



del 15 al 18 de Marzo 2023

# IV Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca

## Anales de trabajos completos

### Instituciones organizadoras:

Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional  
Universidad Nacional del Sur  
Universidad Provincial del Sudoeste  
Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires

### Auspiciantes



IV Congreso de Energías Sustentables de Bahía Blanca / Horacio Di Prátula ...  
[et al.] ; compilación de María Mercedes Marinsalta ; Araceli Kreder ;  
Guillermo Kalocai.  
1a ed. - Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2023.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online  
**ISBN 978-987-8992-15-0**

1. Abastecimiento de Energía. 2. Desarrollo Sustentable. I. Di Prátula,  
Horacio. II. Marinsalta, María Mercedes, comp. III. Kreder, Araceli, comp. IV.  
Kalocai, Guillermo, comp.  
CDD 363.62

ISBN 978-987-8992-15-0



## **IV Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca**

15 al 18 de marzo de 2023

Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional

Universidad Nacional del Sur.

Universidad Provincial del Sudoeste

Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires

### **COMITÉ ORGANIZADOR**

Dr. Ing. Electricista Horacio R. di Prátula Presidente – UTN

Ing. Electrónico Guillermo Kalocai Secretario Técnico - UNS

Ing. en Construcciones Rodolfo Juan Dillon Secretario - UTN

Mg. Ing. Electricista M. Mercedes Marinsalta - UTN

Mg. Ing. Electricista Eduardo Guillermo - UTN

Ing. Química Cecilia Dolcini - CIPBA

Ing. en Construcciones Pablo Ascolani - CIPBA

Ing. Civil Alejandro Ernesto Di Chiara - CIPBA

Esp. Ing en Construcciones. Marcelo Musotto - UTN - CIPBA

Ing. Civil Royel Maurer Bermejo -UNS

Mg. Lic. en Organización Industrial Roberto Verna – UTN

Dipl. Innovación Educativa Mauro Javier Andrés – UTN

Lic. en Economía Araceli Kreder UPSO

Ing. Electricista Andrea Paula Rossi - UTN



4to Congreso de Energías Sustentables  
BAHÍA BLANCA, ARGENTINA 2023

*Colaboradores*

Federico Costabel - UTN

Sebastián Gañán – UTN

Gonzalo Cecchini – UTN



## IV Congreso de Energías Sustentables en Bahía Blanca

15 al 18 de marzo de 2023

Facultad Regional Bahía Blanca, Universidad Tecnológica Nacional

Universidad Nacional del Sur.

Universidad Provincial del Sudoeste

Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires

### COMITÉ EVALUADOR

Mg. Ing. Jorge Agustín Adaro	UNRC
Ing. Miguel Banchieri	UTN FRBB
Ing. Patricia Benedetti	UTN FRBB
Mg. Ing. Pablo Bertinat	UTNFRRo/ UNR
Mg. Ing. Rubén Bufanio	UTN FRN
Ing. Jorge Caminos	UTN FRSF
Ph.D. Horacio Campaña	UTN FRBB
Dr. Arq. Jorge Daniel Czajkowski	FAU - UNLP / CIC / CONICET
Dr. Héctor Gerardo Chiacchiarini	UNS
Dr. Horacio Raúl di Pratula	UTN FRBB
Dra. Ing. Mariana del Valle Bernard	UTN FRSFco
Dr. Ing. Franco Ezequiel Dotti	UTN FRBB
Dr. Ricardo Faccio	Universidad de la República
Dr. Ing. Diego Martín Ferreyra	UTN FRSFCO
Dr. Ing. Maximiliano Garay	UNS
Dr. Ing. Andrés García	UTN FRBB
Ing. Marcelo Rafael Gil	UTN FRLP
Mg. Ing. Pablo Guillermo Girón	UTN-FRBB
Mg. Ing. Cecilia Girotti	UTN FRBB
Dr. Ing. Adrián Gonnet	UTN-FRBB
Mg. Ing. Eduardo Guillermo	UTN-FRBB



4to Congreso de Energías Sustentables  
BAHÍA BLANCA, ARGENTINA 2023

Mg. Ing. Alejandro Haim	UTN FRBA
Esp. Ing. Luis Humberto Hernández	UTN FRGP
Ing. Guillermo Kalocai	UNS
Ing. Jorge Lassig	UNCo
Dr. Ing. Ariel Sebastián Loyarte	UTN-FRSF-CIESE
Ing. Jose Maccarone	UTN FRLP
Ing. Ulises Manassero	UTN FRSF
Ing. Eduardo Luis Malchiodi	UTN FRBB
Dr. Ing. Jorge Mario Marchetti	Norwegian University of Life Sciences.
Mg. Ing. María Mercedes Marinsalta	UTN FRBB
Esp. Ing. María Cecilia Montero	UTN FRBB
Dr. Ing. Juan Moro	UNS
Esp. Ing. Marcelo Musotto	UTN FRBB
Esp. Carlos Alberto Pistonesi	UTN FRBB
Dr. Ing. Lucio Ponzoni	CNEA, UPSO, UNTREF, UNSAM
Dra. Lic. Marina Recalde	CONICET / FUNDACION BARILOCHE
Esp. Ing. Andrea Paula Rossi	UTN FRBB
Dr. Ing. Emmanuel Sangoi	UTN-FRSF-CIESE
Dr. Lic. Raúl Antonio Versaci	UTN FRH
Dr. Jorge Rubén Vega	UTN FRSF
Dr. Ing. Alejandro Vitale	CONICET
Dra. Lic. Maria Alicia Volpe	PLAPIQUI
Ing. Elbio Miguel Woeffray	UTN FRCU
Dr. Ing. Claudio Javier Zega	LEMIT-CICPBA
Ing. Hugo Daniel Zurlo	UNNE



4to Congreso de Energías Sustentables

BAHÍA BLANCA, ARGENTINA 2023

## AUSPICIANTES

# YPF

  
Auspicio Institucional

  
PROFERTIL

  
MUNICIPIO DE BAHÍA BLANCA

  
BANCO CREDICOOP  
COOPERATIVO LIMPIEZA

  
Fundación tgs

  
PUERTO BAHÍA BLANCA

  
Pampa energía

Unipar

  
MEGA  
COMPAÑÍA MEGA S. A.

  
EDES  
COMPAÑÍA ARGENTINA DE ENERGÍA S. A.

  
BAHÍA BLANCA  
PLAZA SHOPPING

  
COOPERATIVA OBRERA  
La empresa social de los propios comerciantes

  
Zona Franca  
Bahía Blanca  
Coronel Rosales

## **Índice de trabajos completos**

<i>Estudio y desarrollo de banco de emulación de turbina eólica de baja potencia. Zuñiga, Cristian Nicolás; Bufanio, Ruben Domingo; Marasco, Damian; Monte, Gustavo; Scarone, Norberto; Agnello, Ariel</i>	1
<i>Estudio experimental de la cubierta reflectante como método de enfriamiento pasivo en un prototipo construido bajo el paradigma de la tecnología apropiada. Ascanio Villabona, Javier Gonzalo; Tarazona Romero, Brayan Eduardo; Lengerke Perez, Omar; Sandoval Rodríguez, Camilo Leonardo; Castillo Leon, Nilson Yulian; Rincón Quintero, Arly Darío</i>	11
<i>Análisis de acceso de un conjunto de parques eólicos en el sistema de transmisión de la región patagónica. Manassero, Ulises; Cea, Marcos; Rossi, Lautaro; Sangoi, Emmanuel; Torres, José L.</i>	19
<i>Hidrógeno verde a partir de residuos agroindustriales. Dietrich, Nadia; Airasca, Ariel; Campaña, Horacio</i>	29
<i>Túnel de viento. Attorresi, Luciano; Febrino, Giannina; Taccone, Vera; Oviedo, Natalia; Boro, Drissa; Ponzoni, Lucio</i>	35
<i>Auditoría energética de palacio municipal de Camilo Aldao, Córdoba. Czajkowski, Jorge; Gómez, Analía; Birche, Belén; Berardi, Roberto; Basualdo, David; Basualdo, Julián</i>	46
<i>Desarrollo de un microgenerador de energía hidroeléctrica para la ciudad de Tres Arroyos. Taccone, Vera; Roldo, Antonella; Artaza Martina; Zijlstra, Alejandro; Attorresi, Luciano; Ponzoni, Lucio</i>	56
<i>Dispositivo de Placa Caliente con guarda, para ensayos de transferencia de calor. Artaza Martina; Muñoz, Rocío; Taccone, Vera; Attorresi, Luciano; Boro, Drissa; Ponzoni, Lucio</i>	66
<i>Acople energético en generación solar por concentración a alta temperatura. Almacenamiento térmico y selección del fluido. Pérez Correa, Ignacio; Salemme, Ailen; Chocrón, Mauricio; Labollita, Santiago</i>	76
<i>Comportamiento higrotérmico de un edificio patrimonial. Caso “Estación Joven” en Pérez, Santa Fe. Gómez, Analía; Czajkowski, Jorge; Birche, Belén; Berardi, Roberto; Basualdo, David y Basualdo Rapetti, Julián</i>	86

<i>Análisis energético y económico en plantas de incineración de residuos sólidos urbanos con generación eléctrica.</i> Castillo Leon, Nilson Yulian; Tarazona Romero, Brayan Eduardo, Ascanio Villabona, Javier Gonzalo, Duran Sarmiento, Miguel; Sandoval Rodriguez, Camilo Leonardo; Lenguerke Perez, Omar .....	94
<i>Estimación de la radiación solar a partir de temperaturas.</i> Adaro, Jorge A.; Ziletti, María N., Romero, Héctor F., Esquenazi, Alberto S. ....	104
<i>Efecto de extractos de plantas en la estructura de poros de morteros cementicios.</i> Delbianco, Natalia; Peralta Ring, Rocío; Priano, Carla .....	111
<i>Geotermia de baja entalpía aplicada a una vivienda unifamiliar sustentable en Brandsen. Dimensionamiento de intercambiador de calor tierra-aire (pozo canadiense o provenzal.</i> Birche, María Belén; Czajkowski, Jorge Daniel; Ferrer Tevar, José Antonio ...	118
<i>Análisis de factibilidad de acceso de central de biogás en red de distribución para aprovechamiento de efluentes agroecológicos.</i> Manassero, Ulises; Sanseverinatti, Carlos I.; Espíndola, Francisco; Perdomo, M.; López, Diego .....	128
<i>Análisis de metodología de recuperación de módulos solares fv dañados en parques solares.</i> Rojo, Jeremías; Speroni, Alejandro .....	137
<i>Incorporación de residuos de un tipo de catalizador en matrices cementicias.</i> Peralta Ring, Rocío; Delbianco, Natalia; Priano, Carla .....	142
<i>Construcción de un colector disco parabólico y determinación de su eficiencia óptica.</i> Panaroni, D.; Martorelli, L.; Castro Luna, A.M. ....	149
<i>Predimensionamiento de instalación fotovoltaica con aplicación en un organismo del Estado.</i> Baliño, Eduardo Marcos; Ortega, María Eugenia; Vinante, Humberto.....	157
<i>Transformación de la matriz eléctrica argentina a fuentes renovables, análisis del impacto en la reducción de emisiones de carbono.</i> Keesler, María Daniela .....	169
<i>Análisis de la eficiencia en evaporación en un ingenio de Tucumán, Argentina, durante 10 años.</i> Cruz, M. Carolina; Diaz, Gisela; Franck Colombres, Federico; Dora, Paz; Cruz, M. Carolina .....	177
<i>Generación de energía eléctrica empleando una plataforma basada en Piezoelectricidad.</i> Sandoval Rodríguez, Camilo Leonardo; Ascanio Villabona, Javier Gonzalo; Rincón Quintero, Arly Darío; Lenguerke, Omar; Castillo, Nilson Yulián; Duran, Miguel Arlenzo .....	188

<i>Análisis de datos de irradiancia solar medidos en la ciudad de Junín, provincia de Buenos Aires.</i> Bertolotti, Sebastián; Carrió, Florencia; Busso, Mauricio; Guerriero, Tomas.....	197
<i>Turbinas hidrocínicas: revisión de métodos de experimentación en Túneles de Viento y ejemplos.</i> di Prátula, H.R.; Malchiodi, Eduardo; Antón, Marcelo; di Prátula, Fausto; Pistonesi, Carlos; Bilbao Yeska, Mauren Abril; Zanfagnini, Eliana; Martínez, Alexis; Oga, Juan José .....	204
<i>Revisión del diseño de alabes para turbinas hidrocínicas.</i> di Prátula, H.R.; Lifschitz, Ana Julia; Malchiodi, Eduardo; Ricciuti, Nestor; Zanfagnini, Eliana; Oga, Juan José.....	215
<i>Revisión: medición de recursos eólicos e hídricos y dispositivos de conversión mecánico eléctrico.</i> di Prátula, H.R.; Guillermo, Eduardo; Antón, Marcelo; Pistonesi, Carlos.....	228
<i>Propuesta superadora para potenciar la disponibilidad de energía eólica usando el hidrogeno como vector energético.</i> di Prátula, H.R.1; Petris, Diego; Di Pietro, Martin; Guillermo, Eduardo; Pistonesi, Carlos; Delbianco, Horacio; Rossi Andrea.....	240
<i>Diseño preliminar de un reactor de pirólisis para reciclado avanzado de plásticos de desecho.</i> Aagaard, Tomas F.; Urrestarazu, Adrian M.; Mendez, Claudio M.; Casoni, Andres I.; Rodriguez Garido, Gabriel; Volpe, María A. ....	249
<i>Mejoras en la eficiencia energética de una vivienda modular.</i> Herlein, Cristian; Ratazzi, Alejandro; Moro, Juan M.; Meneses, Romina; Serralunga, Martín .....	260
<i>Celda de combustible microbiana para el aprovechamiento energético de digeridos.</i> Gatti, Marcela Noemí; Quiñones, Facundo; Cesano, Margarita; Tissier, Jaqueline; Fuentealba, Jael; Díaz, Valeria .....	269
<i>Análisis de las propiedades termofísicas de pavimentos asfálticos y de su contribución a la Moderación del efecto ICU.</i> Cabrera, Pablo; Botasso, Gerardo; Castro Luna, Ana .....	277
<i>Capacitación en instalaciones fotovoltaicas.</i> Salvatierra, Santiago; Drunday, Jonathan; Garcés Leandro; Berola, Julián .....	285
<i>Producción y aprovechamiento de hidrógeno obtenido a partir de energía solar fotovoltaica.</i> Gonnet, Adrián; Mainetti, Carlos; Guillermo, Eduardo; Borja, Fernando .....	293

<i>Diseño, construcción y caracterización eléctrica de un aplicador de radiofrecuencia para la producción de biodiesel.</i> Corach, Julián; Fernández Galván, Eriel; Sorichetti, Patricio Aníbal .....	300
<i>Co-digestión de orujo de uva con macroalgas de agua dulce.</i> Cesano, Margarita; Alcazar, Constanza; Azua, Facundo; Gatti, Marcela; Camacho, Alberto .....	307
<i>Estudio de factibilidad basado en energía solar fotovoltaica on grid y off grid: un caso de estudio en Colombia.</i> Rincon Quintero, Arly Darío; Jaimes Quintero, Karen Tatiana; Sandoval Rodriguez, Camilo Leonardo; Lengerke Perez, Omar; Tarazona Romero, Brayan Eduardo; Ascanio Villabona, Javier Gonzalo .....	313
<i>Tratamiento de imágenes por transformación del dominio: aplicación de la transformada de Wavelets en la segmentación de imágenes.</i> Gelid, Pedro Benjamin.....	324
<i>Estudio preliminar del aprovechamiento energético del sorgo fibroso en Tucumán, Argentina.</i> Cruz, M. Carolina; Casen, Sergio .....	334
<i>Desarrollos relacionados a los temas energéticos, que ayudan en el camino de transformación a ciudades inteligentes.</i> Maccarone, José Luis; Rapallini, José; Pascual, Osvaldo; Colavitte, Facundo; Rodriguez, Inti; Bifano, Lautaro; Rodriguez, Omar; Mazzeo, Hugo .....	344
<i>Implementación de emulador de turbina eólica: primera etapa control de máquina primaria.</i> Bohn, N.; Barreneche, T.; Amodeo, S.J. ....	350
<i>Diseño de ensayos de durabilidad sobre colectores solares térmicos en el territorio argentino según norma IRAM 210007: 2017.</i> Barnetche Orenzans, Magdalena; Haim, Pablo Alejandro; Nores Pondal, Federico.....	360
<i>Análisis de variables para la producción y uso de hidrógeno verde en la Universidad Nacional de La Matanza.</i> Eterovic, Jorge E.; Blanco, Gabriel E.; Fauroux, Luis E.; Alterini, Federico J.; Lohigorry, Agustín J. ....	371

# ESTUDIO Y DESARROLLO DE BANCO DE EMULACIÓN DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA

Zuñiga Cristian Nicolás, Bufanio Ruben Domingo, Marasco Damian, Monte Gustavo, Scarone Norberto, Agnello Ariel

*Facultad Regional del Neuquén, Universidad Tecnológica Nacional  
rbufanio@frn.utn.edu.ar, zcn95@outlook.es*

## RESUMEN

Dado el desafío de adaptar convenientemente los sistemas de conversión de la energía cinética del viento a través de un rotor de palas, su transformación a mecánica y luego a eléctrica en forma controlada y segura, y con la necesidad de acortar la brecha o diferencias entre las simulaciones computacionales y las obtenidas en campo, es que se observa como conveniente y necesario del desarrollo de un banco de ensayos de laboratorio que permita emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas dentro del rango de las diversas velocidades del viento, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico sean lo más similares a los que un rotor real desarrolle, por lo cual se facilite y reduzca costos en la prueba de los sistemas eléctricos de conversión, tanto comerciales o prototipos experimentales, en principal aquellos con vinculación a la red eléctrica de suministro.

Por lo tanto se describe, en este trabajo desarrollado dentro del grupo GESE de la FRN, el diseño y construcción de un emulador de turbina eólica de baja potencia totalmente funcional, el proceso de su diseño e implementación, las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Para ello en una primera parte, se presentan los conceptos asociados al modelado simplificado del comportamiento de una turbina eólica, tanto en términos estáticos como dinámicos. En base a esto, se establecen los elementos que constituirán al emulador, las características requeridas de los mismos y los alcances impuestos. Posteriormente, se analiza el sistema implementado desde el punto de vista del control y se lo culmina con la construcción de un prototipo experimental. Se muestran y analizan los primeros resultados, luego se comentan los beneficios potenciales que puede aportar el sistema tanto en el ámbito académico como en la industria. Por último, como trabajos futuros, se plantean opciones de mejora.

### **Palabras clave:**

Emulador, Eólica, Baja Potencia, Control

### **Área Temática:**

Energías Sustentables

### **Categoría del Trabajo:**

Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

Se torna muy conveniente, en lo técnico-económico, la ejecución y prueba de un sistema de conversión de la energía eólica del viento, de sus siglas en inglés (WECS), a través del desarrollo de un banco de ensayos que permita emular las variables de desempeño principales de un rotor de palas, de manera que tanto el torque como velocidad de giro impuestos al generador eléctrico, para el rango de velocidades de viento especificadas, sean lo más acordes a aquellos obtenidos a través de pruebas en túnel de viento o de campo. Esta posibilidad en principio brinda una manera ventajosa de poder probar el prototipo del sistema de conversión eléctrico sin la necesidad de tener que desarrollar o adquirir un sistema de palas, mecánica completa, torre, montajes, acondicionamientos del lugar, y esperar el tiempo necesario para que se cumplan las condiciones de viento para su ensayo, o tener que recurrir a un túnel de viento, lo cual en una primera etapa de validar especificaciones de desempeño de simulaciones computacionales puede incurrir en elevados costos de implementación y evaluaciones. Por lo tanto esta opción de estandarizar un banco de ensayos del sistema de conversión de la energía eólica de baja potencia, acortaría la brecha de error con un costo "razonable" entre las simulaciones computacionales y las de campo o experimentales, ya que previo a estas permitiría probar al sistema completo de conversión de la energía cinética del viento en eléctrica (WECS), [1], conformado por el generador eléctrico, prototipos electrónicos o del tipo comerciales de electrónica de potencia y su control, permitiendo una gran flexibilidad en el cambio de las variables de salida aerodinámicas de un rotor de palas, y por lo tanto propiciar la mejor adopción según desempeños obtenidos entre sistema aerodinámico/mecánico y el eléctrico. Lo dicho, cabe aclarar, no quita el tener que validar con ensayos de campo, pero estos se harían dentro de un marco de mayores posibilidades de éxito frente a las especificaciones de desempeño previamente planteadas.

Debido a que se va a trabajar en energía eólica, en especial de baja potencia, se realiza en lo previo el correspondiente estudio bibliográfico que va de lo general a lo particular de este trabajo. Por lo tanto se comienza por estudiar las recomendaciones de seguridad y diseño que se determinan para aerogeneradores de baja potencia, y por otro lado los fundamentos tecnológicos que la rigen, aquí se utilizan dos referencias, la [2] que trata dichos fundamentos, y la [3] como la normativa que regula las condiciones de diseño y seguridad, como se indica, para aerogeneradores con área de barrido de rotor menor a los 200m<sup>2</sup>. Con mismo criterio, con el objetivo de comprender los conceptos que establecen las pautas para las especificaciones de evaluación y ensayo la [4] brinda detalles de documentación y certificación para con un generador eólico de baja potencia. Mismo para poder incursionar en el control de potencia, la [5,6] dan un interesante tratamiento de conceptos aerodinámicos, en especial en la primera en baja potencia, respecto al estudio, opciones de mejora y validación de la teoría de BEM (Blade Element Momentum). En los tratados [7-9] se encuentran los conceptos fundamentales sobre las características y comportamientos estacionarios y dinámicos de los rotores de palas que permiten un mejor entendimiento de las condiciones a emular.

Para comprender los métodos actuales de ensayo de aerogeneradores de baja potencia en especial los que utilizan bancos de emulación (wind turbine emulator o WTE) destinados a la generación distribuida, de manera poder establecer opciones de mejora, la [10] detalla un análisis, y demuestra experimentalmente la necesidad de aplicar un algoritmo al sistema de emulación que tenga en cuenta la dinámica de la turbina eólica en lugar de solo la estática, demostrando que con el tratamiento estacionario no se logra visualizar adecuadamente los transitorios reales debido principalmente a la diferencia en los momentos de inercia que se obtienen con un driver y máquina de inducción o sincrónica, mucho menores, respecto al de una turbina eólica real. Por lo tanto, luego de corroborar a través de herramienta informática el adecuado desempeño del algoritmo planteado, se lo aplica al banco experimental de emulación cuyas salidas se comparan con el de una turbina real de 7.5kW, obteniendo valores muy similares. En [11,12] se simulan a través de Simulink/Matlab el comportamiento estático y dinámico de un sistema WT (wind turbine), en la primera sin desarrollar la parte de conversión y control eléctrico y en la segunda con detalle de dicho esquema y su control inyectando energía a la red trifásica de baja tensión. En [13] se ha diseñado, construido y evaluado un emulador físico de aerogenerador WTE en un entorno de microrred, con el objetivo principal de investigar la integración y control de coordinación de los sistemas de energía eólica en dicho esquema. Para ello se implementa un control vectorial del torque sobre un motor de inducción, estrategia que permite entregar un par independiente, logrando un comportamiento dinámico de elevada precisión, que proporciona flexibilidad para adaptarse a una amplia gama de condiciones de viento. Además, también se incluye la construcción del emulador y el diseño del sistema de control, esquema a través del cual se corrobora un comportamiento similar al de la turbina eólica real tanto en estado estacionario como dinámico. Luego en [14] se investiga y se da solución a la problemática de que la inercia de los WTE sea mucho menor que la de los sistemas físicos reales (WT), aportando un esquema de compensación de inercia que replica el comportamiento mecánico "lento" de los WT, además en este trabajo se corrobora que la inestabilidad de los WTE aplicando el esquema de compensación de inercia, caracterizada por la oscilación del par de

compensación, es causada por el retardo de tiempo de un paso producido en la observación de la aceleración. Por lo tanto, para dar solución, se desarrolla y analiza la estabilidad a través de un modelo discreto lineal de WTE que considera dicho tiempo de retraso en la observación de la aceleración. Además, con el fin de emular de manera estable los WT con gran inercia, se implementa un esquema de compensación de inercia mejorado, aplicando un filtro digital de primer orden que mitiga la desviación de la respuesta inducida por el tiempo. Por otro lado en [15] se presenta un emulador de aerogenerador utilizando un algoritmo basado en la teoría del momento del elemento de pala (BEM), la propuesta se basa en un control sobre máquina de inducción, que permite emular un diseño de aerogenerador sin tener que fabricarlo, permitiendo ensayarlo para condiciones arbitrarias de la velocidad del viento y su perfil o gradiente según la altura sobre el suelo. Por último en [16], como aplicación del emulador, se propone y valida experimentalmente a través de un WTE, una solución a la problemática de sobre tensión y velocidad de giro en que podría incurrir un aerogenerador PMSG de baja potencia y velocidad variable cuando es conectado a la red eléctrica (sin acumulación), para lo cual se desarrolla, implementa y valida con un emulador un sistema de conversión con chopper Boost en tres modos de operación según diferentes regiones de operación y en función de la velocidad del viento.

En este trabajo, a diferencia de los planteados, se busca lograr en el emulador una “modularidad”, es decir que los elementos principales del sistema sean fácilmente reemplazables, modificables y adaptables a nuevas condiciones y/o especificaciones, así como permitir la integración de los mismos dentro de otros sistemas. Esto se consideró con vista de su aplicación a entornos académicos y a la ampliación y mejora de las capacidades del mismo. Para cumplir este objetivo se dio una estructura genérica al protocolo de comunicación entre la PC (ordenador) y el circuito de control, así como al manejo de los niveles de consigna, rangos del torque y velocidades reales. En función de lo cual este trabajo se organiza de la siguiente manera, en la sección 2 se brindan los conceptos principales del comportamiento estático y dinámico que deben emularse de una turbina eólica. La sección 3, con sus subsecciones, trata el desarrollo completo del emulador de turbina eólica de baja potencia, luego la 4 el desarrollo experimental con un análisis de los primeros resultados y por último en la 5 nuestras conclusiones.

## 2. COMPORTAMIENTO ESTÁTICO Y DINÁMICO DE UNA TURBINA EÓLICA.

Para establecer el funcionamiento del emulador es esencial conocer el comportamiento estático y dinámico de la turbina eólica, el cual obedece a los estados estacionarios y transitorios del sistema analizados desde el punto de vista de los conceptos de la teoría del control.

### 2.1 Características estáticas.

El comportamiento estático o estacionario se refleja a través de las condiciones de equilibrio, definidas en las especificaciones de desempeño, entre las curvas de torque aerodinámico paramétricas según las velocidades de viento y la electromagnética, respecto ambas de la velocidad de giro de la máquina. En términos matemáticos, una manera de representar en forma simplificada, pero efectiva, las características estáticas de una turbina eólica, es a través de la función torque de dos variables. Siendo estas la velocidad de viento y la de giro del rotor de la turbina; como ejemplo en la Figura 1, se grafica una de ellas utilizadas durante el desarrollo de este trabajo.

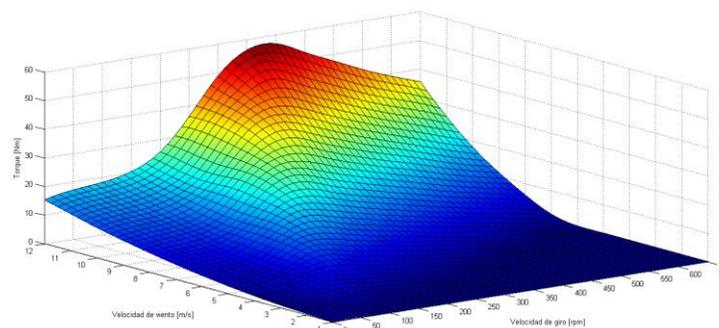


Figura 1. Características de torque para un rotor de perfil NACA 4412

Las características aerodinámicas del rotor de una turbina pueden ser estudiadas empleando métodos físicos o numéricos (fluido dinámicos computacionales), [2-4]. Los primeros, por lo general, se obtienen realizando ensayos en túnel de viento, donde como ejemplo para este trabajo la curva del torque aerodinámico se puede lograr al encontrar los puntos de equilibrio (velocidades de giro constante), para las diferentes velocidades de viento en lo previo especificadas, al ajustar un torque antagónico por medio de un conjunto freno y celda de carga, y registrando a través de los correspondientes transductores y

adaptadores electrónicos, el torque y la velocidad de giro del rotor. Por otro lado, a diferencia de estos valorados ensayos, y con un porcentaje de error aceptable, es posible conocida la geometría del o los perfiles alares a lo largo de la envergadura de la pala, aplicar la teoría del elemento de pala (BEM), que se basa en una geometría 2D (dos dimensiones) de los diversos perfiles, divididos anularmente y despreciando su interacción, en donde se conjugan de cada uno de ellos los resultados del torque y empuje según la teoría de la cantidad de movimiento axial y radial igualados a aquellos que surgen por medio de las fuerzas de sustentación y arrastre. Este método, es el utilizado en este trabajo para obtener las características del rotor de la turbina eólica, dado que, en forma simplificada, pero eficaz, brinda las características aerodinámicas necesarias para un estudio de desempeño del rotor de palas sin la necesidad de poseerlas físicamente. Se observa además que es el ampliamente utilizado en aplicaciones industriales para predicción del comportamiento de un rotor [8]. Por otro lado, si bien se trata de una aproximación al comportamiento de una turbina eólica real y no es exactamente igual a un relevamiento sobre una turbina física, se ha demostrado que los resultados de este método se encuentran dentro de un rango aceptable de exactitud [5].

## 2.2 Comportamiento dinámico.

Si bien la teoría del momento del elemento de pala permite establecer el comportamiento de una turbina en términos de torque y velocidad de giro, al implementar el banco de ensayo de emulación propuesto, Figura 2 b), es necesario considerar las diferencias entre el sistema mecánico de una turbina real y el sistema motor-generator implementado para su emulación, que tiene que ver fundamentalmente con las diferencias de los momentos de inercia que se imponen entre ambos. En dicha Figura 2 se muestran los diagramas de los modelos mecánicos de ambos sistemas.

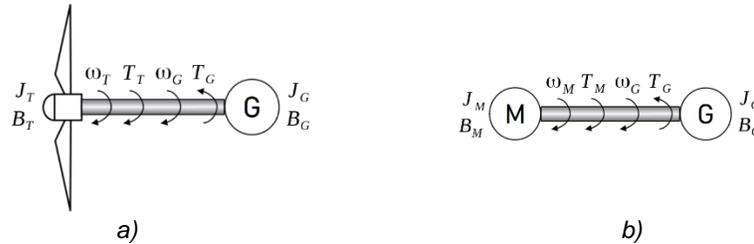


Figura 2. Modelo Mecánico. a) Turbina Eólica Real. b) Emulador de Turbina Eólica.

En función de ello, por ejemplo en [14], se describe el esquema de compensación de inercia típicamente utilizado a partir de los valores de torque efectivamente aplicados al generador en ambos sistemas, y se propone un método para su obtención.

Suponiendo que el eje es infinitamente rígido, de la figura 2. a) y a través de la Ecuación (1), es posible obtener en forma simplificada la relación entre la diferencia entre el torque ejercido por la turbina y el aplicado al generador, donde  $J_T$  se define como el momento de inercia del rotor y  $\dot{\omega}_G$  la aceleración angular.

$$T_T - T_G = J_T \cdot \dot{\omega}_G \quad (1)$$

Con mismo criterio, aplicando la misma condición al sistema del emulador, figura 2. b), se obtiene la diferencia entre el torque ejercido por el motor y el torque efectivamente aplicado al generador.

$$T_M - T_G = J_M \cdot \dot{\omega}_G \quad (2)$$

Expresando ambas ecuaciones como sigue a través de 3) y 4), y luego restándolas, se obtiene por último la Ecuación 5).

$$T_T = J_T \cdot \dot{\omega}_G + T_G \quad (3)$$

$$T_M = J_M \cdot \dot{\omega}_G + T_G \quad (4)$$

$$T_T - T_M = (J_T - J_M) \cdot \dot{\omega}_G \quad (5)$$

El término de la derecha de la Ecuación (5) constituye un "torque de compensación" que puede aplicarse para lograr que el comportamiento dinámico de ambos sistemas sea similar. No obstante, es importante destacar, que el método impone el uso de un derivador dentro del lazo de realimentación, [14], que puede traer aparejado dificultades en la estabilidad del sistema debido al ruido presente en el valor de

adquisición de la velocidad de giro. Por otra parte, también aumenta la complejidad de la implementación al tratarse de un cálculo que debe realizarse en tiempo real.

### 3. DISEÑO DEL EMULADOR DE TURBINA EÓLICA DE BAJA POTENCIA.

En la Figura 3 se representa el sistema implementado para este proyecto, en el mismo se utiliza un encóder para detectar la velocidad de giro del motor, cuyas señales de salida son procesadas a través de un controlador de velocidad de máquina de inducción, driver o variador de velocidad. El uso de dicho encóder responde a la búsqueda de un control preciso del comportamiento del motor y por ende del generador. El driver, por su parte, tiene la posibilidad de intercambiar consignas con el circuito de control de manera que este último las interprete fácilmente. Además, provee la información de torque, lo cual permite minimizar las desviaciones que podrían ocurrir.

En tanto, el lazo de realimentación se cierra mediante la consigna de torque que el circuito de control aplica al variador. Dentro del circuito de control, también se incluye un conjunto de datos que permiten ejecutar distintos tipos de procesos de simulación con mayor independencia del ordenador o PC. Por último, dicho circuito recibe desde la PC toda la información necesaria mediante un bus USB, de manera poder ejecutar el proceso de emulación del rotor de una turbina real.

Por otra parte, en cuanto a la PC, la misma ejecuta una interfaz gráfica de usuario creada para seleccionar y ajustar el proceso de simulación, así como para asistir al usuario durante la ejecución de la misma.

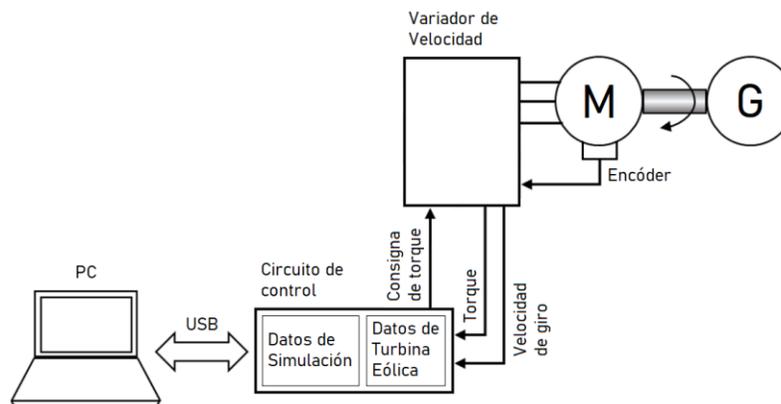


Figura 3. Sistema implementado para el proyecto

La característica de mayor relevancia que se busca lograr en el emulador es la modularidad. Es decir, lograr que los elementos principales del sistema sean fácilmente reemplazables, modificables y adaptables a las nuevas condiciones, así como permitir la integración de los mismos dentro de otros sistemas. Esto se consideró con vista de ser aplicado en la academia además de la ampliación y mejora de las capacidades del mismo. Para cumplir este objetivo se buscó dar una estructura genérica al protocolo de comunicación entre la PC y el circuito de control, así como al manejo de los niveles de consigna, torque y velocidades de giro reales.

#### 3.1 Componentes de hardware utilizados.

El diseño del prototipo experimental de Emulador de Turbina Eólica partió de la base de que se realizarán las simulaciones sobre un generador síncrono de imanes permanentes (PMSG) de 1 kW, 450 rpm y 6 pares de polos. Esto claro depende directamente de las características del sistema de conversión de energía eólica que se desee emular, dado el desarrollo actual del mercado en baja potencia se optó por un PMSG, [1]. Además el generador utilizado definirá en que rango de potencias y velocidades de giro se va a trabajar.

La máquina de inducción trifásica, utilizada en este caso como motor, cumple la función de aplicar el torque y la velocidad de giro apropiadas al generador. Por ello, para que el motor sea capaz de producir el torque necesario, especialmente a bajas velocidades, es recomendable que este tenga una potencia en lo posible mayor al doble de la potencia del generador y la misma cantidad de polos. Frente a ello se buscó definir las características del motor considerando los objetivos del proyecto y la disponibilidad de estos equipos en el laboratorio. Se escogió una máquina de inducción, marca WEG, de 1.5 kW, 4 polos y 1420 rpm, acoplada al generador mediante una reducción de 3:1 a fin de compensar la diferencia en la cantidad de polos y reducir posibles problemas con el deslizamiento del motor. Si bien, lo más utilizado en emuladores de turbina eólica son las máquinas de CC con excitación independiente, dado que poseen propiedades dinámicas superiores y resultan más sencillas desde el punto de vista del control, el uso de un motor de inducción permite lograr un diseño robusto, que requiere poco mantenimiento, a bajo costo, además de poseer una densidad de potencia superior [13].

Ya que la consigna fundamental del variador de velocidad es aplicar la regulación del torque que debe ejercer el motor, es requisito que soporte la potencia de este. Adicionalmente, debe ser capaz de recibir una consigna de torque en forma analógica, como requiere la implementación. En base a esto, se utilizó uno de la familia Sinamics, del fabricante Siemens, con la posibilidad de brindar una potencia máxima de 5,5 kW. Al tratarse de un equipo de última generación, enmarcado como tope de gama, con potentes capacidades dentro de lo que existe en el mercado actual, permitió una implementación más eficiente y con menores costos asociados. Consta específicamente de un módulo de potencia PM240-2, una unidad de control CU250S-2 PN y un panel del operador IOP-2.

En el diseño se incluyó la consigna en forma de voltaje analógico, con la posibilidad de implementarla por trenes de pulsos, contemplando las posibles limitaciones debido a interferencias que puedan provenir del entorno de laboratorio. A su vez, se utilizó la capacidad de modificar el rango de voltajes de la entrada de consigna, ajustándolo a la alimentación del circuito de control, evitando así la utilización de hardware intermedio. Por otro lado, se utilizó la funcionalidad del cálculo interno del torque aplicado, el cual se determina en base a las tensiones y corrientes detectadas en la alimentación del motor. Este parámetro y la velocidad de giro se disponen en las salidas analógicas de voltaje.

Por otro lado, dentro de los tipos de regulación disponibles se seleccionó el control vectorial por torque, dado que posee características superadoras con respecto a otras técnicas. La misma permite lograr condiciones dinámicas rápidas y precisión en la operación en estado estable. De esta manera, pueden soportarse cambios bruscos en la consigna de torque debidos a las variaciones rápidas de la velocidad de viento emulada [13].

Por último, dentro de lo principal del hardware, se encuentra un encóder utilizado para detectar la velocidad de giro, en este caso se empleó el modelo 1XP8001-1 del fabricante Siemens, del tipo HTL bipolar de 1024 PPR. Dado que el variador de velocidad es capaz de procesar dichas señales, permite omitir el hardware y el software que se requeriría para realizar este proceso.

A partir de lo descripto, el circuito de control y la interfaz de usuario se describen en las siguientes secciones.

### **3.2 Interface de usuario.**

La interfaz de usuario permite seleccionar y configurar los datos de la turbina y del proceso de simulación, así como iniciar y finalizar las mismas. Como puede suponerse, el objetivo del desarrollo es que la interfaz gráfica permita la configuración de los procesos de simulación de forma ágil y sencilla.

Por ello el código del software utilizado en el ordenador o PC se desarrolló mediante el lenguaje de programación Python. Las principales características que motivaron esta decisión fueron la relativa agilidad en el desarrollo de interfaces gráficas y la potencia para el procesamiento de datos. Dicho software consta internamente de módulos que agrupan las funciones correspondientes a segmentos del proceso, con la finalidad de agilizar su desarrollo, así como facilitar futuras modificaciones del mismo.

Los datos del rotor de la turbina a emular se obtuvieron mediante el software libre Q-Blade y luego se exportaron como archivos del tipo csv, siendo a posterior procesados mediante el código desarrollado y ejecutado en el ordenador. Debido a lo anterior, en el circuito de control, se dispondrá de la característica de la turbina en formato de tabla o matriz, posibilitando además en los casos que sea necesario realizar interpolaciones entre dichas muestras.

En principio, algunas características del software se definieron en base al resto de los elementos del sistema, sin embargo, dada la flexibilidad intrínseca y de diseño del mismo, es posible dar al usuario la opción de seleccionar una amplia variedad de parámetros del sistema, como pueden ser los rangos de torque y velocidad del driver, e indirectamente del motor y el generador.

### **3.3 Circuito de Control.**

Las funcionalidades básicas del circuito de control son: controlar los procesos de carga de datos, configuración de la simulación y su ejecución, y permitir e implementar el algoritmo de trabajo. De forma complementaria, para cumplir con estas funciones, también debe detectar las señales analógicas que indican los valores de torque y velocidad, generar el voltaje analógico de consigna, y comunicarse con el ordenador o PC.

#### **3.3.1 Desarrollo electrónico.**

Como elemento central del hardware de control, se utilizó como se muestra en Figura 4, un microcontrolador, el mismo se seleccionó fundamentalmente en base a sus capacidades analógicas necesarias para procesar las señales que indican los valores de velocidad de giro y torque, y generar la señal utilizada como consigna. El dispositivo seleccionado no tuvo requerimientos importantes en cuanto a velocidad y capacidad de memoria, en gran parte debido al hecho de que los tiempos de respuesta del sistema mecánico son ampliamente mayores a los de un sistema electrónico y a la optimización del software en cuanto a memoria de datos.

Por otro lado, para garantizar el correcto funcionamiento de las interfaces analógicas y la exactitud de los niveles establecidos y detectados, se analizó los valores de impedancias de entrada y salida del variador de velocidad y del microcontrolador. En base a lo observado, se decidió utilizar un adaptador de impedancia para acondicionar la señal de la consigna analógica, y con la idea de mantener la adaptabilidad del circuito con otros equipos se dejó contemplado el posible uso de estos para todas las señales analógicas.

Luego para las señales digitales se utilizaron optoacopladores, a fin de adaptar los niveles de las señales y eliminar la posibilidad de que una falla o error de conexión dañe al resto del hardware. Esto también es útil desde el punto de vista de la seguridad, dado que sería potencialmente riesgoso que el microcontrolador deje de funcionar correctamente. En cuanto a la comunicación con la PC, y además del módulo UART interno del microcontrolador, se incluye un adaptador UART-USB basado en circuito integrado. Por último, el voltaje de alimentación se obtiene a partir de la fuente de DC del driver, mediante un convertidor tipo buck basado en circuito integrado, evitando así que el circuito dependa de algún otro dispositivo externo.

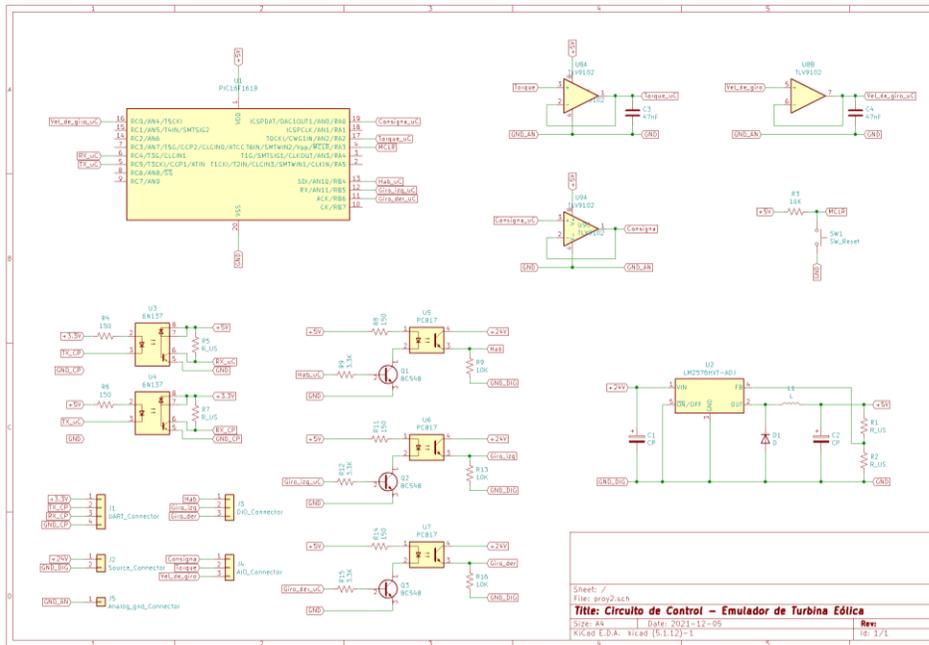


Figura 4. Esquema del desarrollo electrónico propuesto para controlar al emulador

### 3.3.2 Características del software desarrollado.

En el microcontrolador se implementó un software tipo multitarea, el cual se diseñó siguiendo el lineamiento de modularidad, de forma de facilitar la modificación de segmentos del código sin alterar el resto del software. También se planteó una estructura compatible con las mejoras que podrían realizarse a futuro sobre el sistema, como la modificación desde la PC de parámetros del algoritmo de control. Si bien el software de la placa de control se diseñó e implementó en base a las características del equipo disponible, se dejó planteada una estructura versátil que permita adaptarlo a otras posibilidades.

Como condición importante durante la simulación, se realiza una consulta periódica a la PC para testear la conectividad de la misma. Esto es una medida de seguridad, dado que el operador interactúa con el sistema a través del ordenador, es decir, que si se perdiera la conexión con el circuito de control se trasladaría la misma situación a todo el sistema.

### 3.3.2 Aspectos de la comunicación con el ordenador o PC.

La comunicación entre la PC y el circuito de control tiene dos funcionalidades básicas: llevar a cabo un intercambio confiable de datos, y permitir al ordenador accionar sobre el circuito de control durante el proceso de simulación. Adicionalmente, esta interfaz de comunicación es muy relevante para el funcionamiento del sistema de manera que sea predecible el proceso de simulación, además de que se trata de un elemento clave para lograr la modularidad buscada en el sistema. Considerando lo anterior, se establecieron tres objetivos principales en su diseño:

1. Resolver la comunicación de los datos en una forma suficientemente genérica, que permita reemplazar el circuito de control, la PC, o el software que esta ejecuta.
2. Incluir en el proceso de comunicación, una redundancia suficiente para garantizar la integridad de los datos que se envían desde la PC.

3. Garantizar que la PC mantenga siempre el control sobre el funcionamiento del circuito de control. Como primera medida, para lograr el principio de modularidad, se utiliza un bus USB para la comunicación. Complementariamente a esto, se estableció un conjunto de comandos y tramas de datos, que define exactamente como enviar y recibir información. En segunda instancia, dentro de las tramas de datos mencionadas, se incorporó el uso de Comprobación de Redundancia Cíclica (CRC), permitiendo evaluar la fidelidad de los datos recibidos y reenviarlos en caso de ser erróneos, evitando por lo tanto un potencial comportamiento errático del emulador durante la simulación. Por último, se implementa la respuesta a la consulta de conectividad que envía el circuito de control, la misma se realiza durante todo el proceso de simulación y solo ocurre mientras el software de la PC se encuentre funcionando correctamente.

#### 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS DE PRIMEROS RESULTADOS

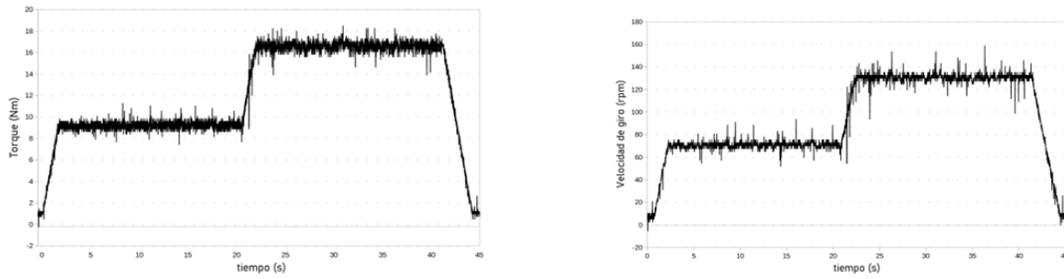
Se realizaron pruebas en el laboratorio de electrónica de la FRN del comportamiento estático y dinámico del emulador de turbina eólica construido. También se evaluó la confiabilidad del equipo y la funcionalidad de la interfaz de usuario. Para la ejecución de las mismas se utilizaron en principio resistores como carga del generador, conectadas por medio de un puente rectificador trifásico. Para el análisis de desempeño se visualizaron los valores de torque y velocidad de giro mediante un osciloscopio conectado a las salidas analógicas del variador de velocidad, ver Figura 5.



Figura 5. Prototipo experimental del emulador propuesto de turbina eólica de baja potencia

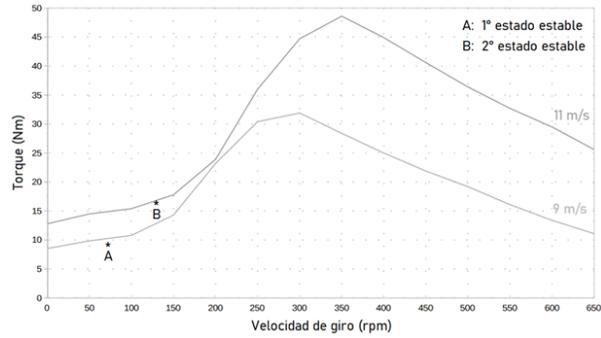
En la Figura 6 se muestran los resultados de la prueba de comportamiento en estado estacionario. Para esta prueba se configuró, mediante la GUI, una simulación de dos valores de velocidad de viento, permaneciendo 20 segundos en cada uno de estos, y bajo carga constante. En a) y b) se puede observar que el comportamiento cualitativo fue el esperado, en acuerdo a los momentos de equilibrio teóricos del torque aerodinámico versus el antagónico impuesto por el generador PMSG y su carga. A su vez, al comparar cuantitativamente los niveles de torque y velocidad con las curvas características correspondientes, se comprueba la exactitud del resultado. Esto se representa en la Figura 5 c). Estas pruebas se repitieron para distintas velocidades de viento y distintos valores de carga, comprobándose que las cualidades del equipo se mantienen.

Adicionalmente, se decidió realizar una prueba emulando un perfil de viento real. Si bien este proceso no estaba contemplado en principio entre los objetivos principales del proyecto, fue muy valioso para prever desarrollos futuros y evaluar las capacidades del equipo en este sentido. Para ello al perfil de viento real (obtenido de medidas del laboratorio de energías renovables que posee el INTI en Cutral-Có, Neuquén) que se encontraba muestreado cada 1 segundo, y poder aplicarlo al emulador, se le realizó un diezmado para distintos períodos de muestreo, donde el finalmente utilizado fue de 2 segundos. Si bien el tiempo de respuesta no fue limitante, y el periodo de muestreo podría haberse reducido aún más, el único inconveniente encontrado se debió al salto entre los valores de velocidad de viento del BEM del Q-Blade respecto a aquellos reales, este último dado por los datos de la característica de la turbina que se utilizaron para las pruebas, que en este caso y a solo modo de prueba, se uso un NACA 4412 y luego una geometría correspondiente al aerogenerador del fabricante ELOCAL, modelo AG1000. Más allá de lo indicado se obtuvieron resultados satisfactorios que se muestran a través de las Figuras 7 a) y b), respecto a la 7 c) del perfil de viento real.



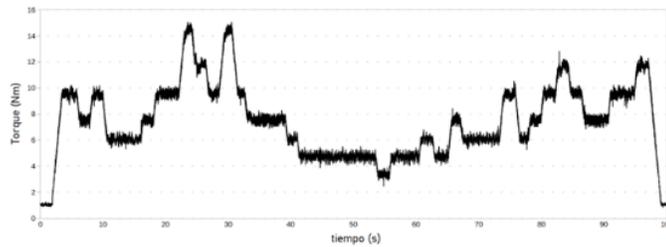
a)

b)

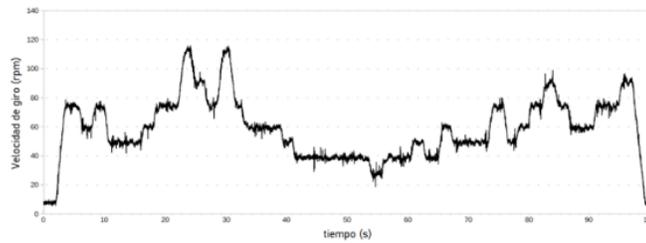


c)

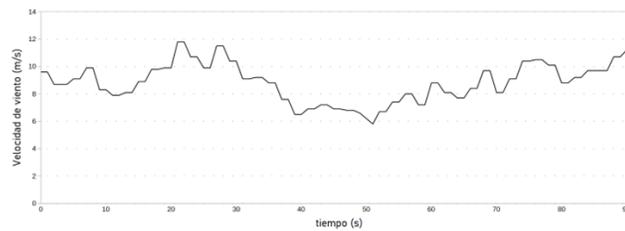
Figura 6. a) y b) Torque y velocidad de giro temporales, c) Curvas obtenidas de desempeño del emulador.



a)



b)



c)

Figura 7. Resultados prueba condiciones dinámicas. a) Torque, b) Velocidad de giro, c) Velocidad de viento.

## 5. CONCLUSIONES

Mediante la configuración desarrollada, se logró en laboratorio condiciones de emulación aceptables del comportamiento aerodinámico del rotor de una turbina eólica de baja potencia, donde las interfaces entre el variador y el circuito de control sean lo suficientemente genéricas y confiables para alcanzar los objetivos de modularidad y fidelidad, como se desprende de las pruebas realizadas. La propuesta

habilita la posibilidad del reemplazo del generador, el motor o el driver, siempre y cuando se respeten sus límites electromecánicos, mismo del encóder, bajo la única condición de que este último sea soportado por el variador o driver. Se ha garantizado a través de los primeros resultados que el emulador posea un margen de exactitud considerado aceptable, [13-16]. Por otro lado, en las pruebas con un perfil de viento real, se demostró la viabilidad de la simulación en dichas condiciones, con la necesaria inserción para ello del cálculo de la compensación dinámica del sistema.

En el conjunto de las pruebas de laboratorio, se comprobó que el funcionamiento del equipo y la interfaz de usuario fueron aceptables y la comunicación entre las unidades suficientemente confiables.

En cuanto a trabajos futuros, dado el alcance de los objetivos de modularidad, resulta viable la integración del equipo en un sistema orientado a la evaluación de estrategias de control de velocidad de giro de la turbina, como el utilizado en [16], mismo a ensayos y evaluaciones con sistemas WECS más complejos y reales que los ofrecidos para este alcance con una carga resistiva, tanto en prototipos experimentales como los ya realizados en la FRN para inyectar energía a la red, o del mercado.

Esta ampliación en las capacidades del banco de ensayo además permitiría, por ejemplo, emular una estrategia de control que implique cambios en el ángulo del paso de pala, condición que requeriría del desarrollo de hardware adicional y una nueva interfaz de usuario.

Por último, y con más desarrollo, resultaría posible y muy enriquecedor integrar el sistema en una microrred experimental, donde permitiría analizar la interacción de esta con una fuente distribuida de generación como la eólica de baja potencia, y estimar por ejemplo los efectos ocasionados por el comportamiento particular (turbulento) del recurso eólico a baja altura y en entornos complejos, como los urbanos, y su capacidad de complementariedad con otras fuentes como la solar fotovoltaica.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Bufanio R., Arribas L., de la Cruz J., Karlsson T., Amadío M., Zappa A., Marasco D. (2022). *An update on the electronic connection issues of low power SWTs in AC-coupled systems: a review and case study*. Energies, MDPI.
- [2] Wood, D. (2011). *Small Wind Turbines: Analysis, Design and Application*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- [3] IEC 61400-2 Ed.3. (2013). *Wind Turbines—Part 2: Small Wind Turbines*. International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland.
- [4] Sven W. Enevoldsen. (2015). *Small Wind Turbines Engineering*. Randers Denmark.
- [5] Refan M. and Hangan H. (2012). *Aerodynamic Performance of a Small horizontal axis wind turbine*. Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 134.
- [6] Liu Su and Janajreh Isam. (2012) *Development and application of an improved blade element momentum method model on horizontal axis wind turbines*, Springer Open Journal.
- [7] Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. (2011). *Wind Energy Handbook*, John Wiley and Sons, Ltd.
- [8] Schaffarczyk A. (2014). *Introduction to Wind Turbine Aerodynamics*. 1st Ed, Springer Science & Business Media, pp. 85 – 91.
- [9] Hansen Martin. (2015). *Aerodynamics of Wind Turbines*. 3rd Ed, Earthscan, pp. 38 – 53.
- [10] Jiawei Chen, Jie Chen, Chunying Gong and Huizhen Wang. (2012). *Design and Analysis of Dynamic Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion System*. Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON), pp. 971 – 977.
- [11] Phlearn Jansuya and Yuttana Kumsuwan. (2013). *Design of MATLAB/Simulink Modeling of Fixed-Pitch Angle WT Simulator*. Energy Procedia 34, pp. 362 – 370.
- [12] Bufanio R., Marasco D., Monte G., De Villaflor A., González J., Scarone N., and Bracco R. (2019). *Low Power Wind Energy Control “WECS PMSG” On-Grid*. Modern Environmental Science and Engineering, Volume 5, Number 6, June 2019.
- [13] Devbratta Thakur and Jin Jiang. (2017). *Simulator for Integration to a Microgrid with Renewable Energy Source*. Electric Power Components and Systems, 45(9):949–963.
- [14] Weijie Li, Minghui Yin, Zaiyu Chen and Yun Zou. (2017). *Inertia Compensation Scheme for Wind Turbine Simulator Based on Deviation Mitigation*. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, Vol. 5(2), pp. 228 – 238.
- [15] Ohyama K. and Nakashima T. (2010). *Wind Turbine Emulator Using Wind Turbine Model Based on Blade Element Momentum Theory*. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM), pp. 762 – 765.
- [16] Tammaruckwattana S. and Ohyama K. (2013). *Modeling and Simulation of Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Power Generation System Using Boost Converter Circuit*. Fukuoka Institute of Technology, 2013.

# Estudio experimental de la cubierta reflectante como método de enfriamiento pasivo en un prototipo construido bajo el paradigma de la tecnología apropiada

Ascanio-Villabona, Javier Gonzalo<sup>a-b</sup>, Tarazona-Romero, Brayan Eduardo<sup>a-b</sup>, Lengerke-Perez, Omar<sup>a</sup>, Sandoval-Rodríguez Camilo Leonardo<sup>a-b</sup>, Castillo Leon, Nilson Yulian<sup>a</sup>, Rincón-Quintero, Arly Darío<sup>a-b</sup>

a Unidades Tecnológicas de Santander - UTS - Bucaramanga, Colombia  
b Universidad del País Vasco - UPV/EHU - Bizkaia, España  
Jascanio@correo.uts.edu.co

## RESUMEN.

El consumo eficiente de energía en el sector de la vivienda en relación con la refrigeración es una preocupación en la construcción y mejoras de casas en áreas tropicales. El confort térmico se ve agravado por la ganancia de calor en la superficie del techo. Así, en el grupo de las técnicas de refrigeración pasiva, una de las prácticas y tecnologías en control solar que aportan mejoras en condiciones confortables son el aislamiento térmico o los cambios geométricos de las cubiertas. Por otro lado, los métodos con reflexión y radiación son los métodos utilizados para disminuir la ganancia de calor al facilitar la eliminación del exceso de calor dentro de un edificio para mantener un ambiente cómodo. Dado que el potencial de estas técnicas varía en diferentes zonas climáticas, se debe examinar su aplicación en diferentes zonas.

Esta investigación se basa en el estudio experimental de un prototipo de radiador de techo como método de enfriamiento pasivo en viviendas, que se desarrolló a través de una metodología de investigación experimental realizando mediciones en un prototipo construido mediante el paradigma de la tecnología apropiada, con el objetivo de establecer un comportamiento inicial de la temperatura interna resultante del clima del entorno externo. Como punto de partida, se realizó una matriz de selección para identificar las tipologías de sistemas de refrigeración pasiva para modelar el sistema y su posterior implantación, estableciendo sus características constructivas. Paso seguido de la medición de las variables climáticas (fuera del prototipo) y variables microclimáticas (dentro del prototipo) para obtener una base de datos a analizar. Como resultado final, se evidenció la disminución de la temperatura que se produce en el interior de la cámara con respecto a la temperatura exterior. asimismo, una linealidad en su comportamiento en relación a las variaciones de las variables climáticas.

**Palabras Claves:** Tecnología apropiada, Envoltente, Eficiencia energética, Refrigeración pasiva, NZEB.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la reducción de la demanda energética para el acondicionamiento del interior de viviendas garantizando un confort térmico y la climatización pasiva en los edificios es un tema desconocido para muchos [1]–[3]. Sin embargo, las acciones generalmente se limitan las ganancias de la radiación solar y a reducir la transferencia de calor por medio de ventilación [1], [4], [5]. Todo esto se centra en climas más fríos, donde los errores pueden ser costosos. Sin embargo, en los climas templados y cálidos, la acción se limita al suministro de ventilación y aire, que es ligeramente más fresco que el exterior, y cuyos efectos afectan más directamente al usuario, sin comprometer la seguridad del usuario [6], [7]. Se plantea la necesidad de mejorar el confort térmico en viviendas ya que debe crear espacios que brinden a los habitantes las condiciones climáticas adecuadas para realizar sus actividades de manera confortable. Tanto la envolvente de la vivienda como los sistemas estructurales internos que la componen juegan un papel importante en la consecución de estas condiciones. Para ello se debe considerar la influencia del entorno, el comportamiento de los habitantes y el modelo de funcionamiento de la vivienda, entre otros factores [8], [9].

Particularmente, los sistemas de aire acondicionado y sistemas de transmisión de aire forzado como los ventiladores eléctricos consumen casi el 20% de la energía consumida en los edificios[10]. Los sistemas de refrigeración por compresión de vapor no solo son ineficientes, sino que también utilizan refrigerantes que agotan la capa de ozono, contribuyendo a la problemática del calentamiento global [11], [12]. Es así que se hace necesario investigar y aplicar soluciones de enfriamiento pasivo y con tecnologías de bajo costo[13]. Una de las posibles alternativas es utilizar tecnologías de enfriamiento con envolventes con bajo intercambio radiante. Así mismo analizar nuevas geometrías que ayuden a mejorar el aislamiento térmico y ayuden a disminuir la conductividad térmica y la absorción de calor en la superficie superior de la edificación. Estas estrategias libres del consumo de energía y del uso de gases refrigerantes muestran un gran potencial para combatir las situaciones energéticas y ambientales actuales a través de la aplicación en diversos estudios, como materiales de revestimiento de edificios.

En este trabajo, se busca realizar una investigación exploratoria basada en la evaluación de variables micro-climáticas internas[14], en un prototipo de refrigeración pasiva aplicando material reflectivo y cambio de geometría, mediante el concepto de tecnología apropiada[15], [16], para analizar su comportamiento con nuevo sistema de refrigeración pasiva en edificios. Esta trabajo, propone una metodología de indagación aplicada[17], que permita encontrar estrategias de cero consumos energéticos, aplicando características geométricas, y materiales encargados de la disipación de la energía solar expuestas a la radiación durante el día, en la búsqueda de mejorar el comportamiento de la temperatura en el interior.

## 2. METODOLOGÍA Y DISEÑO EXPERIMENTAL

En el desarrollo de esta investigación, se propone desarrollar una metodología de investigación aplicada presentado las fases en la Tabla 1 con el fin de encontrar estrategias que puedan ser utilizadas para resolver problemas específicos, con el objetivo de comprender el comportamiento del prototipo, las características geométricas, materiales del techo y el comportamiento de las variables en este prototipo, manteniendo los materiales encargados de la disipación de los rayos solares expuestos a la radiación solar durante el día, en la búsqueda del máximo rendimiento tanto para las temporadas de verano e invierno. De igual forma, se quiere analizar las investigaciones de Beng y Noguchi de la Universidad de Melbourne, Australia, que realizaron estudios sobre la refrigeración y ventilación sostenible con un bajo consumo energético para calentar o enfriar viviendas con la utilización de techos refrigerantes [18].

*Tabla 1 Fases de la metodología de la investigación*

Secuencia de Metodología	
Etapa 1: Documentación bibliográfica	La consulta bibliográfica relacionada con los avances y prototipos propuestos de refrigeración pasiva de techos, con la finalidad de apoyarse en dichas investigaciones y seleccionar modelos de apoyo a este trabajo.
Etapa 2: Modelado del sistema de refrigeración pasiva de techo	Diseño del modelo seleccionado, bajo el concepto de tecnología apropiada, definiendo características geométricas y materiales del dispositivo, cálculo de rendimiento teórico por

	medio de una simulación en una herramienta computacional.
Etapa 3: Construcción del prototipo de refrigeración pasiva de techo	Construcción del sistema de refrigeración pasiva de techo, diseñado con las características geométricas y materiales seleccionados.
Etapa 4: Análisis de los resultados	Análisis de los resultados obtenidos por el prototipo de refrigeración pasiva de techo, basados en los datos obtenidos durante las mediciones, para evaluar el comportamiento del del sistema.

## 2.1. Revisión de materiales y geometrías

Se realizó la revisión bibliográfica en motores de búsqueda con estándares científicos usando palabras clave como: Enfriamiento radiativo, techos para refrigeración pasiva, envolventes pasivas en edificaciones, entre otros; con el fin de identificar y clasificar los trabajos realizados con relación a la temática. Esto evidencia que los estudios realizados hasta la fecha se centran en la aplicación independiente de diferentes sistemas pasivos de refrigeración de techos, sin embargo, se necesita un enfoque integrado para estos sistemas para una evaluación y un análisis técnico exhaustivo. Por lo que en el trabajo de investigan geometrías de techos basado en sistemas de radiadores solares, así mismo materiales de aislamiento pasivo usados en edificios, la Tabla 2 presenta los trabajos destacados.

Tabla 2 Materiales de aislamiento pasivo

País	Técnica	Conclusión
Sri Lanka[19]	Capa de poliestireno de 25 mm	75% de reducción de calor
Hyderabad, India [20]	Colocación de baldosas de arcilla hueca en lugar de capas de envejecimiento	38–63% de ahorro de energía
Estados Unidos [21]	Aplicación de pintura fría	38% de ahorro de energía
Italia [22]	Aplicación de pintura fría en losa de techo	54% de ahorro de energía
Grecia [23]	Como aislante se utiliza un entrehierro ventilado de 60 mm	56% de reducción de la ganancia de calor diaria
Sri Lanka [24]	Aislamiento de bambú de 25 mm de espesor	53% de reducción máxima de calor
Experimento de laboratorio, Chennai [25]	Ferrocemento como panel secundario con entrehierro de 300 mm	Temperatura reducida a 15 °C en cielo raso de losa

Con relación a la geometría este trabajo se basó en las metodologías del estudio realizado por AA Reewan aL. Shao bS. Riffat de la Universidad de Nottingham[26], el cual, concluyeron los efectos que tienen las geometrías de los techos con los efectos de la estanquidad de luz, pero también la simulación de la incidencia de la radiación.

## 2.2. Características del prototipo.

Al realizar la evaluación de los materiales reflectores de la radiación de tecnologías blandas como recubrimiento en la superficie del prototipo y basado en la caracterización de temperaturas de cada uno de ellos del cuadro se obtiene la Tabla 3. Resultados para los materiales reflectores de la radiación

Tabla 3. Resultados para los materiales reflectores de la radiación

Materia I	Descripción	Temperatura directa cielo	Temperatura con filtro	Reducción
R01	Papel de aluminio convencional	-22,6 °C	-19,7 °C	2,9 °C
R02	Bandeja de aluminio alimentaria	-22,6 °C	-19,3 °C	3,3 °C

R03	Manta térmica, cara plateada	-22,6 °C	-19,8 °C	2,8 °C
R04	Manta térmica, cara dorada	-22,6 °C	12,1 °C	34,7 °C

Se optó por el material de papel aluminio convencional (R01) debido a sus propiedades físicas, facilidad de obtención y adaptación, así mismo, espuma de poliuretano, usada como aislante térmico utilizada en la cámara aislada como barrera al paso de calor entre el exterior e interior de la cámara.

### 2.3. Modelado y construcción del prototipo

Diseño final de un modelo que cumple con los requisitos para proteger la cámara interior de la radiación solar directa y reflejada, evitando la visión de los elementos del entorno (Figura 1).

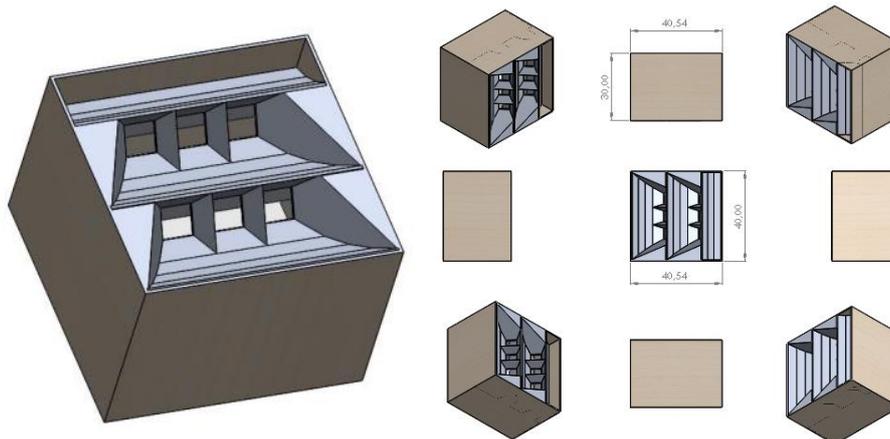


Figura 1. Modelo de prototipo con techo para análisis de refrigeración pasiva.

La construcción del prototipo se establece determinando las medidas del modelamiento y los materiales que se seleccionaron en la caracterización. Obteniendo el modelo presentado en la Figura 2.



Figura 2 Prototipo construido.

### 3. MONITORIZACIÓN

Para la búsqueda del comportamiento de las variables se hace el registro de 3840 datos en totalidad registrando 960 por sensores termohigrómicos, registrados durante 10 días con 8 horas por día en intervalos de 5 minutos. Las 8 horas diarias se determinan por ser las horas solares que se presenta en la zona del caso estudio. Las variables registradas son la temperatura y humedad con dos sensores en el exterior y dos sensores en el interior del prototipo ubicados como se presenta en la Figura 3 y Figura 4, así mismo se mide la temperatura superficial con un termómetro infrarrojo y la radiación se midió con un piranómetro.

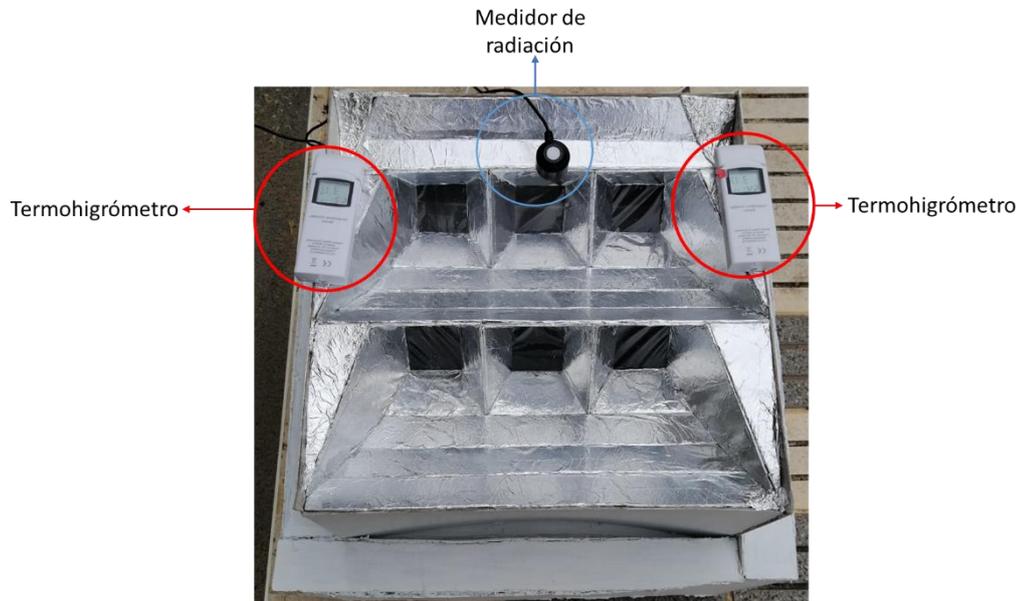


Figura 3 Implantación de sensores para monitorización de variables del exterior



Figura 4 Implantación de sensores para monitorización de variables del interior

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para el análisis de datos se realiza la comparación de la temperatura interna con la temperatura externa (ver Figura 5).

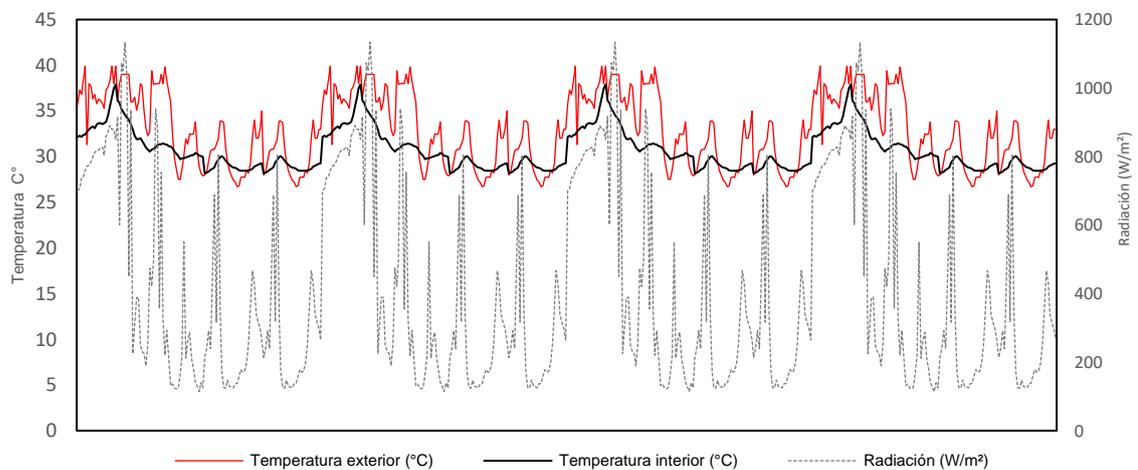


Figura 5. Temperatura interior, exterior y radiación ambiente.

En la Figura 5. Temperatura interior, exterior y radiación ambiente., se observa que la temperatura exterior varía según la variación de la incidencia de la radiación sobre el prototipo, así mismo se presenta una similitud de comportamiento con la temperatura interior en todos los datos, presentado picos de temperatura ambiente de 39,9°C en el momento que la radiación es de 1134W/m<sup>2</sup> generando una temperatura de 37,9°C en el interior del prototipo. Para analizar el comportamiento y la comparación en todo momento de las temperaturas del exterior e interior monitorizadas se realiza la linealización de datos como se presenta en la Figura 6.

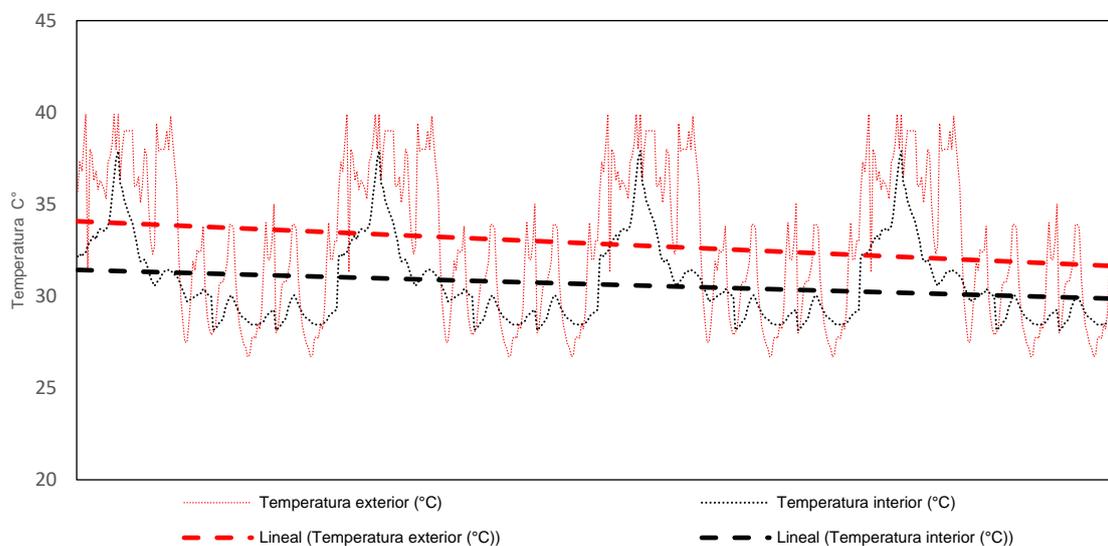


Figura 6 Linealidad de datos de temperatura exterior y temperatura interior del prototipo

Con la Figura 6 se aprecia que al realizar la linealización de datos la temperatura en el interior de prototipo se mantiene por debajo de la temperatura exterior, mostrando una reducción de temperatura al interior del prototipo, así mismo se evidencia que la temperatura en el interior presenta una tendencia constante ante a las variaciones de temperatura en el exterior. Adicional se calcula la diferencia de temperatura de los datos registrados.

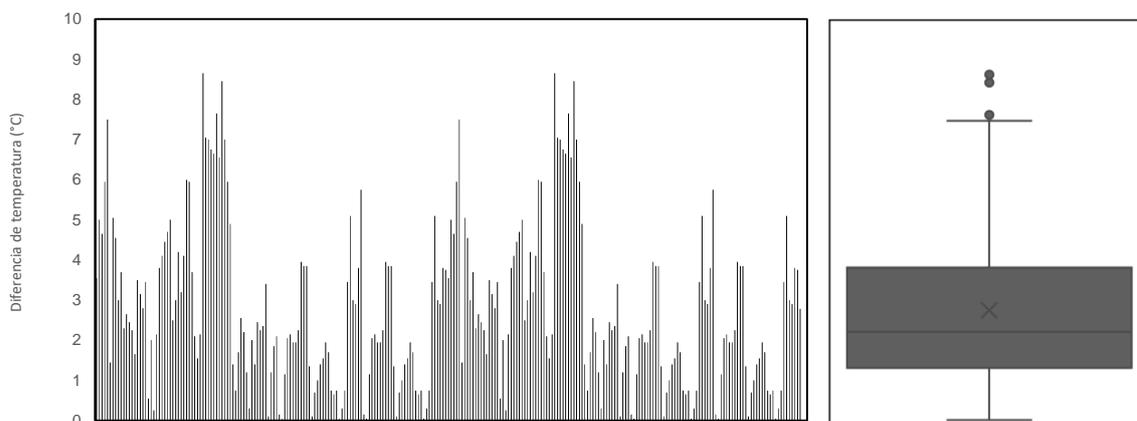


Figura 7. Diferencia de temperaturas exterior e inferior.

Como se mencionó anteriormente en todo momento se presenta una diferencia de temperaturas, en la Figura 7 se muestran picos de diferencia entre ellas, ocasionados por cambio de temperaturas bruscos en el exterior y manteniendo una temperatura interna constante. En esta figura (Figura 7) se presentan valores de diferencia que oscilan entre los 1°C y 10°C. Evaluando las temperaturas se realiza el diagrama de cajas, donde se exponen los valores máximos y mínimos medidos en cada zona de monitorización.

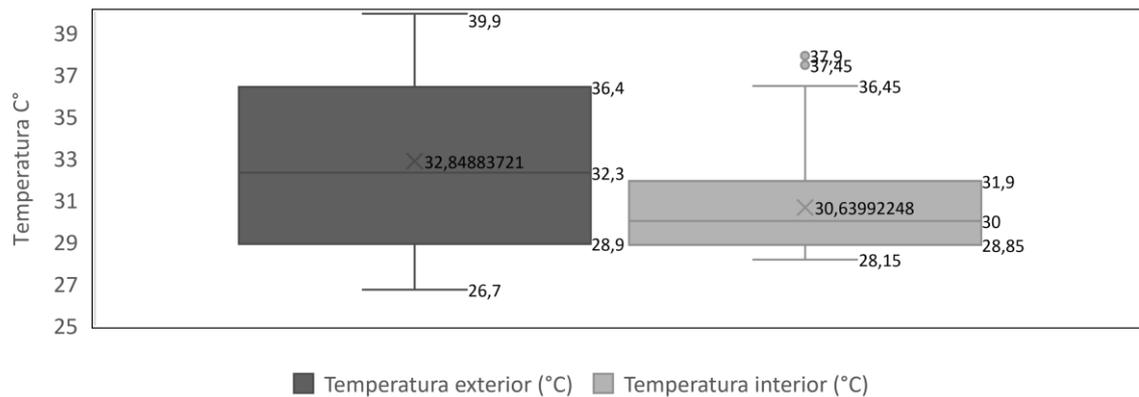


Figura 8 Diagrama de cajas

Las temperaturas máximas en el exterior del prototipo es de 39,9°C y la mínima de 26,7°C con una temperatura promedio de 32,84°C presentando amplia variación de temperaturas internas y externas como se compara en la Figura 8.

### 3. CONCLUSIONES.

La integración de materiales aislantes térmicos, materiales reflectores de radiación y variación geométrica en un prototipo de estudio de techo, genera una diferencia de la temperatura entre el exterior y el interior para este caso se puede evidenciar la viabilidad en el prototipo de techos de enfriamiento pasivo. El presente estudio investiga la variación de temperaturas de un techo con materiales aislantes y con reflectores de radiación de aluminio y espuma de poliestireno estudiado durante horas solares en Bucaramanga Santander. Siendo este un estudio inicial para futuros trabajos y análisis del potencial de enfriamiento de los edificios. Se observó que la reducción correspondiente en las temperaturas al implantar estos materiales como envolventes y generar una geometría distinta se presenta una disminución promedio de 2°C representando un 8,5% con relación al promedio máximo de 32,8°C. La temperatura interna del prototipo tiene una tendencia a mantenerse constantes y no generar oscilaciones teniendo un promedio de 30,6°C. La variación de la temperatura exterior está directamente relacionada con la incidencia de la radiación solar, al aumentar la radiación aumenta la temperatura exterior, y genera variaciones en la temperatura interior. Finalmente, este sistema de techo con aislamiento de espuma de poliestireno, reflector de radiación de aluminio y cambio de geometría es efectivo cuando la cantidad de radiación solar es extremadamente alta y se produce la máxima variación de temperatura, siendo posible la hipótesis a futuro de reducir la necesidad de aire acondicionado en edificios residenciales y comerciales durante las temporadas de verano o en zonas de climas cálidos y tropicales.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] S. Liu *et al.*, "Comparative analysis on indoor and outdoor thermal comfort in transitional seasons and summer based on multiple databases: Lessons learnt from the outdoors," *Science of The Total Environment*, vol. 848, p. 157694, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.157694.
- [2] A. Jahanbin, "Efficacy of coupling heat recovery ventilation and fan coil systems in improving the indoor air quality and thermal comfort condition," *Energy and Built Environment*, vol. 3, no. 4, pp. 478–495, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENBENV.2021.05.005.
- [3] Y. He, N. H. Wong, T. Kvan, M. Liu, and S. Tong, "How green building rating systems affect indoor thermal comfort environments design," *Build Environ*, vol. 224, p. 109514, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.109514.
- [4] J. Li, Y. Wang, and Y. Xia, "A novel geometric parameter to evaluate the effects of block form on solar radiation towards sustainable urban design," *Sustain Cities Soc*, vol. 84, p. 104001, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2022.104001.
- [5] G. Tian *et al.*, "Studies on the thermal optical properties and solar heat gain of thin membrane structure industrial building," *Solar Energy*, vol. 213, pp. 81–90, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.SOLENER.2020.10.083.
- [6] M. Fan *et al.*, "A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control," *Build Environ*, vol. 212, p. 108831, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2022.108831.

- [7] Y. He, A. Tablada, J. Y. Deng, Y. Shi, N. H. Wong, and E. Ng, "Linking of pedestrian spaces to optimize outdoor air ventilation and quality in tropical high-density urban areas," *Urban Clim*, vol. 45, p. 101249, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.UCLIM.2022.101249.
- [8] B. Widera, "Comparative analysis of user comfort and thermal performance of six types of vernacular dwellings as the first step towards climate resilient, sustainable and bioclimatic architecture in western sub-Saharan Africa," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 140, p. 110736, Apr. 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.110736.
- [9] A. Couvelas, "Bioclimatic building design theory and application," *Procedia Manuf*, vol. 44, pp. 326–333, Jan. 2020, doi: 10.1016/J.PROMFG.2020.02.238.
- [10] F. Anderson, "Eco-turbina: Turbo ventilador eléctrico de bajo consumo. Public Policies-New Smart Settings in Public Management View project", Accessed: Sep. 14, 2022. [Online]. Available: <http://portalweb.cammesa.com/default.aspx>
- [11] S. Y. Jeong, C. Y. Tso, M. Zouagui, Y. M. Wong, and C. Y. H. Chao, "A numerical study of daytime passive radiative coolers for space cooling in buildings," *Building Simulation 2018 11:5*, vol. 11, no. 5, pp. 1011–1028, Sep. 2018, doi: 10.1007/S12273-018-0474-4.
- [12] J. N. Munday, "Tackling Climate Change through Radiative Cooling," *Joule*, vol. 3, no. 9, pp. 2057–2060, Sep. 2019, doi: 10.1016/J.JOULE.2019.07.010.
- [13] "Tecnología blanda - Qué es, definición y concepto | 2022 | Economipedia." <https://economipedia.com/definiciones/tecnologia-blanda.html> (accessed Sep. 14, 2022).
- [14] K. Pantavou, A. Mavrikis, and G. K. Nikolopoulos, "Data on multiple body parameters, microclimatic variables, and subjective assessment of thermal sensation monitored in outdoor environment," *Data Brief*, vol. 12, pp. 184–187, Jun. 2017, doi: 10.1016/J.DIB.2017.03.045.
- [15] B. E. Tarazona-Romero, A. Campos-Celador, and Y. A. Maldonado-Muñoz, "Can solar desalination be small and beautiful? A critical review of existing technology under the appropriate technology paradigm," *Energy Res Soc Sci*, vol. 88, p. 102510, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.ERSS.2022.102510.
- [16] J. Patnaik and P. K. Tarei, "Analysing appropriateness in appropriate technology for achieving sustainability: A multi-sectorial examination in a developing economy," *J Clean Prod*, vol. 349, p. 131204, May 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.131204.
- [17] M. Amini Farsani, H. R. Jamali, M. Beikmohammadi, B. D. Ghorbani, and L. Soleimani, "Methodological orientations, academic citations, and scientific collaboration in applied linguistics: What do research synthesis and bibliometrics indicate?," *System*, vol. 100, p. 102547, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.SYSTEM.2021.102547.
- [18] K. Beng and M. Noguchi, *Calefacción o refrigeración y ventilación sostenibles de viviendas asequibles sin consumo energético*, vol. 205. 2017. Accessed: Apr. 14, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817350580>
- [19] M. Ristimäki, A. Säynäjoki, J. Heinonen, and S. Junnila, "Combining life cycle costing and life cycle assessment for an analysis of a new residential district energy system design," *Energy*, vol. 63, pp. 168–179, Dec. 2013, doi: 10.1016/J.ENERGY.2013.10.030.
- [20] S. O. Ajayi, L. O. Oyedele, B. Ceranic, M. Gallanagh, and K. O. Kadiri, "Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment," *Ceased*, vol. 6, no. 1, pp. 14–24, Jan. 2015, doi: 10.1080/2093761X.2015.1006708.
- [21] "World's fastest Building Life Cycle Assessment software - One Click LCA." <https://www.oneclicklca.com/> (accessed Sep. 14, 2022).
- [22] L. Caldas, "Generation of energy-efficient architecture solutions applying GENE\_ARCH: An evolution-based generative design system," *Advanced Engineering Informatics*, vol. 22, no. 1, pp. 59–70, Jan. 2008, doi: 10.1016/J.AEI.2007.08.012.
- [23] M. A. Curran, "Life Cycle Assessment: a review of the methodology and its application to sustainability," *Curr Opin Chem Eng*, vol. 2, no. 3, pp. 273–277, Aug. 2013, doi: 10.1016/J.COACHE.2013.02.002.
- [24] F. Asdrubali, C. Baldassarri, and V. Fthenakis, "Life cycle analysis in the construction sector: Guiding the optimization of conventional Italian buildings," *Energy Build*, vol. 64, pp. 73–89, Sep. 2013, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2013.04.018.
- [25] B. Petrovic, J. A. Myhren, X. Zhang, M. Wallhagen, and O. Eriksson, "Life Cycle Assessment of Building Materials for a Single-family House in Sweden," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 3547–3552, Feb. 2019, doi: 10.1016/J.EGYPRO.2019.01.913.
- [26] A. A. Freewan, L. Shao, and S. Riffat, "Optimizing performance of the lightshelf by modifying ceiling geometry in highly luminous climates," *Solar Energy*, vol. 82, no. 4, pp. 343–353, Apr. 2008, doi: 10.1016/J.SOLENER.2007.08.003.

# **Análisis de acceso de un conjunto de parques eólicos en el sistema de transmisión de la región patagónica.**

Manassero, Ulises; Cea, Marcos; Rossi, Lautaro; Sangoi, Emmanuel; Torres, José L.

Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) (Lavaise 610, Santa Fe), Facultad Regional Santa Fe, UTN.

## **RESUMEN.**

La eólica se ha convertido en una fuente de energía clave, de cara a la migración hacia el nuevo paradigma energético. Durante 2019 su generación creció casi un 19 % en todo el mundo. En este trabajo se analiza de acceso a la red de ocho Parques Eólicos adjudicados en las rondas de licitación del programa "RenovAr", impulsado por la Secretaría de Energía de la Nación y que tendrán vinculación en el sistema de transmisión de 132 kV de la región patagónica. Se realizan simulaciones de flujo de carga para distintos estados de generación por parte del parque, de acuerdo a estudios estadísticos de vientos en el lugar de emplazamiento de cada uno de ellos. Los resultados obtenidos evidencian condiciones de operación inadmisibles de la red con el acceso de algunos parques, frente a escenarios de baja demanda, ocasionando elevadas sobrecargas en líneas de 132 kV, que obligan al desarrollo e implementación de un sistema de desconexión de generación.

**Palabras Claves:** Parque eólico; Sobrecargas; Variaciones rápidas de potencia; Fluctuaciones de tensión.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

La reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la generación de energía eléctrica constituye un eslabón primordial de la transformación energética. Alejar rápidamente al mundo del consumo de combustibles fósiles que causan el cambio climático hacia formas de energía más limpias y renovables es clave si el mundo quiere alcanzar los objetivos climáticos acordados [1].

En esta línea, la rápida disminución de los costos de las energías renovables contribuye a la agilización de esta transformación. El costo promedio ponderado global de electricidad de todas las tecnologías de generación de energía renovable disponibles comercialmente presenta disminuciones de precios continuas. Para los proyectos de Parques Eólicos (PE) en tierra instalados en 2018, el costo promedio ponderado global de electricidad resultó un 13% más bajo que en 2017 y 35% más bajo que en 2010 [2].

La energía eléctrica generada por todos los PE instalados a finales del año 2019 cubren más del 6% de la demanda mundial de electricidad, donde la tasa de crecimiento de la energía eólica instalada en 2019 fue del 10,1%, superior al 9,3% del año anterior [3].

En el ámbito local, Argentina se presenta como un país de gran atracción para el desarrollo de este tipo de energías debido a sus elevadas velocidades de vientos, logrando ser el onceavo mercado más adecuado para el desarrollo de nuevos proyectos energéticos sustentables [4].

Como consecuencia de las expectativas técnico-económicas que brindan los proyectos renovables y con motivo de lograr una menor dependencia de la generación eléctrica a base de hidrocarburos, el Ministerio de Energía y Minería de la Nación impulsó la ley 21.191 “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica” decreto 531/2016, en donde se pretende cubrir el 20% de la matriz energética con energías renovables. En este contexto, y bajo las rondas licitatorias de los programas “RenovAr” [5]-[6]-[7], cada vez son más los proyectos renovables que entran en servicio en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI).

En el presente trabajo se propone una metodología para evaluar el acceso a la red de los PE adjudicados en las rondas RenovAr que se vincularán al SADI en la región patagónica, con el propósito de evaluar su impacto en las condiciones de operación estacionarias, bajo diferentes escenarios de generación de energía del PE relacionadas al estudio de los vientos de su lugar de emplazamiento.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el estudio de inserción de los PEs en el Subsistema Patagónico de Transmisión en 132 kV se muestra en la figura 1.

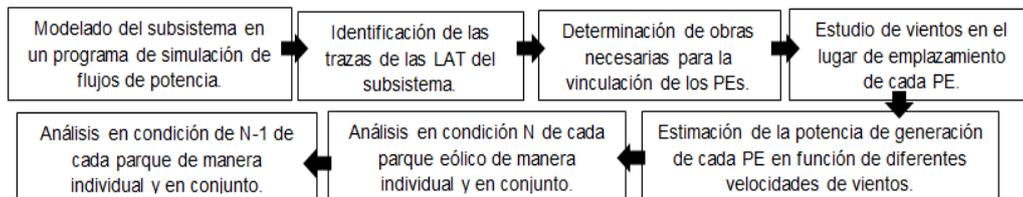


Figura 1 Metodología de análisis de inserción de PE en la red de potencia

### 2.1. Hipótesis de Trabajo

Para el modelado y las condiciones de operación admisibles de la red de subtransmisión, se adoptaron los siguientes supuestos:

- El límite de capacidad de transmisión de potencia de las líneas aéreas corresponde al límite térmico-mecánico impuesto por sus conductores.
- El límite de operación admisible de transformadores de potencia (132/33/13,2 kV y 500/132/33 kV) corresponde a la capacidad nominal de la máquina, impuesta por el fabricante según su diseño.
- Se consideran aceptables niveles de tensión en barras de 132 kV que se encuentran en el rango de 0,90 a 1,10 pu para nodos radiales y 0,95 a 1,05 pu para nodos anillados. En 500 kV los niveles aceptables se encuentran dentro de un rango de 0,93 a 1,03 pu y, en contingencias, el rango utilizado se considera aceptable dentro de 0,95 a 1,05 pu, tal como lo exigen los Procedimientos Técnicos de CAMMESA [8].
- El escenario de demanda Base del subsistema en estudio es el correspondiente a un Pico de Verano.

### 2.2. Descripción del subsistema en estudio

El subsistema de estudio abarca las redes de transporte y transmisión de la región patagónica, que comprende el extenso corredor de 500 kV desde la ET Choele Choele 500/132 kV (Provincia de Río Negro) y se extiende hasta la ET La Esperanza 500/330/132 kV (Provincia de Santa Cruz),

con una longitud aproximada de 1.500 km. Presenta una topología radial con ETs de rebaje a 132 kV en las ETs Puerto Madryn (500/220/132 KV) y Santa Cruz Norte 500/132 kV (ver figura 2). En escenarios de valle de demanda, el consumo del subsistema es de 246 MW y en escenarios de pico alcanza niveles cercanos a los 350 MW de demanda. En la figura 2 se observan las trazas de las líneas de alta tensión (LAT) de 132 y 500 kV del sistema patagónico en estudio. El subsistema fue modelado con un software de simulación de sistemas eléctricos de potencia (ver figura 3) y se utilizaron sus herramientas de cálculo de flujo de potencia en estado estable.

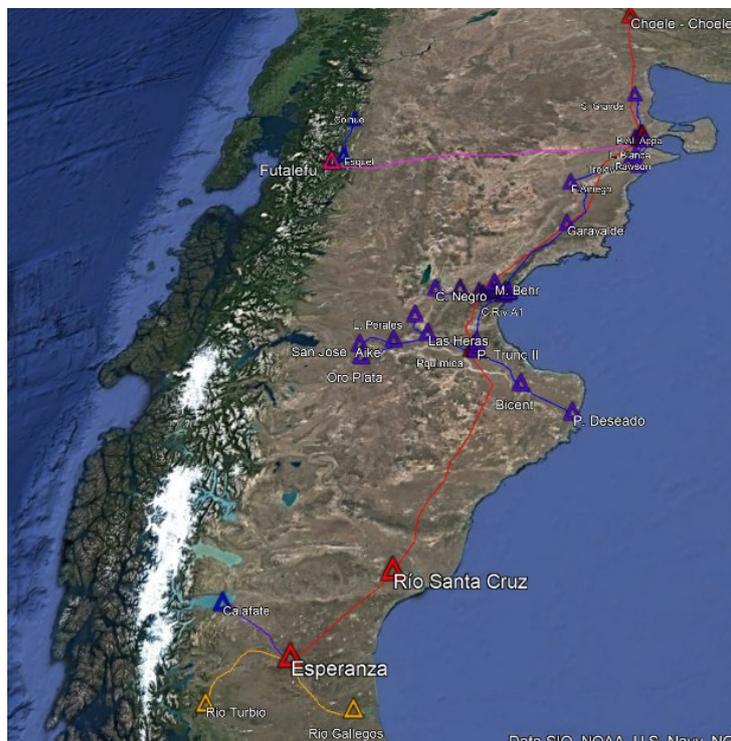


Figura 2 Mapa satelital con identificación de las trazas del subsistema en estudio. Referencias: color rojo: LAT 500 kV y ETs 500/220/132 kV; color azul: LATs 132 kV y ETs 132/33/13,2 kV.

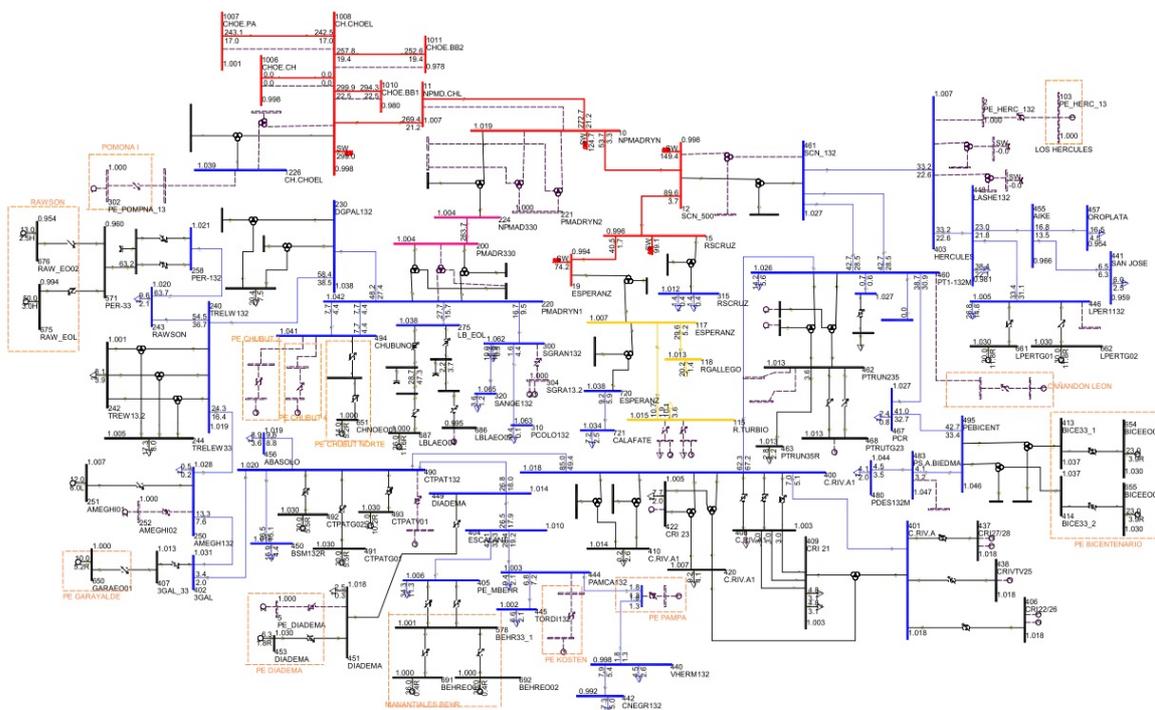


Figura 3 Modelo eléctrico del corredor de 500/132 kV de la región patagónica.

### 2.3. Vinculación de los PEs en la red del SADI.

En una primera instancia, se vinculan al SADI los PE adjudicados en las licitaciones correspondientes a las rondas Renovar 1, 1.5 y 2 impulsadas por la Secretaría de Energía de la Nación.

Según la ubicación geográfica de cada PE y las trazas de las líneas de 132 kV del subsistema, se determinan las obras de infraestructura necesarias para su vinculación a la red. En este aspecto, para el diseño y modelado de las obras de vinculación de los PE a la red se establecieron los siguientes criterios:

- Sección del conductor seleccionado en función de la potencia máxima de los PEs y de las líneas de 132 kV existentes.
- En caso de que el PE no presente un nodo cercano de 132/13,2 kV, se establece una conexión de entrada/salida con la línea existente a través de construcción de una LAT doble terna.
- Las tensiones nominales de todos los transformadores de bloque utilizados son de 132/13,2 kV, con una tensión de cortocircuito de 5%.

Con excepción al PE Pampa, todos los PEs se vinculan mediante una LAT simple terna hacia el nodo de conexión más cercano. En el caso del PE Pampa, se realiza una entrada/salida con la línea existente a través de una doble terna.

Para la vinculación del PE Diadema, sólo es necesaria la incorporación de un transformador de bloque, debido a que dicho PE ya se encuentra en funcionamiento con una potencia máxima de 6,3 MW adjudicada en la Ronda 1 de Renovar.

Además de las obras mencionadas, es indispensable realizar la construcción de una LAT de 132 kV de 300/50 Al/Ac de 13,4 km de longitud entre los nodos CHUBUNOR-PMADRYN, debido a que con la incorporación de los PE Chubut 3 y 4, la evacuación de potencia por dicho corredor provoca significativas sobrecargas en la LAT existente.

A continuación, se detalla en la tabla 1 las obras necesarias para la vinculación de los PEs.

Tabla 1 Obras Eléctricas de Vinculación de los Proyectos de PE a la red del SADl

Nombre del PE	P <sub>nom</sub> [MW]	Línea Aérea de 132 kV		Transformador de Bloque 13,2/132 kV	
		Conductor	Longitud [km]	S <sub>nom</sub> [MVA]	X <sub>1</sub> [%]
Los Hércules	97,2	185/30 Al Ac - Triangular	3,4	108	5
Pampa	100	240/40 Al Ac - Triangular	4,8	111	5
Kosten	24	150/25 Al Ac - Triangular	3,4	27	5
Diadema	27,6	-	-	31	5
Chubut 4	82,8	150/25 Al Ac - Triangular	3,3	92	5
Chubut 3	57,6	150/25 Al Ac - Triangular	4	64	5
Pomona I	100	210/35 Al Ac - Triangular	5,2	106	5
Cañadón León	100	240/40 Al/Ac - Triangular	25	120	5

#### 2.4. Potencia generada por los PEs.

La potencia que produce un aerogenerador es principalmente función de la velocidad del viento, por lo tanto, para poder determinar estos valores es necesario conocer la curva de variación de la potencia en función de las velocidades del viento. Para tal fin, se recurre al catálogo del fabricante que provee la curva de operación del aerogenerador presentada en la figura 4 y su ecuación (1) correspondiente al cálculo de la potencia generada en función a la velocidad del viento ( $v$ ).

$$P = 4,2 \cdot \left[ \text{MAX}(0; \text{MIN}(C; R; 1)) \cdot (1 - \text{ENTERO}(\frac{v}{v_{\max}} - 0,01)) \right] \quad (1)$$

Donde la velocidad máxima de viento ( $v_{\max}$ ) admitida por el modelo de aerogenerador es de 25 m/s, y siendo los coeficientes C y R obtenidos a partir de las ecuaciones (2) y (3) respectivamente.

$$C = \left( \frac{v}{12} \right)^3 - 0,005 \quad (2)$$

$$R = 0,3 + 0,05 \cdot v \quad (3)$$

Para el presente estudio, se utilizaron generadores marca Vestas, modelo 80, con una potencia máxima de 2 MW. En la figura 4 a), se muestra la curva de potencia generada en función de la velocidad del viento calculada según (1).

Para conocer la potencia generada por el aerogenerador, se trabaja con mediciones de velocidad de viento cada 10 minutos a lo largo de un año, a 10 metros del nivel del suelo en el lugar de emplazamiento de cada PE. Luego, a partir de la ley de Hellmann se estima la velocidad de viento a una altura de 80 m, que se corresponde con la altura del eje del aerogenerador. Finalmente, se realiza una distribución discreta de velocidades de vientos a fines de obtener una distribución densidad de probabilidades de Weibull [9].

El modelo de cálculo basado en la Ley de Hellman para la variación de la velocidad con la altura, se obtiene a partir de la ecuación 4.

$$\frac{\langle v' \rangle}{\langle v \rangle} = \left( \frac{z'}{z} \right)^\alpha \quad (4)$$

En donde:

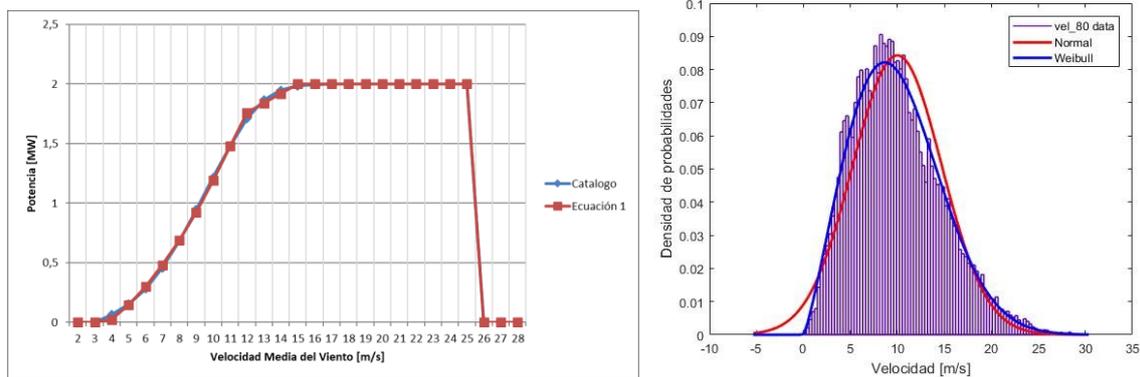
$v$  y  $v'$ : son las velocidades en metros por segundo a las alturas  $z$  y  $z'$  respectivamente.  
El factor  $\alpha$  puede obtenerse a partir de la fórmula de Justus-Mikjail (ver ecuación 5).

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln \langle v_z \rangle}{1 - 0,088 \ln \left( \frac{z}{10} \right)} \quad (5)$$

En la figura 4 b) se muestra, a modo de ejemplo, el caso particular de la curva de densidad de probabilidades de Weibull, obtenidas con la ayuda del software MATLAB, correspondiente al PE Hércules.

Por otra parte, a raíz de los coeficientes  $c$  y  $k$  de la distribución de probabilidades de Weibull, se obtiene la “distribución de frecuencia acumulada”, que permite calcular la frecuencia acumulada de las velocidades de viento que son mayores o iguales a cierto valor  $V$  (ver ecuación 6).

$$F'(v \leq V) = 1 - F(v \geq V) = e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (6)$$



a) Curva de operación aerogenerador Vestas

b) Distribución de Weibull de vientos

Figura 4. Potencia de generación en relación a velocidades de vientos.

La frecuencia acumulada se calcula para velocidades de viento en el rango de 0,5 m/s a 25 m/s con intervalos de 0,5 m/s. Luego, a partir de las “clases” definidas, se seleccionan los valores de vientos correspondientes a los cuartiles 1, 2, 3 y 4. La definición estadística de los cuartiles utilizados en el análisis de la base de datos de los perfiles de velocidad de viento es la siguiente:

- $V_{Q1}$ : El 25% del tiempo los vientos son menores o iguales al  $V_{Q1}$
- $V_{Q2}$ : El 50% del tiempo los vientos son menores o iguales a  $V_{Q2}$
- $V_{Q3}$ : El 75% del tiempo los vientos son menores o iguales  $V_{Q3}$
- $V_{Q4}$ : El 100% del tiempo los vientos son menores o iguales a  $V_{Q4}$

Finalmente, se comparan los cuartiles de velocidad de viento con la curva de potencia-viento del aerogenerador y se estima la potencia generada para cada cuartil. En la tabla 2 se resumen los valores de potencia calculados de los PEs de la región patagónica adjudicados en rondas Renovar destacando, el detalle de cuartiles de potencia del PE existente Manantiales Behr, por tratarse de un PE de elevado módulo de potencia, cuya operación incide en el análisis conjunto de ingreso de otros PEs a instalarse en zonas aledañas.

Tabla 2 Potencia generada por PE, según cuartiles de viento

Nombre del PE	Velocidad del Viento [ms]				Potencia Generada por el PE [MW]			
	$V_{Q1}$	$V_{Q2}$	$V_{Q3}$	$V_{Q4}$	$P_{Q1}$	$P_{Q2}$	$P_{Q3}$	$P_{Q4}$
Los Hércules	6,5	9,5	13,0	25,0	19,1	51,8	90,2	98,0
Pampa	7,0	10,0	14,0	25,0	24,0	59,4	96,0	100,0
Kosten	7,0	10,0	14,0	25,0	5,8	14,3	23,0	24,0
Diadema	7,0	10,5	14,0	25,0	6,7	18,7	26,9	28,0
Chubut 4	6,0	9,0	12,0	25,0	12,6	38,8	73,9	84,0
Chubut 3	6,0	9,0	12,0	25,0	8,7	26,8	51,0	58,0
Pomona I	5,0	7,5	10,5	25,0	7,4	29,2	66,7	100,0
Cañadón León	7,0	9,5	13,0	25,0	24,0	52,8	92,0	100,0
Manantiales Bher (YPF)	7,0	10,5	14,0	25,0	24,0	66,7	96,0	100,0

### 3. RESULTADOS

### 3.1. Ingreso individual de PE al SADI – Red en Condición Normal

Para el análisis de la configuración en régimen de funcionamiento normal (régimen N), se utilizan los escenarios de pico y valle de demanda.

Con motivo de evaluar el impacto de los PE adjudicados en las rondas Renovar que se vincularán al SADI, se realiza el análisis de ingreso de cada PE de manera individual, según los requerimientos del Procedimiento Técnico N°1 de CAMMESA [10] y el Anexo 40 de Generación Eólica [11] que especifica el modo de operación de los PEs.

Los PE se corresponden con una Granja Tipo A según [11], por lo cual se despachan en modo “control de tensión” -curva de capacidad tipo pentagonal simétrica con  $\cos \phi$  0,95 capacitivo/inductivo para valores de potencia de entre el 30 y el 100% de la potencia máxima-, con un valor de tensión de referencia en la propia barra de generación de 1,03 pu.

Se realizan sucesivas simulaciones de flujo de potencia del sistema para evaluar el ingreso individual de los PEs con los valores de generación de potencia calculados según los cuartiles 1, 2, 3 y 4 presentados en la Tabla 2.

Los resultados de las simulaciones evidencian que, con excepción del PE Pampa, el ingreso individual del resto de los PE, para cada uno de los cuartiles de potencia calculados, no ocasionan problemas en las variables que definen la operación normal de la red (estado de cargas de líneas y transformadores y perfiles de tensión en barras). En la Tabla 3 se resumen los resultados obtenidos.

Tabla 3 Resumen de condiciones de operación de la red para acceso individual de los PE, según diferentes cuartiles de potencia generada

Nombre del PE	P <sub>nom</sub> [MW]	OPERACIÓN DE RED ESTABLE							
		VALLE				PICO			
		P <sub>Q1</sub>	P <sub>Q2</sub>	P <sub>Q3</sub>	P <sub>Q4</sub>	P <sub>Q1</sub>	P <sub>Q2</sub>	P <sub>Q3</sub>	P <sub>Q4</sub>
Los Hércules	97,2	√	√	√	√	√	√	√	√
Pampa	100	√	X	X	X	√	√	√	X
Kosten	24	√	√	√	√	√	√	√	√
Diadema	27,6	√	√	√	√	√	√	√	√
Chubut 4	82,8	√	√	√	√	√	√	√	√
Chubut 3	57,6	√	√	√	√	√	√	√	√
Pomona I	100	√	√	√	√	√	√	√	√
Cañadón León	100	√	√	√	√	√	√	√	√

Con respecto al PE Pampa, su acceso a la red se establece en un corredor radial extenso de 80 km, con líneas de sección reducida (constituye una red de alta impedancia) y con una demanda importante que alcanza los 80 MVA en escenario pico. Por lo tanto, la inyección de potencia del PE (principalmente activa) sumado al consumo reactivo del transformador elevador, desmejoran notablemente los perfiles de tensión del corredor de 132 kV CT Patagonia-Cerro Negro, alcanzando niveles inadmisibles ante eventuales condiciones de despacho del PE a plena carga (P<sub>Q4</sub>).

A los fines de no producir detrimento de las condiciones de “base” de la red, se propone la ampliación de la curva de capacidad del PE Pampa a  $\cos \phi$  0,93 inductivo/capacitivo, que implican mayores prestaciones del inversor de potencia y/o la instalación de bancos de capacitores o FACTS. De esta manera, todos los perfiles de tensión se establecen dentro del rango admisible impuesto por los Procedimientos Técnicos de CAMMESA.

Por otra parte, en el escenario de valle de demanda, el ingreso del PE Pampa ocasiona sobrecargas en la LAT de 132 kV Comodoro Rivadavia-Pico Truncado (C.RIV.AR-PT1) a partir del despacho de potencia del cuartil 2 (60 MW) en adelante (ver figura 5 a y Tabla 3). Esto implica que el PE no podría funcionar en escenarios de valle de demanda con vientos superiores al cuartil 2, por lo que hace indispensable que se cuente con Desconexión Automática de Generación (DAG). Para lograr el despacho óptimo de generación sin producir sobrecargas en la LAT C.RIV.AR-PT1, es necesario un monitoreo continuo del flujo de potencia operado por este enlace, en combinación con un sistema DAG implementado sobre el PE Pampa. Con ello, el PE no debe superar los 46 MW de potencia generada cuando existen vientos superiores al cuartil 2. Esto se logra desconectando, en forma escalonada, módulos de 2 MW de aerogeneradores (ver figura 5 b y tabla 3).

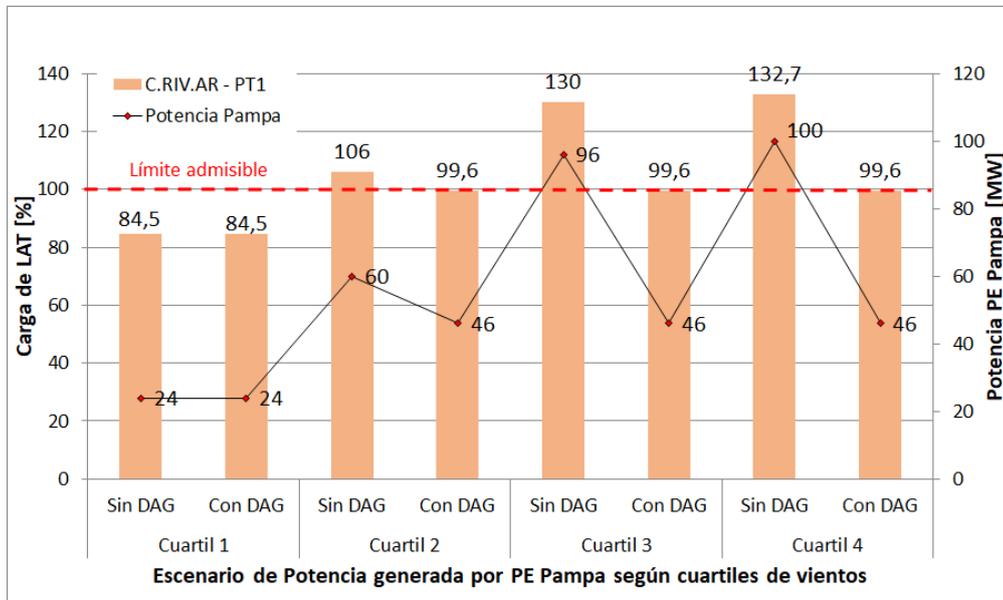


Figura 5. Comparación del estado de carga de LAT C.RIV.AR-PT1 para situaciones de despacho del PE Pampa con y sin implementación de DAG

Con motivo de evaluar el ingreso del PE Pampa para escenarios de demanda mayores, se realiza un análisis de sensibilidad para obtener el módulo de potencia admisible a inyectar por el PE en las situaciones que presenten niveles de potencia disponible iguales o mayores al cuartil 2 (es decir 60 MW). Se realizan incrementos sucesivos de 10 MW en la demanda del subsistema en estudio, hasta alcanzar su potencia de pico (350 MW). Los resultados obtenidos, presentados en la figura 6 y en la tabla 4, demuestran que para los primeros tres incrementos de demanda del sistema es necesario contar con esquema DAG. Luego, a partir de una demanda del subsistema superior a los 265 MW, la potencia generada por el PE, para el cuartil 2, no representa sobrecarga en la LAT ni en ninguno de los equipamientos del sistema, por lo que no es necesario recortar generación. Estos resultados permiten inferir que, a medida que se incrementa la demanda, la potencia generada por el PE Pampa es consumida mayormente en el propio corredor radial Diadema-Cerro Negro, reduciendo entonces la evacuación de potencia del PE por el enlace crítico C.RIV.AR-PT1.

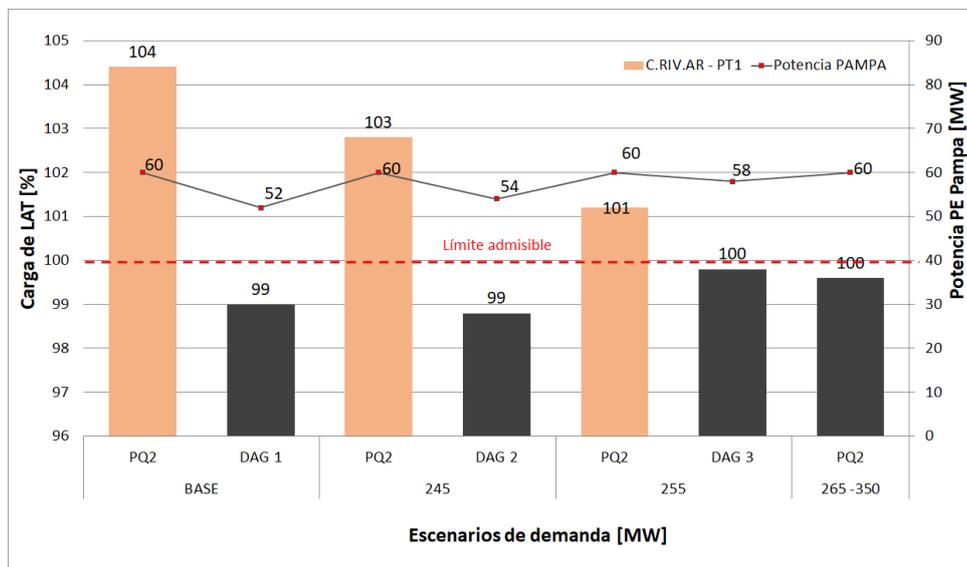


Figura 6. Despacho de generación en escenario de valle: con y sin DAG en PE Pampa.

### 3.2. Ingreso conjunto de PEs al SADI – Condición de red N

Tal como se procedió para el análisis de la inserción de los PE individualmente el SADI, en este caso, se evalúa la inserción en conjunto de los PEs Pampa, Kosten y Diadema, debido a que evacúan su potencia de generación por la misma LAT crítica estudiada con anterioridad. Además, ambos se encuentran a distancias menores a 50 km, por lo cual sus niveles de potencia inyectada a la red pueden tener un alto índice de correlación, en función a los perfiles de vientos que se desarrollan en la región.

En primera instancia, se despacha el conjunto de PE en escenario de valle y de pico, considerando cuatro casos de nivel de potencia generada según los cuartiles  $P_{Q1}$ ,  $P_{Q2}$ ,  $P_{Q3}$  y  $P_{Q4}$  obtenidos en la Tabla 2.

Los resultados se observan en la figura 7, donde se destaca que el escenario de valle es el más crítico debido a la sobrecarga en la LAT C.RIV.AR-PT1. En dicho escenario, para vientos correspondientes al cuartil 2, la sobrecarga de la LAT aumenta considerablemente en relación al despacho individual del PE Pampa, alcanzando niveles del orden al 127%. A medida que se incrementa la potencia de despacho (cuartiles 3 y 4), la LAT incrementa los niveles de sobrecarga, alcanzando niveles cercanos al 200% cuando los PE generan a plena potencia.

En el escenario de pico de demanda, los resultados son similares, pero menos significativos, ya que comienzan a sobrecargar la LAT a partir del cuartil 3 y alcanzan una sobrecarga de 130% a plena potencia.

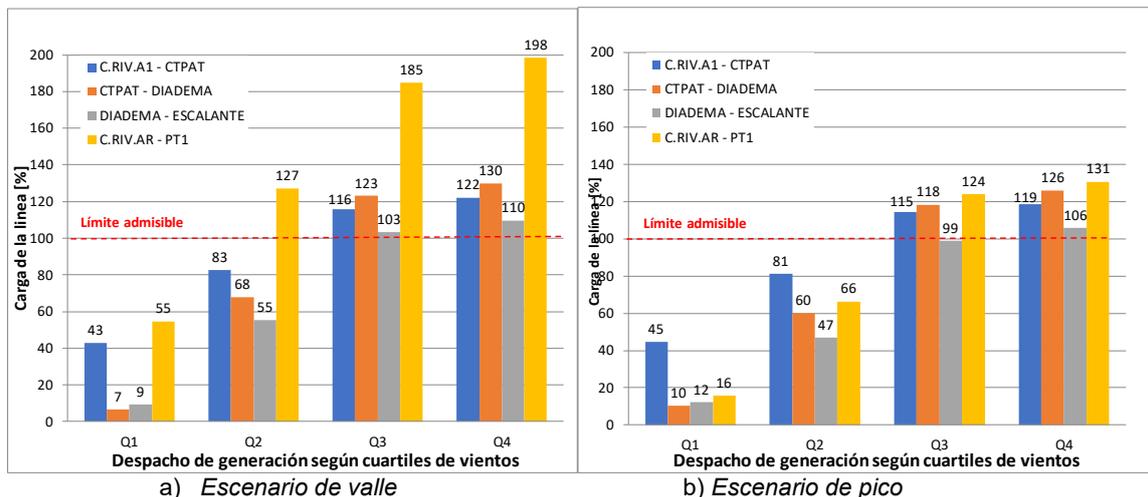


Figura 7. Estado de carga de LATs

En síntesis, para condiciones de vientos del cuartil 2 en adelante, el sistema alcanzaría condiciones inadmisibles de operación, por lo que es necesario recortar generación mediante un sistema DAG.

Para encontrar los módulos de generación necesarios a recortar, se aplica la misma metodología utilizada en el despacho individual del PE Pampa.

Como “caso Base” del análisis se considera el escenario valle de demanda, con un despacho del conjunto de PEs correspondiente al cuartil 2, debido a que en el mismo se producen las primeras restricciones de operación en la red.

En este caso, los recortes de potencia del conjunto PEs en estudio deben considerar que en la zona de influencia se encuentra operativo el PE Manantiales Behr de 96 MW de potencia nominal, que debido a su existencia previa a la concreción de los PEs RENOVAR, se asume una prioridad de despacho del mismo. Por lo tanto, las estrategias de recorte de potencia se proponen solo para el conjunto de PE a ingresar en la red, sin alterar el estado de generación del PE Manantiales Behr, que tiene la particularidad de entregar potencia al sistema y canalizarla por la misma LAT crítica en estudio y, por ende, el recorte de generación del conjunto dependerá también de la potencia que aporta este PE.

Los resultados obtenidos del análisis de sensibilidad a partir de los incrementos discretos de 10 MW de demanda del subsistema Patagónico, muestran para el escenario de base, que la potencia del conjunto de PE debe ser igual a 56 MW, de un total de 96 MW disponibles, es decir que se deben recortar 42 MW (ver figura 8). El recorte de potencia se realiza de manera proporcional a la potencia nominal de cada PE (ver tabla 4). Se observa que a medida que incrementa la demanda del subsistema, la brecha entre la potencia disponible del conjunto de PEs y la potencia que es posible inyectar sin producir sobrecargas, es cada vez menor, alcanzando diferencias de 10 MW para el escenario de máxima demanda del subsistema (350 MW).

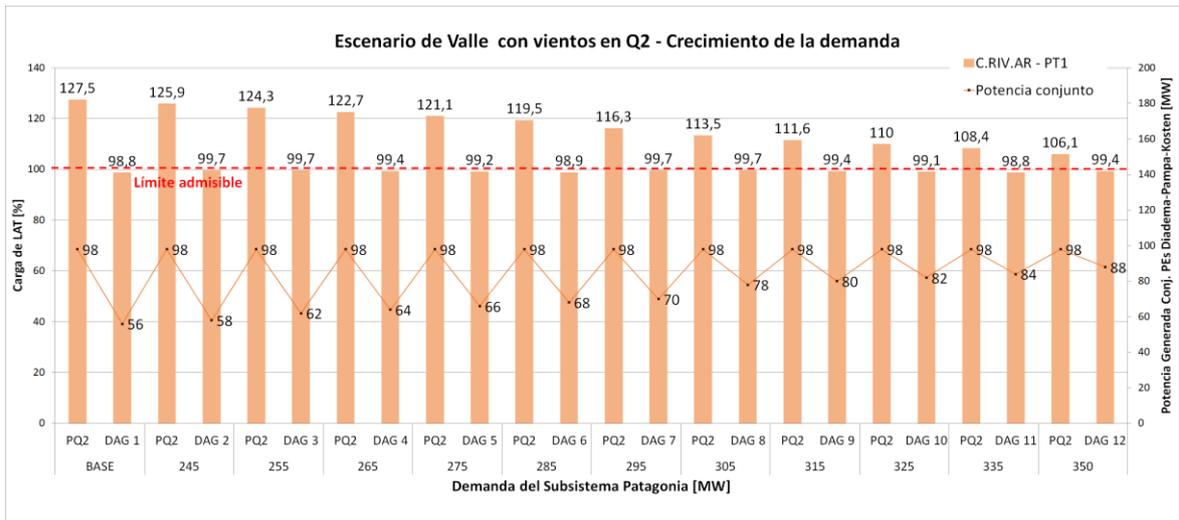


Figura 8. DAG del conjunto de PE para distintos escenarios de demanda del sistema.

Tabla 4 Nivel de DAG a implementar para cada PE para distintos escenarios de demanda con red N

Nombre del PE	DESPACHO DE GENERACIÓN DE PE											
	DAG 1	DAG 2	DAG 3	DAG 4	DAG 5	DAG 6	DAG 7	DAG 8	DAG 9	DAG 10	DAG 11	DAG 12
Pampa	38	38	40	42	42	42	48	50	50	50	52	54
Kosten	6	8	8	8	8	10	10	10	12	12	12	14
Diadema	12	12	14	14	16	16	16	18	18	20	20	20
<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>58</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>66</b>	<b>68</b>	<b>74</b>	<b>78</b>	<b>80</b>	<b>82</b>	<b>84</b>	<b>88</b>

### 3.3. Ingreso conjunto de PEs al SADI – Condición de red N-1

En condiciones de emergencia de la red, se analizan aquellas fallas de LATs que conllevan a la operación radial del sistema, inicialmente con configuración anillada. Por el contrario, se omiten aquellas fallas que ocasionan condiciones de isla de algunos nodos, en redes con topología radial. De acuerdo a este criterio, se realizan simulaciones de flujos de carga para situaciones de falla en el corredor de 132 kV C.RIV.AR-GARAYALDE-AMEGINHO, para lo cual el tramo C.RIV.AR-CT PAT-GARAYALDE queda operando de forma radial, canalizando el flujo de potencia del conjunto de PEs por la línea crítica “C.RIV.AR - PT1”. Cabe destacar que la potencia inyectada por los PEs Diadema, Pampa y Kosten se corresponde con la obtenida con implementación de los sistemas DAG, en condiciones de red normal (ver tabla 4).

La determinación de la máxima potencia admisible a despachar por el conjunto de PE en situaciones de contingencia se realiza a partir del escenario valle de demanda, incrementando la demanda de potencia del sistema en escalones de 10 MW hasta alcanzar la potencia de pico.

Los resultados obtenidos presentados en la figura 9 muestran que la potencia máxima del conjunto de PE en condición de red N-1, resulta significativamente inferior que en condición N, dado que ante la salida de servicio de alguno de los tramos de LAT del corredor C.RIV.AR-GARAYALDE-AMEGHINO, todo el flujo de potencia generado por los PE debe evacuarse a través de la línea C.RIV.AR-PT1 y esto hace indispensable que se actúe sobre DAG para no sobrecargar la línea.

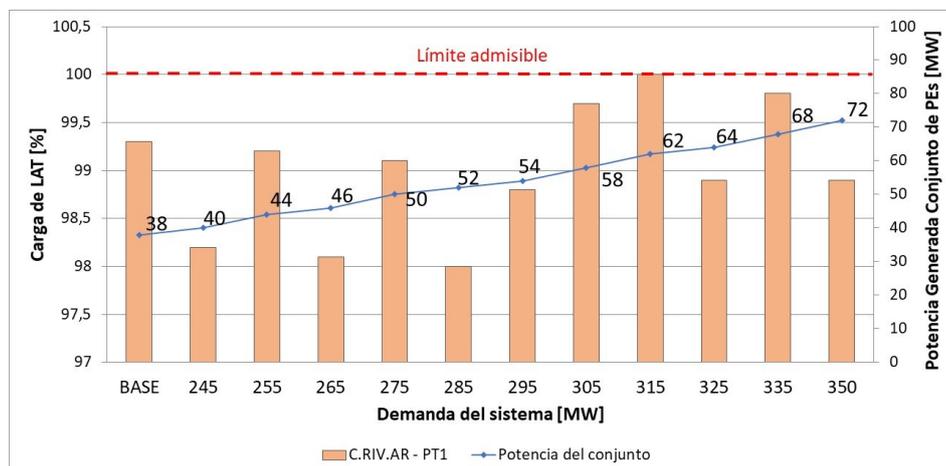


Figura 9. DAG en condición de N-1 para distintos escenarios de demanda del sistema.

A continuación, en la tabla 6 se muestran los niveles de DAG requeridos en cada PE para condición de N-1 y para distintos escenarios de demanda del sistema.

Tabla 5 Nivel de DAG a implementar para cada PE para distintos escenarios de demanda con red N-1

Nombre del PE	DESPACHO DE GENERACIÓN DE PE											
	DAG 1	DAG 2	DAG 3	DAG 4	DAG 5	DAG 6	DAG 7	DAG 8	DAG 9	DAG 10	DAG 11	DAG 12
Pampa	28	30	30	32	34	34	36	40	40	42	44	46
Kosten	4	4	6	6	6	8	8	8	8	8	10	10
Diadema	6	6	8	8	10	10	10	10	14	14	14	16
<b>Total</b>	<b>38</b>	<b>40</b>	<b>44</b>	<b>46</b>	<b>50</b>	<b>52</b>	<b>54</b>	<b>58</b>	<b>62</b>	<b>64</b>	<b>68</b>	<b>72</b>

#### 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha desarrollado una metodología para evaluar el ingreso individual y conjunto de PE en una región eléctrica “exportadora de energía”, caracterizada por redes de transmisión de 132 kV de gran extensión, con topologías de operación mayormente radial y circuitos de alta impedancia. Los resultados obtenidos de los estudios eléctricos permiten inferir que, el aporte de potencia de los PEs al sistema ocasionan problemas de sobrecargas en líneas y/o perfiles de tensión fuera de los rangos admitidos, que obstaculizan su acceso a la red.

Entonces, para lograr la normalización de los perfiles de tensión de los nodos de la red se requieren ajustes en las curvas de capacidad de los PEs con mayor regulación de potencia reactiva con respecto a las exigidas por CAMMESA. Por otra parte, a los fines de evitar sobrecargas en las líneas de la red, se requiere el diseño de esquemas de DAG, para los escenarios más exigentes, que se establecen ante condiciones de bajos niveles de demanda y elevado aporte de generación eólica.

En estudios próximos se analizará el impacto en conjunto de todos los PEs en el subsistema considerando escenarios de mayor exigencia, buscando encontrar la reserva rodante que debería tener el sistema en caso de contingencias.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M., Wagner, N., Gorini, R. (2019). “The role of renewable energy in the global energy transformation”. *Energy Strategy Reviews*, Volume 24, Pages 38-50.
- [2] IRENA (2019). “Renewable power generation costs in 2018”. *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.
- [3] IRENA (2019). “Future of wind: Deployment, investment, technology, grid integration and socio-economic aspects (A Global Energy Transformation paper)”. *International Renewable Energy Agency*, Abu Dhabi.
- [4] E&Y (2019). “Renewable Energy Country Attractiveness Index (recai)”. *EY Global Power & Utilities Corporate Finance Leader*, United Kingdom
- [5] Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2016). “Resolución N° 71-2016: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 1”.
- [6] Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017). “Resolución N° 275-2017: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 2”.
- [7] Ministerio de Energía y Minería de la nación (2016). “Resolución N° 252/2016: Convocatoria Programa RenovAar Ronda 1.5”.
- [8] CAMMESA (2014). “Anexo 4: Control de tensión y despacho de potencia reactiva”. *Los Procedimientos de CAMMESA*, Pérez.
- [9] Lopez Villarubia, M. (2012). *Ingeniería de la Energía Eólica*. Marcombo, Volumen 5 de la Colección Nuevas energías, ISBN 8426718566.
- [10] CAMMESA (2014). “Procedimiento Técnico N° 1: Estudios requeridos para la presentación de la solicitud de acceso y ampliaciones al sistema de transporte”. *Los Procedimientos de CAMMESA*, Pérez.
- [11] CAMMESA (2014). “Anexo 40: Generación eólica”. *Los Procedimientos de CAMMESA*, Pérez.

# HIDRÓGENO VERDE A PARTIR DE RESIDUOS AGROINDUSTRIALES

Dietrich Nadia<sup>1</sup>, Airasca Ariel<sup>2</sup>, Campaña Horacio<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup> Universidad Tecnológica Nacional-Facultad Regional Bahía Blanca –  
Argentina

E-mail: hcampana@frbb.utn.edu.ar

## RESUMEN.

En Argentina, la producción agroindustrial de peras y manzanas genera desechos orgánicos (bagazo), que pueden ser altamente contaminantes si no son dispuestos correctamente. La digestión anaeróbica es una alternativa para resolver el tratamiento de distintos residuos orgánicos, convirtiéndolos parcialmente en energía limpia. En este trabajo se evaluó la generación de biohidrógeno mediante fermentación oscura (termofílica) a partir de codigestión de estiércol bovino con dos tipos distintos de bagazos (pera y manzana). En forma preliminar, en los reactores de bagazo de manzana en comparación con los reactores de bagazo de pera, se midió una diferencia de más del 50 % del volumen generado de hidrógeno durante la primera etapa de la codigestión anaeróbica (acidogénesis-acetogénesis).

**Palabras claves:** Biohidrógeno, Residuos Agroindustriales, Bagazo, Fermentación Oscura.

**Área Temática:** ENERGÍAS SUSTENTABLES: Energías Alternativas y Sustentabilidad; Fuentes de Energía Renovable; Bioenergía; Hidrógeno.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN.

En los últimos años, ha adquirido importancia el reemplazo de la energía proveniente de combustibles fósiles por fuentes renovables, por ejemplo, mediante el uso de la digestión anaeróbica de residuos agroindustriales, obteniéndose subproductos de valor agregado, tales como biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ), además de biol y digesto con valor agronómico. La producción de biohidrógeno ha adquirido mayor interés por tratarse de un tipo de energía cuya utilización no genera gases de efecto invernadero, y puede obtenerse a partir de biomasa [1]. En Argentina, una zona de producción de frutas se localiza en la región de los valles norpatagónicos (provincias de Río Negro y Neuquén). En el año 2021, la producción de pera fue de 594.263 toneladas y la producción de manzana fue de 497.643 toneladas [2], generando aproximadamente un 20% de residuos (especialmente en la elaboración de jugos). La tecnología de tratamiento anaeróbico es sustentable, y resuelve el pasivo económico y ambiental que supone la generación y gestión de residuos agroindustriales. El proceso de digestión anaeróbica está formado por etapas consecutivas, cuyos productos gaseosos finales son metano y dióxido de carbono. La producción microbiológica de hidrógeno es característica de la primera etapa de la digestión anaeróbica (acidogénica-acetogénica), mediante la vía de fermentación oscura (bacterias anaerobias facultativas y/o estrictas).

En este trabajo se investigaron los procesos de fermentación oscura midiendo las variaciones en la producción de biohidrógeno de la codigestión de dos tipos de bagazos (pera y manzana) y estiércol bovino.

## 2. METODOLOGÍA.

Se emplearon como sustratos: a) desechos de pera de variedad Packham's Triumph (bagazo), b) residuos de manzana de variedad Red Delicious, ambos obtenidos a partir de frutos con certificación y c) estiércol de origen vacuno. Todos los ensayos se realizaron por triplicado y la carga másica inicial de cada digestor fue 50 % bagazo (ya sea pera o manzana) y 50 % estiércol vacuno, con una concentración aproximada de 6-7 % de materia seca completando volumen con agua destilada. El pH inicial fue ajustado en 8.5 con solución de hidróxido de sodio. El modo de operación fue discontinuo (reactores "batch"), utilizando frascos de vidrio tipo Erlenmeyer de 2 litros (40% volumen libre) con válvulas para facilitar la operación y muestreo del proceso. El biogás generado por cada reactor fue almacenado en una probeta de vidrio graduada, que contenía una solución ácida (con indicador) midiendo volumen generado por desplazamiento líquido. Antes de la ejecución de los ensayos se realizó un barrido con nitrógeno gaseoso para desplazar el aire de los reactores. El tiempo de digestión fue de aproximadamente 48 horas y los reactores operaron en condiciones termofílicas (55 °C) en baño termostático. Dentro del mismo, los reactores se mantuvieron recubiertos para evitar la incidencia de la luz (fermentación oscura), con agitación manual discontinua. Las mediciones fisicoquímicas y técnicas analíticas fueron pH, conductividad eléctrica, materia seca (MS), materia orgánica (MO), sólidos volátiles (SV), nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo total (P total), demanda química de oxígeno (DQO), alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV), aplicadas a la caracterización de los sustratos y de los reactores, luego de la agitación y homogenización. La metodología de análisis se llevó a cabo según métodos estándar [3]: demanda química de oxígeno (5220D), nitrógeno total Kjeldahl (4500 N), fósforo total (4500P), materia seca (2540B), sólidos volátiles (2540E), pH (4500H+) y conductividad eléctrica (2510D). La materia orgánica se realizó por [15] y el carbono orgánico por [8]. Se realizó el fraccionamiento de la materia orgánica (FMO) mediante procedimientos ajustados al tipo de sustratos [4] y [5]. El FMO se divide en cuatro etapas que determinan las fracciones hidrosoluble, liposoluble, lignina y hemicelulosa/celulosa [4-5].

La caracterización de los reactores al final de cada ensayo incluyó DQO total y filtrada (mg/l), alcalinidad (mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ) y ácidos grasos volátiles (mg  $\text{CaCO}_3/\text{L}$ ). Durante cada ensayo se realizaron muestreos intermedios (cada 12 horas) midiendo los siguientes parámetros: pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles, volumen de gas generado (mL), temperatura del baño y temperatura de la muestra. La extracción de biogás para determinar composición se realizó con jeringa (septum de la probeta graduada). La composición de biogás fue determinada por medio de cromatógrafo gaseoso, Perkin Elmer Clarus 500 CG, con columna Hysep N 80/100-6' x 1/8" SS, y flujo de nitrógeno (19,0 PSI, flujo 25,0 mL/minuto). El detector de conductividad térmica operó a 130 °C, el horno a 65 °C, y la columna a 100 °C. Los ensayos experimentales se realizaron por triplicado. Este trabajo expone los resultados parciales de un estudio más completo sobre la generación de biohidrógeno, que constituye la tesis en desarrollo ("Pretratamiento de residuos agroindustriales en procesos de digestión anaeróbica con generación de biohidrógeno" (Res. CSU UTN N° 2318/2018)). El análisis estadístico de los resultados se incluirá en el trabajo final de tesis. Por lo tanto se presentan aquí los valores promedio y las desviaciones estándar, sin incluir test de hipótesis y significación de diferencias.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En la Tabla 1, se describe la caracterización fisicoquímica de estiércol, bagazo de pera y bagazo de manzana. El bagazo de pera y bagazo de manzana presentan valores similares de pH, conductividad, materia seca, materia orgánica, carbono orgánico, sólidos volátiles, NTK y fósforo total, encontrado por otros autores [10]. Según la Tabla 1, se puede observar que el bagazo de manzana presenta mayor contenido de la fracción hidrosoluble (73,86 %) y menor porcentaje de la fracción celulosa/hemicelulosa (18,76 %). En comparación con el bagazo de pera que presenta valores de la fracción hidrosoluble y la fracción celulosa/hemicelulosa aproximadamente del 47,00 %. El contenido de sólidos volátiles está relacionado con los compuestos solubles de la fracción hidrosoluble, mientras que las fracciones de celulosa/hemicelulosa y lignina están formada por compuestos recalcitrantes más difíciles de degradar por los microorganismos. Los valores de pH, conductividad, sólidos volátiles, materia seca, NTK y fósforo total de estiércol son similares con los parámetros encontrados por otros investigadores [6]. Debido al alto contenido de humedad en los residuos de pera (84,40 %) y manzana (84,30 %), se pueden considerar como sustratos altamente biodegradables, y candidatos óptimos en la producción de biogás [7]. El contenido de sólidos volátiles es similar en el bagazo de pera (97,60 %) y de manzana, (98,28 %), pero en el estiércol es menor (59,20 %).

Tabla 1. Caracterización de estiércol, y bagazo de pera, bagazo de manzana

Parámetro	Unidades	Estiércol	Bagazo Pera	Bagazo Manzana
pH	-	7,17 (0,22)	4,04 (0,05)	4,41 (0,22)
Conductividad	mS/cm	1,95 (0,81)	0,80 (0,18)	0,63 (0,02)
Materia orgánica (MO)	% MS	58,17 (5,51)	97,38 (0,43)	98,24 (1,50)
Carbono orgánico	% MS	33,74 (3,20)	56,48 (0,32)	56,98 (0,87)
Sólidos Volátiles (SV)	% MS	59,12 (6,92)	97,60 (0,23)	98,28 (1,22)
Nitrógeno total (NTK)	% MS	0,26 (0,046)	0,21 (0,046)	0,23 (0,046)
Fósforo total	mg PO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /g MS	2,67 (0,05)	0,38 (0,01)	0,675 (0,01)
Materia seca (MS)	%	18,72 (5,47)	15,59 (1,11)	15,73 (1,64)
F. Hidrosoluble	% MS	8,40 (1,05)	47,20 (17,20)	73,86 (4,23)
F. Liposoluble	% MS	4,85 (1,38)	5,35 (1,69)	7,37 (0,48)
F. Celulosa-Hemicelulosa	% MS	54,83 (8,89)	47,35 (18,85)	18,76 (4,73)
F. Lignina	% MS	31,92 (9,21)	0,20 (0,10)	0,15 (0,07)

(DS) Valores de desviación estándar

Los parámetros iniciales y finales de los reactores PB (bagazo de pera) y MB (bagazo de manzana), luego del ensayo, no presentaron cambios para: materia orgánica, carbono orgánico, sólidos volátiles, materia seca y, NTK. Sin embargo, el fósforo total de los reactores MB aumentó (Tabla 2). Por otro lado, el pH final de los reactores PB y MB fue  $4,62 \pm 0,09$  y  $4,41 \pm 0,01$  respectivamente, lo cual indica que la acidificación observada durante los experimentos puede haber inhibido las bacterias productoras de hidrógeno [9].

La DQO filtrada es una medida indirecta de la materia orgánica soluble que puede ser biodegradada por los microorganismos. Se puede observar en la Tabla 2 la DQO filtrada removida fue mayor en los reactores MB (41,62 %), que en reactores PB (15,05 %). Esto puede deberse a que la fracción hidrosoluble en el bagazo de manzana fue mayor que en el de pera, el cual se encuentra formado por azúcares solubles, pectinas, compuestos fenólicos, etc. [10].

Tabla 2. Caracterización de reactores anaeróbicos PB y MB

Parámetro	Unidades	PB inicial	PB final	MB inicial	MB final
pH	-	8,50 (0,01)	4,62 (0,01)	8,50 (0,01)	4,41 (0,09)
Conductividad	mS/cm	2,10	2,90	1,71	1,70
Materia orgánica	% MS	69,86 (11,00)	71,73 (11,00)	76,27 (11,00)	71,10 (11,00)
Carbono orgánico	% MS	40,52 (6,38)	41,61 (6,38)	44,24 (6,38)	41,24 (6,38)
Sólidos Volátiles	% MS	70,49 (11,00)	72,17 (11,00)	76,84 (11,00)	71,80 (11,00)
Materia seca	%	7,33 (1,22)	6,85 (1,22)	6,54 (1,22)	3,77 (1,22)
Nitrógeno total (NTK)	% MS	0,40 (0,046)	0,39 (0,046)	0,67 (0,046)	0,83 (0,046)
DQO filtrada	mg/L	38300 (3613)	32533 (2294)	39000 (3679)	22767 (2221)
Fósforo total	mg $PO_4^{2-}$ /g MS	5,29 (0,11)	5,58 (0,11)	3,82 (0,08)	7,16 (0,14)
Alcalinidad	mg $CaCO_3$ /L	923,40(277,00)	n/d	2255,00(767,00)	n/d
Ácidos Grasos Volátiles	mg $CaCO_3$ /L	1463,40 (424,74)	4390,20 (1274,52)	975,60 (283,06)	1869,90 (524,9)

Observaciones: PB(pera bagazo) MB(manzana bagazo) DS(Desviación Estándar)

En los reactores PB se obtuvo una producción promedio máxima de gas de  $1057 \pm 100$  mL, con un pH promedio de  $5,17 \pm 0,09$ , a 23,5 horas del inicio del ensayo. En la Figura 1, los reactores MB tuvieron mayor producción promedio de gas de  $1657 \pm 110$  mL con pH promedio  $5,40 \pm 0,01$  (período de tiempo similar).

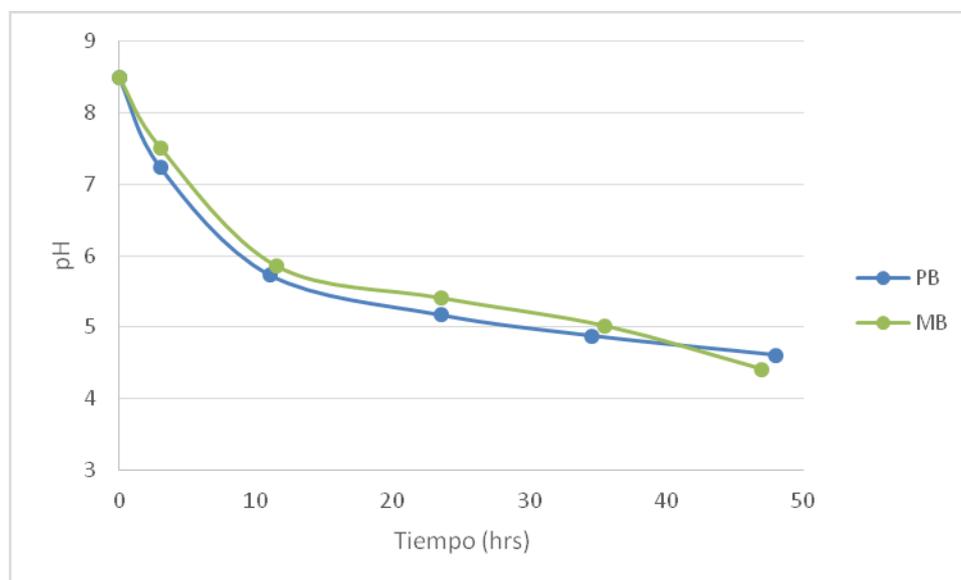


Figura 1. Variación temporal (promedio) de pH de reactores PB y MB. Observaciones: PB(pera bagazo) MB(manzana bagazo)

En los reactores MB el volumen acumulado promedio de biogás producido fue de  $4480 \pm 390$  mL, más de 50 % mayor que en los reactores PB ( $2297 \pm 197$  mL) (Figura 2). La composición del biogás en las primeras horas de operación de los digestores fue exclusivamente dióxido de carbono. En los muestreos siguientes, el contenido de hidrógeno en el biogás alcanzó  $28 \pm 17$  % (PB), y  $36 \pm 13$  % (MB), completando la composición el dióxido de carbono, sin presencia detectable de metano en ninguno de los casos.

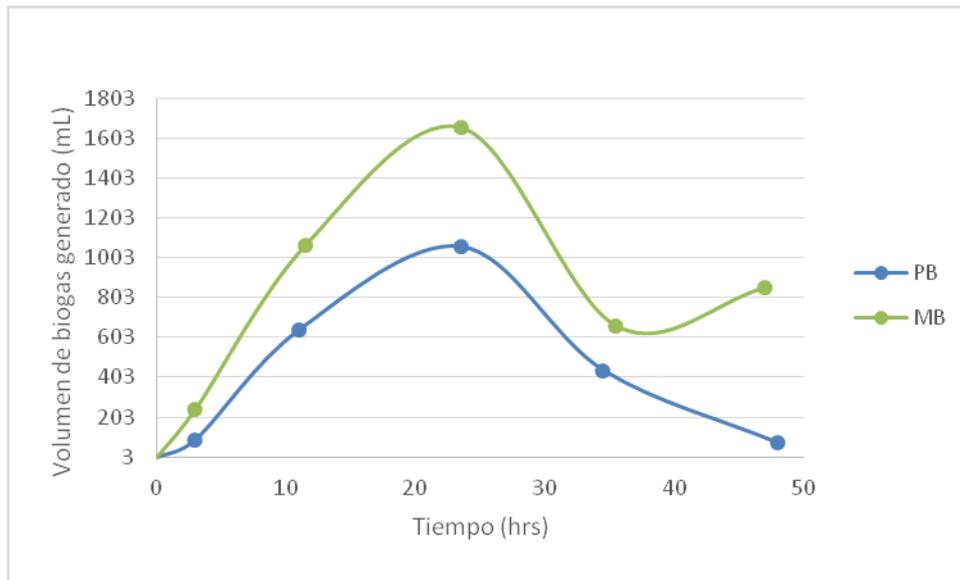


Figura 2. Variación temporal (promedio) del volumen de biogás generado en reactores PB y MB. Observaciones: PB(pera bagazo) MB(manzana bagazo)

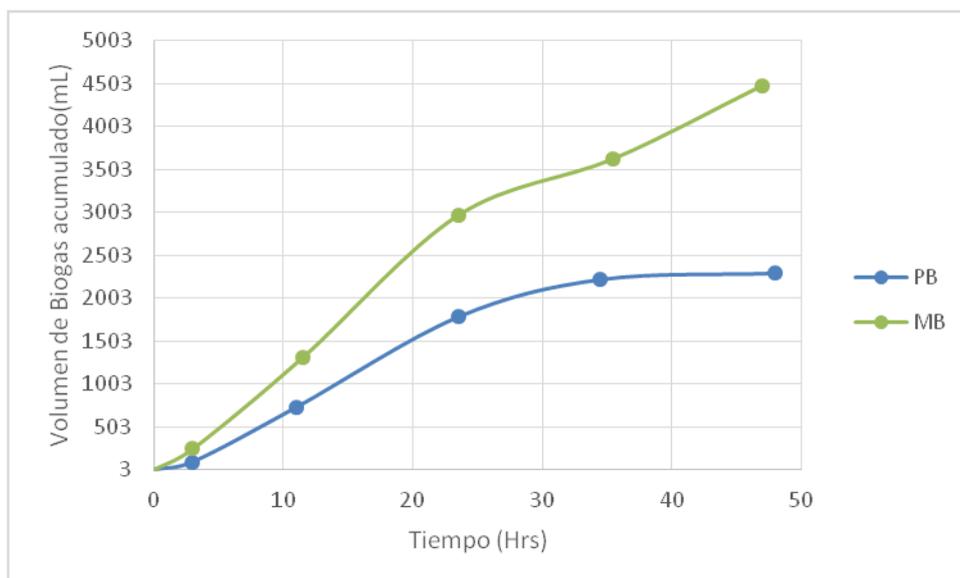


Figura 3. Variación temporal (promedio) del Volumen de biogás acumulado generado en reactores PB y MB. Observaciones: PB(pera bagazo) MB(manzana bagazo)

En el proceso de digestión anaeróbica bajo estudio, las bacterias acidogénicas consumieron los carbohidratos solubilizados, generando hidrógeno, dióxido de carbono y sustancias orgánicas en forma de ácidos grasos volátiles (ácidos acético, butírico, propiónico, láctico, entre otros) como productos finales [11,12], que disminuyen el pH y puede causar efectos inhibitorios en las bacterias productoras de hidrógeno [13]. En los procesos anaeróbicos, los dos principales factores que afectan el pH son los contenidos de ácido carbónico y de ácidos grasos volátiles. El pH y la capacidad buffer en un sistema anaeróbico es completamente dependiente del equilibrio entre el gas carbónico y el bicarbonato que regula la concentración del ion hidrógeno [14]. Por lo tanto, los reactores MB presentaban mayor concentración de alcalinidad total en el inicio de los ensayos, lo cual le brindaba al sistema la capacidad de amortiguar el aumento de acidez debido a la generación de ácidos grasos volátiles. Por otro lado, en la finalización de los ensayos de los reactores PB, no se detectaron valores de alcalinidad total, pero sí se hallaron valores altos de ácidos grasos volátiles, por lo que los reactores no pudieron amortiguar la caída del pH de igual manera que los reactores MB.

### 3. CONCLUSIONES.

De los resultados obtenidos se concluyó que los reactores con bagazo de manzana alcanzaron mayor conversión en hidrógeno durante la primera etapa de codigestión anaeróbica, en comparación con los reactores con bagazo de pera. Los residuos de manzana son sustratos con alta concentración de compuestos biodegradables por microorganismos, y menor contenido de la fracción celulosa/ hemicelulosa de características recalcitrantes. Por otro lado, la codigestión de estiércol con residuos de manzana permitió mayor capacidad tampón para amortiguar los cambios de pH que ocurran dentro de los reactores.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] NTAIKOU I., ANTONOPOULOU G., LYBERATOS G. Biohydrogen Production from Biomass and Wastes via Dark Fermentation: A Review. *Waste Biomass Valor* v.1, p.21-39, 2010. doi:10.1007/s12649-009-9001-2.
- [2] SENASA. Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria. Mensuario Estadístico Frutícola Senasa Centro Regional Patagonia Norte, febrero de 2022. Página web: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mensuario\\_estadistico\\_fruticola\\_-\\_febrero\\_de\\_2022\\_-\\_senasa\\_centro\\_regional\\_patagonia\\_norte.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/mensuario_estadistico_fruticola_-_febrero_de_2022_-_senasa_centro_regional_patagonia_norte.pdf) (consultado 5 de setiembre 2022)
- [3] APHA, AWWA and WPCF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21st Edition, American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation, Washington DC, 2005.
- [4] KONONOVA M.M. Soil Organic Matter. Its nature, its role in soil formation and in soil fertility, p 49-51. Pergamon Press, Oxford, 1961.
- [5] STEVENSON F.J. Gross Chemical Fractionation of Organic Matter In: Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. C.A. Black, D.D. Evans, L.E. Ensminger & F.E. Clark. (ed.) American Society of Agronomy. Madison, WI., p 1409-1414, 1965.
- [6] PETTYGROVE G.S., HEINRICH A.L., EAGLE A.J. (2010). *Dairy Manure Nutrient Content and Forms. Manure Technical Guide Series. University of California Cooperative Extension. Disponible en: <http://manuremanagement.ucdavis.edu/> (Fecha de Consulta: 5 de setiembre 2022)*
- [7] GARCIA-PEÑA, E. I., PARAMESWARAN, P., KANG, D. W., CANUL-CHAN, M., & KRAJMALNIK-BROWN, R. (2011). Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: process and microbial ecology. *Bioresource technology*, 102(20), 9447-9455.
- [8] VAN BEMMELEN, J. M. (1890). Über die Bestimmung des Wassers, des Humus, des Schwefels, der in den colloidalen Silikaten gebundenen Kieselsäure, des Mangans usw im Ackerboden. *Die Landwirthschaftlichen Versuchs-Stationen*, 37(279), e290.
- [9] LIN, P. Y., WHANG, L. M., WU, Y. R., REN, W. J., HSIAO, C. J., LI, S. L., & CHANG, J. S. (2007). Biological hydrogen production of the genus Clostridium: metabolic study and mathematical model simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(12), 1728-1735.
- [10] MALHI, N., CARRAGHER, J., SAARELA, M., & PAHL, S., (2021). A review of opportunities to recover value from apple and pear pomace. <https://fightfoodwastecrc.com.au/wp-content/uploads/2020/09/final-report.pdf> (página web consultada 24 de mayo 2022)
- [11] PAVLOSTATHIS, S. Kinetics and Modeling of Anaerobic Treatment and Biotransformation Processes. *Comprehensive Biotechnology (Second Edition)*. Burlington: Academic Press, 2011.
- [12] HALLENBECK P. Chapter 2 - Fundamentals of Biohydrogen. In: LARROCHE, A. P.-S. C. C. H. (ed.) *Biohydrogen*. Amsterdam: Elsevier, 2013.
- [13] SOARES J., CONFORTIN T., TODERO I. & DIAS MAYER, F. & MAZUTTI, M. Dark fermentative biohydrogen production from lignocellulosic biomass: Technological challenges and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v.117, 2019. 109484. 10.1016/j.rser.2019.109484.
- [14] RITTMANN B.E., MCCARTY P.L. *Biología del medio ambiente. Principios y Aplicaciones*. McGraw Hill. España, 2001.
- [15] DAVIES, B. E. (1974). Loss-on-ignition as an estimate of soil organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, 38(1), 150-151`

# TÚNEL DE VIENTO

Attorresi, Luciano (Autor 1)<sup>a</sup>; Febrino, Giannina (Autor 2)<sup>b</sup>; Taccone, Vera (Autor 3)<sup>c</sup>; Oviedo, Natalia (Autor 4)<sup>d</sup>; Boro, Drissa (Autor 5)<sup>e</sup>; Ponzoni, Lucio (Autor 6)<sup>f</sup>

a Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

b Universidad Nacional de Tres de Febrero

c Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

d Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

e UNTREF-CNEA- Université Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso

f CNEA – UNTREF – Universidad Nacional de San Martín

latorresi@untref.edu.ar

## RESUMEN.

La eficiencia de funcionamiento de un aerogenerador depende, principalmente, de las características propias de los de la zona en la cual se va a instalar. Dichas características se definen mediante modelos estadísticos en base a las mediciones realizadas y se denominan “curvas de viento”. Es importante entonces, que al diseñar el aerogenerador se tengan en cuenta la curva de viento de esa zona. En este trabajo, se presentan las características de un túnel de viento desarrollado para la prueba de aerogeneradores de baja potencia que permitirá, determinar en forma económica y simple, no solo la curva característica del aerogenerador y la potencia generada para diferentes curvas de viento, sino también, hacer los ajustes de diseño necesarios con el objeto de maximizar la potencia extraída para su instalación en distintas regiones de Argentina con diferentes curvas de viento. Además, permitirá realizar una comparación entre distintos modelos, variando determinados parámetros de diseño para evaluar la influencia de los mismos en la performance del aerogenerador. El túnel de viento constituirá una herramienta fundamental para el desarrollo nacional de aerogeneradores de baja potencia en el país.

**Palabras Claves:** Túnel de viento de baja velocidad, Aerogenerador, Curva de viento.

**Área Temática:** Generación distribuida de electricidad. Energía y medio ambiente.

**Categoría del Trabajo:** Estudiantes de grado.

## 1. INTRODUCCIÓN

El túnel de viento es una herramienta experimental que sirve para estudiar el comportamiento dinámico, cinemático o estático de un objeto inmerso en un fluido. Se trata de una sección en la cual se genera un flujo de aire controlado que permite recrear las condiciones reales que experimentará un objeto, que puede estar modelado a escala.

La importancia de los túneles de viento radica en que se trata de instrumentos precisos y rápidos para realizar investigaciones aerodinámicas y obtener datos empíricos para respaldar las decisiones de diseño del objeto en cuestión con un considerable ahorro económico.

Los túneles de viento tienen un amplio rango de aplicación, suelen utilizarse para llevar a cabo ensayos aeronáuticos, arquitectónicos, energías renovables, ambiente, entrenamiento deportivo e investigación, entre otros. Existen múltiples clasificaciones de los túneles de viento, teniendo en cuenta distintos parámetros, por ejemplo, a partir de la velocidad de operación y la geometría del túnel.

### 1.1 Velocidad de operación.

Según la velocidad alcanzada en la cámara de prueba y expresada en función del número de Mach.

$$Ma = V/V_{\text{sonido}} \quad (1)$$

Tabla 1: *clasificación de túneles de viento a partir de la velocidad en la sección de prueba.*

Numero de Mach	Clasificación
$Ma < 0,8$	Subsónicos
$0,8 < Ma < 1,2$	Transónicos
$1,2 < Ma < 5$	Supersónicos
$5 < Ma$	Hipersónicos

El motivo principal para realizar la clasificación por número de Mach radica en su relación con los efectos de compresibilidad de un gas. Para flujos subsónicos, se considera al fluido incompresible, en cambio, en flujos transónicos y supersónicos, deben considerarse los efectos de compresibilidad. Finalmente, en flujos hipersónicos se hacen consideraciones adicionales para el estado químico del gas.

Al mismo tiempo es importante definir el número de Reynolds que se podrá alcanzar dentro del túnel de viento. Este número adimensional es una cuantificación relativa entre los efectos inerciales (momentum del fluido) y los efectos de fricción del fluido. Son estos últimos los que controlan esencialmente el desempeño del perfil, ya que dictan el arrastre y limitan la máxima sustentación en el perfil.

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (2)$$

Siendo: D: el diámetro hidráulico, V la velocidad del fluido y  $\nu$  la viscosidad cinemática del fluido.

### 1.2 Geometría del túnel.

Existen dos clasificaciones teniendo en cuenta la estructura del túnel, por tipo de retorno y la estructura de la sección de prueba.

El retorno puede ser abierto o cerrado. Para el caso del retorno abierto, el flujo ingresa al túnel directamente de la atmósfera. El flujo es acondicionado y uniformado en la sección de entrada. Después se acelera en una contracción donde a la vez pierde presión y desemboca en la sección de prueba. A continuación, se encuentra un difusor que devuelve el aire a la atmósfera a través de la sección de salida. Generalmente encontramos la sección impulsora después de la cámara de ensayos para evitar la interferencia de éste con el flujo.

En cuanto a la configuración de retorno cerrado, el flujo en el interior del túnel se encuentra aislado de la atmósfera, contenido en un circuito cerrado.

La segunda clasificación refiere a la estructura de la sección de prueba. Esta puede ser de cámara abierta o cerrada. El primer tipo de cámara de prueba se encuentra abierta directamente a la atmósfera. De esta forma se reducen los errores debidos a la proximidad de las paredes al modelo y su interferencia con el flujo. Sin embargo, se conoce a partir de túneles existentes que este tipo de configuración puede ser más ruidosa y provocar inestabilidad en el flujo. El segundo tipo de cámara, la cámara de prueba se encuentra como continuación del mismo túnel y no está en contacto con la atmósfera. [6]

## 2. CONTEXTO

Varios países latinoamericanos, incluyendo Argentina, han suscripto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible del programa de las Naciones Unidas [1]. Por lo cual, fomentar la obtención de energía eléctrica a partir de fuentes renovables es una de las prioridades en la agenda gubernamental.

Argentina apunta a disminuir la brecha existente con otros países que se encuentran más avanzados en el uso de tecnologías alternativas para la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Actualmente, el desarrollo de dispositivos de generación de baja potencia comienza a vislumbrarse como un horizonte viable para la generación de energía eléctrica en zonas alejadas de las grandes urbes. Particularmente, la perspectiva en materia de energía eólica en Argentina es sumamente alentadora. Se estima que el potencial eólico patagónico, al sur del paralelo 42, encierra una energía decenas de veces mayor a la contenida en toda la producción anual argentina de petróleo. Asimismo, existen numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires, y en muchos otros sitios puntuales de todo el país [2].

Cuestiones como el tipo de aerogenerador, tipo de perfil a utilizar, las dimensiones del mismo, generador eléctrico, transmisión, etc dependen de las características del viento de la zona en el cual se va a instalar. Sin embargo, gran parte de los desarrollos nacionales en materia de aerogeneradores de baja potencia, guían sus esfuerzos en la construcción de la máquina, basando su diseño en la copia de otros aerogeneradores internacionales y delegando a un plano secundario, las características del viento para su diseño, básicamente debido a la falta de infraestructura y complejidad ingenieril que requieren el desarrollo de este tipo de máquinas, y que muchas veces las PyMEs o fabricantes locales carecen. Consecuentemente, muchos diseños no satisfacen las condiciones mínimas necesarias para un adecuado funcionamiento, operando solo en ciertos períodos del año o saliendo de funcionamiento por desperfectos de diseño; causando grandes pérdidas para todos aquellos que se benefician de este tipo de tecnología.

Una primera forma de mejorar la calidad de los aerogeneradores nacionales de baja potencia es crear un laboratorio de prueba, para que los mismos fabricantes puedan probar sus propios aerogeneradores y analizar algunos parámetros de funcionamiento como su curva de rendimiento. En este sentido, institutos nacionales se encuentran trabajando en la certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia, y desarrollando un laboratorio a cielo abierto ubicado en la provincia de Neuquén para probar su funcionamiento con las curvas de vientos que se encuentran en la provincia de Neuquén [3] [4].

Sin embargo, esto no es suficiente ya que, como ya se mencionó, el diseño de un aerogenerador y su performance, dependen básicamente de las características del viento, y actualmente no existe ningún laboratorio nacional desarrollado para que fabricantes nacionales, universidades y/o centros de investigación puedan probar sus diseños para diferentes condiciones.

Actualmente el grupo de investigación se encuentra trabajando en un laboratorio de prueba de aerogeneradores de baja potencia, de manera que éste sea un laboratorio referente a nivel nacional para la prueba y desarrollo de micro aerogeneradores.

Para ello se está trabajando en un método novedoso para la prueba de aerogeneradores de baja potencia basado en las siguientes tres etapas:

- I. Diseño y simulación asistida por computadora en aerogeneradores.
- II. Fabricación del modelo en escala mediante impresión 3D.
- III. Simulación del modelo en un túnel de viento preparado para la prueba de modelos de micro aerogeneradores.

Estas etapas, se desarrollan dentro de un proceso diseñado ad-hoc que permite determinar en forma económica y simple, no solo la curva característica del aerogenerador y la potencia generada para diferentes curvas de viento, sino hacer los ajustes/cambios de diseño necesario con el objeto de maximizar la potencia extraída del aerogenerador para su instalación en regiones de la Argentina con diferentes curvas de viento, brindando una herramienta fundamental para el desarrollo nacional de aerogeneradores de baja potencia en el país.

## 3. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es el diseño preliminar de un túnel de viento subsónico de tipo abierto y que trabaje a bajo número de Reynolds con el fin de estudiar microgeneradores evaluando sus parámetros mediante la utilización en SolidWorks®.

## 4. METODOLOGÍA

El túnel de viento se desarrolló para el ensayo de aerogeneradores de eje horizontal y vertical de baja potencia, diseñados dentro del marco del proyecto que lleva a cabo el grupo de investigación. El dispositivo permitirá corroborar de forma empírica los resultados obtenidos de modelos numéricos. Esta técnica, posibilitará la comparación entre distintos modelos, variando determinados parámetros de diseño para evaluar su influencia en la performance del aerogenerador.

En este caso, se ha optado por un túnel de viento de tipo abierto, ya que requiere de menor estructura y menores costos de construcción. Además, permite el intercambio directo con la atmósfera en caso de utilizar gases para la visualización de las líneas de corriente del flujo. Este tipo de túnel apela al efecto Venturi para conseguir mayores velocidades de flujo en la sección de prueba disminuyendo el área en dicha zona.

Se optó por una sección de túnel circular para obtener un flujo más uniforme y laminado debido a la viscosidad del aire y para evitar la concentración de fluido y formación de pequeños vórtices característicos de geometrías con ángulos rectos. La sección de prueba se modeló cerrada, ya que se encuentra entre el ingreso de aire y la salida. Se partió de los siguientes parámetros de diseño:

Sección de prueba de 348 mm de diámetro. Sección de entrada de 580 mm de diámetro. Motor de 1 hp y 700 RPM marca Gec Machenes L.T.D acoplado en forma directa al ventilador AX630 – 9EK de la marca Blower Chicago Argentina. Ventilador axial de 630 mm de diámetro, con 9 álabes con un ángulo de ataque de 27°, definido por el código de letras EK.

El diseño del túnel permite una configuración del ventilador como impulsor en la entrada o como extractor en la salida, factor que le da mayor versatilidad para la prueba de modelos aerodinámicos.

Finalmente, para evaluar su comportamiento, se modeló el túnel en el programa SolidWorks®, como puede observarse en las Figuras 1 y 2. Luego, se simuló su funcionamiento mediante la herramienta FlowSimulation, un programa de elementos finitos, el cual sirvió para tener una vista preliminar de cómo se comportará el flujo una vez que sea construido.

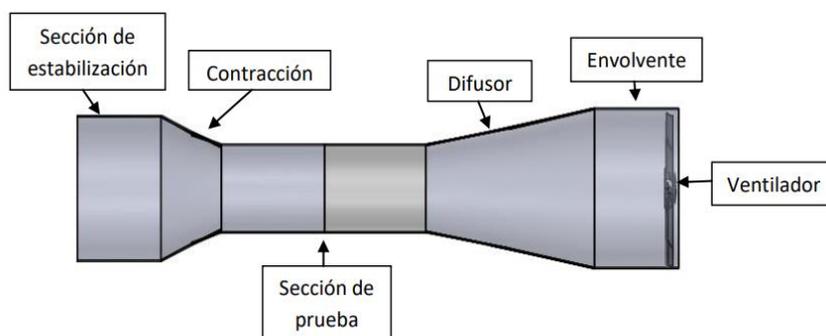


Figura 1: Túnel de viento ensamblado.

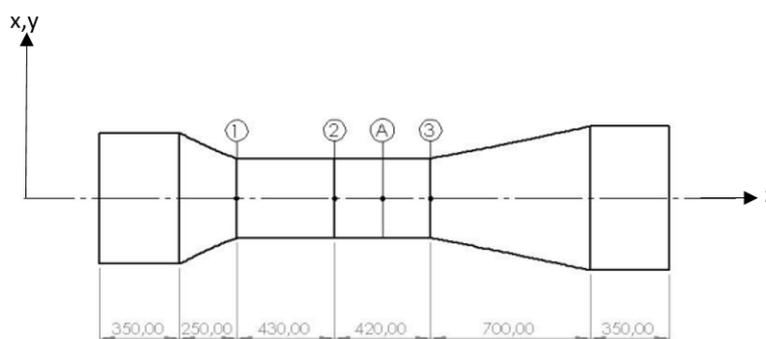


Figura 2: Medidas del túnel de viento.

Se realizó una simulación de flujo externo con una región local de rotación, que representa el movimiento realizado por los álabes del ventilador, con una velocidad de rotación de 700 rpm y sujeto a condiciones estándar de presión y temperatura. El software de SolidWorks, FlowSimulation utiliza para predecir los flujos turbulentos, las ecuaciones de Navier-Stokes con promedio de Favre, en las que se tienen en cuenta los efectos ponderados en cuanto a tiempo de la turbulencia del flujo en los parámetros del flujo.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el análisis de la performance del túnel en general, se analizaron las líneas de corriente a lo largo de toda la sección del mismo. Estas deben ser lo más ordenadas posible, de forma que permita observar cómo influye el objeto de estudio en el flujo.

A su vez, se estudiaron distintos parámetros dentro de la sección de prueba: velocidad, la distribución de presiones y el número de Mach.

### 5.1 Configuración del ventilador

En el siguiente punto se evaluaron las distintas posibilidades de uso del ventilador. Por un lado, se colocó como impulsor, es decir, soplando aire hacia el interior del túnel y, por otro lado, el ventilador se dispuso como extractor, es decir, aspirando aire desde el interior del túnel. En la Fig.3 se muestra una imagen del ventilador a emplear en el desarrollo del túnel de viento.



Figura 3: Modelo de Ventilador a usar en el túnel de viento.

La descarga del ventilador axial le proporciona al flujo de aire un movimiento helicoidal. Por lo tanto, en el caso de utilizar al ventilador como impulsor, obtenemos un flujo desordenado, en el que se observan remolinos que provocan un aumento de la presión y la consecuente disminución de la velocidad que se puede obtener en la sección de prueba, Fig. 4a.

En la Fig. 4b, se colocó un dispositivo enderezador de flujo, de estructura tipo panal de abejas, seguido del ventilador impulsor con el fin de lograr un flujo más ordenado. En esta configuración, se observa un aumento en la presión a lo largo del túnel. En la Tabla 2, vemos que la presión dinámica del fluido disminuye, provocando un valor menor de velocidad en la sección de prueba.

En cambio, al usar la configuración del ventilador como extractor, como se ve en la Fig. 4c, el flujo ingresa al túnel con menor cantidad de remolinos, las líneas de corriente son más ordenadas.

Si se busca un rendimiento aún mejor, sigue siendo necesaria la instalación de accesorios para el enderezamiento del flujo que generarán una pérdida de carga localizada. De todas formas, la presión a lo largo del túnel es relativamente menor lo que conlleva a un aumento en la velocidad alcanzada en la sección de prueba.

Tabla 2: Resultados en la sección de prueba según la configuración del ventilador.

Parámetro	Unidad	Ventilador Impulsor	Ventilador impulsor con enderezador de flujo	Ventilador Extractor
Presión Estática	[Pa]	101299	101356,93	101294,43
Presión Dinámica	[Pa]	25,68	13,13	30,39
Presión Total	[Pa]	101324,69	101370,06	101324,82
Velocidad	[m/s]	6,532	4,669	7,106
Velocidad (x)	[m/s]	0,066	-0,030	0,007
Velocidad (y)	[m/s]	0,015	0,002	-6,59e-04
Velocidad (z)	[m/s]	6,532	4,479	7,106
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	1,20	1,20	1,20
Numero de Mach		0,02	0,01	0,02

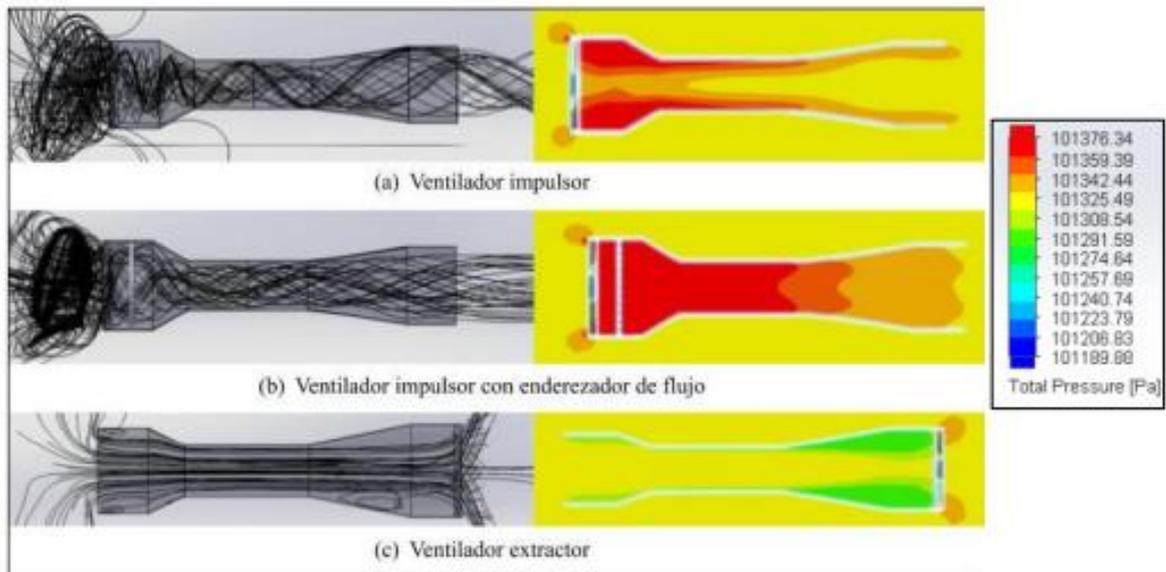


Figura N°4: Líneas de flujo de aire dentro del túnel para distintas configuraciones del ventilador

### 5.2 Sección de Estabilización.

El principal objetivo de esta sección es la de enderezar el flujo para que éste sea lo más laminar posible. Para cumplir, se suelen colocar distintos tipos de pantallas de turbulencia que anulen las componentes de velocidad transversal del flujo; aunque estos suponen un obstáculo que disminuye la energía de la componente longitudinal del flujo representado en la corriente del fluido como una pérdida de carga. Esta condición lleva a elegir un diámetro mayor para esta sección que el diámetro de la zona de prueba para disminuir la pérdida de carga, ya que la ecuación de Darcy-Weisbach depende del diámetro.

$$H_f = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{Dh \cdot 2g} \quad (3)$$

Siendo:

H<sub>f</sub>: la pérdida de carga por fricción (m)

L: la longitud de tubería (m)

V: la velocidad media del fluido (m/s)

D<sub>h</sub>: diámetro de la tubería (m)

F: el factor de Darcy

### 5.3 Contracción

El objetivo de esta sección es aumentar la velocidad en la sección de prueba apelando a una disminución considerable en el área de paso del flujo.

Las paredes de la contracción guían al flujo hasta la sección de menor tamaño, mientras que en la línea central la velocidad decae. De esta forma, a la salida de la contracción se exhibe un perfil de velocidad como el de la Fig. 5 en el que los extremos poseen una velocidad mayor que el centro del flujo. Este perfil de velocidad fue tomado a 5 mm de la entrada de la sección de prueba, donde en diámetro interno de la contracción es de 351,34 mm.

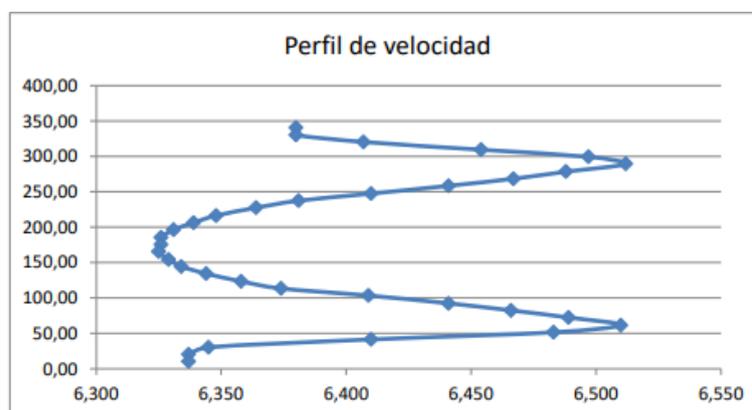


Figura N°5: Perfil de velocidad a la salida de la contracción.

Por lo tanto, a la salida de la contracción se coloca una longitud de asentamiento que actúe como estabilizador del perfil de velocidad del flujo. Esta longitud posee el mismo diámetro que la zona de prueba.

#### 5.4 Sección de Prueba

Esta es la sección más importante del túnel, ya que es el lugar en el que se instala el modelo a analizar. El flujo debe ser uniforme y la capa límite debe ser delgada para maximizar el área de la sección transversal utilizable. Se optó por una sección de prueba cerrada, para evitar fluctuaciones en el flujo, y de un material transparente que permita observar directamente los fenómenos que ocurren dentro de ella. La sección de prueba es la que se enmarca en la figura 1, está entre los planos 2 y 3 en la figura 2, donde se puede ver que tiene una longitud útil de 420 mm y un diámetro de 348 mm.

Tabla 5: Valores sección de prueba tomados en el punto A (fig.2) con malla para enderezar el flujo.

Parámetro	Unidad	Valor
Presión estática	[Pa]	101294.43
Presión dinámica	[Pa]	30.39
Presión total	[Pa]	101324.82
Velocidad	[m/s]	7.106
Velocidad (x)	[m/s]	0.007
Velocidad (y)	[m/s]	-6.590e-04
Velocidad (z)	[m/s]	7.106
Número de Mach	[adimensional]	0.02
Densidad	[kg/m <sup>3</sup> ]	1.20
Viscosidad dinámica	[Pa.s]	1.8145e-05

Con el diámetro de la sección de prueba, la velocidad calcula; el valor de viscosidad dinámica y la densidad del aire, obtenemos mediante la ecuación 2, un número de Reynolds de  $1,8 \times 10^5$ . Este número de Reynolds se encuentra dentro de los valores típicos de flujo para aerogeneradores de baja potencia comprendido entre número de Reynolds de  $1 \times 10^5$  a  $5 \times 10^5$  [5]. Para cualquier ajuste del mismo se podrá variar la velocidad del ventilador, variando la velocidad y en consecuencia ajustando el valor del número de Reynolds reinante dentro de la sección de prueba. A continuación, se puede ver el perfil de velocidades en los planos 1; y en el 2 y 3 de la sección de prueba marcados anteriormente en la Fig. 2. En los gráficos se omitieron los valores de la velocidad del fluido en los límites sólido-líquido, ya que, por condición de no deslizamiento, ese valor es igual a cero y dificulta la observación de los fenómenos que ocurren hacia el centro de la sección analizada.

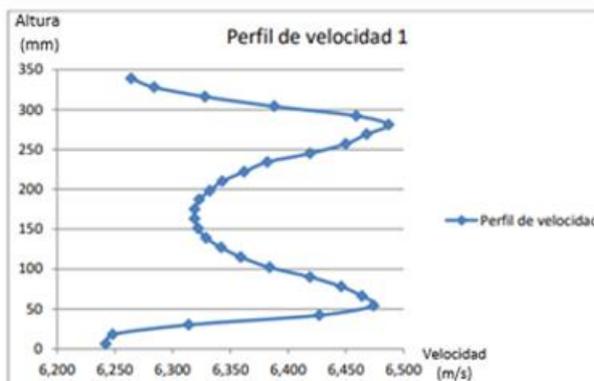


Figura N°6: Perfil de velocidad en plano 1.

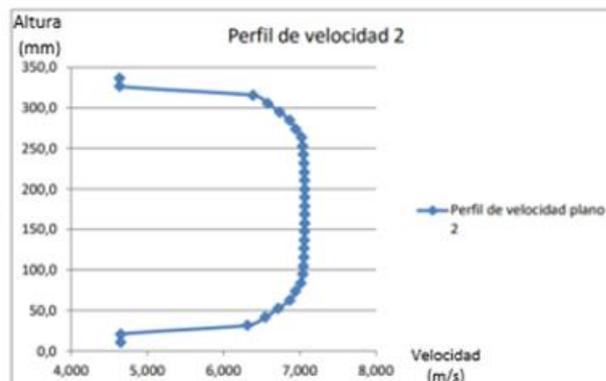


Figura N°7: Perfil de velocidad en plano 2.

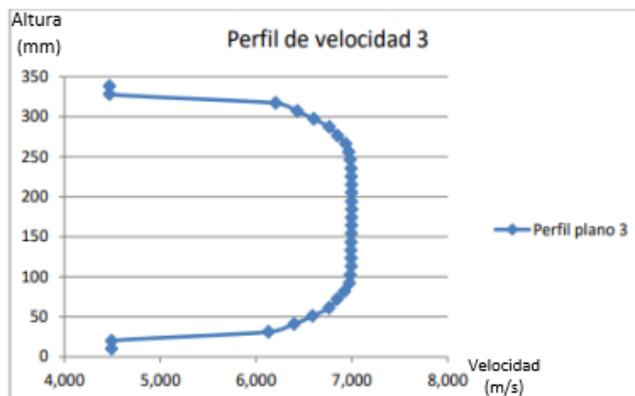


Figura N°8: Perfil de velocidad en plano 3.

Si bien la cantidad puntos encontrados por simulación para la determinación de la capa limite son pocos, la sección útil (de prueba) se encuentra bien definida entre las alturas 100 y 250mm. En los perfiles graficados en las podemos ver como el flujo estabiliza su perfil a lo largo de la sección de prueba. En la Fig.6 se observa un perfil de velocidades perturbado por los efectos de la contracción; en cambio, en las Figs. 7 y 8 se observa una transición hacia un perfil más desarrollado, donde se puede encontrar un perfil Pouseville característico. Por lo tanto se analizan la variación de la presión en un plano transversal A, entre los planos 2 y 3.

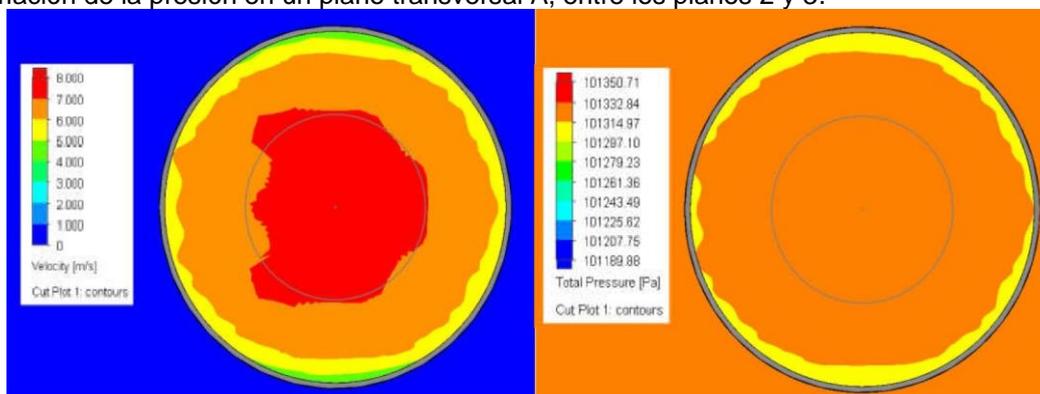


Figura N°9: a) campo de velocidades en plano A. b) campo de presiones en plano A.

El flujo exhibe una variación de 0,02% entre el valor promedio de velocidad y la velocidad en la componente principal del fluido. Por lo que podemos afirmar que el flujo es ordenado.

Al analizar los perfiles de velocidad de las Figs. 7 y 8 podemos determinar el área útil de la sección de prueba del túnel de viento. De forma estricta, muestran una velocidad uniforme a lo largo de la sección de prueba, con una capa límite de aproximadamente 84 mm en cada pared del túnel. Por lo tanto, para evitar que la capa límite cerca de las paredes interfiera en las pruebas de los modelos, se tomará como sección útil del mismo 180 mm de diámetro desde el centro. Como podemos ver en las Figs. 11 y 12, en las cuales se muestra la dimensión de la sección útil.

En la fig. 11 vemos que la velocidad en la sección útil determinada es constante, aunque exhibe leves deformaciones.

### 5.5 Difusor

Las pérdidas de energía a través de un conducto varían proporcionalmente con el cuadrado de la velocidad tal como se describe en la expresión de Darcy Weisbach (Ecuación 3)

El objetivo del difusor es reducir la velocidad del fluido expandiendo la sección y así recuperar la presión estática tal como se observa en las Figuras 11 y 12. Para el diseño del mismo, se seleccionó una geometría cónica que, por continuidad, al aumentar la sección disminuye la velocidad lo que permite además disminuir la pérdida de carga se demuestra en la expresión de Darcy Weisbach.

La geometría cónica permite realizar el cálculo de las pérdidas del difusor utilizando la fórmula para pérdidas en tuberías con expansión gradual teniendo en cuenta el ángulo de apertura de los difusores.

$$Pd = \theta \left( 1 - \left( \frac{dhe}{dhs} \right)^2 \right)^2 \quad (4)$$

Donde:

$\theta$  Coeficiente de ángulo del difusor.

$d$  Diámetro hidráulico de entrada y salida del difusor

La expansión gradual es un caso particular de pérdida de energía donde a diferencia de la expansión súbita se transmite con el cambio de sección de un cono en donde las pendientes de sus paredes inciden guiando el fluido por la transición reduciendo la pérdida de energía. Se buscará que el diseño sea mínimo para minimizar las pérdidas asociadas al difusor.

Cabe destacar que el equipo de investigación busca el funcionamiento óptimo del túnel de viento pero se encuentra limitado con los recursos y materiales disponibles. El diseño propuesto se ajusta justamente a esas dos condiciones.

### 5.6 Envoltente del ventilador

Es la configuración de la sección que recubre el ventilador. En las simulaciones se pudo observar que al existir un espacio libre entre los álabes y las paredes de la sección se generaban flujos de recirculación acompañado de remolinos en la sección.

Se realizaron simulaciones del ventilador como extractor, con espacio de 20 mm entre el extremo de los álabes del ventilador y la pared del túnel, Fig.10 a) y con un espacio de 5mm Fig. 10 b), se ve que con una diferencia de 5 mm entre álabes y envoltente, prácticamente no aparecen estos remolinos según los resultados de la simulación. Con la reducción de de estos remolinos más el agregado de pantallas alineadoras-enderizadoras de flujo en los extremos del volumen de prueba podemos asegurarnos que no interfieran con el ensayo en la sección de prueba.

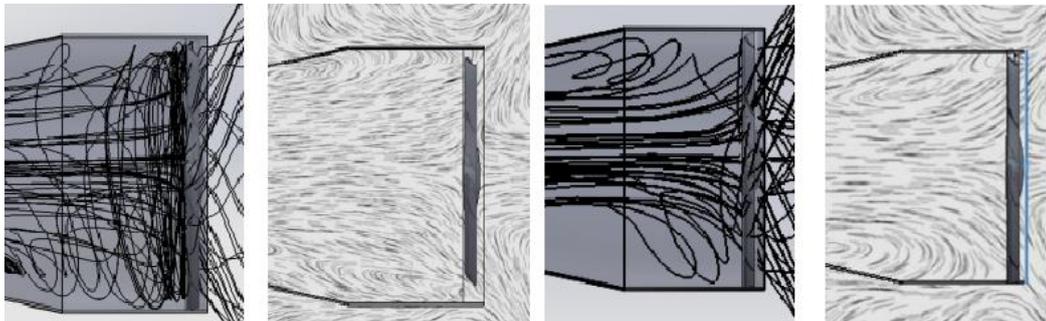


Figura N°10: Líneas de corriente en la envoltente del ventilador con una separación de a) 20 mm entre álabes del ventilador y pared b) 5 mm entre álabes del ventilador y pared.

A modo de resumen, se muestran los resultados de la simulación sobre un plano longitudinal del túnel de viento, en el cual se representa la variación de la presión, velocidad, el número de mach y la densidad. La Fig. 11 permite observar la velocidad que se obtuvo en cada una de las secciones del túnel. La velocidad que más interesa es la de la sección de prueba, que será la que afecte a los experimentos que se realicen dentro del túnel.

En la Fig. 12 observamos como varía la presión dentro del túnel, manteniendo una relación inversa con la velocidad. Sin embargo, esta variación de presión es casi despreciable, provocando un efecto insignificante en la densidad del aire Fig. 13. Por lo tanto, la suposición de un fluido incompresible, según el número de Mach, cuya variación se muestra en la Fig. 14, es completamente válida.

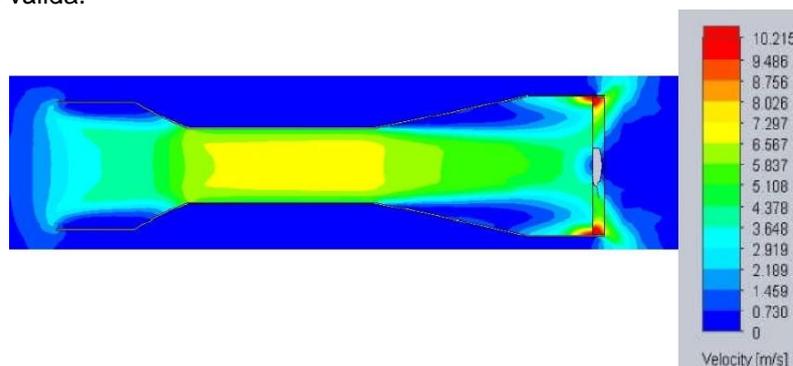


Figura N°11: variación de la velocidad.

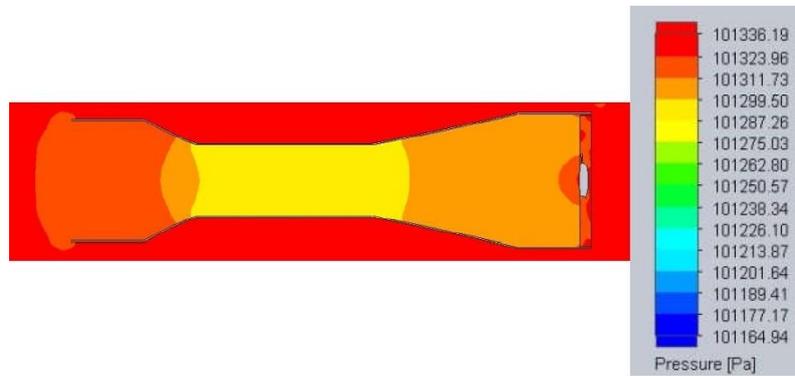


Figura N°12: variación de la presión

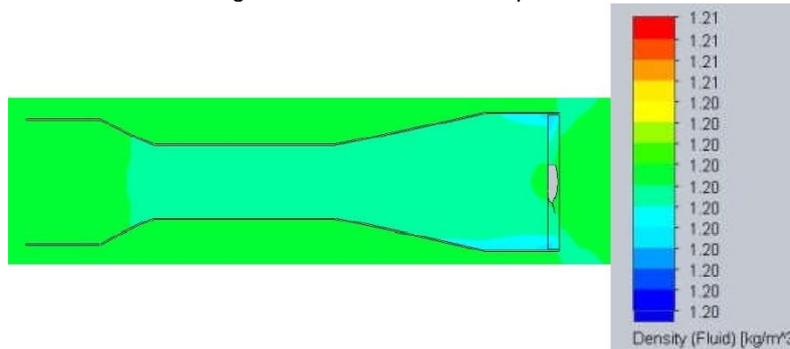


Figura N°13: variación de la densidad

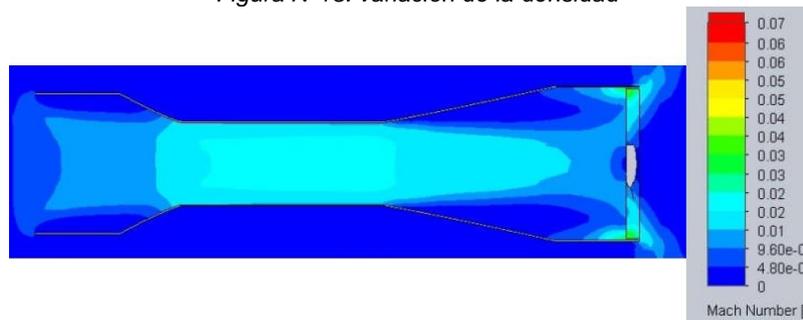


Figura N°14: variación del Número de Mach

### 5.7 Enderezadores de flujo

Las pantallas de turbulencia o enderezadoras de flujo, son pantallas de aluminio de perfil tipo panal de abeja (HoneyComb). El espesor de la pantalla es de 20mm y los lados de los hexágonos de 5mm. En la figura 15 se ve una foto de la pantalla original. La misma fue cortada según el diámetro de la sección de estabilización y colocada una al comienzo otra al final de la misma (Figura 1).

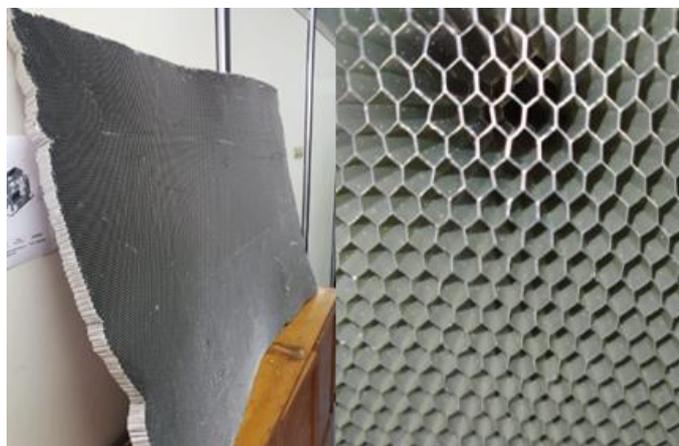


Figura N°15: Foto del HoneyComb original antes de cortar e instalar.

## 6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se logró caracterizar el funcionamiento de un túnel de viento, a partir de un programa de simulación de elementos finitos. Se obtuvo información importante para su construcción, como la existencia de una longitud de estabilización del flujo entre la contracción y la sección de prueba. Además de la configuración del ventilador y la importancia de la geometría de su envolvente. Se comprobó un valor de número de Mach de 0.02, casi constante a lo largo del túnel. Esto nos indica que se tiene un régimen subsónico ( $Ma < 0,8$ ), de forma que el flujo puede considerarse incompresible, es decir, que la densidad será constante a lo largo de la sección del túnel. De esa forma, se podrá utilizar la teoría de Reynolds, Darcy y Bernoulli para simplificar los cálculos durante los ensayos. La alta calidad del flujo y la estabilidad de sus parámetros en el tiempo, es esencial para la investigación. Se determinaron los parámetros básicos de la sección de prueba como son la velocidad de 7.106 m/s, la presión 101294.43 Pa y la viscosidad dinámica  $1.8145 \times 10^{-5}$  Pa.s, este último es un parámetro necesario para calcular el número de Reynolds de  $1,8 \times 10^5$ . Al igual que se determinó la sección útil de la misma, con un diámetro de 180 mm desde el centro, por lo que se podrán ensayar prototipos de hasta 150mm de longitud transversal para evitar los efectos de la capa límite. La turbulencia característica de los túneles de viento provoca que las características del flujo sean similares a las de un flujo en aire libre con un mayor número de Reynolds [7]. Por lo que, en el caso de querer extrapolar los resultados a las condiciones reales, debe tenerse en cuenta la corrección del número de Reynolds. Este trabajo permitirá avanzar en el desarrollo de un túnel de viento para la prueba de aerogeneradores de baja potencia instalado en el Laboratorio de Perfil Alar de la CNEA-UNTREF.

El túnel de viento se encuentra actualmente en construcción en el laboratorio de Perfil Alar de la CNEA (Figura 3). Se instaló además, un variador de frecuencia Marca: WEG Modelo: CFW300, para el comando de la velocidad del ventilador. Se está trabajando, entre otras cosas, en la instalación de un tubo Pitot y piezométrico para la comprobación de las presiones estáticas y dinámicas, para los diferentes regímenes de trabajo en función de la velocidad.

## 4. REFERENCIAS.

- [1] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. (s.f.). Objetivo 7: Energía asequible y no contaminante. Recuperado en línea 20/4/2020 de <http://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-developmentgoals/goal-7-affordable-and-clean-energy.html>
- [2] Secretaría de Planeamiento Energético Estratégico. (2016). Escenarios Energéticos 2025. Buenos Aires: Ministerio de Energía y Minería.
- [3] Prensa INTI. (24 de Enero de 2020). Ya rige la primera certificación de instaladores de aerogeneradores de baja potencia. Recuperado en línea el 14/3/2020 de <https://www.inti.gob.ar/noticias/21-asistencia-regional/1587-yarige-la-primera-certificacion-de-instaladores-de-aerogeneradores-de-bajapotencia>.
- [4] Asociación Argentina de Energía Eólica. (7 de mayo de 2014). INTI Neuquén prueba aerogeneradores en Cutral-Có. Recuperado en línea el 14/3/20 de <https://argentinaeolica.org.ar/novedades/inti-neuquen-pruebaaerogeneradores-en-cutral-co-1>
- [5] Ezequiel J. López., Andrés E. Zappa., Carlos A. Wild Cañón (2017). DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS AERODINÁMICAS DE PERFILES PARA AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA UTILIZANDO DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL Universidad Nacional del Comahue-CONICET
- [6] Nancy Hall. (5 de mayo de 2015). Types of Wind Tunnels. NASA. Recuperado en línea el 18/3/2020 de <https://www.grc.nasa.gov/www/k12/airplane/tuntype.html>
- [7] J.B. Barrow., H. Rae., and A. Pope (1999). Low-Speed Wind Tunnel Testing. Nueva York: John Wiley & Sons.

# AUDITORÍA ENERGÉTICA DE PALACIO MUNICIPAL DE CAMILO ALDAO, CÓRDOBA

Czajkowski, Jorge; Gómez, Analía; Birche, Belén; Berardi, Roberto; Basualdo, David y Basualdo, Julián

Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable, FAU, UNLP / CIC / CONICET  
czajko@ing.unlp.edu.ar

## RESUMEN

Con financiamiento de un proyecto Euroclima+ se auditaron edificios municipales en 17 ciudades del país. El objetivo es aumentar el nivel de conocimientos con fines de capacitar a los actores municipales en el proyecto, mantenimiento y rehabilitación edilicia a fin de mejorar la eficiencia energética de cada red de edificios para diferentes usos. Se muestran resultados de una auditoría energética y propuestas de mejora y rehabilitación de su eficiencia energética y sustentabilidad.

**Palabras Claves:** Eficiencia energética, Edificios, Sustentabilidad, Municipios, Auditoría.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El proyecto Euroclima+ “Edificios Municipales Energéticamente Eficientes y Sustentables” es llevado adelante bajo la coordinación de la *Universidad Nacional de La Plata (UNLP)* por la *Red Argentina de Municipios frente al Cambio Climático (RAMCC)* y el *Copenhagen Centre on Energy Efficiency (C2E2)*. Cuenta con el financiamiento de la República de Francia mediante la *Agencia Francesa de Desarrollo (AFD)*.

El Producto 6: auditorías energéticas fue responsabilidad del equipo del LAYHS Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo – UNLP. El LAYHS elaboró la primera encuesta nacional de eficiencia energética en edificios municipales a fin de hacer un primer relevamiento entre noviembre y junio del 2020-21. En agosto del 2021 se inició la campaña de invierno abarcando las provincias de Buenos Aires, Santa fe y Córdoba donde forma parte este caso de estudio. En el municipio de Camilo Aldao se auditaron el Palacio Municipal, el Hospital y el Asilo de ancianos. (Filippin, C.: 2003))

El edificio se encuentra localizado en calle Belgrano 901 de Camilo Aldao (Lat -33.12; Long -62.09) en clima templado cálido en Zona Ila (IRAM 11603). Su construcción es de mediados del siglo pasado y ha sufrido numerosas renovaciones encontrándose en buen estado. Está implantado en un lote de esquina cuyo frente principal mira al NNE. La edificación con forma de L ocupa más del 60% del lote, mientras el resto es ocupado por otras dependencias que no se auditaron.



Figura 1: Imagen del edificio previo a la primera rehabilitación. Fuente: Eficiencia energética y ure en edificio municipal de camilo Aldao, de: Abate, Rastelli y Renzi. 2019.



Figura 2: Localización de Camilo Aldao, Córdoba. Fuente: OpenStreetMap, 2022.

### 1.1. Características del edificio

El Palacio Municipal de Camilo Aldao fue construido en los `70 del sXX, remodelado en 1985 y rehabilitado en 2019. La última rehabilitación incorporó mejoras en eficiencia energética como pintura clara en azotea, reparación del lucernario, cambios de luminarias a LED, cambio de equipamiento y climatización a productos etiquetados, mejoras en operación de ofimática entre muchas otras medidas positivas. Pero no se mejoraron vidriados, ni se previeron protecciones solares en aberturas, ni aislamiento en muros ni techos.

La mayor inversión fue en un generador solar fotovoltaico y un calentador solar de agua que prácticamente reducen a un mínimo las facturad de energía la mitad del año. Cuando se encienden los equipos de climatización el consumo supera lo que se genera.

Tiene una superficie habitable de 297.05m<sup>2</sup> y un volumen a climatizar de 831.74m<sup>3</sup> con una altura media de locales de 2,60m. Está materializado con muros de ladrillos macizos de 30cm, revocados en ambas caras (R= 0.53 m<sup>2</sup>K/W y K= 1.88 W/m<sup>2</sup>K), el techo es de losa de H°A° con contrapiso de pendiente membrana hidráulica y terminación de ladrillos (R= 0.62 m<sup>2</sup>K/W y K= 1.62 W/m<sup>2</sup>K). Las carpinterías de ventanas y puertas son amplias de perfiles de aluminio con un vidrio de seguridad de 3+3mm de espesor sin protección adicional (R= 0.17 m<sup>2</sup>K/W y K= 5.86 W/m<sup>2</sup>K). Los solados son mixtos de cerámicas esmaltadas sobre contrapiso de hormigón pobre o baldosas calcáreas (R= 0.83 m<sup>2</sup>K/W y K= 1.20 W/m<sup>2</sup>K). Los techos son de losa de bovedillas cerámicas y H°A° con un grueso contrapiso de pendiente y terminación con ladrillos planos pintados de blanco. Una gran masa térmica en esa superficie de cerramiento. El cielorraso aplicado y tiene un K= 1.62 W/m<sup>2</sup>K. Las renovaciones de aire se fijan en 2 (IRAM 11604). Por cuestiones de salubridad interior no se recomienda reducir este valor.

Posee buena iluminación natural y el sistema de alumbrado interior es tipo LED de reciente rehabilitación. Posee un generador solar fotovoltaico de 6,90 kWp conectado a red urbana mediante un inversor de corriente trifásico y un medidor de doble vía. Este permite reducir la demanda anual unos 4844 kWh/año de los 15000 kWh/año, interanuales. El sistema de climatización es mediante equipos de aire acondicionado frío/calor, ubicados en los ambientes principales. El edificio contaba con protecciones solares en las ventanas y lamentablemente en la rehabilitación se eliminaron y en la actualidad se generan sobrecalentamientos.

## **1.2. Metodología e instrumental utilizado**

El equipo del LAYHS posee más de 30 años de experiencia en la realización de auditorías de edificios y propuestas de rehabilitación energética y ambiental (Rosenfeld, Elías; et Al: 1988)(Czajkowski, J., et Al: 2012). El procedimiento consiste en la visita del edificio y su relevamiento en lo formal, constructivo y estado de conservación. Conocido este se planifica la instalación de instrumental automático durante una semana a fin de registrar su comportamiento higrotérmico y lumínico, si corresponde en zonas térmicas. A fin de obtener un comportamiento térmico ponderado. Se instala un resguardo meteorológico en el exterior a fin de registrar la variación de temperaturas y HR con una frecuencia de 15 minutos. Para esto se usa un microadquisidor de datos Hobo.

En el interior en cada zona térmica se instala un Hobo con programación similar al exterior. Se toman temperaturas superficiales interiores y termografía en caso de requerirse. El instrumental utilizado pertenece al LAYHS y fue adquirido con trabajos de investigación y de terceros ya que el presente proyecto no contempla adquisición y/o reposición. Lo cual implica un riesgo permanente por posible daño o hurto. Además, se realiza una encuesta de percepción ambiental y del confort a funcionarios y empleados municipales.

Luego se realiza un análisis del comportamiento energético del edificio en régimen estacionario basado en una versión adaptada de las Normas IRAM 11604, 11659 y 11900 a fin de obtener el comportamiento a nivel mensual para determinar la demanda de energía en climatización. Considerando una agenda de ocupación basada en el relevamiento. Para invierno y verano se contrastan la versión original con la mejorada y se concluye una propuesta de mejoras.

## **1.3. Comportamiento energético:**

### **1.3.1. Invierno - Versión original:**

Se realiza un análisis térmico y energético mediante una aplicación desarrollada ad-hoc para el Producto 6 en Excel y que usa las Normas IRAM 11601, 11605, 11604, 11659 y 11900 como referencia. Se usan los datos bioclimáticos de la localidad más próxima que resulta ser la Ciudad de Rosario (Santa Fe) distante 164 km entre centros urbanos. Están prácticamente en la misma latitud y manteniéndose en la misma región bioambiental templada cálida, solo cambian de subzona B (húmeda) a A (de transición). Los datos fueron tomados de la Norma IRAM 11900/18 que muestra datos mensuales de temperaturas medias (°C) y radiación solar media (W/m<sup>2</sup>)

		Radiación solar media mensual (W/m2)								
		90°								
Mes	TBS°C	O°	NORTE	ESTE	OESTE	SUR	NE	NO	SE	SO
Enero	28,4	335	106	203	181	95	170	154	162	147
Febrero	25,3	271	123	151	155	66	150	152	108	113
Marzo	23,6	208	146	112	131	51	135	152	72	82
Abril	18,3	169	176	97	116	40	141	161	52	58
Mayo	14	112	156	67	75	29	118	128	33	34
Junio	12,7	81	120	46	56	22	86	100	23	24
Julio	14,8	118	179	73	83	28	133	145	32	33
Agosto	15,9	169	209	101	116	37	162	179	48	51
Septiembre	16,3	195	162	107	133	45	137	165	63	73
Octubre	19,6	265	140	149	158	58	157	164	100	105
Noviembre	23,1	322	115	179	175	81	162	158	137	135
Diciembre	28,1	347	99	193	193	102	159	156	159	160
<b>TOTAL anual</b>	<b>20,0</b>	<b>2592</b>	<b>1731</b>	<b>1478</b>	<b>1572</b>	<b>654</b>	<b>1710</b>	<b>1814</b>	<b>989</b>	<b>1015</b>

Tabla 1: Datos mensuales de temperaturas medias y radiación solar por orientación de la Ciudad de Rosario (Santa Fe). Lat: -32.982, Long: -60.730

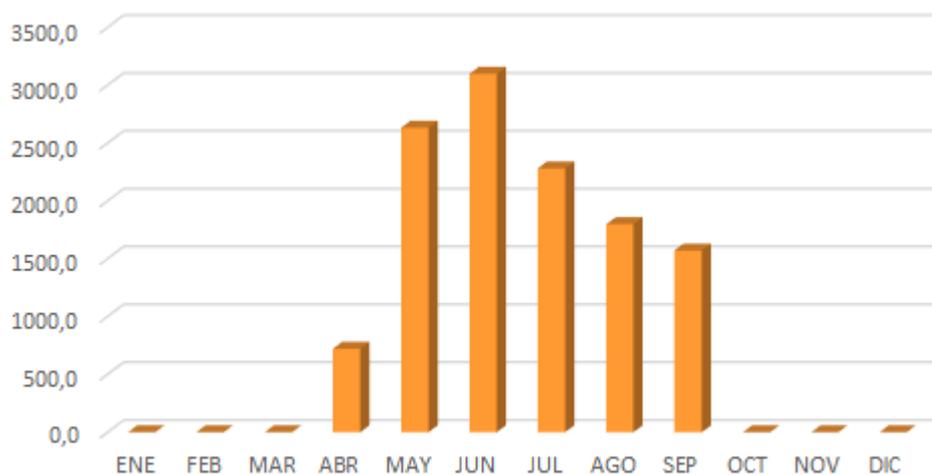


Figura 3: Demanda de energía en calefacción en kWh/mes calculado para TBCal= 20°C, situación original

ASPECTOS DIMENSIONALES		
Superficie habitable	297,05	m2
Volumen habitable	831,74	m3
Indice Compacidad Co	0,58	adim
Factor de forma f	0,62	adim
Factor de exposición Fe	0,97	adim
Altura media de locales	2,80	m
Superficie envolvente	501,52	m2
Superficie protegida	41,16	m2

Tabla 2: Resumen de aspectos dimensionales del edificio

Del diagnóstico surge que el edificio tiene un Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas Gcal (IRAM 11604) de 2,18 W/m³K y un Coeficiente de pérdidas unitarias 4,13 W/m² que resulta en una Demanda anual energía eléctrica en calefacción de **12105,42 kWh/año** y 41,69 kWh/m²año, para una temperatura base de calefacción de 20°C. A fin de definir estrategias de rehabilitación se analizan las pérdidas y se encuentra que es factible intervenir los techos (27%), muros (17%) y vidriados (15%), según Figura 1, a fin de lograr mejoras en la demanda de energía.

### 1.3.2. Invierno - Versión mejorada:

Se propone una serie de mejoras en la envolvente para su rehabilitación, a saber:

- Aislamiento en muros tipo EIFS (External Insulation Finish System) con 4/5 cm de EPS de 30kg/m³ y base coat reforzado con doble malla Fibra Vidrio 10x10 de 110g/m² hasta 1,5 m de altura.

- b. En cubiertas implementar la solución “techo invertido” colocando una capa de 8 cm de EPS de 30kg/m<sup>3</sup> sobre la losa recubierto con un geotextil ligero y 6 cm de arcilla expandida. A fin de lograr un K= 0.14 W/m<sup>2</sup>K.
- c. La intervención más costosa es en vidriados, sea en aislamiento, como en protección solar. Una variante costosa es el cambio de todas las aberturas o al menos hojas móviles que permitan usar DVH y algo menos costoso, agregar un nuevo vidrio pegado con sellador y un perfil S de aluminio. En los vidriados fijos reemplazarlos por DVH.
- d. Dado que ya se cambiaron las luminarias a LED no se sugieren mejoras adicionales.
- e. Si se desea reducir a casi cero la demanda de energía en climatización, se sugiere el uso de una bomba de calor con sonda geotérmica, accionada por el generador solar.

La implementación de las mejoras en muros, techos y vidriados permitirá reducir la demanda de energía en calefacción en un 44.37%. El edificio tendrá un Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas Gcal (IRAM 11604) de 1.21 W/m<sup>3</sup>K y un Coeficiente de pérdidas unitarias 1.43 W/m<sup>2</sup> que resulta en una Demanda anual energía eléctrica en calefacción de **6734,71 kWh/año** y 23,2 kWh/m<sup>2</sup>año, para una temperatura base de calefacción de 20°C.

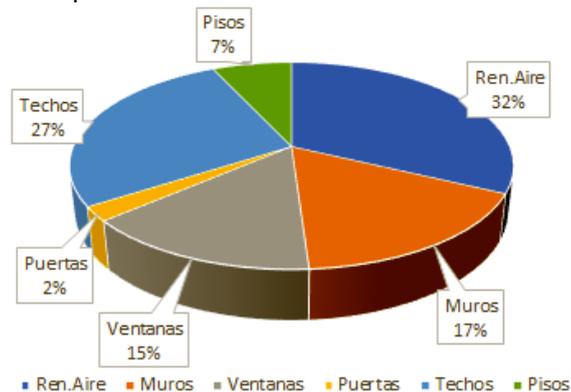


Figura 4: Pérdidas térmicas discriminadas situación mejorada

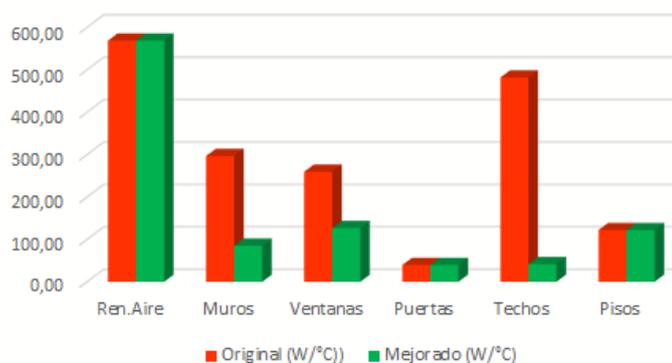


Figura 5: Comparación entre versión original y mejorada

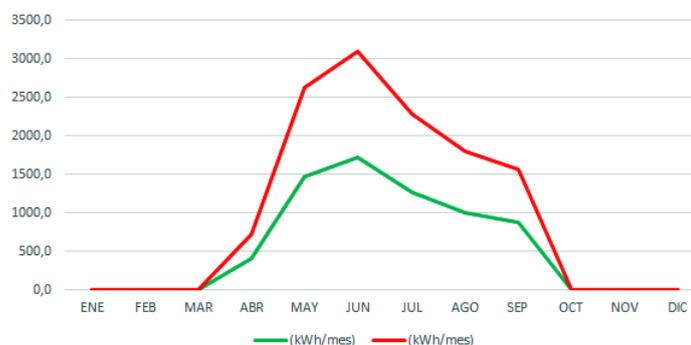


Figura 6: Comparación entre versión original y mejorada mensual

### 1.3.3. Verano - Versión original:

La figura 7 muestra la discriminación de aportes térmicos en el edificio. Se destacan el asoleamiento con el 46%, los techos con el 13%, los muros con un 8%, y las ventanas con un 6%. En la condición de invierno se propuso mejoras en estos, pero es importante la protección solar.

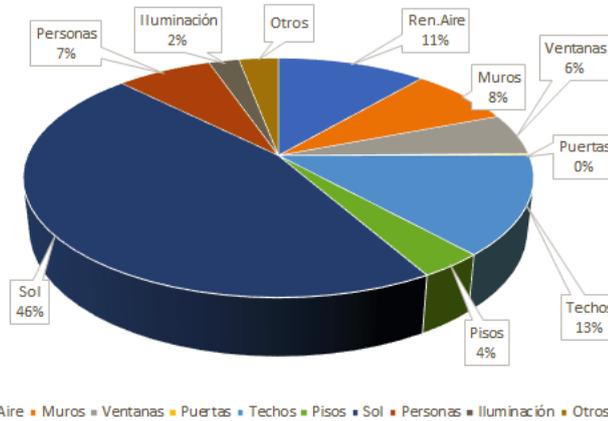


Figura 7: Aportes térmicos discriminados. Situación original verano.

Este análisis simplificado no considera el aporte solar mediante temperatura sol aire o similar ni el efecto de la inercia térmica que quizá modificaría la distribución de aportes. No es posible modificar aporte de personas, iluminación o renovaciones de aire al ser un edificio de apoyo a jóvenes. Del diagnóstico surge que el edificio tiene un Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas Gref (IRAM 11659) de 123,79 W/m<sup>3</sup> que resulta en una Demanda anual energía eléctrica en refrigeración de **51734,36 kWh/año** y 178,2 kWh/m<sup>2</sup>año, para una temperatura base de refrigeración de 20°C.

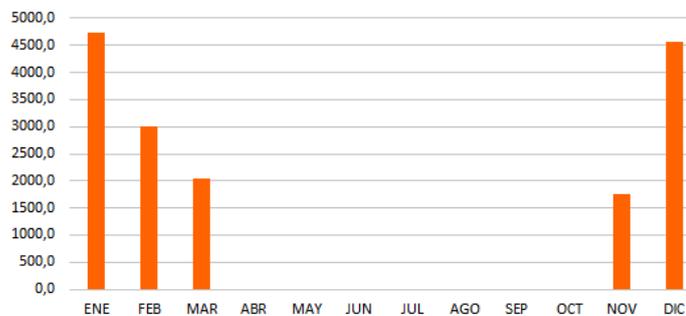
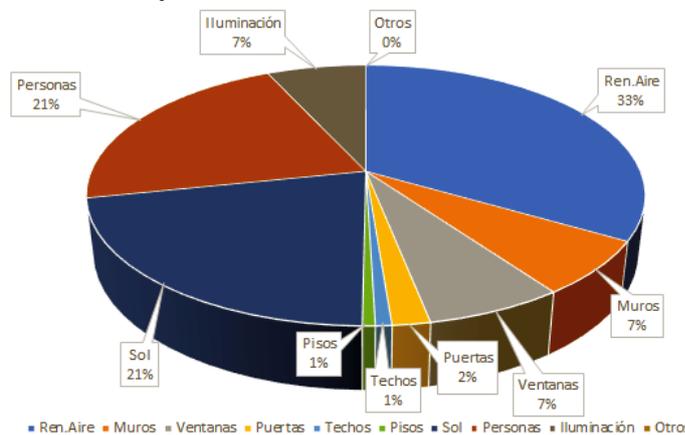


Figura 8: Variación mensual de la demanda de energía en refrigeración.

### 1.3.3. Verano - Versión mejorada:

Se mantienen las mejoras propuestas para el invierno solo agregando una protección solar en las aberturas que lo requieran. Las que dan al norte y Oeste son las más afectadas y requerirían DVH con vidrio exterior templado coloreado en su masa y cortinas exteriores accionadas eléctricamente por un accionador automático que sense la radiación solar. Se busca que los vidriados tengan un FES = 0.18 (IRAM 11659-1). La figura 9 muestra la importante reducción del aporte solar relativo, con las mejoras propuestas lo mismo que en muros, techos y ventanas. No se consideraron las mejoras en pisos y puertas lo mismo que en renovaciones de aire dado el tipo de función edilicia y costos de intervención. Así la propuesta mejorada implica una reducción del **61,73%** en la demanda de energía eléctrica en refrigeración sin considerar la eficiencia energética de los equipos de aire acondicionado. En la figura 10 se comparan el edificio original con el que resulta de las propuestas de mejoras. Destacan las reducciones en muros, ventanas, techos y en



asoleamiento.

Figura 9: Aportes térmicos discriminados. Situación mejorada verano.

Del diagnóstico surge que el edificio tiene un Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas Gref (IRAM 11659) de 44,37 W/m<sup>3</sup> que resulta en una demanda anual energía eléctrica en refrigeración de **41939,82 kWh/año** y 144,4 kWh/m<sup>2</sup>año, para una temperatura base de refrigeración de 20°C.

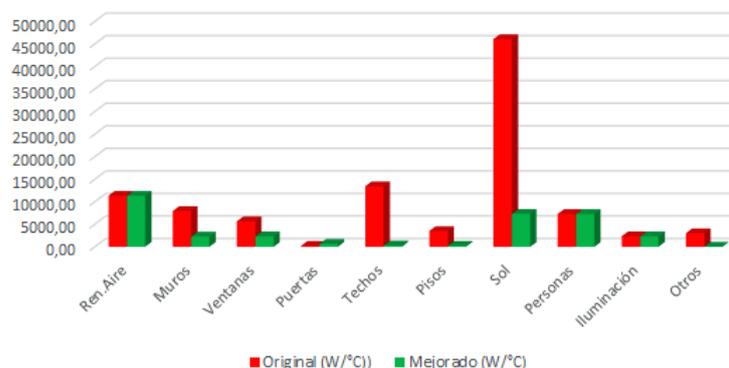


Figura 10: Comparación de edificio original y mejorado. Situación verano.

La figura 11 compara las demandas de energía entre el edificio original y el mejorado. Las reducciones más importantes se dan en asoleamiento, techos y muros. Seguido de ventanas por conducción e iluminación.

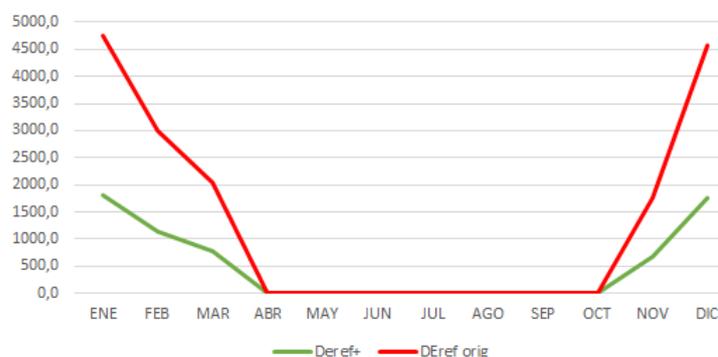


Figura 11: Comparación de la demanda de energía en refrigeración mensual del edificio original y mejorado. Situación verano.

### 1.3.4. Resultados del comportamiento anual:

Cabe remarcar que es un diagnóstico simplificado en régimen estacionario que no contempla ocupación (personas, iluminación y equipos) y el aporte solar, que reducirían la demanda de energía. Se supone una temperatura de termostato de 20°C en el interior. Las principales medidas de diseño eficiente que restan son las propuestas a fin de lograr reducir la demanda en un 44,37%. Los valores son en energía secundaria y no contemplan la eficiencia energética de equipos climatización. La figura 12 y tabla 3, a modo de conclusión parcial, muestra que la reducción total anual de energía en climatización con las medidas de mejora propuestas podría ser de unos 45,72% para mantener el edificio en una temperatura constante de 20°C a lo largo de 8hs de lunes a viernes todo el año. Reduciendo de los 97,15 kWh/m<sup>2</sup>año a 44,42 kWh/m<sup>2</sup>año.

Mes	0 DMEcal (Wh/mes)	DAEcal+ (kWh/mes)	DEcal orig (kWh/mes)	DMEref (Wh/mes)	Deref+ (kWh/mes)	Deref orig (kWh/mes)
ENE	0,0	0,0	0,0	1816275,7	1816,3	4746,1
FEB	0,0	0,0	0,0	1145983,5	1146,0	2994,6
MAR	0,0	0,0	0,0	778403,9	778,4	2034,0
ABR	401578,5	401,6	721,8	0,0	0,0	0,0
MAY	1464580,4	1464,6	2632,5	0,0	0,0	0,0
JUN	1724425,3	1724,4	3099,6	0,0	0,0	0,0
JUL	1269303,0	1269,3	2281,5	0,0	0,0	0,0
AGO	1000796,6	1000,8	1798,9	0,0	0,0	0,0
SEP	874023,8	874,0	1571,0	0,0	0,0	0,0
OCT	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NOV	0,0	0,0	0,0	670292,2	670,3	1751,5
DIC	0,0	0,0	0,0	1751408,8	1751,4	4576,6
<b>ANUAL</b>	<b>6734707,5</b>	<b>6734,7</b>	<b>12105,4</b>	<b>6162364,1</b>	<b>6162,4</b>	<b>16102,8</b>
Reducción demanda EE		44,37%			61,73%	
Total climatización anual sin mejoras			28208,24 kWh/año			97,15 kWh/m2año
Total climatización anual con mejoras			12897,07 kWh/año			44,42 kWh/m2año
			45,72%			

Tabla 3: Resumen de aspectos dimensionales del edificio

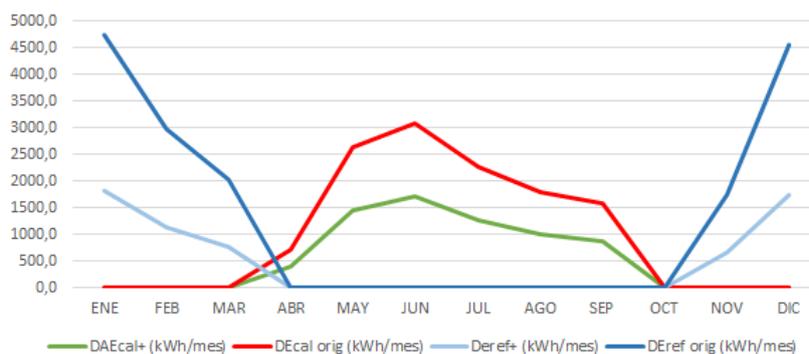


Figura 12: Comparación anual caso «Palacio Municipal» en Camilo Aldao, Córdoba.

#### 1.4. Ficha síntesis:



Figura 13a: Ficha síntesis del caso «Palacio Municipal» en Camilo Aldao, Córdoba (parcial)

Se construyó una ficha tipo que sintetiza las características principales del edificio y su comportamiento energético e higrotérmico. El monitoreo higrotérmico muestra que con calefacción el edificio responde manteniéndose en la zona de confort de invierno del nomograma de B. Givoni mientras que el comportamiento de verano muestra un sobrecalentamiento a pesar de contar con refrigeración. Esto impactará en la propuesta de rehabilitación.

#### 1.5. Diagnóstico y propuesta de rehabilitación energética:

El edificio es de construcción convencional típico en la región y de baja eficiencia energética. El personal manifiesta que es muy caliente en los meses de verano y regular en los meses de invierno. A pesar de contar con sistema de climatización. La medida más importante es trabajar sobre el techo con dos medidas prioritarias: a. agregar 8 cm de EPS de 30 kg/m<sup>3</sup> sobre la losa cubierto (techo invertido) con 6 cm de arcilla expandida. Una segunda medida es agregar un EIFS/SATE de 4 o 5 cm de EPS de 30Kg/m<sup>3</sup> en la cara opaca exterior (Stazi, F., et Al: 2009). La tercera medida y probablemente la más costosa cambiar las carpinterías de ventanas por otras de PVC con DVH y cortinas exteriores automáticas. En cuanto a climatización pensar en un sistema frío/calor con bomba de calor y sonda geotérmica accionado por el generador solar. Automatizado con los horarios de funcionamiento del edificio.

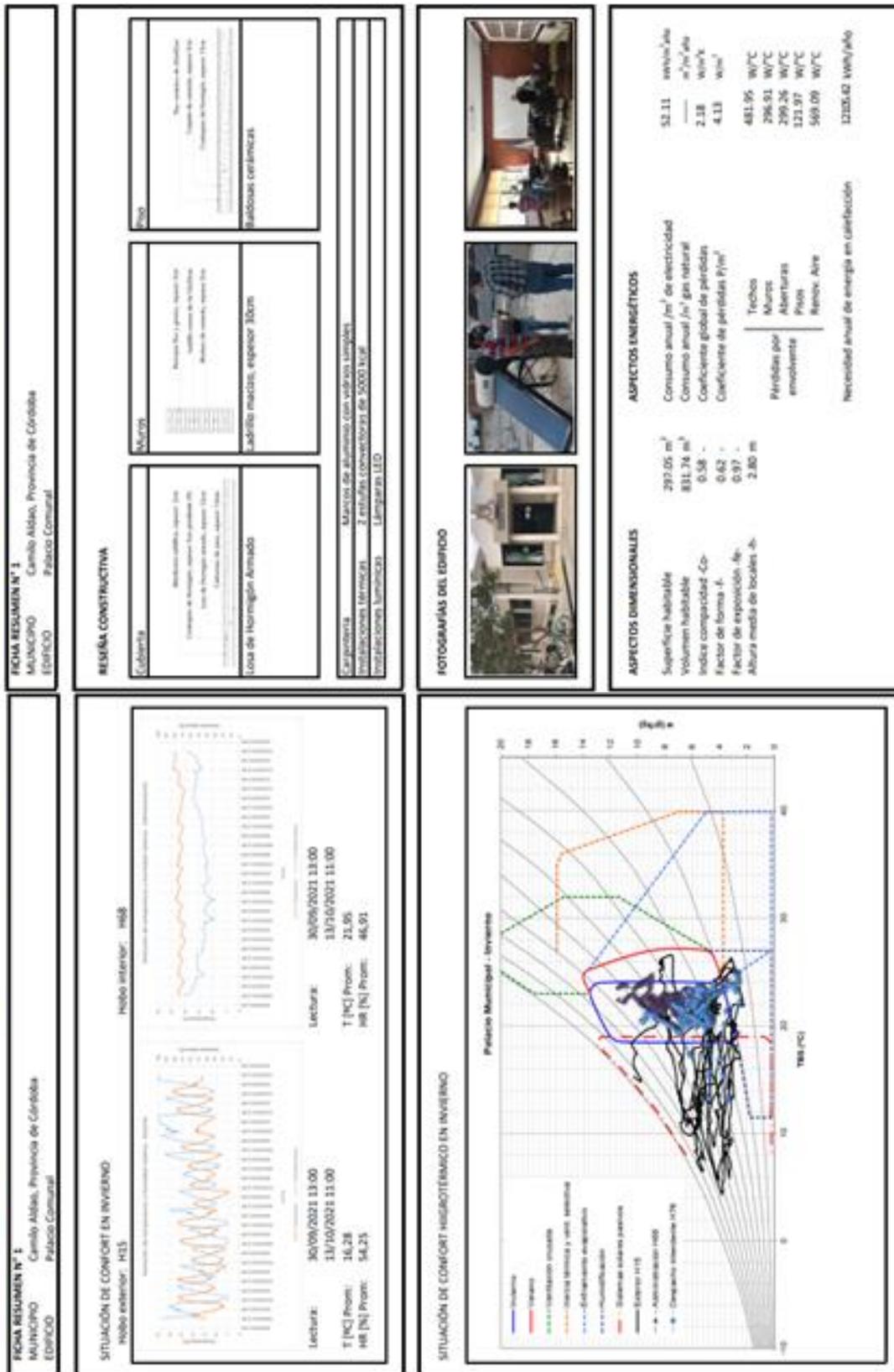


Figura 13b: Ficha síntesis del caso «Palacio Municipal» en Camilo Aldao, Córdoba (parcial)

### 1.5. Diagnóstico y propuesta de rehabilitación energética:

El edificio es de construcción convencional típico en la región y de baja eficiencia energética. El personal manifiesta que es muy caliente en los meses de verano y regular en los meses de invierno. A pesar de contar con sistema de climatización. La medida más importante es trabajar sobre el techo con dos medidas prioritarias: a. agregar 8 cm de EPS de 30 kg/m<sup>3</sup> sobre la losa cubierto (techo invertido) con 6 cm de arcilla expandida. Una segunda medida es agregar un EIFS/SATE de 4 o 5 cm de EPS de 30Kg/m<sup>3</sup> en la cara opaca exterior (Stazi, F., et Al: 2009). La

tercera medida y probablemente la más costosa cambiar las carpinterías de ventanas por otras de PVC con DVH y cortinas exteriores automáticas. En cuanto a climatización pensar en un sistema frío/calor con bomba de calor y sonda geotérmica accionado por el generador solar. Automatizado con los horarios de funcionamiento del edificio.

## 2. CONCLUSIONES.

La auditoría energética es una herramienta válida para conocer y diagnosticar las características térmicas y funcionamiento higrotérmico y energético de edificios. Permite generar información sea cuantitativa como cualitativa para no solo tener información primaria sino conocer la opinión de sus habitantes. Esto facilita la justificación de donde priorizar las inversiones en rehabilitación. El trabajo muestra con claridad las fallas cometidas en la primera rehabilitación donde se priorizó la generación fotovoltaica con la ley de prosumidores de la Provincia de Santa Fe invirtiendo recursos escasos que deberían haberse usado en la envolvente. Incluso en un clima con cierta rigurosidad climática en invierno y verano las recomendaciones de quitar la protección solar muestran no ser razonables. Se mantiene la necesidad de primero un criterio bioclimático, seguido de reducción de la carga térmica y por último compensar con renovables para optimizar la eficiencia energética respecto de la inversión económica.

## 3. REFERENCIAS.

- Czajkowski, J., Gómez, A., Vagge, C., Salvetti, B., Marcilese, M., Diulio, M. d., y otros. (2012). Evaluación del confort higrotérmico invernal en viviendas unifamiliares del gran La Plata mediante auditorías. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 5.101-5.106. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Czajkowski, J., Basualdo, D., Coronel, A. y Gómez, A. (2019) Evaluación del comportamiento térmico de vivienda social mediante termografía. *Condición de verano*. XXIII Congreso y XXXVIII Encontro Arquisur Belo Horizonte, Brasil. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/82959>
- Filippin, C., & Follari, J. (2003). Comportamiento termico de un proyecto demostrativo bioclimático en San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 5.69-5.76. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V., & Martínez, C. (2000). Rediseño y actualización del programa computacional para verificación del riesgo de condensación en cerramientos exteriores. *Avances en Energías Revables y Medio Ambiente*, 4. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Salvetti, M. B., Czajkowski, J. D., & Gómez, A. F. (2009). Análisis del comportamiento energético-ambiental en torre de viviendas en La Plata. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 5.127-5.133. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Stazi, F., Di Perna, C., & Munafó, P. (2009). Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings*(41), 721-731.
- Verbeek, G., & Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings* (37), 747-754.
- Normas: IRAM 11601 (2002). Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y materiales de construcción en régimen estacionario. Norma IRAM 11603. (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la Republica Argentina*. Norma IRAM 11604 (2001). Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico  $G_{cal}$  de pérdidas de calor. Cálculo y valores límite. Norma IRAM 11605 (1996). Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Norma IRAM 11659-1/2 (2004/7). Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración. Y Parte 2: edificios para viviendas. Valores admisibles  $G_{ref}$ . Norma IRAM 11900 (2017). Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética.
- Stazi, F., Di Perna, C., & Munafó, P. (2009). Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings* (41), 721-731. doi:10.1016/j.enbuild.2009.02.008 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809000279>
- Verbeek, G., & Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings* (37), 747-754. doi:10.1016/j.enbuild.2004.10.003 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003366>.

**Agradecimientos:** A la Unión Europea y en particular a la República de Francia por el financiamiento de un proyecto que por su complejidad y amplitud no sería posible con los programas nacionales de CyT. A la RAMCC por el apoyo brindado en la gestión de los municipios a auditar. Al Sr Intendente de Camilo Aldao y su equipo por la gran cortesía y calidez brindada al equipo auditor al visitarlos. A la ciudadanía del municipio, empleados y funcionarios del palacio municipal.

# DESARROLLO DE UN MICROGENERADOR DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA PARA LA CIUDAD DE TRES ARROYOS

Taccone, Vera<sup>1</sup>; Roldo, Antonella<sup>2</sup>; Artaza Martina<sup>3</sup>; Zijlstra, Alejandro<sup>4</sup>; Attorresi, Luciano<sup>5</sup>; Ponzoni, Lucio<sup>6</sup>

1-Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

2 Universidad Provincial del Sudoeste

3 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

4 Universidad Provincial del Sudoeste

5 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

6 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero-UNSAM

[taccone46836@estudiantes.untref.edu.ar](mailto:taccone46836@estudiantes.untref.edu.ar)

## RESUMEN.

En el siguiente artículo se tratará el diseño y construcción de un microgenerador hidroeléctrico para instalar en el segundo arroyo de la ciudad de Tres Arroyos. El diseño está basado en una micro turbina de origen japonés, llamado "PicoPica", equipo de generación de energía hidráulica con potencial para ser dispuesto en áreas no electrificadas. Esta readecuación de la turbina será diseñada con el software CAD/CAE de SolidWorks®, para ser luego impresa como prototipo en impresión 3D con materiales de bajo impacto ambiental.

**Palabras Claves:** Energía Hidroeléctrica, Renovable, Electricidad , Turbina.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable

**Categoría del Trabajo:** Trabajos de estudiantes de grado

## 1. INTRODUCCIÓN

El acceso a la energía limpia es fundamental para los tres pilares del desarrollo sostenible: el económico, el social y el ambiental [1]. En la actualidad, cerca de 1000 millones de personas aún viven sin electricidad, y cientos de millones más viven con un suministro insuficiente o poco confiable. Al mismo tiempo, aproximadamente 3000 millones de personas utilizan combustibles contaminantes o biomasa para cocinar o calefaccionar sus viviendas, lo que genera contaminación del aire en espacios abiertos y cerrados.

Las energías renovables se definen como aquellas que se obtienen de fuentes naturales inagotables, ya sea por la gran cantidad de energía que contienen o por ser capaces de regenerarse por medios naturales.

Entre los diferentes tipos de energías renovables encontramos los siguientes: hidráulica, eólica, solar, geotérmica, mareomotriz, energía de la biomasa. En los sistemas de energía hidroeléctrica se aprovecha la energía hidráulica que tiene el agua, por su velocidad, por su altura o presión. De esta forma, el agua es retenida en un embalse o presa, dejándola caer por una tubería, cuya salida se coloca una turbina, el eje de la cual comienza a girar al caer; este giro pone en marcha el generador eléctrico obteniéndose así la electricidad. Una de las grandes ventajas de este tipo de generación es que puede ser constante y previsible.

A nivel mundial el 16% de la energía utilizada para la generación de energía eléctrica proviene de la energía hidroeléctrica, y se estima que solo ha sido aprovechado el 30% del potencial.

Dentro de América del Sur, Argentina se posiciona en el puesto número cuatro con una potencia instalada de 11170 MW, y cuenta aproximadamente con un 38% de energía hidroeléctrica. En Brasil, Venezuela y Colombia cuentan con una mayor potencia instalada la cual varía en un rango de 11606 a 98015 MW. [2]

Si bien la energía hidroeléctrica se considera un recurso renovable, hay que contemplar que el desarrollo de electricidad a gran escala puede provocar daños ambientales y conflictos sociales, particularmente en el caso de las centrales hidroeléctricas basadas en el almacenamiento. En este caso, el prototipo a implementar se clasifica dentro de los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAHs), los cuales mitigan los impactos ambientales debido a que no requiere la inundación de grandes terrenos ni produce residuos contaminantes.

Los PAHs se pueden clasificar según su potencia tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas según su potencia. Fuente: OLADE [3]

POTENCIA EN KW	TIPO
HASTA 50	MICRO CENTRAL
50-500	MINI CENTRAL
500-5000	PEQUEÑA CENTRAL

Argentina, según la Secretaría de Energía de la Nación, cuenta con por lo menos 45 Pequeños Aprovechamientos Hidráulicos extendidos a lo largo del país.

Dentro de las micro centrales, según la clasificación de la Secretaría de Energía, se encuentran las PICO-CENTRAL que tienen una potencia de 0-5 kW. [4]

Tomando de ejemplo la ciudad de Tres Arroyos, el consumo de energía eléctrica ha incrementado año a año. A raíz del análisis realizado por CELTA (Cooperativa eléctrica de Tres Arroyos), en los años 2018, 2019 y 2020, se demostró que aún en pandemia y con las restricciones sanitarias impuestas, no disminuyó el consumo [5]. Se estima que para 2021 la demanda de los distintos rubros seguirá en alza.

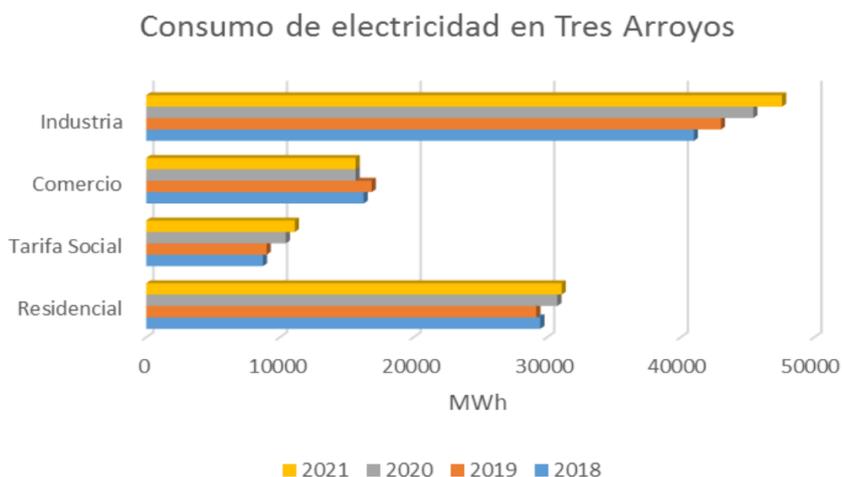


Figura 1 Consumo eléctrico ciudad de Tres Arroyos. Fuente: elaboración propia

A raíz de esto, y como parte del proyecto de final de una materia universitaria, surge el proyecto de diseñar y construir un prototipo de turbina de Arquímedes que genere energía hidroeléctrica, de fácil ensamblaje y movilidad, empleando materiales amigables con el medio ambiente y biodegradables. Al ser un sistema aislado de la red de distribución, se busca abastecer de electricidad a zonas rurales, pequeñas comunidades o regiones de difícil acceso, que hoy en día no disponen de éste servicio, colaborando a una mejor calidad de vida. De esta forma, las personas podrán satisfacer necesidades básicas como la cocción de alimentos, iluminación, agua caliente, calefacción, refrigeración, etc. Además, es una alternativa viable económicamente, ya que a diferencia de los altos costos de infraestructura que conlleva la extensión de redes eléctricas, los materiales a emplear en este tipo de sistemas son de bajo costo y de fácil acceso, pudiendo ser diseñados y montados por personas de la comunidad del lugar donde se vaya a instalar.

El sistema propuesto se clasifica como pequeña central hidroeléctrica (mini – microcentral) y se trata de un diseño que utiliza un Tornillo de Arquímedes como fuente motriz del sistema de rotación.

La turbina de Arquímedes es un dispositivo que consiste en principio, en una superficie con hélices helicoidales dentro de un cilindro cuyo eje está inclinado de tal modo que su extremo inferior quede dentro del agua. El cilindro y la hélice helicoidal forman una serie de celdas en las cuales el agua desciende cuando el tornillo gira. Se encuentra en el grupo de máquinas gravimétricas, es decir que el agua contribuye al movimiento de la turbina por su propio peso. Se llenan las cavidades del tornillo que funcionan como cajones que se desplazan hacia abajo y por la acción de su peso y la superficie helicoidal de la hélice, hace girar al tornillo. Es decir que utilizan la variación de la energía geodésica del fluido.

Algunas de las ventajas del tornillo de Arquímedes en comparación con otras unidades de generación de energía hidráulica (Pelton o Francis) son:

- Capacidad de operación a bajos caudales (hasta 10 m<sup>3</sup>/s) y saltos (hasta 10 m). Figura 2.
- Menor peso y tamaño de sus elementos.
- No requiere cámara de carga ni tubería forzada.
- Funciona a una velocidad de rotación relativamente baja, lo que origina poco desgaste de los componentes mecánicos y garantiza su vida útil.
- La forma en espiral evita que la unidad sea obstruida.
- Coste de mantenimiento bajo

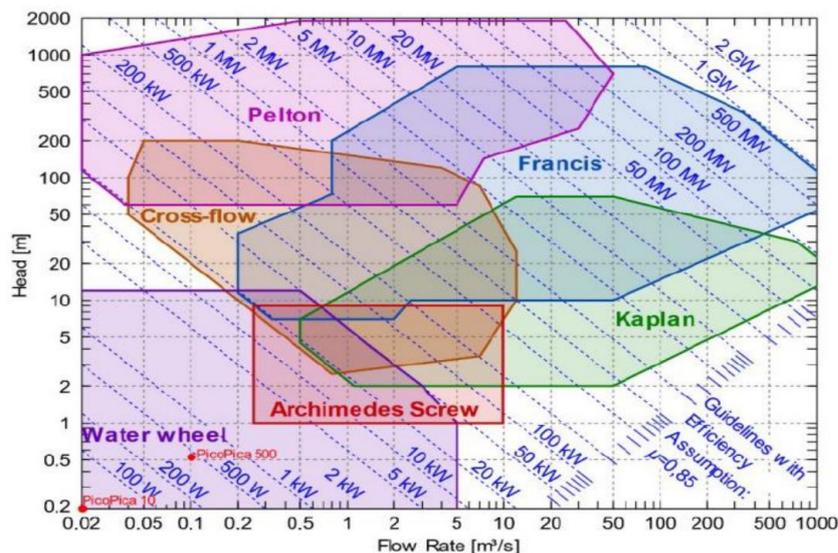


Figura 2 Rango de trabajo de diferentes turbinas hidráulicas [6].

Las partes principales de la turbina son el rotor, el tornillo que se encuentra sujetado con un cojinete superior y uno inferior, un multiplicador/reductor de velocidad y un generador.

Las variables de diseño son muy importantes para optimizar los niveles de potencia obtenidos. A continuación, se detallan las más importantes y su incidencia.

- Relación de diámetros: La relación entre el diámetro de la hélice y el correspondiente al eje tiene incidencia directa sobre el área útil sobre la que incide el flujo de agua. El objetivo es maximizar dicha área, por lo que lo ideal es minimizar el diámetro del eje hasta el límite técnico del material y maximizar el diámetro de la hélice.
- Longitud: Cuanto mayor es esta dimensión, existe más superficie de contacto entre las paredes de la hélice y el flujo de agua, lo que implica mayor potencia en el eje. A pesar de

esto, la longitud se encuentra limitada ya que con ella aumentan las pérdidas por rozamiento. Es por eso que existe un punto de máxima potencia con respecto al largo: el doble del diámetro de la hélice,

- Paso: Es fundamental para el funcionamiento de la turbina. Cuanto mayor sea el paso menos perturbación tendrá el flujo de agua por lo que habrá menores rozamientos y se tendrán mejores niveles de potencia.

El proyecto de instalación se llevará a cabo en un arroyo, ya que el dispositivo a emplear no necesita de una gran profundidad. De esta forma, se suministrará electricidad a la población local, promoviendo un enfoque de autosuficiencia a independencia en el suministro de energía capaz de generar electricidad limpia e incluso almacenarla en baterías.

La energía eléctrica obtenida será destinada a la iluminación del camino que bordea al arroyo a través de 600 m, aproximadamente.



Figura 3 Camino del arroyo. Fuente: elaboración propia

Para el diseño de la turbina se utilizó el programa SolidWorks, un software CAD/CAE para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes.

Para la fabricación del primer modelo de turbina para hacer los ensayos, se prevé el uso de la tecnología de impresión 3D. Esta herramienta nos va a permitir probar diferentes diseños y nuevos materiales, antes de su construcción, mejorando el resultado final de la máquina antes de su instalación.

Se sabe que, para la mayoría de las investigaciones, para ahorrar tiempo y dinero, las pruebas se realizan con un modelo a escala geométrica en lugar de un prototipo de tamaño real, por lo cual es de suma importancia la realización correcta de la escala.

Los tres propósitos principales del análisis dimensional son:

1. Generar parámetros adimensionales que ayuden al diseño de experimentos y al reporte de los resultados experimentales.
2. Obtener leyes de escalamiento de modo que se pueda predecir el desempeño del prototipo a partir del desempeño del modelo.
3. Predecir las tendencias en la relación entre parámetros

En cuanto a la similitud, deben cumplirse tres condiciones para que esta sea completa entre el modelo y el prototipo:

1. Similitud geométrica: el modelo debe tener la misma forma que el prototipo, pero se puede escalar por algún factor de escala constante.
2. Similitud cinemática: la velocidad en cualquier punto del flujo del modelo debe ser proporcional (por un factor de escala constante) a la velocidad en el punto correspondiente en el flujo del prototipo.
3. Similitud dinámica: se logra cuando todas las fuerzas en el flujo del modelo se escalan por un factor constante a fuerzas correspondientes en el flujo del prototipo.

Para llevar a cabo el diseño y desarrollo de esta turbina se deben definir ciertos parámetros, para lo cual se utilizarán las ecuaciones de semejanza y las ecuaciones propias de la turbina Arquímedes. La propuesta para este trabajo fue utilizar como modelo la unidad de energía PicoPica10, un equipo de generación de energía hidráulica con un gran potencial para disponerse en áreas no electrificadas, con características que incluyen generación de baja carga. Es una unidad que permite una generación de alrededor de 10W si se tiene asegurado un flujo de 10 l/s y una altura de 0,1 m. Este producto se puede ensamblar manualmente y utilizar como iluminación de seguridad u otro uso, extrayendo energía de una vía fluvial cercana.



Figura 4 Turbina PicoPica10 [10]

Conociendo todos los parámetros del modelo, se busca construir una turbina semejante a la PicoPica10 que pueda adaptarse a las características del arroyo en la localidad de Tres Arroyos.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo global de este proyecto es la generación de energía eléctrica mediante una microcentral hidroeléctrica aprovechando el caudal y velocidad de un arroyo.

Los objetivos específicos a corto plazo son:

- Determinar los parámetros necesarios para la construcción de la microcentral.
- No modificar las características naturales del ambiente.
- Generar electricidad para alumbrado público.

Los objetivos a mediano/largo plazo:

- Abastecer de electricidad a establecimientos deportivos, bibliotecas, barrios.
- Generar conciencia a los habitantes de la ciudad sobre el cuidado de los arroyos.
- Mejorar la calidad de vida de las personas afectadas por el proyecto.
- Crecer como organización para instalar más generadores en distintas partes de la región.

## 3. METODOLOGÍA

El prototipo estará ubicado en el arroyo del medio de la ciudad de Tres Arroyos. La elección se debió a que su curso atraviesa el centro de la ciudad, tiene mejor caudal y circulación de agua. Se aprovechará la energía potencial y cinética propia del arroyo, la cual se transformará en energía mecánica a través de la turbina y finalmente en energía eléctrica con el generador.



Figura 5: Ciudad de Tres Arroyos. Fuente: Hablemos de Argentina [7]

Las características principales que se deben tener en cuenta al desarrollar una central hidroeléctrica [8,9], desde el punto de vista de su capacidad de generación de electricidad son:

- Potencia (Ecuación 1)

$$P = \eta \cdot \rho \cdot g \cdot Q \cdot H \quad (1)$$

Donde:

$\eta$ : rendimiento global de la instalación

Q: caudal de agua en m<sup>3</sup>/s que se descarga en las turbinas

g: 9,8 m/s, aceleración de la gravedad.

H: salto bruto en metros. [4]

- Tipo de turbina: pudiendo ser gravimétrica, axial, radial, entre otras.
- Generador: En el que un motor mueve el eje de un generador eléctrico basado en la ley de Lenz, es decir, en las corrientes inducidas en los bobinados de la máquina por los campos magnéticos que ella misma crea o existen en su interior. Dicho de otra forma, lo consiguen gracias a la interacción de los dos elementos principales que lo componen: la parte móvil llamada rotor, y la parte estática que se denomina estator. Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético (actúa como inductor) para que el otro lo transforme en electricidad (actúa como inducido).

Es importante aclarar que este proyecto no contempla el diseño y cálculo del generador acoplado a la turbina, dejando esto a una segunda etapa del proyecto.

Entonces, en primer lugar, hay que determinar la potencia bruta del lugar en KW. Para esto, uno de los parámetros a conocer es el caudal del arroyo.

La medición se llevó a cabo empleando el método del flotador (Figura 6), que permite medir caudales con mediana exactitud por lo que conviene emplearlo en arroyos de agua tranquila. Para realizar la medición, se utilizó como flotador una botella de 1,5 litros, llenando 2/3 parte de la misma con agua, registrándose la medida en distintas zonas del curso del arroyo.

Para ello se definieron dos zonas de medición para realizar un análisis de alternativas de locación. Se registraron los valores de ancho, profundidad promedio, área, velocidad y caudal.



Figura 6 Medición en arroyo. Fuente: elaboración propia

Para los lugares potenciales para la instalación de la microturbina se optó por la zona 1, ubicada en cercanías del puente de Av. Belgrano 1500 y la zona 2, a cercanías de uno de los extremos del Parque Miedan.

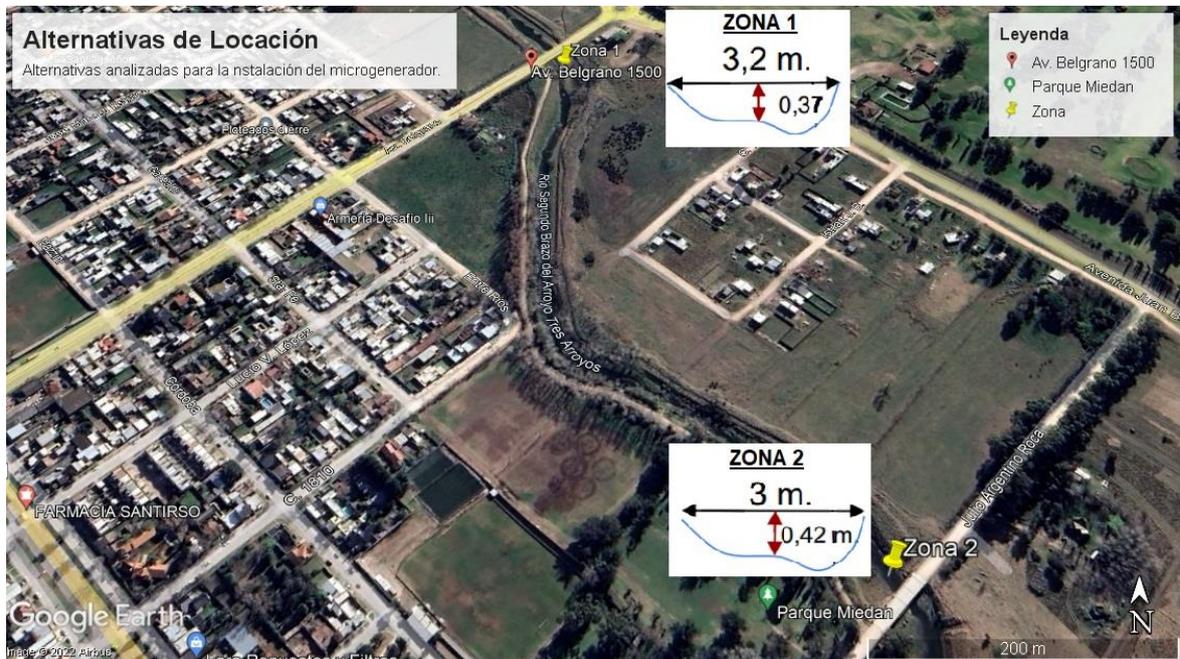


Figura 7. Alternativas de locación. Fuente: Google Earth con edición propia.

Tanto para la Zona 1 como para la Zona 2 se recabaron datos de distancia recorrida en función del tiempo para conocer la velocidad del cauce. Para una mejor aproximación la medición fue repetida 3 veces. Se estimó la velocidad mediante:

$$V = \text{Distancia Recorrida} / \text{Tiempo medio} \quad (2)$$

Luego, se estimó la sección transversal media, afectada por un coeficiente de corrección de 2/3, según la ecuación 3:

$$A = (\text{Profundidad media} \times \text{tirantes}) \times 2/3 \quad (3)$$

Con el promedio de las velocidades es factible calcular el caudal del arroyo a partir de la ecuación 4 de continuidad:

$$Q = \text{Área} \times \text{Velocidad} \quad (4)$$

Los resultados fueron:

**ZONA 1:**

Área = 0,79 m<sup>2</sup>

Velocidad 1: 1 m/s

Velocidad 2: 0,95 m/s

Q = 0,770 m<sup>3</sup>/s

**ZONA 2:**

Área = 0,83 m<sup>2</sup>

Velocidad 1: 0,42 m/s

Velocidad 2: 0,66 m/s

Q = 0,45 m<sup>3</sup>/s

Para definir los parámetros se tomaron los valores medios entre las zonas 1 y 2. Por lo tanto:

Qp = 0,61 m<sup>3</sup>/s

Vp = 0,75 m/s

Hp = 0,40 m

Contando con esta información, se determinó la factibilidad de implementación de un generador hidroeléctrico ya que se necesita un mínimo de 0,1 m de profundidad y un caudal de 0,01 m<sup>3</sup>/s pudiendo generar 10W para al menos dos lámparas led.

Tomando como modelo la PicoPica10, cuyos parámetros están estandarizados y son conocidos, se podrá dimensionar una máquina semejante prediciendo el comportamiento que tendrá la misma al emplazarla en el arroyo.

Para el correcto aprovechamiento del caudal y funcionamiento de la turbina, se propone redireccionar parte del caudal del arroyo (by-pass) para generar el salto necesario y que el dispositivo no quede completamente sumergido (Figura 7). Para disminuir las pérdidas de carga se busca que las secciones tengan la menor longitud y, de ser posible, la menor cantidad de codos.

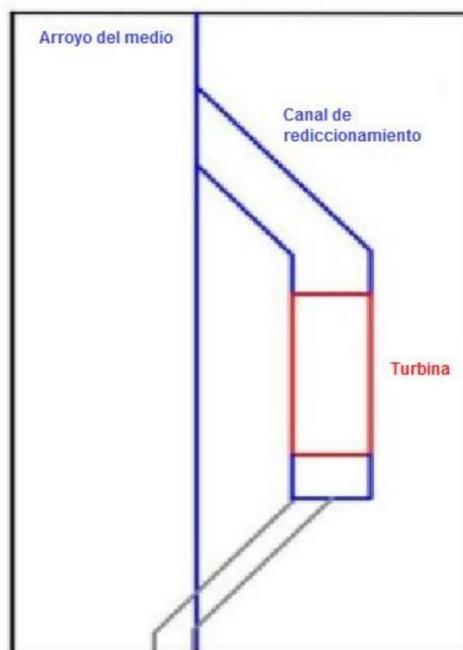


Figura 8 Representación del by-pass sobre el arroyo. Fuente: elaboración propia

Debido a que nuestros valores de caudal a lo largo del arroyo están sobredimensionados para la máquina que se desea construir, se propone que el desvío del curso del arroyo mediante la construcción de una canalización, con una distancia entre ambos de no más de 0,5m, e instalándose un pequeño embalse para asegurar un ingreso uniforme del flujo por la sección de la turbina. Teniendo en cuenta la profundidad del arroyo y las dimensiones máximas que se podrán imprimir en las máquinas 3D del laboratorio, la canalización tendrá una sección cuadrada de profundidad y un ancho de 0,4 m, estas medidas permitirán que las hélices del prototipo de la turbina tengan un diámetro (D1) de 0,3m. Comparando los datos del diámetro de las hélices y del eje de la turbina Pico Pica 10, se halló a través de una regla de tres simple el diámetro del eje de la turbina Arquímedes

$$\begin{array}{l} \text{Si para } 198\text{mm} \text{ ————— } 12\text{mm} \\ \quad \quad \quad 300\text{mm} \text{ ————— } D2 = 18,1\text{mm} \end{array}$$

A partir de estas suposiciones y las mediciones realizadas, se encuentra que  $Q=0,053 \text{ m}^3/\text{s}$

Teniendo en cuenta la profundidad del arroyo se propuso que la canalización se diseñe de forma tal que la turbina cuente con un salto de 0,4 m. Además, contemplando el equipamiento disponible en los laboratorios, se tiene una capacidad de impresión de hasta 1 m. Es por esto que se propone que el largo de la turbina sea de esta longitud. A través de trigonometría se calculó el ángulo de inclinación de la hélice y se obtuvo la ecuación 5:

$$\text{sen}(\alpha) = \text{profundidad}/\text{largo} \quad (5)$$

Por lo tanto,  $\alpha = 23,5^\circ$

Su capacidad de generación de electricidad, a partir de la ecuación 1, será 207,76 W

En el caso del rendimiento, se tomó un valor aproximado al 75% ya que es un factor medio al que pueden llegar este tipo de turbinas hidráulicas.

Otro de los parámetros relevantes para la construcción de la turbina Arquímedes, es el número de revoluciones por minuto, se seleccionará una velocidad de giro en el eje de 100 rpm que será acoplado a un generador de 1500 rpm mediante un acople multiplicador.

Todos estos resultados se encuentran resumidos en la tabla 2, dentro del apartado resultados y discusión.

Una vez obtenidos todos los datos de importancia para la construcción de la turbina, se pasó al software SolidWorks®, donde se realizaron las piezas y planos de la misma. Estos también se podrán encontrar dentro del apartado resultados y discusión.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la siguiente tabla se encuentran plasmadas todas las dimensiones necesarias para la fabricación de la turbina:

Tabla 2 Comparación de las dimensiones modelo vs prototipo. Fuente: elaboración propia

Dimensiones		Modelo "PicoPica 10"	Prototipo "Turbina Arquímedes- Tres Arroyos"
Generación	Potencia	10 W	155,82W
	Número de revoluciones	58rpm	100rpm
Dimensiones Estructurales	Longitud (L)	1085 mm	1000mm
	Ancho (W)	280 mm	400mm
	Altura (H)	385 mm	400mm
	Diámetro de la hélice	198 mm	300mm
	Diámetro del eje	12 mm	18,1 mm
	Ángulo de inclinación del tornillo	20°	23,5°
Condiciones de funcionamiento	Caudal	$0,01 \frac{m^3}{s}$	$0,053 \frac{m^3}{s}$
	Velocidad	$0,33 \frac{m}{s}$	$0,75 \frac{m}{s}$

Según dicha información, teniendo de referencia la turbina PicoPica 10, una vez construida la turbina debería funcionar de forma correcta proporcionando una potencia de 155,82 W. Con estos datos, se realizaron los planos con SolidWorks para la fabricación en 3D de las distintas piezas de la turbina, figura 8.

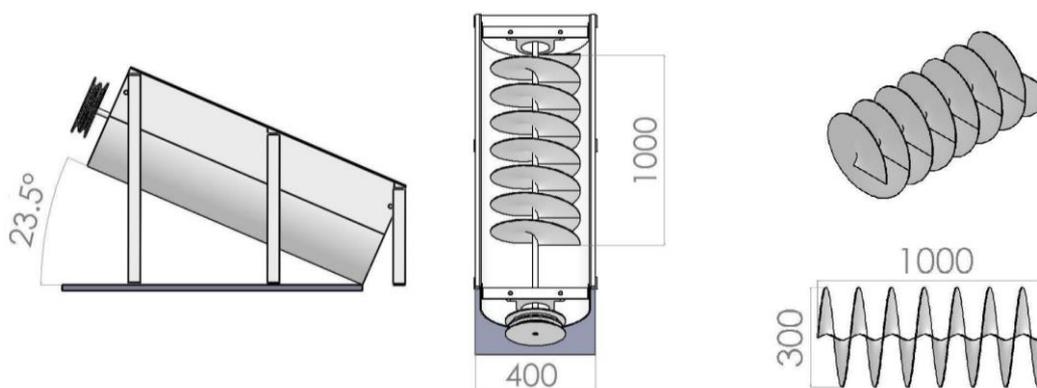


Figura 9 Dimensiones del prototipo. Fuente: elaboración propia

Los pasos a seguir luego de llegar a los resultados anteriores son:

- Construcción de modelos en laboratorios.
- Realizar mediciones a lo largo del año para saber la velocidad media anual del arroyo y las velocidades mínimas y máximas afectadas por las lluvias locales y regionales.
- Hacer ensayos de simulación por elementos finitos.
- Analizar interferencias con ramas, materia flotante o semi sumergida y fauna acuática que esté en el arroyo.
- Corroborar ensayo en el túnel de viento.
- Realizar la instalación en Tres Arroyos.

#### 5. CONCLUSIONES

A lo largo de este proyecto, pudimos llegar a la conclusión de que a través de pequeños aprovechamientos hidráulicos se puede llegar a obtener y aprovechar la energía cinética y potencial en arroyos de bajo caudal de regiones con escasez de recurso eléctrico, ofreciendo energía limpia y reduciendo el impacto negativo sobre la vida acuática.

Luego de la realización de las mediciones de caudales del arroyo, se obtuvieron los datos necesarios para el dimensionamiento de la turbina. Se espera en breve comenzar con la fabricación de la turbina en 3D y realizar la instalación en Tres Arroyos. En una primera instancia se realizará la iluminación del camino próximo al mismo y en un futuro se podrían realizar proyectos a mayor escala generando más energía abasteciendo a barrios, canchas de fútbol y parques cercanos a la instalación. Así mismo, concientizar a la población de cómo utilizar este recurso y sobre la contaminación que encontramos en él.

Por último, establecimientos educativos podrán hacer visitas a la instalación para conocer sobre el prototipo y así incitar a que los estudiantes incursionen en temas relacionados a la energía y ambiente.

## 6. REFERENCIAS

- [1] A. Bárcena y otros (2020), La emergencia del cambio climático en América Latina y el Caribe: ¿seguimos esperando la catástrofe o pasamos a la acción?, Libros de la CEPAL, N°160=(LC/PUB.2019/23-P), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- [2] Ministerio de energía y minería Presidencia de la Nación. (2017). Hidroelectricidad en Argentina y el Mundo. Capital Federal, Argentina. Recuperado de: <https://www.minem.gob.ar/www/844/26035/hidroelectricidad-en-argentina-y-en-el-mundo#:~:text=Pa%C3%ADses%20reconocidos%20por%20sus%20pol%C3%ADticas,33%2C=1%25%20del%20total>
- [3] Organización latinoamericana de energía (OLADE), (1980) El desarrollo de pequeñas centrales hidroeléctricas en Latinoamérica y el Caribe (2a. ed.), Panamá. Recuperado de: <http://biblioteca.olade.org/opac-tmpl/Documentos/old0225.pdf>
- [4] Secretaría de Energía. (2017). Argentina. Recuperado de: <http://datos.minem.gob.ar/dataset/generacion-electrica-pequenos-aprovechamientos-hidroelectricos/archivo/5e1ab816-88e3-4190-98d4-a3aff4fc94b1>
- [5] La Voz del Pueblo. (2021). Aún en pandemia, siguió creciendo el consumo eléctrico de las industrias. Tres Arroyos. Recuperado de: <https://lavozdelpueblo.com.ar/noticia/112937-A%C3%BAn-en-pandemia,-sigui%C3%B3-creciendo-el-consumo-el%C3%A9ctrico-de-las-industrias%0A%20>
- [6] YoosefDoost A. y Lubitz G.D., Sustainability 2020, 12(18), 7352; <https://doi.org/10.3390/su12187352>. Received: 7 August 2020 / Revised: 4 September 2020 / Accepted: 4 September 2020 / Published: 8 September 2020.
- [7] Hablemos de Argentina. (2018). Tres Arroyos Buenos Aires: ubicación, turismo y más. Recuperado de : <https://hablemosdeargentina.com/c-buenos-aires/tres-arroyos-buenosaires/>
- [8] José A. C. González, Roque C. Pérez, Antonio C. Santos, Manuel-A.C. Gil (2009), "CENTRALES DE ENERGÍAS RENOVABLES: GENERACIÓN ELÉCTRICA CON ENERGÍAS RENOVABLES", Madrid, España. Editorial: Pearson Educación y la Universidad Nacional de Educación a Distancia.
- [9] Zoccali J., Zoccali N, Ponzoni L, Sframeli V., Lopez Colmenares, Zanini O., Roldos A., Nuñez=T., Zijlstra A., Artaza M., Tacone V., Quinteros L. Ludueña A. IMPLEMENTACIÓN DE UN MICROGENERADOR DE ENERGÍA HIDROELÉCTRICA. (2022) Revista Argentina de Ciencia y Tecnología Universidad Nacional de Tres de Febrero. ISSN 2618-1894.
- [10] Sumino Co., Ltd. Japan. (2020). Spiral Hydraulic Power Unit "PicoPica". Recuperado de: [http://www.unido.or.jp/files/sites/2/PICOPICA\\_Specification201127.pdf](http://www.unido.or.jp/files/sites/2/PICOPICA_Specification201127.pdf)

# Dispositivo de Placa Caliente con guarda, para ensayos de Transferencia de calor.

Artaza Martina<sup>1</sup>; Muñoz, Rocío<sup>2</sup>; Taccone, Vera<sup>3</sup>; Attorresi, Luciano<sup>4</sup>; Boro, Drissa<sup>5</sup>; Ponzoni, Lucio<sup>6</sup>

1 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

2 Universidad Nacional de Tres de Febrero

3 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

4 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero

5 UNTREF-CNEA- Université Joseph KI-ZERBO, Burkina Faso

6 Comisión Nacional de Energía Atómica – Universidad Nacional de Tres de Febrero- UNSAM

[martina.artaza20@gmail.com](mailto:martina.artaza20@gmail.com)

## RESUMEN

El presente artículo trata sobre el diseño y construcción de un dispositivo denominado placa caliente con guarda, que permitirá realizar el ensayo de transferencia de calor de diferentes materiales empleados en la construcción de una Ecovivienda Nacional desarrollada para situaciones de Emergencia. Este dispositivo, ayudará a mejorar el diseño de los sistemas de calefacción y refrigeración pasiva de la estructura de la Ecovivienda, como las placas de las paredes, aberturas de la vivienda, entre otras partes, permitiendo realizar estimaciones de eficiencia energética y reducir los gastos de energía. La concepción del desarrollo de dispositivo fue pensado para ser construido en parte con materiales reciclados y económicos, a fin de reducir los costos de su construcción.

**Palabras Claves:** Ecovivienda, Resistencia, Transferencia de calor, Placas cemento-PET, Conductividad térmica.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable.

**Categoría del Trabajo:** Estudiantes de grado

## 1. INTRODUCCIÓN

En Argentina, la población vive en gran medida en áreas urbanas. En el año 2001 la población urbana total era del 89,3% y para el año 2015, según proyecciones del INDEC, se estima que la población alcanzó 42,4 millones, mientras que la tasa de urbanización ascendió al 94%. Con dicha tasa, Argentina se encuentra entre las naciones más urbanizadas del mundo, por encima de la media de las naciones de Europa y Estados Unidos [1]. En este contexto, según estimaciones de la Subsecretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda de la Nación (desde marzo de 2018, Secretaría de Vivienda), en nuestro país el déficit habitacional es de 3,5 millones de viviendas. Esta situación de necesidad de urbes y viviendas que se adapten se incrementa en el marco de emergencia mundial COVID-19, ya que las condiciones sociales se ven afectadas, necesitándose planes de viviendas que respondan a dichas condiciones de emergencia.

Por otro lado, la disposición de residuos de las ciudades constituye un problema de difícil solución. Actualmente los residuos urbanos de las grandes ciudades de nuestro país son, en su mayor parte, dispuestos en rellenos sanitario o vertederos a cielo abierto, alternativa poco racional desde el punto de vista económico y ambiental. En Argentina se producen y se descartan aproximadamente 200.000 toneladas de envases PET por año, los cuales presentan un proceso de descomposición sumamente lento. “Las botellas de polietileno-tereftalato (PET) tardan más de 500 años en descomponerse, y duran más si están enterradas.” [2].

Además, Argentina dispone, en casi todo su territorio, de excepcionales condiciones para el desarrollo de energías renovables, lo cual permite, mediante la implementación de tecnologías no contaminantes, reducir el consumo de energía eléctrica de origen convencional manteniendo condiciones óptimas de habitabilidad y reduciendo de esa forma las emisiones de CO<sub>2</sub>.

En este contexto, surge el proyecto llevado adelante por el grupo de investigación, con el objetivo de diseñar y construir una vivienda de construcción modular, de fácil y rápido ensamblaje, empleando materiales reciclables y energías renovables para reducir el consumo energético e impacto ambiental, con el objetivo de mitigar la crisis habitacional del país. El proyecto es llevado a cabo por estudiantes, docentes e investigadores que trabajan en distintos grupos, estudiando cada uno una temática distinta: Transferencia de Calor, Fluidos Eólicos, Materiales y Diseño.

En particular, el grupo de Transferencia de Calor tiene como principal objetivo el estudio y diseño de un sistema de acondicionamiento capaz de mantener dentro de la construcción una temperatura relativamente constante y de confort durante todo el año disminuyendo la demanda de energía de red necesaria para la calefacción y refrigeración. Para ello, el primer paso fue determinar el flujo de calor a través de los muros, pisos y techo de la vivienda que serán construidos con placas desarrolladas por el grupo de Materiales, conformadas por una mezcla de cemento y botellas PET trituradas para mejorar la aislación y las propiedades mecánicas del material.

En el lenguaje cotidiano es muy común confundir los conceptos de calor y temperatura. La diferencia entre calor y temperatura radica en que el calor se define como el movimiento o intercambio de energía entre cuerpos, mientras que la temperatura es la medida de la agitación (energía cinética) de las moléculas de un cuerpo o sustancia. Los átomos y moléculas de los cuerpos de menor temperatura poseen una vibración más lenta o menor que aquella de los cuerpos a mayor temperatura. La relación entre calor y temperatura se debe a que para que la temperatura de un cuerpo cambie debe producirse una transferencia de calor.

Por lo tanto, el calor es la forma de energía que se transmite naturalmente, es decir no aplicando trabajo, desde un sistema de mayor temperatura a un sistema de menor temperatura. Así, la termodinámica estudia la relación entre el calor, la fuerza aplicada y la transferencia de energía producida.

De acuerdo a la termodinámica, los mecanismos de transmisión de calor son tres: conducción (transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia a las adyacentes menos energéticas, resultado de la interacción entre partículas), convección (transferencia de energía entre una superficie sólida y el fluido adyacente que se encuentra en movimiento, efecto combinado de conducción y movimiento del fluido) y radiación (transferencia de energía debida a la emisión de ondas electromagnéticas) [3].

De interés particular en la eficiencia térmica era el desarrollo de datos relativos a la transmisión de calor en aislación térmica para propósitos de diseño. En este panorama, se comenzaron a desarrollar dispositivos capaces de medir las propiedades térmicas de los materiales con más precisión que los anteriores que tenían altas fuentes de errores. Es así como surgen los primeros dispositivos de placas calientes con guarda.

El presente artículo trata sobre el diseño y construcción de un dispositivo basado en la ley de Fourier, formado por una caja caliente con guarda, para realizar ensayos de transferencia de calor

por conducción en materiales sólidos y así determinar la constante de conductividad térmica del material que conformaría las placas para la construcción de las paredes, piso y techo de la vivienda mediante la medición de temperatura y flujo de calor que se produce entre una placa caliente y una placa fría que se mantienen a temperatura constante, en estado estacionario. Por lo tanto, la transferencia de calor que rige en el ensayo de placa caliente con guarda es la de conducción, es decir, cuando una de las caras de un sólido posee mayor temperatura que la opuesta. Este fenómeno obedece la Ley de Fourier expresada como:

$$Q = -kA (T_2 - T_1) / dx \quad (1).$$

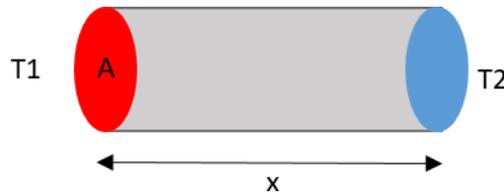


Figura 1: Representación de los parámetros de la expresión de Fourier. Fuente: elaboración propia

Donde:

- Q: Calor transferido (W)
- k: Conductividad Térmica. Es una propiedad intrínseca del material a través del cual se produce la transferencia de calor (W/mK)
- T2: Temperatura del medio de menor temperatura (K)
- T1: Temperatura del medio de mayor temperatura (K)
- A: Área transversal al flujo de calor (m<sup>2</sup>)
- x: Espesor/Distancia entre la región T2 y T1 (m)

Cabe destacar que el signo negativo de la Ley de Fourier indica que el calor se transfiere de la zona de mayor temperatura a la zona de menor temperatura.

Una vez determinada esta constante se podrá determinar el flujo de transferencia calor por el material empleando el modelo de Fourier. Posteriormente, se trabajará en el diseño de los sistemas de calefacción y refrigeración pasiva de la estructura, a demanda de la capacidad de la misma de mantener las temperaturas deseadas.

Se hace foco en la determinación de la constante de conductividad térmica ya que el mecanismo de transferencia de calor por conducción tiene mayor relevancia en el caso de estudio frente a los otros dos mecanismos convección y radiación.

El objetivo general de esta primera etapa del grupo de Transferencia de Calor es determinar el flujo de calor que se produce a través del material constitutivo de las paredes, piso y techo de la vivienda, formado por una mezcla de material PET y Cemento.

Los objetivos específicos en el corto plazo son:

- Determinar y estudiar los métodos de determinación de propiedades térmicas de los materiales.
- Determinar normas de ensayo disponibles.
- Diseñar y construir el dispositivo para llevar a cabo el ensayo.

Se plantea como objetivo a mediano plazo:

- Llevar a cabo el ensayo y determinar la conductividad térmica del material estudiado

El objetivo a largo plazo es:

- Diseñar un sistema de acondicionamiento térmico pasivo para mantener la temperatura de confort dentro de la construcción minimizando la demanda de energía de red.
- Colaborar en el desarrollo de una línea nueva de trabajo asociada a la transferencia de calor.

## 2. METODOLOGÍA

La primera parte del trabajo consistió en la búsqueda bibliográfica acerca de las metodologías disponibles y normadas para la determinación de la conductividad térmica de los materiales. Se halló que el método más utilizado es el de la placa caliente con guarda establecido en normas ISO, IRAM, ASTM, UNE-EN equivalentes. Por lo cual, se adquirió la norma IRAM 11.559 "Acondicionamiento térmico. Determinación de la resistencia térmica y propiedades conexas en régimen estacionario", equivalente a la norma ISO 8302:1991.

Una vez estudiadas las condiciones de la norma, se llevó adelante la etapa de diseño. En primer lugar, se eligió un aparato de caja caliente con guarda doble, es decir con una fuente caliente central y dos fuentes frías externas, dando lugar al espacio para ensayar dos probetas idénticas simultáneamente. Esta elección se debió principalmente a la simplificación en el cálculo de la transferencia de calor y mayor cantidad de datos para un resultado más seguro con menos errores. En segundo lugar, el aparato diseñado se diferencia de otros modelos construidos en el país en que las fuentes frías también son resistencias y no circuitos cerrados o abiertos de agua, con la ventaja de no tener que refrigerar el fluido circulante, reduciendo de esa manera riesgos de pérdidas en el circuito.

La segunda etapa del proyecto, es la construcción del dispositivo. Parte de los materiales para el proceso de construcción fueron obtenidos a partir de la reutilización y reciclaje. Las placas de Durlock eran restos sin utilizar de una obra en construcción, las planchuelas de hierro recortes reutilizados de un mueble de jardín en desuso, las placas de aluminio, los ángulos de aluminio y la manta de cerámica aislante fueron reutilizadas a partir de sobrantes de otros proyectos, trabajando así en línea con las bases y fundamentos del proyecto. Se hizo un análisis de costos en base a lo que fue comprado y los precios estimados de los materiales reutilizados, para obtener un valor aproximado del costo total del ensayo:

*Tabla 1: Listado de materiales comprados, cantidades y costos. Fuente: elaboración propia.*

MATERIAL COMPRADO	CANTIDAD	COSTO [\$]
Alambre kanthal para resistencia – 1mm	10 mts	1.203
Clavos, bulones, tornillos, tuercas y arandelas	36 u de c/	400
Pegamento de alta temperatura	1	850
Aislante eléctrico – papel cerámico	1u 0,6x1 mts	1.190
Varilla roscada	3 u	529
Cable bipolar – 2 mm	6 m	1.860
Relay estado sólido	1 u	2.220
Fuente de alimentación 24V 7 <sup>a</sup>	1 u	6.758,40
Controlador PID para termocupla J	1 u	6.236,40
Termocuplas J	2 u	1.961,42

*Tabla 2: Listado de materiales reutilizados, cantidades y costos estimados. Fuente: elaboración propia.*

MATERIAL UTILIZADO	CANTIDAD	COSTO ESTIMADO [\$]
Recortes de madera/ probetas	3 u de 30x30 cm	1.500
Placas de aluminio	6 u de 40x40 cm	4.800
Ángulos de aluminio	4 u de 1,5 m	1.500
Placas de Durlock	2 u de 240 x 60 cm	900
Planchuelas de hierro	2 u de 37x3x0,21 cm	500
Fuente de alimentación	1 u	6.700
Manta de cerámica 25 mm	1,5 m	3.300

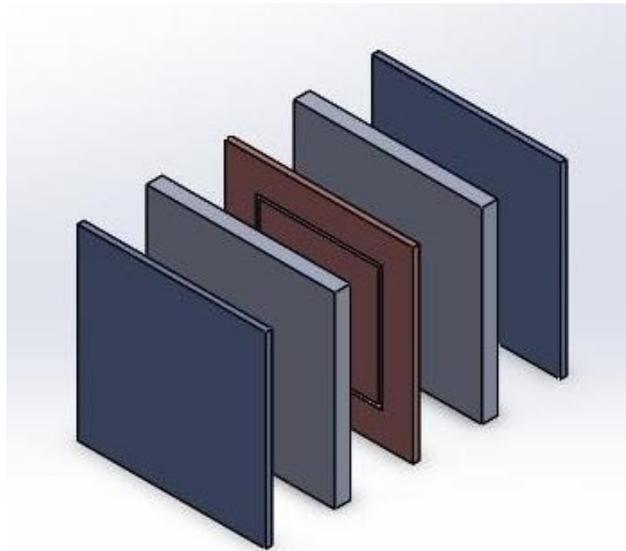
COSTO TOTAL ESTIMADO: \$ 42.408,22

Reutilizando materiales se ahorra un aproximado de \$20.000. Se debe tener en cuenta también que algunos materiales como las fuentes de alimentación, se utilizarán en varias oportunidades. Para el análisis del flujo de calor y la obtención de datos se prevé la instalación de sensores, que se instalarán en puntos estratégicos entre las probetas de medicación y en el ambiente interno de la caja para obtención significativa y segura de los datos.

### 2.1. Descripción del método

El método de la placa caliente con guarda consiste en colocar la probeta entre una fuente de calor, denominada placa caliente, y una fuente fría, denominadas placas frías, y medir el flujo de calor que atraviesa la probeta una vez que se llega al régimen estacionario.

En este caso, se eligió el diseño de un aparato con doble zona de medición, es decir una placa caliente central, dos muestras a su lado y dos fuentes frías. Esquema propuesto de montaje se puede observar en la figura 2.



*Figura 2: Esquema de la configuración de las placas. En color rojo se observa la placa caliente central, en color azul las placas frías exteriores y en color gris se esquematan las probetas. Fuente: elaboración propia.*

### 2.2. Placa caliente

La placa caliente se compone de una zona de medición central y una zona de guarda externa separadas por una ranura de aproximadamente 1 mm. El objetivo de la zona de guarda es crear el efecto de plano infinito para minimizar los errores por fugas de borde.

La resistencia eléctrica se compone de un filamento de Kanthal de 1 mm de diámetro enrollado en espiral en la zona de guarda y con un arrollamiento en zigzag en la zona de medición. La configuración se puede ver en la Figura 3.

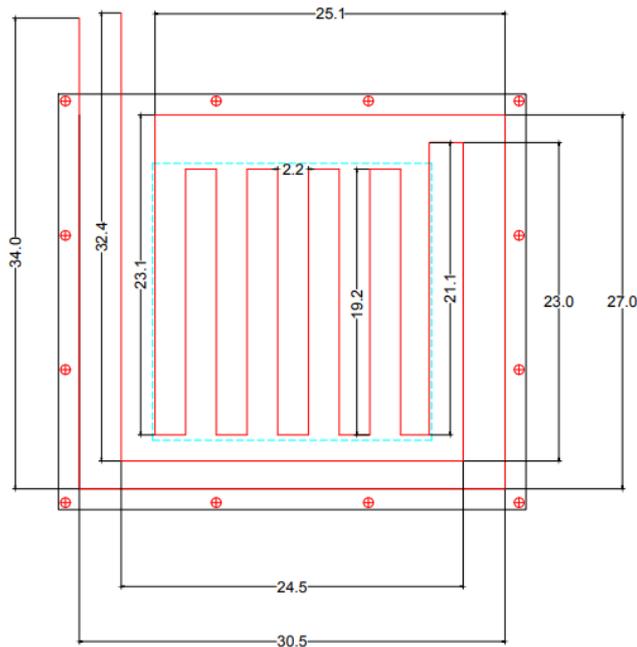


Figura 3: Enrollamiento del filamento de Kanthal en la resistencia caliente. Se puede observar que en la parte exterior la configuración es en espiral y en el interior en forma de zig zag. Nota: las medidas se encuentran expresadas en cm. Fuente: elaboración propia.

El filamento de Kanthal se envuelve a cada lado por dos placas de aluminio de 30 x 33,5 cm y 3 mm de espesor con el objetivo de distribuir uniformemente la temperatura. Entre el filamento de Kanthal y las placas de aluminio, se coloca un papel cerámico con la finalidad de aislar eléctricamente el circuito para evitar cortocircuitos y al mismo tiempo permitir el flujo de calor. La resistencia se mantiene unida por tornillos de 0,5 mm de diámetro que se colocan en las aristas de la zona de guarda.

El cuadrado central de la placa caliente de 20 x 20 cm, zona de medición, se coloca al final dejando una ranura de 1 mm de espesor aproximadamente y se rellena con silicona de alta temperatura para que la placa caliente quede unida.

En la siguiente figura se puede observar la zona de guarda externa a la cual se le colocan los tornillos para mantener los componentes unidos.

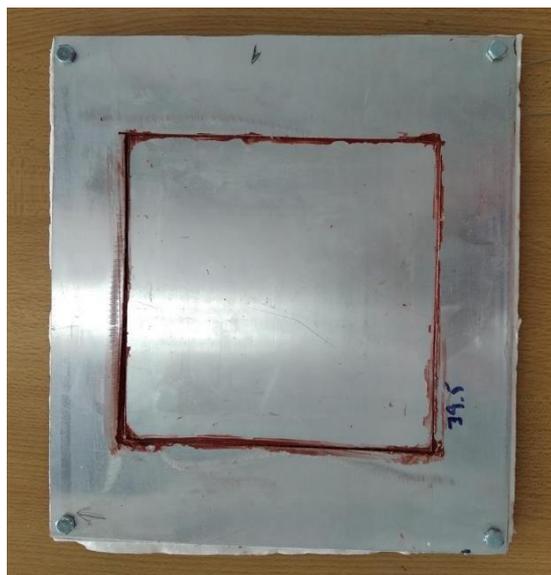


Figura 4: Placa caliente terminada. Fuente: elaboración propia

### 2.3. Placas frías

Las placas frías se componen de resistencias, al igual que la fuente caliente. Tienen la misma disposición que la placa caliente, con dos diferencias principales. En primer lugar, el diseño de enrollamiento del filamento de Kanthal es en zig zag con un espaciado mayor a través de toda la

placa, como se muestra en la Figura 5, ya que la temperatura que se debe alcanzar es menor a la de fuente caliente. En segundo lugar, las placas frías carecen de zona de medición, es decir cada placa de aluminio es de un solo cuerpo como se puede observar en la figura 6.

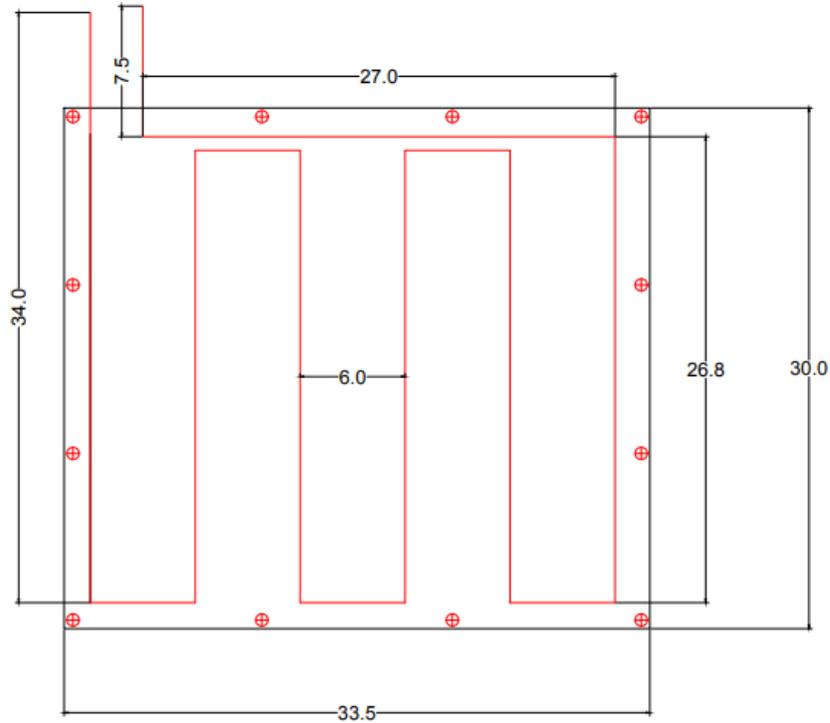


Figura 5: Enrollamiento del filamento de Kanthal en las resistencias frías. Nota: Las medidas se encuentran expresadas en cm. Fuente: elaboración propia

#### 2.4. Caja térmica

La caja externa del aparato está realizada con placas de Durlock® unidas por ángulos de aluminio y tornillos. En la figura 7 se muestra la misma. En su interior se colocará una manta de fibra cerámica de alta densidad de 1 pulgada de espesor y poliestireno expandido de 10mm que actuarán como aislantes térmicos para minimizar la transferencia de calor entre el interior de la caja y el medio ambiente.



Figura 6: Caja térmica del dispositivo para aislar el ensayo del ambiente circundante y disminuir las pérdidas de calor. Fuente: elaboración propia.

## 2.5. Sistema eléctrico

Para controlar la temperatura de la fuente caliente y fuentes frías se utilizarán dos circuitos eléctricos independientes.

El circuito eléctrico para el control de la temperatura de la fuente caliente se compone por:

- Fuente de alimentación de corriente continua: es el dispositivo que entregará potencia eléctrica que se convertirá en potencia calórica.
- PID: es el dispositivo que a través de pulsos controlará la temperatura de la placa caliente a través de la termocupla tipo J conectada a las dos unidades.
- Relay de estado sólido (SSD): Es el dispositivo encargado de abrir o cerrar el circuito eléctrico entre el PID y la fuente caliente. Es decir que si la temperatura censada por la termocupla es menor que la temperatura deseada (set point del PID), el SSD cierra el circuito para que la fuente entregue potencia y si la temperatura censada por la termocupla es mayor que la temperatura deseada, el SSD abre el circuito para que no se le entregue más potencia. En otras palabras, el SSD es controlado por el PID. La elección de usar corriente continua, y por ende un relé de estado sólido para control de este tipo de corriente, se debe al mayor control que se encuentra en el manejo de la corriente en el circuito de la resistencia eléctrica, de modo de mantener una mejor estabilidad en el proceso de calentamiento.

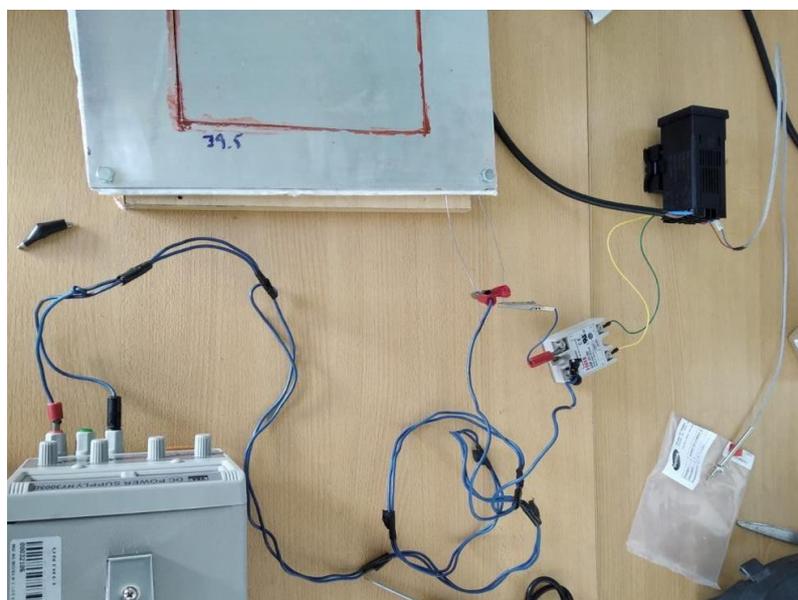


Figura 7: Circuito eléctrico para la alimentación de la fuente caliente. Fuente: elaboración propia.

El circuito eléctrico de la fuente fría es más simple debido a que la función de esta es crear la zona de baja temperatura para que se produzca el flujo de calor y está compuesto principalmente por la fuente de alimentación de corriente continua. La misma se regulará para que se mantenga a una temperatura inferior.

A fin de analizar los resultados del comportamiento térmico de la placa caliente, se hicieron mediciones de flujo de calor mediante una cámara termográfica, marca UTI-T, modelo UTI85A. Los resultados obtenidos se ven en la figura 12.

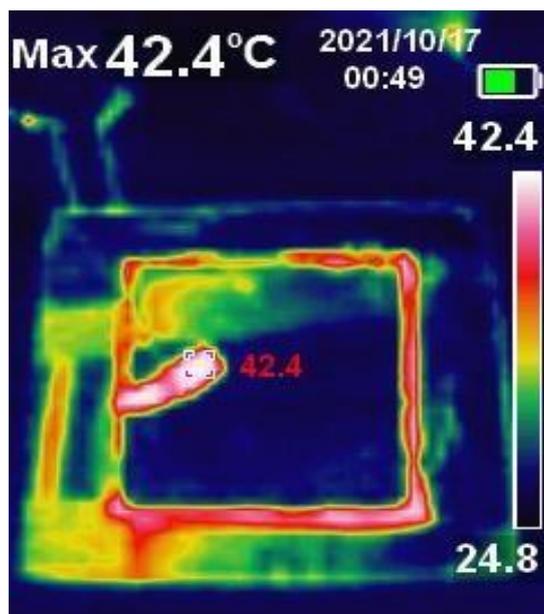


Figura 8: Flujo de calor medido imagen termográfica. Fuente: elaboración propia.

Se puede observar de la imagen termográfica, una diferencia de temperatura entre la guarda y la zona de medición de la placa, asociado a la configuración de enrollamiento del cable Kanthal y el aislamiento que esta posee.

La placa fría, se alimentará con una fuente de laboratorio de corriente continua como la empleada en la placa caliente. La corriente y tensión de alimentación de esta placa será inferior a la de la placa caliente, de manera de generar un gradiente térmico en las placas de Cemento y PET a ensayar, y de esa forma obtener los parámetros de conductividad térmica por medio del modelo de Fourier.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos hasta el momento son:

- Estudio de los distintos métodos de medición de la conductividad térmica de los materiales
- Elección del método: Método de Placa Caliente con Guarda
- Diseño y construcción de las fuentes que servirán como fuente caliente y fuentes frías para que se produzca un flujo de calor a través de las probetas
- Comprobación de la aislación eléctrica entre las resistencias y las placas de aluminio. Se realizó una prueba de funcionamiento. Se han conectado cada resistencia por separado a la fuente de alimentación y se comprobó que el sistema funciona.
- Diseño del sistema de montaje de las fuentes y probetas: el conjunto se mantiene estabilizado y comprimido por flejes de hierro los cuales se mantienen apretados con dos varillas roscadas que mantienen los distintos elementos componentes en contacto para una transmisión de calor segura y efectiva
- Diseño de la configuración eléctrica para alimentar las resistencias.

Los pasos siguientes para finalizar el dispositivo son:

- Aislamiento de la caja para evitar fugas de calor al ambiente durante el ensayo. El mismo se realizará con manta cerámica.
- Colocación del sistema soporte y encaje de las probetas y placas.
- Pruebas eléctricas para determinar la potencia eléctrica óptimas de las fuentes y tiempos del ensayo.
- Diseño del sistema de sensores para el control de temperatura durante el ensayo.

### 4. CONCLUSIONES

El desarrollo de la caja caliente con guarda permitirá avanzar en el estudio de la eficiencia energética del proyecto que se encuentra llevando a cabo el grupo de investigación. Si bien su desarrollo apunta inicialmente al cálculo de la conductividad térmica de las placas empleadas en la construcción de la vivienda, su uso se puede extender al análisis de la conductividad térmica de

otros materiales y configuraciones, ya que está previsto la fabricación de los cerramientos como puertas y ventanas con el uso de materiales poliméricos impresos en 3D, que deberán ser analizados, previo a su construcción. Por otro lado, el desarrollo de este dispositivo permitirá avanzar en la profundización de los temas asociados a la eficiencia energética, siendo este uno de los pilares de trabajo del grupo de investigación.

Al finalizar la escritura de este trabajo, el grupo de investigación se encontraba poniendo a punto el dispositivo desarrollado para llevar a cabo los primeros ensayos, por lo que no fue posible obtener resultados experimentales que permitan corroborar los ensayos.

Por último, la concepción de este desarrollo apunta a dar una respuesta a una problemática de muchas viviendas asociadas a la medición de la eficiencia energética, a partir del empleo de esta caja construida en parte con materiales reciclados y de bajo costo, con un procedimiento que puede ser útil de replicar en otras instituciones para su fabricación.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ensick M. G. (2017). Basural PET: En Argentina se tiran 12 millones de botellas de plástico por día. El cronista.

[2] Gaggino, R. (2008). Ladrillos y placas prefabricadas con plásticos reciclados. Revista INVI Universidad de Chile ISSN 0718-1299.

[3] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). Termodinámica (7.a ed.). McGraw-Hill Education. <https://www.utnianos.com.ar/foro/attachment.php?aid=16821>

[4] Ministerio de planificación, inversión pública y servicios. Subsecretaría de Planificación Territorial de Inversión Pública (2011). Plan Estratégico Nacional

[5] ARGENTINA. Norma IRAM 11.559: Determinación de la conductividad térmica y propiedades conexas en régimen estacionario. Método de placa caliente con guarda. Buenos Aires: IRAM, 1991

[6] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones. (4.a ed.). McGraw-Hill Education.

[7] Rocio Muñoz (2022). Tesis de grado: Diseño y construcción de un dispositivo para determinar la conductividad térmica de los materiales a ser empleados en una Ecovivienda Nacional desarrollada por la UNTREF.

# ACOPLE ENERGÉTICO EN GENERACIÓN SOLAR POR CONCENTRACIÓN A ALTA TEMPERATURA. ALMACENAMIENTO TÉRMICO Y SELECCIÓN DEL FLUIDO

Pérez Correa, Ignacio<sup>(1,2)</sup>, Salemme, Ailen<sup>(2)</sup>, Chocrón, Mauricio<sup>(2,3)</sup>, Labollita, Santiago<sup>(2)</sup>

*(1) Instituto de Tecnologías de Hidrógeno y Energías Sostenibles (ITHES) - (UBA-CONICET)*

*(2) Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires*

*(3) Centro Atómico Constituyentes, Comisión Nacional de Energía Atómica*

*igperez@fi.uba.ar*

## RESUMEN.

Las energías renovables son una forma prometedora de generación de electricidad sin emisión de gases contaminantes y sin agotamiento de recursos naturales. De todas formas, en la actualidad es complejo el aporte eléctrico en solitario de estas energías con centrales de alta potencia debido a las incertidumbres climáticas y de demanda en el mercado energético, por ello se requiere de un acople con energías que presenten una potencia estable y regulable. En este trabajo se analizó la generación de energía por concentración solar en conjunto con centrales nucleares convencionales. Se estudiaron los diversos fluidos de transferencia utilizados a nivel mundial para las plantas de concentración solar con el fin de seleccionar el óptimo. También fueron realizadas simulaciones numéricas del ciclo de potencia. Se obtuvo un incremento cercano al 10 % en la eficiencia térmica de la generación (de 27,60 % a 36,92% del calor aportado), también disminuye el requerimiento de la contribución nuclear a la potencia generada en un 58 %, implicando una reducción en la carga de uranio a utilizar y del combustible a disponer al finalizar la operación. En base a los resultados, se ve que el acople de ambas energías es mucho más eficiente termodinámicamente en el aprovechamiento térmico que si se utilizaran ambas energías por separado.

**Palabras Claves:** Energía solar por concentración, Energía nuclear, Eficiencia energética.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el consumo energético global ha crecido en gran medida y se espera que la tendencia continúe en línea con el incremento poblacional. Según la Agencia Internacional de energía (IEA) las demandas energéticas mundiales se incrementarán un 38% hacia el año 2040 [1] y, por ello, se vuelve primordial satisfacerlas con formas de generación que presenten el menor impacto ambiental posible. Actualmente la producción global está dominada por diversos tipos de energía fósil (gas natural, carbón, petróleo, etc.) que representan el 59,33% a nivel global [2] y un 62% en Argentina [2,3] (Figura 1), levemente mayor que el promedio global.

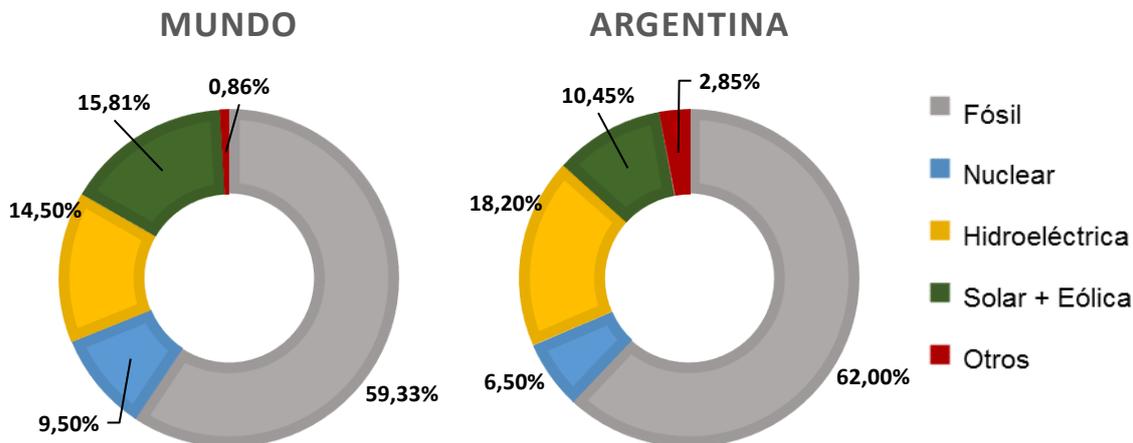


Figura 1 Comparación de generación energética global y en Argentina.

Las energías renovables tienen la gran oportunidad de satisfacer las demandas que se generarán en los futuros años para combatir al cambio climático de forma sostenible. De todas maneras, si el 38 % de demanda esperada se satisface solo con energías renovables, el aporte fósil seguiría siendo alto (del orden de 46%) por lo que se debe hacer un esfuerzo adicional para disminuirlo. Existen diversas formas de caracterizar a los tipos de generación de energía. En primer lugar, se utiliza la emisión de gases de efecto invernadero, pero también existe el factor de capacidad que se define como el porcentaje de horas promedio en que se puede operar a la máxima potencia. Otro parámetro es el uso de suelo, que representa la cantidad de espacio requerido para la instalación y al uso de los materiales para su construcción. Una comparativa de los mismos se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1 Parámetros característicos para distintos tipos de generación de energía.

Tipo de generación	Factor de capacidad (%) [4]	Uso de suelo (m <sup>2</sup> /GWh) [5]	Emisión de gases de efecto invernadero (ton CO <sub>2</sub> /GWh) [5]
Solar fotovoltaica	12-19	5,7	46
Solar térmica	≈15	-	-
Hidroeléctrica	30-80	50	4
Eólica	20-40	46	12
Nuclear	60-100	0,1	16
Fósil	70-90	2,1	1000

Como es de esperar, las formas renovables presentan muy buenas características en las emisiones de efecto invernadero respecto a las energías fósiles, pero en los otros parámetros se aprecia que la generación solar y eólica tienen un factor de capacidad relativamente bajo y, a su vez, la eólica e hidroeléctrica tienen un uso de suelo elevado.

En particular, respecto de la generación eléctrica por concentración solar existen diversas tecnologías (Figura 2).

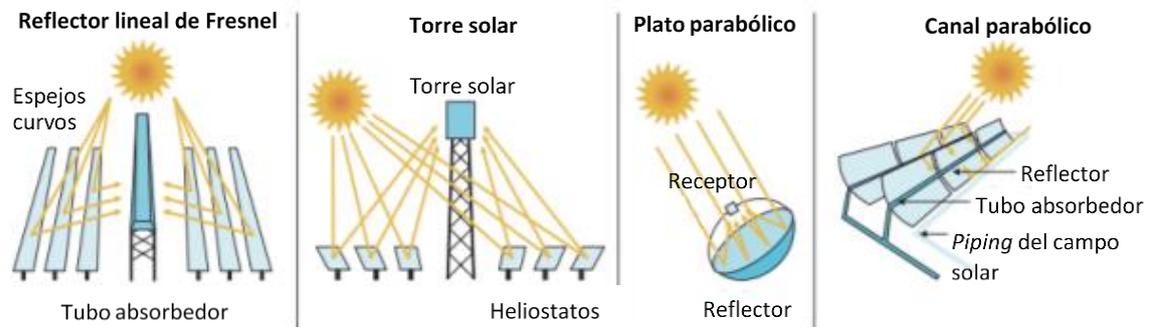


Figura 2 Tecnologías principales de concentración solar (adaptado de [6]).

Todas se basan en la concentración mediante espejos de los rayos solares en un área pequeña entregando energía a un fluido térmico que luego será transformada en electricidad a través de un ciclo de potencia de vapor, las diferencias radican en la forma de concentrar la energía solar. Un esquema simplificado se muestra a continuación:

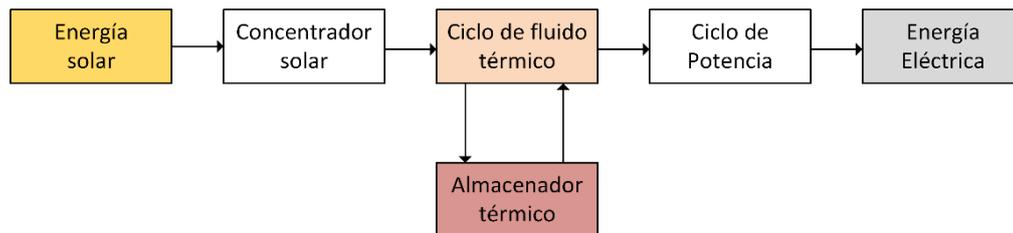


Figura 3 Esquema de generación de energía eléctrica por concentración solar.

De las mencionadas, la única probada comercialmente en la actualidad es la de Canal/Cilindro Parabólico con plantas de alta potencia, seguidas por las de Torre Solar [7]. Se muestra una distribución de las plantas a nivel global:

#### TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR

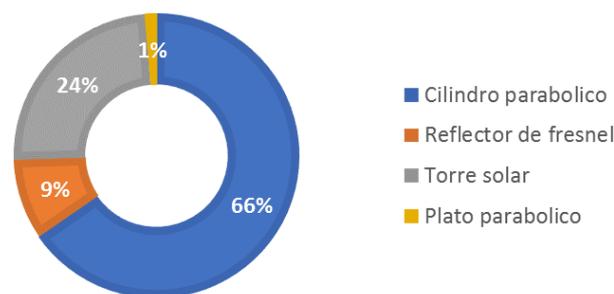


Figura 4 Distribución de tecnologías de generación solar a nivel mundial [8]

Cabe destacar que el agregado del almacenador térmico (que conserva los excedentes de producción para los momentos en los que no hay generación) permite aumentar el factor de capacidad de la energía, en este caso particular se puede incrementar hasta un 75% [5].

De todas maneras, la introducción de energías renovables requiere de centrales de potencia firme y regulable que puedan absorber la variabilidad de la generación y adaptar rápidamente la oferta frente a la incertidumbre en las variaciones de demanda que se produzcan en la red. Existen propuestas para lograr esa flexibilización de la red que consisten en el acople de la generación renovable con algún otro tipo de energía que entregue una potencia constante y regulable [9].

Una de las formas de generación alternativa a los combustibles fósiles que durante su ciclo de vida prácticamente no emite al ambiente gases de efecto invernadero, ni gases tóxicos (sulfuros, óxidos de nitrógeno, etc.), ni material particulado y que posee una potencia continua y ajustable es la energía nuclear [10].

Cabe destacar que desde el accidente de Fukushima en 2011 la energía nuclear ha entrado en una etapa de grandes cambios en las políticas de seguridad a nivel global [11]. En situaciones de emergencia, los reactores nucleares poseen sistemas de apagado automático seguro, pero aún apagados continúan liberando durante un cierto tiempo una cantidad de calor (5-7 % del máximo) que debe ser removido continuamente (calor de decaimiento) y para ello se debe utilizar energía

que se extrae de la red. En el caso de Fukushima ocurrió un evento de alto impacto y baja probabilidad como es un terremoto y un tsunami que inutilizaron las torres eléctricas y también la cámara principal y la de respaldo de generadores Diesel en el sitio, dejando a la central si posibilidad de refrigeración. Esta situación derivó en una serie de mejoras en la protección de las centrales nucleares actuales, como la introducción de sistemas pasivos de enfriamiento que no requieran de electricidad para operar.

Las mejoras en la seguridad tienen un correspondiente incremento de los costos de construcción, por ello continuamente se buscan formas de hacerla competitiva en el mercado eléctrico. Algunas de estas consisten en aplicaciones adicionales como calentamiento residencial de hogares o producción de agua desmineralizada [12] (de donde nuestro grupo de investigación ha obtenido resultados favorables [13]). Otras opciones consisten en el acople de la producción nuclear con energías renovables [14,15] con el propósito de disminuir la carga nuclear utilizada (menores desechos) y poder garantizar una potencia ajustable a la demanda eléctrica absorbiendo la variabilidad que presentan las formas renovables (solar, eólica).

Nos concentraremos en el acople entre la generación solar-térmica y la nuclear. En los reactores nucleares convencionales se obtiene vapor a 270 °C lo que da eficiencias térmicas del orden de 28%, mediante el aporte de la energía solar se podría aumentar esta temperatura en gran medida con una mejora en el aprovechamiento energético, implicando una disminución en el requerimiento de combustible nuclear y sus respectivos desechos.

Hay poca bibliografía acerca de este acoplamiento energético, en particular en [16] proponen el acople solar nuclear con generación por canal parabólico utilizando un aceite como fluido térmico y con ello alcanzar una temperatura de vapor de 381 °C y una eficiencia del 33,17 %.

El objetivo del presente trabajo es realizar un relevamiento de las centrales actuales de generación solar con el fin de seleccionar fluidos térmicos de ciclo y de almacenamiento reales con el propósito de maximizar la eficiencia del proceso conjunto.

## 2. ALMACENADOR DE ENERGÍA TÉRMICA

Es el corazón de la generación de energía solar por concentración, permite entregar potencia durante la noche o en momentos donde no haya generación. Estudiaremos los fluidos posibles de almacenamiento y de ciclo térmico con el fin de seleccionar la combinación que optimice el acople energético solar-nuclear.

### 2.1. Fluidos de almacenamiento

Nos concentraremos en sistemas fluidos, aunque cabe destacar que también existe la posibilidad de almacenamiento en compuestos sólidos. Estos fluidos se pueden clasificar en 3 tipos:

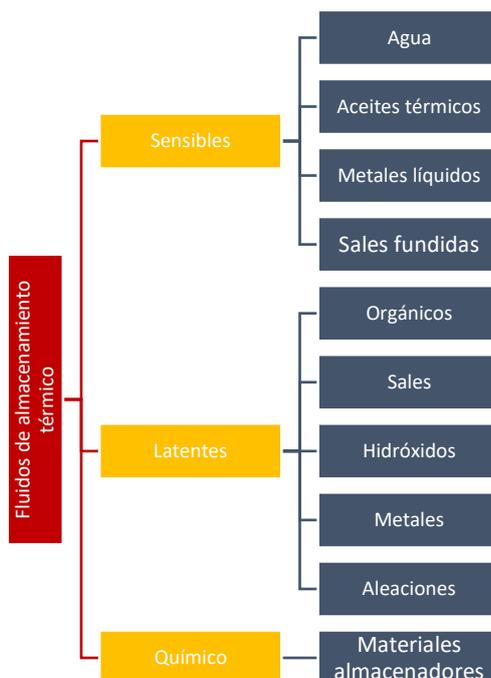


Figura 5 Tipos de fluidos de almacenamiento térmico (basado en [17]).

#### 2.1.1 Almacenamiento sensible

La energía se almacena por aumento de temperatura ( $\Delta T$ ) del fluido almacenador sin presentar cambio de fase, existirá un límite de almacenamiento en función de la capacidad de transmitir calor térmicamente. Se mencionan algunos ejemplos utilizados:

### **Agua**

Es un fluido económico, con alta capacidad calorífica y no tóxico, es muy habitual en las plantas de tipo Fresnel. Se dificulta su uso a muy alta temperatura debido a las presiones que se requieren para conservarla en estado líquido. En estos casos se suele obviar el ciclo intermedio de fluido térmico y se genera el vapor del ciclo de potencia directamente en el concentrador solar, lo que se traduce en un aumento de la eficiencia de la generación.

### **Aceite térmico**

Permite un almacenamiento líquido a mayor temperatura sin un exceso de presión y se almacena más energía por unidad de volumen. Tienen buena viscosidad, pero baja conductividad térmica. No son económicos y se degradan a alta temperatura (400 °C) y por ciclado.

### **Sales fundidas**

Generalmente se componen de mezclas de sales de nitratos, la más utilizada es la “sal solar” una mezcla de 60%  $\text{NaNO}_3$  y 40%  $\text{KNO}_3$ . Son utilizadas cuando se requiere aún más temperatura que la que soportan los aceites (hasta 560 °C) y son de uso habitual en los concentradores solares. Tienen alta temperatura de ebullición a baja presión, son muy estables, con elevadas capacidades caloríficas que da altas eficiencias en los ciclos Rankine de vapor. Son relativamente económicas y de fácil disponibilidad. Las desventajas son que poseen un punto de fusión elevado ( $\approx 200$  °C) lo que demanda sistemas de anti-congelamiento en las cañerías y que traen algunos problemas de corrosión a alta temperatura.

### **Metales líquidos**

Son los que admiten la mayor temperatura de almacenamiento debido a sus altos puntos de ebullición, lo que deriva en altas eficiencias térmicas en los ciclos de potencia. Tienen elevada conductividad térmica y altos coeficientes de transferencia de calor (hasta  $30000 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$ ). Son más costosos que las sales fundidas y producen corrosión (en particular el sodio líquido presenta menor corrosión que las otras opciones utilizadas). Algunos de ellos requieren de atmósfera controlada para funcionar con el fin de evitar reacciones con el oxígeno o humedad del ambiente y, al igual que las sales fundidas, tienen temperaturas de fusión mayores al ambiente (aunque más bajas que las sales) lo que también demandará algún tipo de sistema para evitar la solidificación. Ejemplos de estos fluidos son el sodio y aleaciones de sodio-potasio o plomo-bismuto.

#### **2.1.2 Almacenamiento latente**

Almacenan energía cambiando de fase (habitualmente sólido-líquido), manteniendo su temperatura, lo que permite mantener una transferencia de calor estable y estacionaria. Se debe elegir la sustancia específicamente para que cambie de fase a una temperatura acorde al proceso en cuestión. En la actualidad, hasta donde se pudo hallar en bibliografía, no existen centrales por concentración solar de gran potencia que utilicen almacenamiento latente [8], aunque están en una fase avanzada de desarrollo [18].

#### **2.1.3 Almacenamiento químico**

Se realiza con una reacción química reversible convenientemente elegida en donde se genera un compuesto con estado energético más elevado. La ventaja de esta forma es que permite almacenar energía por mucho más tiempo ya que no se realiza en forma de calor y no está sometido a pérdidas. De esta forma podría ser útil para generación en plantas de alta potencia y acomodar la demanda con esta energía. De todas maneras, todavía se encuentra en estado experimental [17].

### **2.2. Fluidos de transferencia**

Se encargan de transportar la energía colectada en el concentrador hasta el generador de vapor del ciclo Rankine para producir la electricidad. Se suelen utilizar los mismos fluidos que para almacenamiento sensible a los que se le agrega la posibilidad del aire, ya que es económico y permite alcanzar altas temperaturas, pero presenta bajos coeficientes de transferencia de calor por su baja conductividad térmica.

### **2.3. Aspectos de diseño del sistema acumulador**

#### **2.3.1 Diseño de los tanques.**

Una vez elegido el fluido para la operación se deben definir una serie de características del tanque almacenador para poder diseñarlo. En primer lugar, se elige el factor de almacenamiento ( $F_A$ ) que establece la capacidad de almacenamiento como un exceso de producción (usualmente 1,5 [16]), luego se define el tiempo de almacenamiento ( $t_{alm}$ ) que es el tiempo en el que se espera recuperar la energía almacenada (oscila entre 8 y 15 horas, según las plantas analizadas [8]). En base a estos factores y a las propiedades del fluido se realiza el siguiente procedimiento:

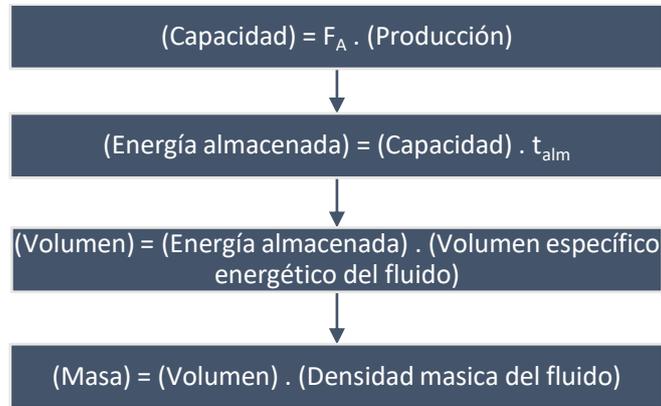


Figura 6 Procedimiento de diseño del tanque almacenador térmico.

### 2.3.2 Configuración de alimentación.

Establece la disposición de los tanques de almacenamiento en el ciclo de fluido térmico.

#### Sistema indirecto:

Es utilizado cuando se desea operar con dos fluidos distintos (Figura 7 (a)). El fluido térmico de transferencia toma energía del colector solar y la entrega en el generador de vapor del ciclo de potencia y el exceso de energía se canaliza por un circuito intermedio donde se calienta a otro fluido que es almacenado en un tanque caliente. Las centrales solares que se basan en este sistema utilizan como fluido de proceso un aceite térmico y, de almacenamiento, una sal. Cuando existe disponibilidad de luz solar, el aceite recoge energía del colector y, cuando no, la toma del fluido almacenado, de esta forma se obtiene una potencia más estable en el tiempo.

#### Sistema en línea:

En este caso (Figura 7 (b)) se opera con un solo fluido que hace las veces de almacenador térmico y de fluido de transferencia, de esta forma se evita la pérdida de eficiencia por el intercambiador de calor intermedio. Si se utilizan sales o metales líquidos debe considerarse que se requerirá de algún sistema para evitar la solidificación del fluido.

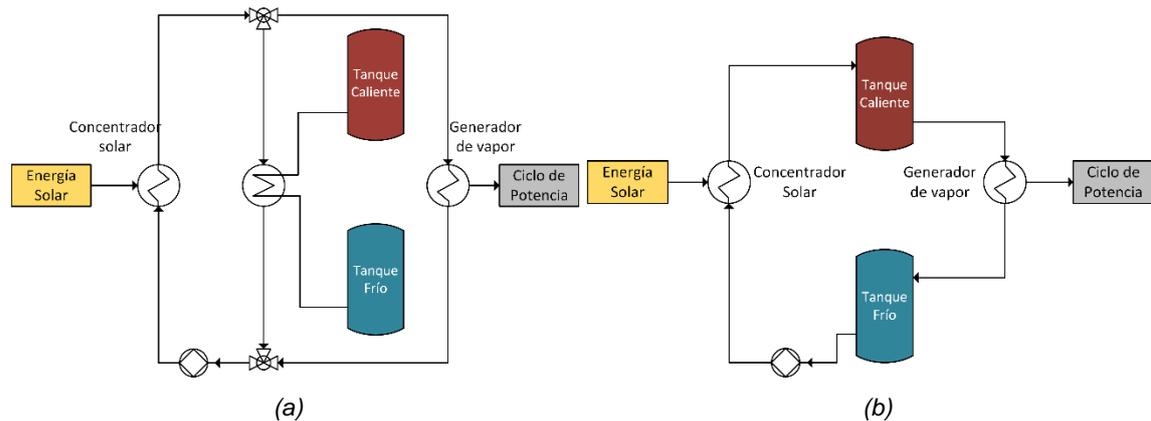


Figura 7 Esquema de configuración de tanques.  
(a): Indirecto (b): En línea

### 3. ANÁLISIS DE FLUIDOS DE TRANSFERENCIA Y ALMACENAMIENTO

Realizando un análisis exhaustivo de plantas solares por concentración [8] se observa la siguiente distribución en la utilización de fluidos térmicos (Figura 8).

## FLUIDOS TÉRMICOS DE PLANTAS SOLARES

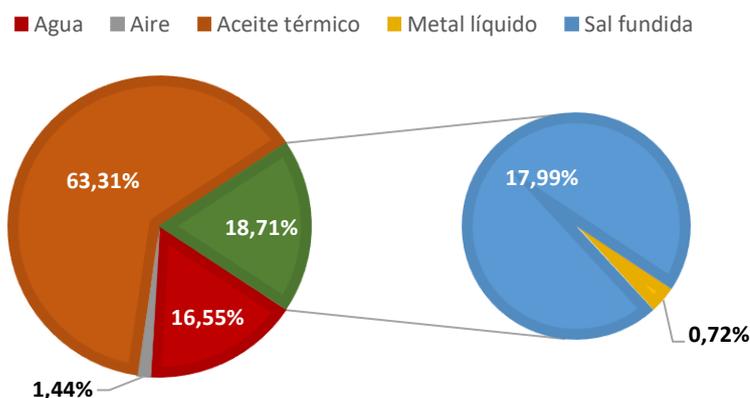


Figura 8 Distribución de utilización de fluidos de transferencia de calor en plantas de concentración solar.

Hay un gran predominio de los aceites térmicos (63,31 %) en la utilización comercial como fluido de transferencia. Respecto del almacenamiento térmico, el dominio es absoluto respecto de las sales fundidas con un 89,61 % (Figura 9).

## MATERIALES DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO

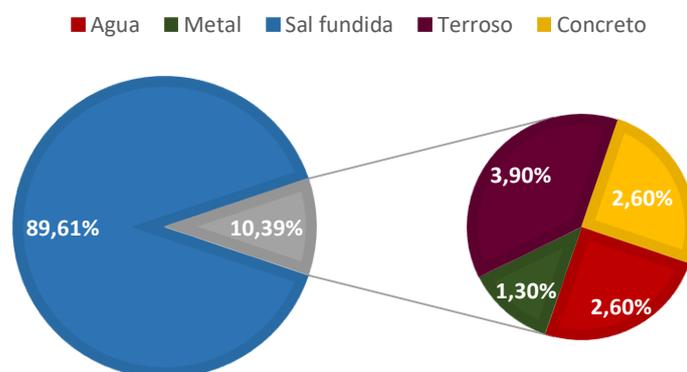


Figura 9 Distribución de utilización de materiales de almacenamiento en plantas de concentración solar.

La explicación puede hallarse en función de los parámetros característicos de estos fluidos. Definiremos la temperatura media máxima que podrá lograr el vapor en el ciclo utilizando este fluido térmico, el volumen que ocupará el fluido térmico por unidad de energía almacenada (volumen energético específico) y el costo de fluido térmico por unidad de energía almacenada.

Tabla 2 Parámetros característicos de los fluidos térmicos utilizados comercialmente.

Tipo de fluido	Fluido	Temperatura media máxima en el ciclo (°C)	Volumen energético específico (m <sup>3</sup> /TWh)	Costo específico (\$/TWh)
Agua [19]	Agua	157	0,665	8,639.10 <sup>-5</sup>
Aceite térmico [19]	Therminol VP-1	345	1,481	36,479
	Xcletherm	261	1,428	15,144
	Dowtherm A	345	1,900	83,078
Sal fundida [20]	Sal Solar (60% NaNO <sub>3</sub> – 40% KNO <sub>3</sub> )	530	0,978	2,415
Metal líquido [21]	Sodio	828	2,945	4,734

Se consideró en los cálculos un almacenamiento de  $\Delta T=100$  °C para darle una magnitud real, pero para la comparación de los fluidos no es relevante esta elección ya que todos almacenan energía de forma sensible. Los aceites térmicos, muy utilizados como fluidos de transferencia, no son elegidos como almacenadores ya que el costo por unidad de energía es muy elevado en comparación a las sales fundidas o al sodio líquido.

Es de nuestro interés alcanzar altas temperaturas de vapor a la entrada de la turbina con el fin de aumentar la eficiencia de la generación conjunta. Esta condición lleva a la utilización de sales fundidas o sodio líquido como fluido de almacenamiento y de transferencia en el ciclo solar con una configuración de tanques en línea.

#### 4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron simulaciones del ciclo térmico de potencia con la central nuclear en solitario y con el acople solar-nuclear, analizando ambos fluidos de proceso/almacenamiento elegidos.

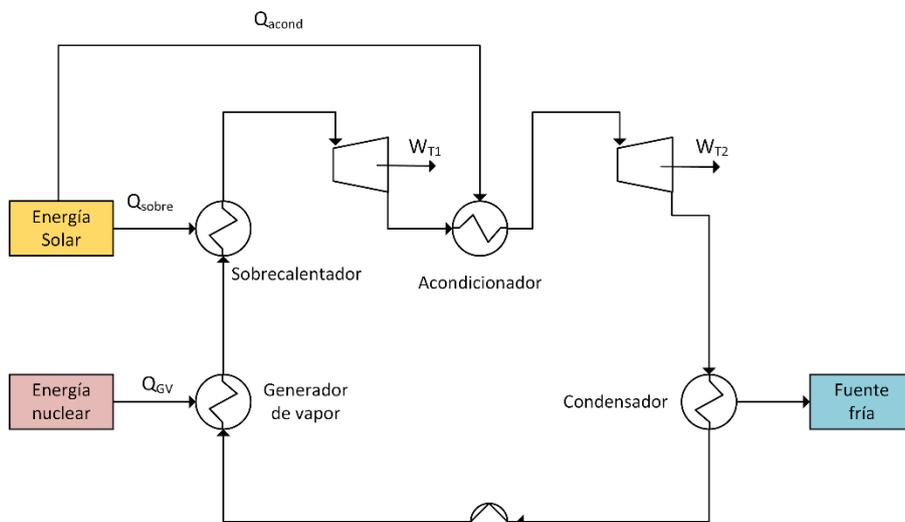


Figura 10 Acople solar-nuclear en generación eléctrica.

En el caso base que considera solamente a la energía nuclear se utiliza de ella tanto para el generador de vapor como para el acondicionador. En los casos de acople con generación solar se considera que la parte nuclear sólo genera vapor y la solar sobrecalienta ese vapor y lo acondiciona entre las dos expansiones (Figura 10).

Se estudiarán los calores requeridos por ambas energías por unidad de potencia generada en la turbina con el fin de independizarse del tamaño de planta. También se calcularán las eficiencias de primera ley:

Eficiencia global de ciclo:

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_{T1} + \dot{W}_{T2} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{GV} + \dot{Q}_{sobre} + \dot{Q}_{acond}} \quad (1)$$

Eficiencia de la generación solar:

$$\eta_{solar} = \frac{\dot{W}_{solar}}{\dot{Q}_{sobre} + \dot{Q}_{acond}} \quad (2)$$

La potencia solar ( $W_{solar}$ ) se define como el exceso de potencia generado en el acople solar-nuclear respecto de la generación nuclear en solitario. En la Figura 11 se muestran los resultados del calor requerido por energía y las eficiencias de primer principio. La introducción del acople solar permite reducir en gran medida el aporte nuclear en la generación de potencia (disminuye a un 61,05 % con la sal fundida y a un 41,98 % utilizando sodio como fluido térmico). Cabe destacar que también se produce una disminución de la potencia calórica total (del orden de 25,12 %), ambas centrales de generación por separado son menos eficientes que el conjunto acoplado. Esto se ve reflejado en la eficiencia global del ciclo que aumenta de 27,60 % en la central nuclear en solitario hasta un 36,92% con el sodio líquido.

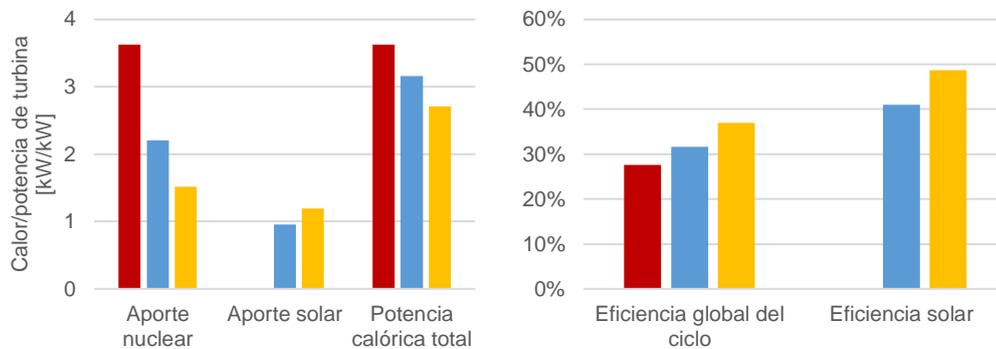


Figura 11 Resultados del análisis de la simulación (Rojo: Central nuclear, Azul: Acople con sal fundida como fluido térmico, Amarillo: Acople con sodio líquido como fluido térmico). (a) Calor aportado por unidad de potencia de turbina. (b) Eficiencias del proceso

La eficiencia de la generación de energía solar también aumenta, si el ciclo operara solamente por energía solar presentaría una eficiencia del 32 %, en cambio, en el acople esta alcanza valores de 40,99% y 48,74% para la sal fundida y el sodio, respectivamente.

## 5. CONCLUSIONES

Las energías renovables tienen la capacidad de generar energía limpia con recursos que se restauran en una escala de tiempo humana, por ello son las que mejor posicionadas están para combatir el cambio climático, pero las tecnologías actuales no permiten un factor de capacidad elevado (entregar potencias cercanas a la máxima una gran cantidad de horas promedio) debido a las variaciones climáticas y, también, les es complejo adaptar la producción para seguir las demandas del mercado eléctrico. Como solución a eso se requiere acoplar la generación renovable con centrales de potencia firme. En particular, se estudió el acople de la energía solar térmica por concentración con centrales nucleares. Se comenzó con el almacenamiento energético, que es el núcleo del proceso, y tiene por objeto aumentar el factor de capacidad, se analizaron los fluidos de transferencia de calor y de almacenamiento con el objetivo de seleccionar el más conveniente para el proceso. Fueron realizadas simulaciones numéricas del acople.

En la situación base, el vapor de la central se calienta hasta 270 °C lo que da eficiencias térmicas del orden del 28 %, el acople solar-nuclear eleva la temperatura del vapor en gran medida lo que permite aumentar las eficiencias a 31,64 % con sal fundida y 36,92 % con sodio. En línea con lo anterior, se ve que el aporte de calor nuclear por unidad de potencia producida en la turbina disminuye hasta un 42% de su valor original en el caso del sodio líquido, lo que se traduce en una central nuclear de menor tamaño con una gran reducción de costos, menor requerimiento de combustible nuclear y producción de residuos a disponer. El acople es un sistema más eficiente en el aprovechamiento energético desde el punto de vista termodinámico que si se utilizara ambas energías por separado.

Se continuará el trabajo con el dimensionamiento del acople, en conjunto con la selección de fluidos, con el objetivo de hacer un análisis económico y optimizar todas las variables del proceso.

## 6. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency. (2018). *World Energy Outlook 2018*. París. Edición 2018. IEA Publications. París.
- [2] British Petroleum. (2022). *Statistical Review of World Energy*. Londres. Ed. 71. Pureprint Group Limited. Londres.
- [3] Comisión Nacional de Energía Atómica. (2022). *Síntesis del Mercado Eléctrico mayorista de la República Argentina*. Buenos Aires. N° 259. Subgerencia Planificación Estratégica. Buenos Aires.
- [4] Suman, Siddharth. (2018). "Hybrid nuclear-renewable energy systems: A review". *Journal of Cleaner Production*. 181, 166-177.
- [5] Brook, Barry W.; Bradshaw, Corey J. A. (2015). "Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation". *Conservation Biology*. 29, 3, 702-712.
- [6] International Energy Agency. (2014). *Technology Roadmap Solar Thermal Electricity*. París. IEA Publications. París.
- [7] Khan, Jibrán; Arsalan, Mudassar H. (2016). "Solar power technologies for sustainable electricity generation - A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 55, 414-425.
- [8] Proyecto SolarPaces. Tecnologías de concentración solar (03/02/2021). Dirección: <https://solarpaces.nrel.gov/by-technology>

- [9] National Renewable Energy Laboratory. (2014). *Rethinking the Future Grid: Integrated Nuclear Renewable Energy Systems*. Golden, CO. US DoE. Oak Ridge, TN.
- [10] van der Zwaan, Bob. (2013). "The role of nuclear power in mitigating emissions from electricity generation". *Energy Strategy Reviews*. 1, 4, 296-301.
- [11] Srinivasan, T.N.; Gopi Rethinaraj, T.S. (2013). "Fukushima and thereafter: Reassessment of Risks of Nuclear Power". *Energy Policy*. 52, 726-736.
- [12] International Atomic Energy Agency. (2007). *Advanced Applications of Water Cooled Nuclear Power Plants*. Viena. TECDOC-1584. IAEA. Viena.
- [13] Conti, María Cecilia; Chocrón, Mauricio. (2018). "Nuclear Desalination and water management activities". *Technical Working Group on Nuclear Desalination*. Viena, Austria.
- [14] International Atomic Energy Agency. (2019). *Nuclear-renewable hybrid energy systems for decarbonized energy production and cogeneration*. Viena. TECDOC-1885. IAEA. Viena.
- [15] Salemme, Ailen. (2020). *Conversión de Energía Empleando Metales Líquidos como Fluidos de Transferencia de Calor en Centrales Nucleares y Térmicas: Ciclos, diseño conceptual termodinámico de equipos y facilidad experimental*. Tesis de Grado. FIUBA.
- [16] Popov, Dimityr; Borissova, Ana. (2018). "Innovative configuration of a hybrid nuclear-parabolic trough solar power plant". *International Journal of Sustainable Energy*. 37, 5, 616-639.
- [17] Alva, Guruprasad; Lin, Yaxue; Fang, Guiyin. (2018). "An overview of thermal energy storage systems". *Energy*. 144, 1, 341-378.
- [18] Zhang, Huili; Baeyens, Jan; Cáceres, Gustavo; Degreève, Jan; Lv, Yongqin. (2016). "Thermal Energy Storage: Recent developments and practical aspects". *Progress in Energy and Combustion Science*. 53, 1-40.
- [19] Alva, Guruprasad; Liu, Lingkun; Huang, Xiang; Fang, Guiyin. (2017). "Thermal Energy Storage materials and systems for solar energy applications". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 68, 1, 693-706.
- [20] Golzález-Robaud, Edouard; Pérez-Osorio, David; Prieto, Cristina. (2017). "Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: Steam vs molten salts". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 80, 133-148.
- [21] International Atomic Energy Agency. (2018). *Sodium Coolant Handbook: Physical and Chemical Properties*. Viena. In-publishing. IAEA.

### **Agradecimientos**

Los autores de este trabajo desean agradecer por el soporte financiero al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas (CONICET), a la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos aires (FIUBA).

# COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICO DE UN EDIFICIO PATRIMONIAL. CASO “ESTACIÓN JOVEN” EN PÉREZ, SANTA FE

Gómez, Analía; Czajkowski, Jorge; Birche, Belén; Berardi, Roberto; Basualdo, David y Basualdo Rapetti, Julián

Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable, FAU, UNLP / CIC / CONICET  
[j.czajkowski@fau.unlp.edu.ar](mailto:j.czajkowski@fau.unlp.edu.ar) // [jdczajko@gmail.com](mailto:jdczajko@gmail.com)

## RESUMEN

El proyecto “Edificios municipales energéticamente eficientes y sustentables” permitió estudiar el comportamiento higrotérmico y energético de 47 edificios en varias regiones bioclimáticas de Argentina. El estudio de caso “Estación Joven” corresponde a la refuncionalización de una antigua estación de ferrocarril a poca distancia de Rosario, Santa Fe. El método consiste en auditar el edificio en dos momentos del año, durante una semana, a fin de conocer su demanda de energía y comportamiento higrotérmico y confort. Se exponen y discuten resultados de una monitorización higrotérmica, junto a una propuesta de mejora en su comportamiento.

**Palabras Claves:** Confort higrotérmico, Patrimonio, Municipios, Santa Fe.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

# 1. INTRODUCCIÓN

El trabajo es parte de una muestra de 47 edificios municipales auditados por el proyecto Euroclima+ “Edificios Municipales Energéticamente Eficientes y Sustentables”. El proyecto es coordinado por la *Universidad Nacional de La Plata (UNLP)* y cuenta con la asociación de la *Red Argentina de Municipios frente al Cambio Climático (RAMCC)* y el *Copenhague Centre on Energy Efficiency (C2E2)*. Es financiado por la República de Francia mediante la *Agencia Francesa de Desarrollo (AFD)*.

El caso presentado en este trabajo es un edificio localizado en calle 9 de Julio y A. San Martín de Pérez (Lat -32.99; Long -60.77) en clima templado cálido en Zona IIIb (IRAM 11603). Este Centro cumple una gran función social en una zona vulnerable de población de medio bajo nivel de ingresos. Su reacondicionamiento se finalizó en 2017. Está implantado en una antigua estación de FFCC.



Figura 1: Implantación de la “Estación Joven” en la comuna de Pérez, Santa Fe. Fuente: Propia a partir de mapas de OpenStreetMap y Google Maps, 2022.



Figura 2: Entrada del edificio comunal y detalle interior hacia el andén. Fuente: Propia, 2022.

Tabla 1: Datos mensuales de temp medias y radiación solar por orientación de la Ciudad de Rosario (Santa Fe). Lat: -32.982, Long: -60.730. Fuente: Norma IRAM 11900, 2017.

Mes	TBS°C	Radiación solar media mensual (W/m2)								
		0°	NORTE	ESTE	OESTE	SUR	NE	NO	SE	SO
Enero	28,4	335	106	203	181	95	170	154	162	147
Febrero	25,3	271	123	151	155	66	150	152	108	113
Marzo	23,6	208	146	112	131	51	135	152	72	82
Abril	18,3	169	176	97	116	40	141	161	52	58
Mayo	14	112	156	67	75	29	118	128	33	34
Junio	12,7	81	120	46	56	22	86	100	23	24
Julio	14,8	118	179	73	83	28	133	145	32	33
Agosto	15,9	169	209	101	116	37	162	179	48	51
Septiembre	16,3	195	162	107	133	45	137	165	63	73
Octubre	19,6	265	140	149	158	58	157	164	100	105
Noviembre	23,1	322	115	179	175	81	162	158	137	135
Diciembre	28,1	347	99	193	193	102	159	156	159	160
<b>TOTAL anual</b>	<b>20,0</b>	<b>2592</b>	<b>1731</b>	<b>1478</b>	<b>1572</b>	<b>654</b>	<b>1710</b>	<b>1814</b>	<b>989</b>	<b>1015</b>

Este edificio como el resto de la muestra estudiada fue propuesto por los intendentes y jefes comunales de cada uno de los 17 distritos auditados por el equipo del Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de La Plata. La totalidad del instrumental utilizado pertenece al LAyHS y fue adquirido con fondos públicos previamente.

### 1.1. Características del edificio

El Centro de apoyo juvenil «Estación Joven» es de antigua construcción, fines del siglo XIX, con materialidad tradicional. Tiene una superficie habitable de 84.39 m<sup>2</sup> y un volumen a climatizar de 285.92m<sup>3</sup> con una altura media de locales de 4.30m. Compuesto por cerramientos opacos en ladrillos comunes de 30 cm revocados en ambas caras y un K= 1.88 W/m<sup>2</sup>K. Los techos son a dos aguas de tipo liviano compuesto por estructura de madera de pino sobre los que materializa un entablonado machihembrado de 3/4", cartón embreado y chapa ondulada aluminizada al exterior. El cielorraso es visto y tiene un K= 2.58 W/m<sup>2</sup>K. Todas las carpinterías de puertas y ventanas son de madera en regular estado con vidriado sencillo de 4 mm y en algunos casos con postigos interiores junto a vidrios fijos de seguridad de 3+3mm y un K= 5.86 W/m<sup>2</sup>K. Las renovaciones de aire se fijan en N=2 (IRAM 11604).

El interior tiene buena iluminación natural, la artificial es tipo fluorescente de bajo consumo y se está renovando a LED. Solo en 1 ambiente orientado al este está climatizado con un aire acondicionado tipo Split de 3000 W. Conserva la envolvente y carpintería original que fueron restauradas. Sufrió una intervención con la colocación de unas ventanas de vidrio fijo que están en debate en la presentación ante ICOMOS. Solo posee servicio de energía eléctrica.

## 2. Desarrollo del trabajo:

### 2.1. Metodología e instrumental utilizado

El equipo del LAyHS posee más de 30 años de experiencia en la realización de auditorías de edificios y propuestas de rehabilitación energética y ambiental (Rosenfeld, Elías; et Al: 1988) (Czajkowski, J., et Al: 2012). El procedimiento consiste en la visita del edificio y su relevamiento en lo formal, constructivo y estado de conservación. Conocido este, se planifica la instalación de instrumental automático durante una semana a fin de registrar su comportamiento higrotérmico y lumínico, si corresponde en zonas térmicas. Se instaló un resguardo meteorológico en el exterior distante 300 m en la sede del palacio municipal dado que la estación está muy expuesta y sin vigilancia. Se usó un microadquisidor de datos Hobo Pro V2 a fin de registrar la variación de temperaturas y HR con una frecuencia de 15 minutos. En el interior en cada zona térmica se instalaron dos microloggers siendo uno Hobo U12/012 y otro modelo UX100-003. Se registraron temperaturas superficiales interiores y termografía en caso de requerirse. Se realizó una encuesta de percepción ambiental y del confort a empleados municipales.



Figura 3: Instrumental utilizado en la monitorización higrotérmica. Fuente: Propia, 2022.

El trabajo se completa con un análisis del comportamiento energético del edificio en régimen estacionario basado en una versión adaptada de las Normas IRAM 11604, 11659 y 11900 a fin de obtener el comportamiento a nivel mensual para determinar la demanda de energía en climatización. Considerando una agenda de ocupación basada en el relevamiento. Para invierno y verano se contrastan la versión original con la mejorada y se concluye una propuesta de mejoras.

## 2.2. Comportamiento energético:

El edificio como se mencionó previamente es de construcción tradicional con muros de ladrillos comunes, carpinterías de madera con vidrio simple de 4mm y techo de chapas metálicas sobre entablonado de madera. Implica una baja eficiencia energética y es esperable un comportamiento térmico inadecuado. El personal manifiesta que es muy caliente en los meses de verano y frío en los meses de invierno. El reporte de auditoría de invierno del 28/09/2021 al 12/10/2021 muestra un consumo de energía eléctrica de 106.2 kWh en energía eléctrica. En la visita de verano no pudo accederse al medidor por falta de personal municipal. El municipio no brindó registros históricos de consumo de energía por falta de información. La figura 4 muestra las pérdidas de energía discriminadas por la envolvente donde destacan muros y techo con el 27% respectivamente seguidos de las renovaciones de aire y las ventanas.

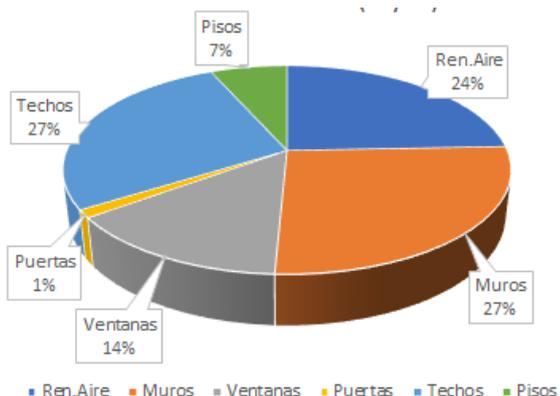


Figura 4: Pérdidas térmicas discriminadas situación original

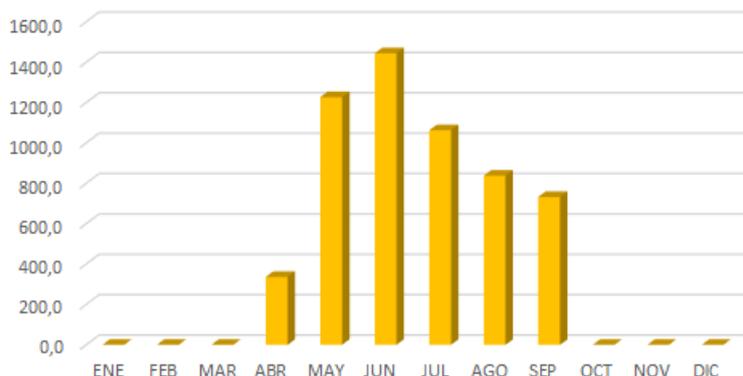


Figura 5: Demanda de energía en calefacción en kWh/mes calculado para TBcal= 20°C, situación original

La Figura 5 muestra la demanda de energía calculada para una temperatura de confort interior de 20°C usando como base los datos de la Ciudad de Rosario ya que Pérez no posee estación meteorológica.

Tabla 2: Resumen de aspectos dimensionales del edificio

ASPECTOS DIMENSIONALES		
Superficie habitable	84,39	m <sup>2</sup>
Volumen habitable	286,92	m <sup>3</sup>
Indice Compacidad Co	0,37	adim
Factor de forma f	0,79	adim
Factor de exposición Fe	1,00	adim
Altura media de locales	4,30	m
Superficie envolvente	225,68	m <sup>2</sup>
Superficie expuesta	225,68	m <sup>2</sup>

La Tabla 2 muestra indicadores dimensionales y formales del edificio usados en el diagnóstico energético, del cual surge que el edificio tiene un Coeficiente volumétrico global de pérdidas térmicas Gcal (IRAM 11604) de 2,87 W/m<sup>3</sup>K y un Coeficiente de pérdidas unitarias 7,39 W/m<sup>2</sup> que resulta en una Demanda anual energía eléctrica en calefacción de **5641,41 kWh/año** y 66,85 kWh/m<sup>2</sup>año, para una temperatura base de calefacción de 20°C.

A fin de definir estrategias de rehabilitación se analizan las pérdidas y se encuentra que es factible intervenir los techos (27%), muros (27%) y vidriados (14%), según Figura 4, a fin de lograr mejoras en la demanda de energía.

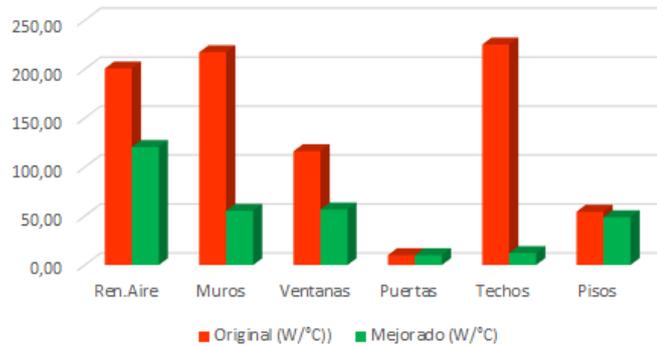


Figura 6: Comparación entre versión original y mejorada

La Figura 6 muestra el impacto que tendrían las mejoras en la envolvente con las mejoras propuestas en aislamiento térmico de muros, techos y vidriados.

### 2.3. Comportamiento higrotérmico:

Las figuras 7 y 8 muestran el comportamiento del edificio durante los períodos frío y cálido del año respectivamente.

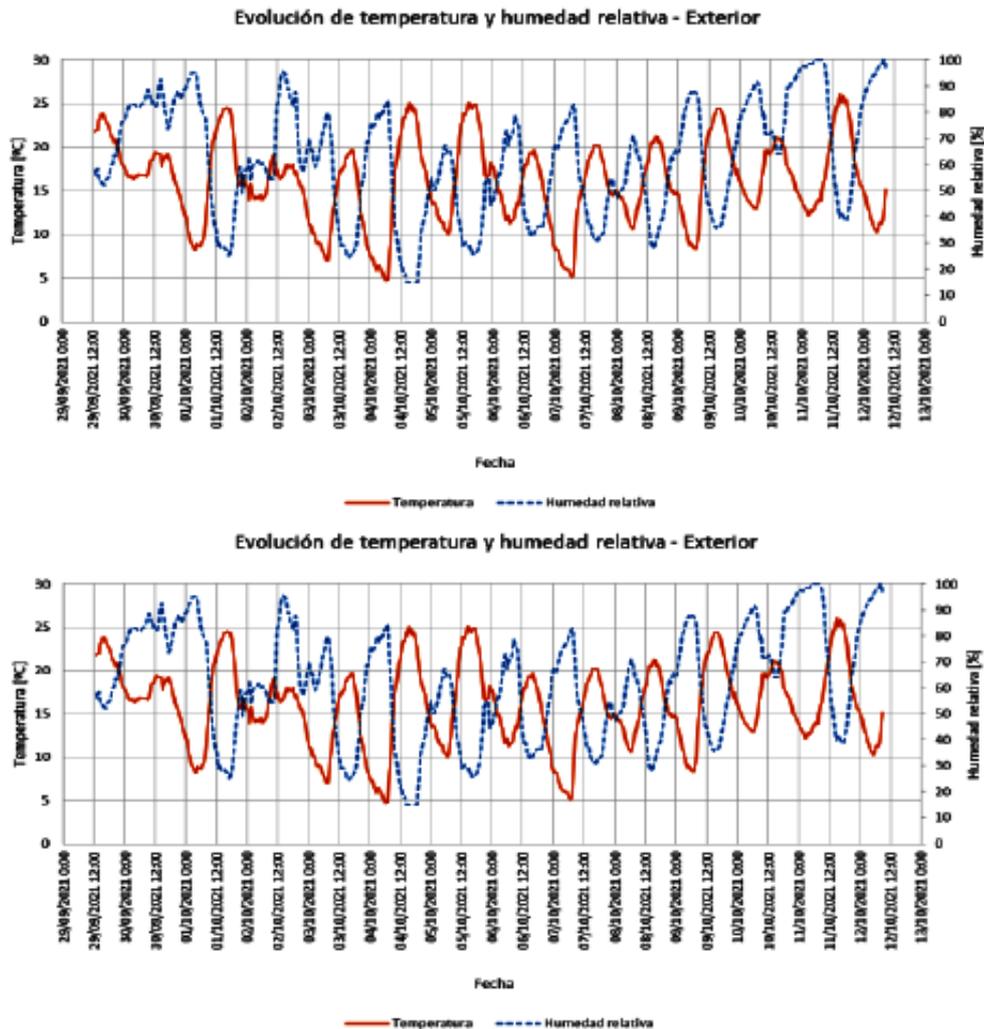


Figura 7: Comportamiento higrotérmico del edificio en setiembre/octubre mostrando resultados del exterior (Izq.) e interior (Der.)

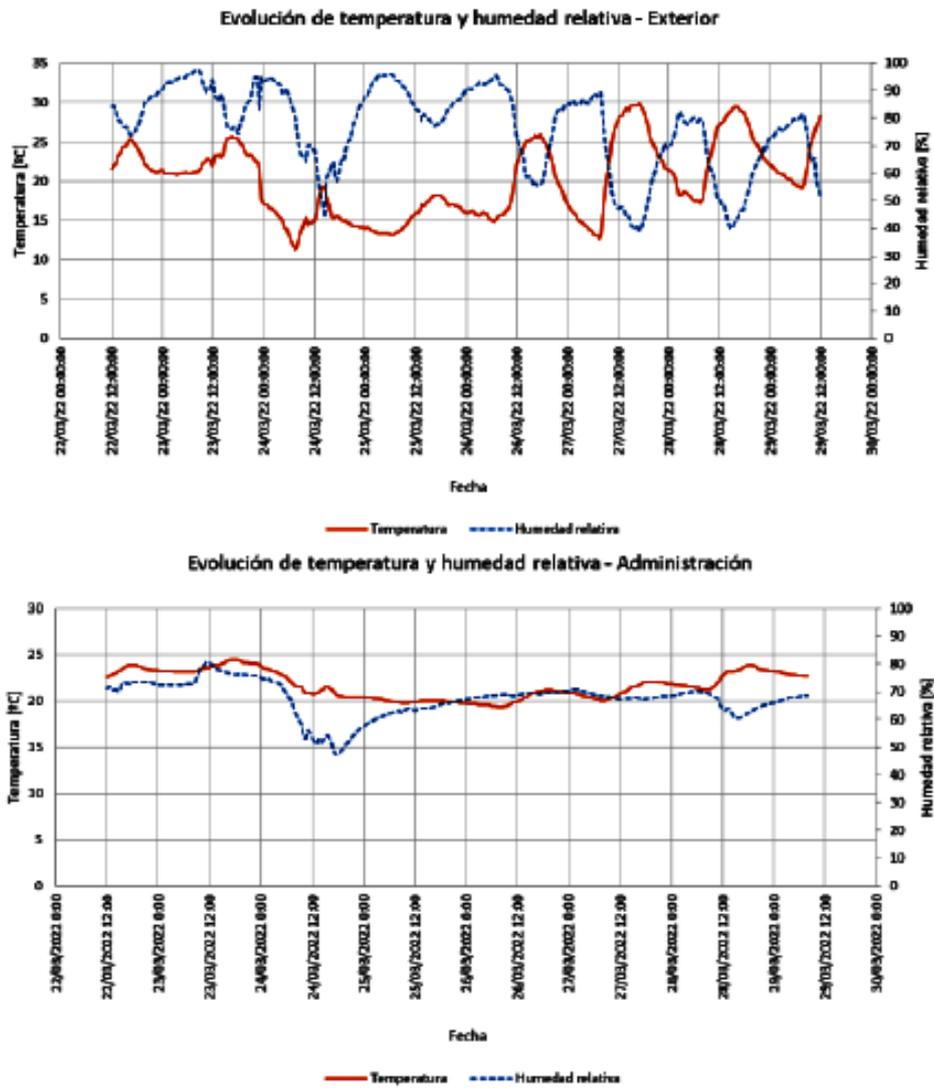


Figura 8: Comportamiento higrotérmico del edificio en marzo mostrando resultados del exterior (Izq.) e interior (Der.)

Por temas de agenda en ambos casos las mediciones se realizaron al límite de ambas temporadas siendo más características de inicios de primavera y otoño respectivamente.

Esto se muestra en las gráficas de confort del modelo B.Givoni materializadas con el programa Psiconf 1.0.

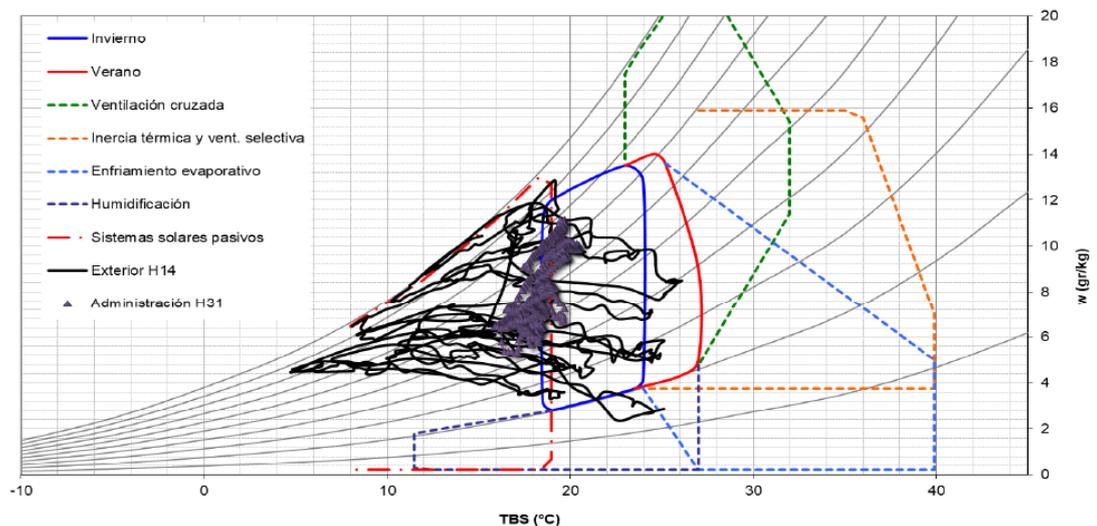


Figura 9: Comportamiento higrotérmico del edificio en set/oct mediante Psiconf 1.0.

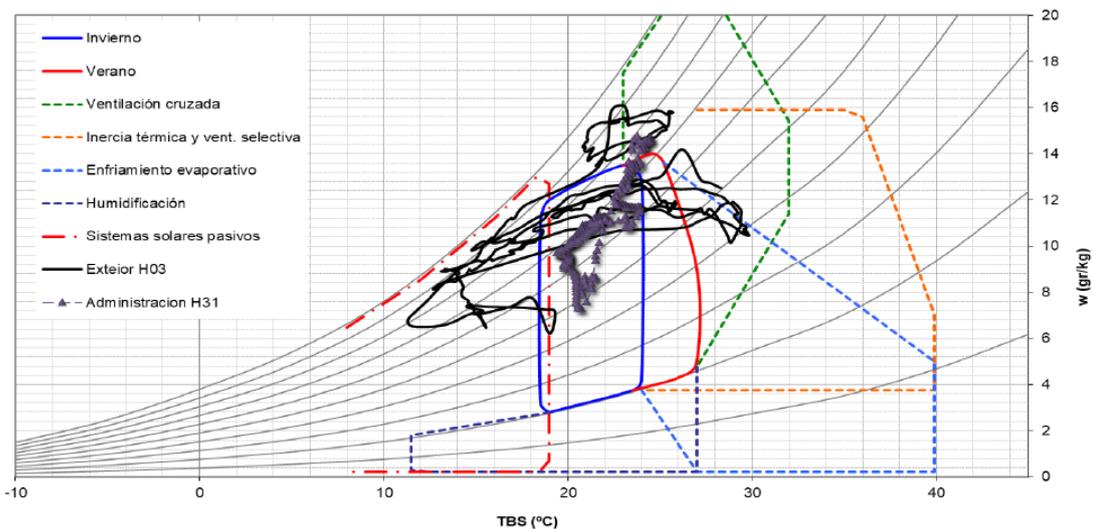


Figura 10: Comportamiento higrotérmico del edificio en marzo mediante Psiconf 1.0.

Las figuras 7 y 8 muestran la variación higrotérmica respecto de las zonas de confort de invierno y verano, respectivamente. De haberse realizado la monitorización en julio y en enero mostraría que el edificio es de un bajo confort higrotérmico sumamente frío y húmedo en invierno y muy caliente en verano. En invierno se requeriría el uso de sistemas solares pasivos y en verano de ventilación cruzada, mayor inercia térmica, aislamiento en techos y protección solar.

#### 2.4. Diagnóstico y propuesta de rehabilitación energética:

La medida más importante es trabajar sobre la envolvente: a. agregar 10 cm de lana de vidrio con foil de aluminio inferior en el espacio entre cabios, o sobre el cielorraso suspendido y reemplazar con tableros de yeso el cielorraso; cubrir los muros interiores con 0.05m de lana de vidrio, barrera de vapor y terminación en tableros de yeso o negociar con la comisión de patrimonio un aislamiento exterior respetando la imagen existente con 0.05m de EPS de 30kg/m<sup>3</sup> con la técnica EIFS (SATE) y c. colocar DVH en ventanas fijas y móviles más protección solar. Estas soluciones no debieran afectar la imagen del edificio, conservando la construcción preexistente y le dará adecuados niveles de confort higrotérmico y eficiencia energética. La solución de aislamiento interior en muros elimina el efecto benéfico de la inercia térmica. De pensarse en energías renovables la mejor opción es una bomba geotérmica frío/calor accionado por un generador FV. Además, brindaría ACS al office. El generador fotovoltaico podría alimentar además la iluminación LED (100W) y la computadora del sector administrativo.

Otro grupo del proyecto basado en estas recomendaciones elaborará el proyecto ejecutivo para que la universidad haga el llamado a compulsa de precios y dirija la obra de rehabilitación con fondos de la Unión Europea.

### 3. CONCLUSIONES.

El diagnóstico energético y monitorización higrotérmica puede considerarse herramientas válidas para conocer las características térmicas y funcionamiento bioclimático y energético de edificios. Permite generar información sea cuantitativa como cualitativa para no solo tener información primaria sino conocer la opinión de sus habitantes. Esto facilita la justificación de donde priorizar las inversiones en rehabilitación.

El trabajo muestra con claridad los inconvenientes de programar tantas auditorías en tiempos ajustados junto a desplazarse centenares de km de la sede institucional. A pesar de esto los resultados son valiosos. El mayor inconveniente del caso analizado es estar propuesto como edificio del patrimonio cultural ya que es usual una incompatibilidad entre los requerimientos para realizar mejoras en la eficiencia energética y su aprobación por parte de los expertos en conservación del patrimonio edificado.

Aun así, se mantiene la necesidad de primero un aplicar criterios bioclimáticos, seguido de reducción de la carga térmica y por último compensar con renovables para optimizar la eficiencia energética respecto de la inversión económica.

### 3. REFERENCIAS.

- Czajkowski, J., Gómez, A., Vagge, C., Salvetti, B., Marcilese, M., Diulio, M. d., y otros. (2012). Evaluación del confort higrotérmico invernal en viviendas unifamiliares del gran La Plata mediante auditorías. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 5.101-5.106. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Czajkowski, J., Basualdo, D., Coronel, A. y Gómez, A. (2019) Evaluación del comportamiento térmico de vivienda social mediante termografía. *Condición de verano*. XXIII Congreso y XXXVIII Encontro Arquisur Belo Horizonte, Brasil. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/82959>
- Czajkowski, J. (2022). Psiconf 1.0 - Una aplicación para la graficación y análisis del confort higrotérmico, con datos de instrumental analógico o digital según el modelo de Baruch Givoni. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/141630>
- Filippín, C., & Follari, J. (2003). Comportamiento termico de un proyecto demostrativo bioclimático en San Luis. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 5.69-5.76. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Gonzalo, G., Ledesma, S., Nota, V., & Martínez, C. (2000). Rediseño y actualización del programa computacional para verificación del riesgo de condensación en cerramientos exteriores. *Avances en Energías Revables y Medio Ambiente*, 4. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Salvetti, M. B., Czajkowski, J. D., & Gómez, A. F. (2009). Análisis del comportamiento energético-ambiental en torre de viviendas en La Plata. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13, 5.127-5.133. <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>
- Stazi, F., Di Perna, C., & Munafó, P. (2009). Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings*(41), 721-731.
- Verbeek, G., & Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings* (37), 747-754.
- Normas: IRAM 11601 (2002). Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y materiales de construcción en régimen estacionario. Norma IRAM 11603. (2012). *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la Republica Argentina*. Norma IRAM 11604 (2001). Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico  $G_{cal}$  de pérdidas de calor. Cálculo y valores límite. Norma IRAM 11605 (1996). Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos. Norma IRAM 11659-1/2 (2004/7). Ahorro de energía en refrigeración. Parte 1: vocabulario, definiciones, tablas y datos para determinar la carga térmica de refrigeración. Y Parte 2: edificios para viviendas. Valores admisibles  $G_{ref}$ . Norma IRAM 11900 (2017). Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética.
- Rosenfeld, Elías; Ravella, Olga Rosa; Fabris, Aldo; Discoli, Carlos Alberto; Di Constanzo, Nelly; Lozano, Susana; Martínez, Sara; Ferreyro, Carlos; Czajkowski, Jorge Daniel; Sagasti, Carlos; Fontana, Marisa; Gómez, Analía Fernanda (1988). El consumo de energía en el sector del área metropolitana argentina. Potencial de URE. XXIII Reunión de Trabajo de la ASADES. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/77990>
- Stazi, F., Di Perna, C., & Munafó, P. (2009). Durability of 20-year-old external insulation and assessment of various types of retrofitting to meet new energy regulations. *Energy and Buildings* (41), 721-731. doi:10.1016/j.enbuild.2009.02.008 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809000279>
- Tanides, G. C., Nicchi, F. G., Laviora, M. L., & Mazitelli, A. (2013). Calefacción en el sector residencial argentino: primera modelización y estudio de las consecuencias de la sustitución de bombas de calor en reemplazo de calefactores a gas. Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía. Buenos Aires. <http://eluree.org/wp-content/uploads/2013/09/actas/>
- Verbeek, G., & Hens, H. (2005). Energy savings in retrofitted dwellings: economically viable? *Energy and Buildings* (37), 747-754. doi:10.1016/j.enbuild.2004.10.003 <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778804003366>.

### Agradecimientos

A la Unión Europea y en particular a la República de Francia por el financiamiento de un proyecto que por su complejidad y amplitud no sería posible con los programas nacionales de CyT. A la RAMCC por el apoyo brindado en la gestión de los municipios a auditar. Al Sr Intendente de Pérez y su equipo por la gran cortesía y calidez brindada al equipo auditor al visitarlos. A la ciudadanía del municipio, empleados y funcionarios del palacio municipal.

# ANÁLISIS ENERGÉTICO Y ECONÓMICO EN PLANTAS DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CON GENERACIÓN ELÉCTRICA

Castillo-Leon Nilson Yulian<sup>a</sup>, Tarazona-Romero, Brayan Eduardo<sup>a</sup>, Ascanio-Villabona, Javier Gonzalo<sup>b</sup>, Duran-Sarmiento, Miguel<sup>b</sup>, Sandoval-Rodriguez, Camilo Leonardo<sup>b</sup>, Lenguerke-Perez, Omar<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Unidades Tecnológicas de Santander. Bucaramanga, Colombia

<sup>b</sup> University of the Basque Country, Bizkaia, Spain

nycastillo@correo.uts.edu.co

## RESUMEN.

Actualmente, a nivel mundial la generación constante de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) se ha convertido en un desafío para la humanidad, que obliga a plantear diferentes modelos de gestión, el objetivo del presente estudio, es realizar una evaluación energética y económica que valore los flujos de RSU generados por pequeñas ciudades utilizando la tecnología de Incineración directa para la generación eléctrica. Se evaluó una configuración convencional de ciclo Rankine, por medio de un enfoque analítico, se calcularon las propiedades termodinámicas en cada estado para determinar los rendimientos energéticos de planta, definiendo los supuestos financieros para desarrollar el análisis económico. Los parámetros de vapor de los ciclos Rankine se estimaron en 40 bar y 380°C, con un PCI de los RSU de 8,786 kJ/kg. La eficiencia energética se calculó en 22.6% entregando a la red 87.4 GWh por año, con un periodo de recuperación de 19.7 años, un valor presente neto (VPN) de \$ 5.880.477 USD, una tasa interna de retorno (TIR) de 11.16% y un costo nivelado de electricidad de 190.14 USD/MWh. Bajo las condiciones de este estudio, la variable más significativa por ingresos de planta, es la tarifa de eliminación de RSU.

**Palabras Claves:** Análisis termodinámico, Ciclo Rankine, Incineración directa Residuos sólidos urbanos.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables

**Categoría del Trabajo:** Trabajos de Docentes-Investigadores-Profesionales

## 1. INTRODUCCIÓN.

La generación y disposición adecuada de residuos sólidos urbanos RSU, es una preocupación para toda sociedad que desea alcanzar prosperidad industrial, una mala gestión de los desechos, desencadenaría en afectaciones al medio ambiente que a su vez desataría problemáticas sociales. La generación desmedida de basuras durante 25 años a nivel mundial se ha triplicado, pasando de 680 millones de toneladas en 1999 a 1300 millones de toneladas en el 2012, presentando un aumento en menos de 15 años del 91%, las proyecciones del banco mundial indican que para el 2025 se generarían alrededor de 2.200 millones de toneladas[1], lo que requiere una alternativa para la gestión de las basuras, abriendo el espacio a tecnologías WtE tales como la incineración directa de RSU la cual disminuye en un 90% el volumen de los residuos y en un 75% el peso específico de los mismos, reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del suelo y el agua en comparación de los vertederos actuales [2][3] y generando energía eléctrica parcialmente renovable (combustible biomasa de RSU) fortaleciendo de esta manera la seguridad energética y diversificando las fuentes de combustible primario [4][5][6].

Actualmente, son más de 800 plantas térmicas de recuperación energética de residuos, las cuales operan en 40 países a nivel mundial; tratan aproximadamente 11% de los RSU generados en todo el mundo y producen un total de 429 TWh de potencial año [7], La incineración implica una quema directa y controlada de desechos en presencia de oxígeno para generar cenizas, gases de combustión y calor que se utiliza para producir electricidad, durante el proceso los gases de combustión alcanzan una temperatura de al menos 850°C durante 2s para garantizar una descomposición adecuada de las sustancias orgánicas tóxicas [8]. Sin embargo la cantidad de energía recuperada de la combustión de residuos varía significativamente con las características de los RSU (composición, flujo de masa, frecuencia y PCI), la tecnología de combustión, las diferentes configuraciones y los parámetros del ciclo de vapor. La corrosión sigue siendo el problema principal en la caldera de RSU, desafortunadamente los procesos de corrosión tienen una naturaleza múltiple, cambian con el tiempo según la composición de los RSU y están estrictamente relacionados con los parámetros de vapor, siendo estos limitados a 380°C y 40 bar, así, la presión y la temperatura en el generador de vapor, marca la generación de corrosión, restringiendo la eficiencia del ciclo alrededor del 20 y 25% siendo superadas en comparación con las eficiencias de los ciclos térmicos que utilizan combustible fósil, como el carbón (35-40%) [9][10][11] [12].

La factibilidad de la implementación de esta tecnología se ha evaluado dentro de la comunidad científica, afirmando por medio de análisis de ciclo de vida, que la incineración ofrece mejores réditos económicos cuando se realiza recuperación energética y condiciones técnicas que aseguren la sostenibilidad ambiental del proyecto [13][14]. En términos energéticos y económicos tan et al, analizaron la gestión de residuos en malasia, comparando las tecnologías de incineración y gasificación, se obtuvieron mejores rendimientos energéticos y económicos para la incineración, no obstante, estos resultados pueden variar en función del tipo de residuos, así como de la escala y la eficiencia del sistema y de la región estudiada. Lino e Ismail (2017) [15] Llegaron a la conclusión de que la electricidad generada mediante esta práctica podría abastecer hasta 135.680 casas y generar ingresos de aproximadamente 5,8 millones de dólares al mes. Según Dalmo et al. la implantación de RSU en plantas de incineración en el estado de Sao Paulo podría generar hasta 5,7 TWh, un potencial capaz de satisfacer el 79% de la demanda energética del estado. La incineración de residuos en sólo 16 grandes ciudades brasileñas podría sustituir el 1,8% del consumo total de electricidad doméstica en todo Brazil [16].

No menos importante, y debido a la resistencia social, las plantas de incineración requieren un sistema de control y tratamiento de los gases de escape, lo que conlleva unos costes elevados. La reducción de las emisiones peligrosas de la incineración es un tema constantemente investigado en la literatura. Como ejemplo, podemos citar a Silva et al. (2019) [17] quienes propusieron un modelo de reactor que combina la pirólisis y la incineración alimentada por una mezcla de RSU y astillas de madera, una mezcla con alto poder calorífico. Con este reactor, los autores lograron minimizar las emisiones de compuestos como el HCl, las dioxinas y los furanos, logrando emisiones por debajo de los estándares legales de Brasil y de otros indicadores medioambientales internacionales. Estas innovaciones son importantes para el futuro de la incineración y la generación de energía a partir de los RSU. Una revisión de la evolución y la mejora de los métodos de tratamiento de efluentes gaseosos en las plantas de incineración en las últimas décadas se pueden encontrar en [18]. Como consecuencia de estos elevados costes, esta tecnología no está implantada a nivel mundial, por lo que se concentra principalmente en tres regiones del mundo: Europa, Asia y América del Norte, No obstante, el potencial de la incineración en regiones del mundo donde esta tecnología no está extendida es muy alto. La intención de este estudio, es desarrollar por medio de un enfoque analítico los cálculos energéticos y rendimientos de planta, que serán la base para construir una metodología que permita evaluar indicadores económicos, sirviendo como punto de partida para nuevos

investigadores y tomadores de decisiones que pretendan la implementación de esta tecnología en sus ciudades.

## 2. METODOLOGÍA.

Este estudio tiene como objetivo evaluar los rendimientos energéticos y económicos de una planta de incineración directa de residuos MSWI. Para el ejercicio numérico se caracterizó como escenario de referencia una planta convencional de tamaño mediano, con capacidad de 66 MWt, de acuerdo con las características energéticas de los MSW ofrecidas por la ciudad de Bucaramanga y su área metropolitana (Colombia).

### 2.1. Caso de estudio.

El valor energético de los RSU depende de su contenido de humedad y composición, la recuperación de energía por tonelada de desechos dependerá del poder calorífico inferior PCI, la eficiencia de la caldera y el producto final, ya sea en forma de vapor o electricidad, el valor calorífico de los RSU varía de un país a otro, incluso entre ciudades de la misma nación, influenciados principalmente por aspectos socioeconómicos. En el presente estudio, se tomó como caso referente el flujo de residuos sólidos urbanos que ingresan al vertedero el carrasco, ubicado en la ciudad de Bucaramanga (Colombia). La composición física de los RSU se determinó al promediar tres estudios realizados en el vertedero el carrasco, como se muestra en la figura 1 [19] [20].

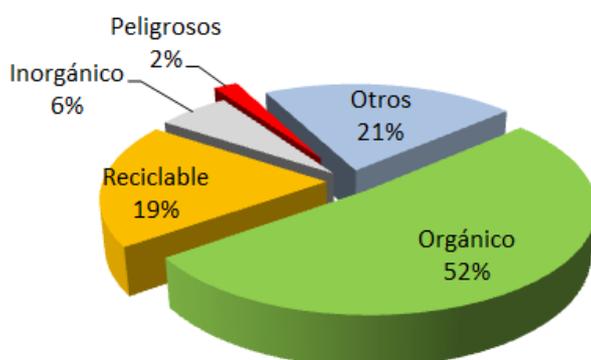


Figura 1. Composición física de RSU

El diseño de planta considerado, se muestra en la Figura 2. La planta funciona de la siguiente manera. El fluido de trabajo sale de la bomba 2 (líquido comprimido) pasando por el economizador (vapor saturado) y sobrecalentador (vapor sobrecalentado) de la caldera, el vapor sobrecalentado ingresa a la turbina (corriente 5), donde se expande a presión de condensación (corriente 7). Se realiza una extracción en la turbina proporcionando el vapor necesario para el funcionamiento del desaireador (corriente 6). El vapor condensado ingresa a la bomba 1 (flujo 1) que aumenta la presión del agua a la presión de operación del desaireador (flujo 2). Finalmente, el agua ingresa a la bomba 2, a través de la corriente 3, cerrando el ciclo.

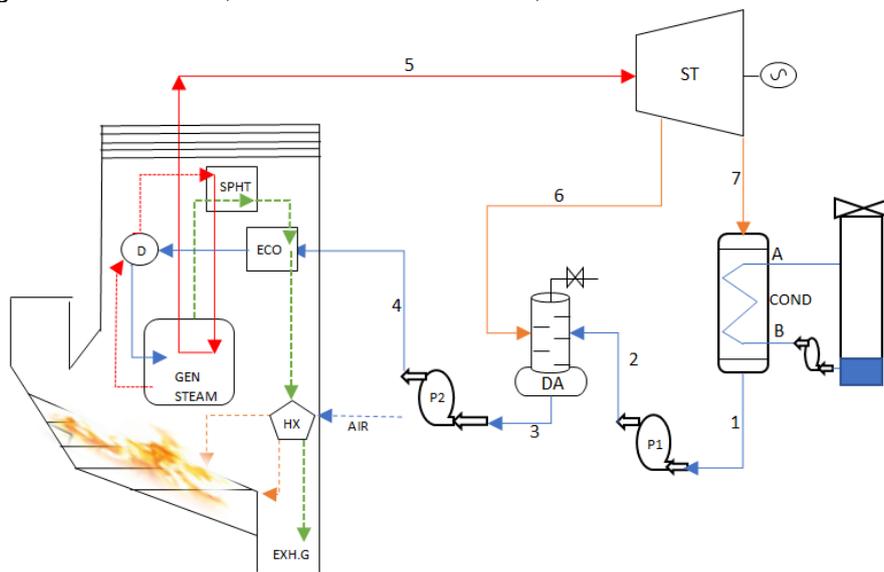


Figura 2. Esquema de planta

## 2.2. Cálculos de energía.

La metodología utilizada para la evaluación energética se observa en la figura 3. Después de definidos los parámetros iniciales de planta (Tabla 1), se calculan las principales propiedades termodinámicas en cada corriente de flujo de vapor (Tabla 2), Para ello se utilizó el software CoolProp (acceso libre, gratuito) [21].

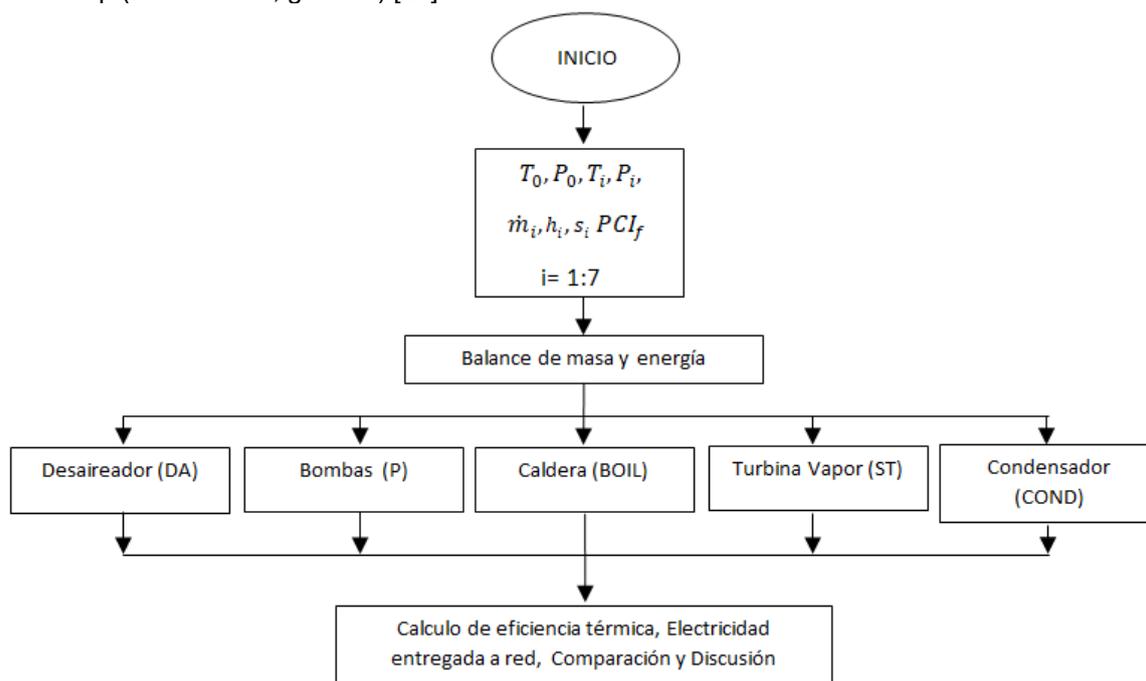


Figura 3. Metodología Análisis energético

Mediante una revisión energética del ciclo, se determina el flujo másico producido por la caldera y el flujo de residuos (capacidad de planta) que ingresan al horno utilizando la ecuación (1).

$$\dot{m}_{s,OUT,BOIL} = \frac{\dot{m}_{RSU} \cdot \eta_{BOIL} \cdot PCI_{RSU}}{(h_{OUT,BOIL} - h_{IN,BOIL})} \quad (1)$$

La potencia eléctrica y mecánica de la turbina de vapor se calculan con las ecuaciones (2) y (3), si se resta la energía eléctrica consumida en planta EECp a la potencia eléctrica se obtiene la potencia eléctrica líquida generada por el ciclo.

$$\dot{W}_{ST,el} = \dot{W}_{ST,mec} \cdot \eta_{Gen} \quad (2)$$

$$\dot{W}_{ST,mec} = w_{ST,térmico} \cdot \dot{m}_{IN,ST} \quad (3)$$

La eficiencia térmica y líquida del ciclo, se calculan mediante la ecuación (4) y (5)

$$\dot{W}_{ST,el} = \dot{W}_{ST,mec} \cdot \eta_{Gen} \quad (4)$$

$$\dot{W}_{ST,mec} = w_{ST,térmico} \cdot \dot{m}_{IN,ST} \quad (5)$$

La energía eléctrica entregada red, el consumo específico de RSU y el índice de electricidad líquida excedente se calculan con las ecuaciones (6),(7) y (8) respectivamente,

$$\dot{W}_{Eléctrica Red} = \dot{W}_{ST,el,liq} \cdot Hr_{SOperación al año} \quad (6)$$

$$CER = \frac{\dot{m}_{RSU}}{\dot{W}_{ST,el}} \quad (7)$$

$$IELE = \dot{W}_{ST,el,liq} / \dot{m}_{RSU} \quad (8)$$

Tabla 1. Parámetros Iniciales de planta

Parámetro		Valor		Ref
Temperatura del horno	$(T_{Horno})$	1150	°C	[22]
Poder calorífico inferior	$(PCI_{RSU})$	8,786	$\frac{kJ}{kg}$	[19]
Temperatura vapor	$(T_{ST})$	380	°C	[23]
Presión de vapor	$(P_{ST})$	4,000	kPa	[23]
Eficiencia Caldera	$(\eta_{BOIL})$	0.75	%	[5]

Eficiencia Generador	$(\eta_{Gen})$	0.96	%	[24]
Eficiencias isentrópica Bombas	$(\eta_{Isent-BOM})$	0.85	%	[25]
Eficiencia isentrópica Turbina	$(\eta_{Isent-ST})$	0.85	%	[26]
Presión condensador	$(P_{COND})$	15	kPa	[27]
Presión Desaireador	$(P_{DEA})$	350	kPa	[28]
Potencia eléctrica de turbina Vapor	$(W_{ST,el})$	15	MW	[29]
Horas de operación		8,000	$\frac{Hrs}{año}$	[30]
Horas de operación de ciclos combinados		8,640	$\frac{Hrs}{año}$	[23]
Total de RSU disponible		1,000	$\frac{t_{RSU}}{día}$	[19]
Energía eléctrica consumida en planta	<b>(EECP)</b>	150	$\frac{kWh}{t_{RSU}}$	[29]

Tabla 2. Propiedades termodinámicas

Corriente	Flujo $\dot{m}$ (kg/seg)	Presión p (kPa)	Temperatura t (°C)	Entalpía h (kJ/kg)	Entropía s (kJ/kg.K)
1	16.497	15	53.969	225.944	0.755
2	16.497	350	53.997	226.344	0.755
3	19.270	350	138.857	584.261	1.727
4	19.270	4,000	139.384	588.893	1.733
5	19.270	4,000	380.000	3166.766	6.699
6	2.774	350	138.857	2712.874	6.894
7	16.497	15	53.969	2319.956	7.156
A	826.414	101.325	298.150	104.920	0.367
B	826.414	101.325	308.150	146.720	0.505

### 2.3. Cálculos económicos.

Con el objetivo de determinar la viabilidad económica de la planta, se utilizó la metodología de la figura 4. Inicialmente se calcularon los costos de inversión de planta en función de la capacidad de RSU tratados [31], se determinaron los costos de operación, mantenimiento variable y fijo de planta, con los anteriores resultados se calcula el costo nivelado de electricidad LCOE utilizando la ecuación (9), indicando cuánto cuesta producir un kWh de energía eléctrica.

$$LCOE = \frac{CIA + O\&M_A}{\dot{W}_{ST,el} \cdot Hrs_{Operación \text{ al año}}} \quad (9)$$

Donde CIA es el costo de inversión anualizado y se define como; el producto del factor de recuperación de capital FRC por la inversión de planta.

$$FRC = \frac{i \cdot (1 + i)^t}{(1 + i)^t - 1} \quad (10)$$

Siendo t la vida útil de la planta en años e (i) es la tasa de interés.

Teniendo el conocimiento de los costos de producción e inversión, se procede a elaborar un flujo de caja, el cual tiene como objetivo calcular el valor presente neto VAN y la tasa interna de retorno TIR los cuales indicaron cierres financieros y viabilidad económica de la planta.

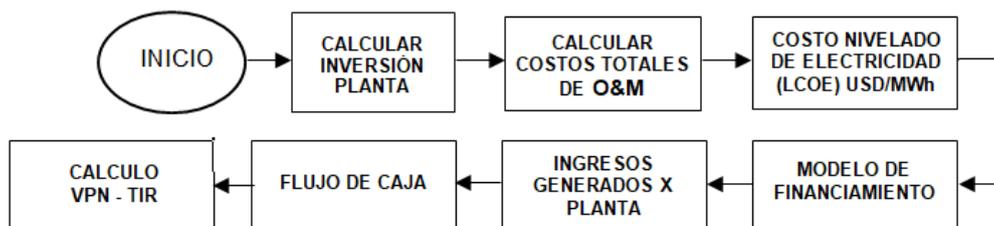


Figura 4. Metodología análisis económico

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1. Análisis Energético

Los principales resultados, derivados de los diferentes balances de masa y energía se observan en la tabla 3. La planta considerada, entrega a la red energía eléctrica alrededor de 87.433 GWh por año, con una eficiencia térmica del 22.6%, capaz de generar por carga 1.81 kg de RSU un kWh de energía eléctrica y 402.7 kWh por tonelada de residuo.

Tabla 3. Rendimientos energéticos de planta

Parámetro	Valor	
Producción de vapor en caldera ( $\dot{m}_{S-CALD}$ )	5.352	$t_{VAPOR}/hr$
Capacidad de planta ( $\dot{m}_{RSU}$ )	651.346	$t_{RSU}/dia$
Eficiencia térmica ( $\eta_{Térmica}$ )	22.6	%
Potencia eléctrica líquida ( $\dot{W}_{ST,el,liq}$ )	10.929	MW
Eficiencia líquida ( $\eta_{Térmica liq}$ )	16.5	%
Electricidad entregada a red ( $\dot{W}_{Eléctrica Red}$ )	87.433	GWh/año
Consumo específico de RSU (CER)	1.81	kg/kWh
Índice de electricidad líquida excedente (IELE)	402.701	kWh/ $t_{RSU}$

#### 3.2. Análisis Económico

Para la definición de la inversión, costos de producción y mantenimiento de planta se utilizó como referencia el trabajo de Schneider (2010) [31]. Los valores de los conceptos mencionados se estimaron en función de los RSU procesados en planta por año (capacidad de planta). Los costos de inversión en bienes de capital se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Costos de inversión en bienes de capital

Tipo de inversión	Estimación ( $\frac{USD}{t_{RSU-año}}$ )	% Inversión capital	Costo (USD)
Infraestructura y almacenamiento de RSU	51.05	7.5 %	11,084,472
Sistemas combustión y generadores de vapor	216.42	32 %	46,988,523
Sistemas de agua y vapor	88.78	13 %	19,277,343
Sistemas de limpieza de gases	85.45	13-15 %	18,554,443
Diseños de planta	22.2	3 %	4,819,336
Costo de construcción	79	11.5 %	16,867,675
Instalación electromecánica	55.5	8-9 %	12,048,339
Otros costos	65.5	10 %	14,458,007
<b>Total</b>			<b>144,098,138</b>

De acuerdo con la referencia [32], los costos de operación y mantenimiento de una planta de generación eléctrica por medio de RSU son estimados en 392.82 \$ / kW-año, para los fijos y los variables en 8,75 \$ / MWh.

Se calculó el LCOE con una tasa de interés de 10% y una vida útil de planta de 25 años, se calculó en 190.14 dólares por MWh. Con relación a los costos de producción de energía eléctrica en plantas WtE de RSU, el departamento de energía de los estados unidos y la oficina de eficiencia energética y energía renovable en su reporte de agosto de 2019 publicó los valores de LCOE para las plantas WtE en los estados unidos, estando entre 120 y 170 US\$/MWh [33], los cuales se aproximan a los valores de este estudio.

Tabla 5. Variables para el cálculo del LCOE

Costo de inversión (USD)	FRC	O&M (Fijos) (USD)	O&M (Variables) (USD)	Horas (Años)	Potencia Planta (kW)	LCOE (US\$/MWh)
144,098,138	0.11	5,892,300	1,050,000	8,000	15,000	<b>190.144</b>

El modelo de financiamiento representa una carga financiera debido a reglas fiscales de cada nación e intereses de préstamo, para este estudio se definieron las condiciones del préstamo, tipo de financiamiento (largo plazo) y amortizaciones (PRICE).

Tabla 6. Condiciones del préstamo

Concepto Financiero	Valor	Ref.
Impuesto sobre la renta	33%	[34]
Horizonte de Planeamiento	25 Años	[5]
Cuota financiada de la inversión	60%	
Plazo de financiamiento	15 Años	
Tasa de interés de préstamo	10%	
Tasa mínima aceptable TMA	10%	[35]

Para elaborar el flujo de caja, se tuvieron en cuenta los ingresos relacionados con; precios por venta de energía, venta de metales y tarifa de eliminación de RSU, se describen en la siguiente tabla.

Tabla 7. Ingreso generado por planta anual

Concepto Ingreso	Estimación	Ref.	Ingreso (USD \$/año)
Venta Energía eléctrica	115.1 US\$ / MWh	[36]	10,063,500
Tarifa eliminación de RSU	42.1 US\$ / t RSU	[37]	15,348,250
Venta de metales separados	665,610 US\$ / año	[31]	665,610
<b>Total</b>			<b>26,077,360</b>

Se calculó la depreciación anual de los equipos y activos [38], calculando la depreciación anual en 4,905,101 USD y redefiniendo los costos distribuidos en planta, siendo del 60% para el equipamiento [39],

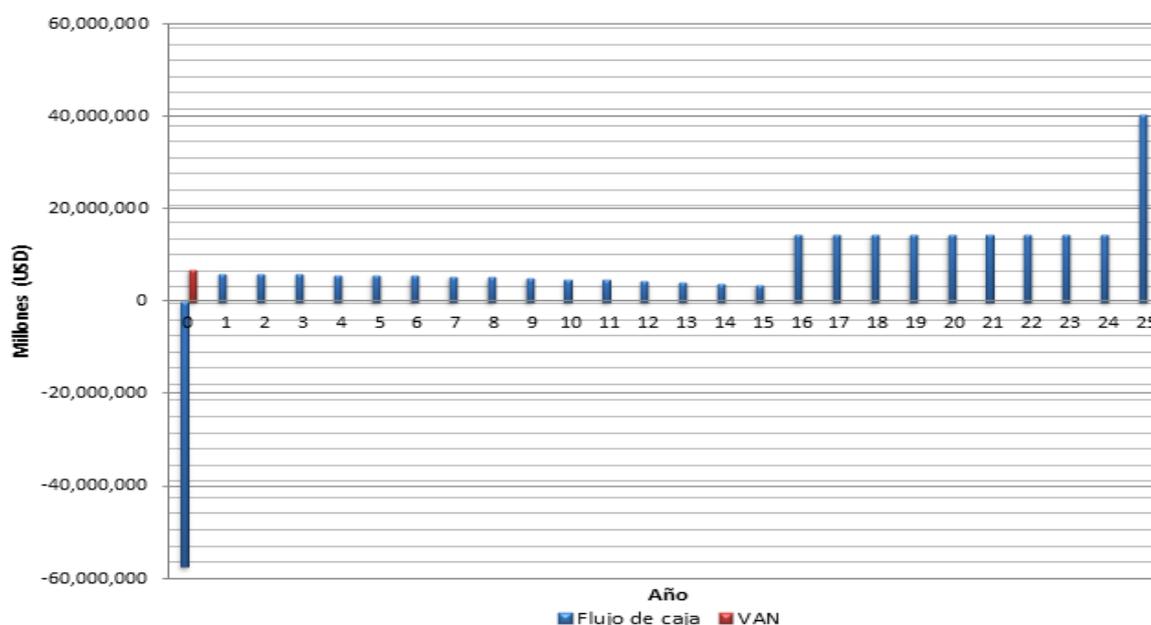


Figura 5. Flujo de caja de planta

Realizados los cálculos de flujos de caja, se puede observar las relaciones VAN, TIR del caso de estudio, logrando para el año diecinueve y 7 siete meses el retorno de la inversión RI

Tabla 8. Resultados VAN, TIR y RI

Indicadores económicos de planta	RI (Años)	VAN (USD)	TIR (%)
	19.7	5,880,477	10.99%

#### 4. CONCLUSIONES.

Las tecnologías WtE se han convertido en soluciones convenientes para la gestión sostenible de los RSU. Los procesos de combustión con recuperación energética (electricidad / calefacción urbana y en algunos casos, refrigeración urbana) representadas por la incineración directa de RSU dominan el mercado de desechos, alcanzando una madurez tecnológica probada en más de 2000 plantas instaladas alrededor del mundo. Sin embargo, un modelo de gestión que combine tecnologías WtE biológicas, térmicas, junto a políticas de reuso y reciclado en planta y fuente respectivamente, aumentaría la sostenibilidad en un proyecto de gestión de basuras.

Del análisis energético realizado se determinó, que la planta, procesando 652 toneladas de RSU al día, con una eficiencia térmica de 22.6%, lograría entregar 87 GWh al año, un estimado de cobertura eléctrica mensual de 46,000 hogares en Colombia. No obstante, la cantidad de energía

recuperada varía significativamente con las características de los RSU, (principalmente el contenido de humedad que afecta al PCI), configuraciones simples de planta y los parámetros del ciclo de vapor penalizados por efectos corrosivos en la zona convectiva de la caldera, ofreciendo la posibilidad de procesar los RSU antes de ingresar al horno por medio de tratamientos mecánicos y biológicos que permitan aumentar la valoración energética de las basuras.

Evaluando los resultados del análisis económico, cargado por su misma naturaleza por la subjetividad de estimaciones ligadas a variables, se evidencian dos aspectos relevantes (merecedores a diferentes análisis de sensibilidad) de los cuales depende la rentabilidad de una planta WtE, siendo del orden técnico y financiero, tales como la capacidad de planta, es decir cuántos RSU procesa en el año, el PCI de los RSU, susceptible a incrementar, si se realizan tratamientos biológicos mecánicos MTB en planta. Factores económicos como la inversión de capital en los sistemas de limpiezas de gases, las condiciones de préstamo (potenciar las alianzas público-privadas), ingresos por venta de electricidad y un factor predominante en este análisis, la tarifa de eliminación de RSU, para este estudio se tasa en 42 dólares por tonelada, en Europa se manejan valores de alrededor de 120 dólares por tonelada de RSU procesada.

Las plantas incineradoras de RSU enfrentan una gran resistencia social e incertidumbre fundadas en los gases de escape producto de la combustión, ya que estos, están compuestos por dibenzodioxinas y dibenzofuranos policlorados que representan altos riesgos para la salud humana, no obstante, el desarrollo tecnológico de última generación en cuanto a limpieza de humos permitiría operar una planta moderna WtE cumpliendo las estrictas normas y valores límites de emisiones establecidas, lo que conlleva a monitoreos por autoridades ambientales y obliga a los administradores de estas plantas a adquirir las tecnologías pertinentes para tratar los productos de la combustión.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, and F. Van Woerden, "What a waste 2.0. A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050," Washington, DC: World Bank, 2018.
- [2] C. Li, L. Yang, J. Wu, Y. Yang, Y. Li, Q. Zhang, Y. Sun, D. Li, M. Shi, and G. Liu, "Identification of emerging organic pollutants from solid waste incinerations by FT-ICR-MS and GC/Q-TOF-MS and their potential toxicities," *J. Hazard. Mater.*, vol. 428, p. 128220, 2022.
- [3] J. Cerda, R. Alves, and J. Perrella, "Analysis of hybrid waste-to-energy for medium-sized cities," *Energy*, vol. 55, pp. 728–741, 2013.
- [4] L. J. de Vilas Boas da Silva, I. F. S. dos Santos, J. H. R. Mensah, A. T. T. Gonçalves, and R. M. Barros, "Incineration of municipal solid waste in Brazil: An analysis of the economically viable energy potential", *Renew. Energy*, vol. 149, pp. 1386–1394, 2020.
- [5] E. N. Kalogirou, *Waste-to-Energy Technologies and Global Applications*, 1ª Edición. Boca Ratón: Taylor & Francis Group, 2017.
- [6] J. Gomez, C. Sandoval, and J. Coronel, "ANÁLISIS DE PROSPECTIVA DEL SECTOR ENERGÉTICO DE COLOMBIA, PARA LA INTEGRACIÓN DE FUENTES FOTOVOLTAICAS EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA APLICANDO UNA REVISIÓN EN BASES DE DATOS CIENTÍFICAS," *Rev. Colomb. Technol. Av.*, 2018.
- [7] S. T. Tan, W. S. Ho, H. Hashim, C. T. Lee, M. R. Taib, and C. S. Ho, "Energy , economic and environmental ( 3E ) analysis of waste-to-energy ( WTE ) strategies for municipal solid waste ( MSW ) management in," *Energy Convers. Manag.*, vol. 102, pp. 111–120, 2015.
- [8] P. Mondal, S. Samanta, S. Arafat Zaman, and S. Ghosh, "Municipal solid waste fired combined cycle plant: Techno-economic performance optimization using response surface methodology," *Energy Convers. Manag.*, vol. 237, p. 114133, 2021.
- [9] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, "A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste," *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 26–44, 2015.
- [10] S. T. Coelho and R. Diaz-chavez, *Best Available Technologies ( BAT ) for WtE in Developing Countries*. Elsevier Inc., 2020.
- [11] A. Ohji and M. Haraguchi, *2. Steam turbine cycles and cycle design optimization: the Rankine cycle, thermal power cycles, and IGCC power plants*. Elsevier Ltd, 2017.
- [12] I. Dincer and M. E. Demir, *4 . 8 Steam and Organic Rankine Cycles*, vol. 4. 2018.
- [13] M. Montagnana, V. Leme, M. Henrique, E. Eduardo, S. Lora, O. José, and B. Marciano, "Resources , Conservation and Recycling Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste ( MSW ) in Brazil," *Resources, Conserv. Recycl.*, vol. 87, pp. 8–20, 2014.
- [14] E. T. de F. Ferreira and J. A. P. Balestieri, "Comparative analysis of waste-to-energy

- alternatives for a low-capacity power plant in Brazil,” *Waste Manag. Res.*, vol. 36, no. 3, pp. 247–258, Jan. 2018.
- [15] F. A. M. Lino and K. A. R. Ismail, “Incineration and recycling for MSW treatment: Case study of Campinas, Brazil,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 35, pp. 752–757, 2017.
- [16] F. C. Dalmo, N. M. Simão, H. Q. De Lima, A. Carolina, M. Jimenez, S. Nebra, G. Martins, R. Palacios-bereche, P. Henrique, and D. M. Sant, “Energy recovery Overview of Municipal Solid Waste in São Paulo State, Brazil,” *J. Clean. Prod.*, 2019.
- [17] L. Francisco, V. Francisco, L. Batistella, C. Albrecht, J. Constantino, M. Moreira, H. Jorge, and R. De F, “Evaluation of gaseous emissions from thermal conversion of a mixture of solid municipal waste and wood chips in a pilot-scale heat generator,” vol. 141, pp. 402–410, 2019.
- [18] L. Makarichi, W. Jutidamrongphan, and K. Techato, “The evolution of waste-to-energy incineration : A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 91, no. November 2017, pp. 812–821, 2018.
- [19] E. D. A. D. B. S. A. – E. EMAB, “INVITACIÓN PÚBLICA PARA LA SELECCIÓN DE LA NUEVA TECNOLOGÍA, SU IMPLEMENTACIÓN Y OPERACIÓN, PARA EL TRATAMIENTO ALTERNATIVO DE LA DISPOSICIÓN FINAL Y EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU) EN LA CIUDAD DE BUCARAMANGA, DEPARTAMENTO DE SAN,” p. 202, 2017.
- [20] M. Szanto and J. Rodriguez, “CONSORCIO BIO- INGE 2015 CONTRATO DE CONSULTORÍA ESPECIALIZADA No 193 DE 2015 FORMULACIÓN DE LA REGIONALIZACIÓN DE LA PRESTACIÓN DE SERVICIO PÚBLICO DE ASEO EN RECOLECCIÓN , TRANSPORTE , TRANSFERENCIA , APROVECHAMIENTO Y DISPOSICIÓN FINAL EN EL MARCO DE LA,” Bucaramanga, 2015.
- [21] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, and V. Lemort, “Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp,” 2014.
- [22] C. Europea, *MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES DE REFERENCIA EUROPEA PARA INCINERACIÓN DE RESIDUOS*. 2011.
- [23] L. Branchini, “Advanced Waste-To-Energy Cycles,” Alma Mater Studiorum – Università di Bologna Research, 2012.
- [24] O. Gohlke and J. Martin, “Drivers for innovation in waste-to-energy technology,” *Waste Manag. Res.*, vol. 25, no. 3, pp. 214–219, 2007.
- [25] M. Moran and H. Shapiro, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7th. ed.* New Jersey, 2011.
- [26] K. Nag, P. R. Deshmukh, and D. D. Programme, *Engineering Thermodynamics*. Tata McGraw - Hill Education Pvt. Ltd., New Delhi, 2008.
- [27] G. Barigozzi, A. Perdichizzi, and S. Ravelli, “Wet and dry cooling systems optimization applied to a modern waste-to-energy cogeneration heat and power plant,” *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1366–1376, 2011.
- [28] O. Badr, S. D. Probert, and P. O. Callaghan, “Rankine Cycles for Steam Power-plants f ( ),” vol. 36, pp. 191–231, 1990.
- [29] A. Bhering, J. Carlos, E. Palacio, A. Martínez, D. J. Rúa, E. E. Silva, M. Luiza, G. Renó, and O. Almazán, “Advanced exergy analysis and environmental assesment of the steam cycle of an incineration system of municipal solid waste with energy recovery,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 157, no. November 2017, pp. 195–214, 2018.
- [30] L. Lombardi, E. Carnevale, and A. Corti, “A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste,” *Waste Manag.*, vol. 37, pp. 26–44, 2015.
- [31] D. R. Schneider, “Cost Analysis of Waste-to-Energy Plant,” vol. 52, no. 3, pp. 369–378, 2010.
- [32] “Independent Statistics and Analysis EIA. Updated Capital Cost Estimates for Utility Scale Electricity Generating Plants. Washington: 2013.”
- [33] D. U.S. Department of Energy, “Waste-to-Energy from Municipal Solid Wastes,” 2019.
- [34] Congreso de Colombia, *LEY 1819 DE 2016, Impuesto sobre la Renta de Personas Naturales*. Colombia, 2016.
- [35] Fundación Carlos Slim, “Formulación y evaluación de proyectos, Cálculo de la TMAR, Disponible en <https://cdn3.capacitateparaeempleo.org/assets/4eqz4uo.pdf>,” 2018. .
- [36] E. XM, “Precio promedio y energía transada, Disponible en <http://www.xm.com.co/Paginas/Mercado-de-energia/precio-promedio-y-energia-transada.aspx>.”
- [37] E. D. A. D. B. S. A. – E. EMAB, “RESPUESTA CUESTIONARIO PROPOSICIÓN No. 3, EN FUNCIÓN DEL DEBATE DE CONTROL POLÍTICO CONCEJO MUNICIPAL DE BUCARAMANGA,” Bucaramanga, 2019.
- [38] E. De Oliveira and J. A. Barra, “Análisis y simulación económica en central de

- cogeneración a partir de biomasa de la industria de aceite de palma, MBA UNIFEI,”  
Universidade Federal de Itajubá, 2008.
- [39] N. Castillo, “Evaluación termodinámica y económica para la generación eléctrica por  
medio de la incineración de residuos sólidos urbanos.,” UDES, 2019.

# ESTIMACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR A PARTIR DE TEMPERATURAS

Jorge A. Adaro, María N. Ziletti, Héctor F. Romero, Alberto S. Esquenazi

Grupo de Energía Solar, Departamento de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Río Cuarto. Ruta 36 Km 36, Río Cuarto - Córdoba, Argentina  
Email: [aadaro@ing.unrc.edu.ar](mailto:aadaro@ing.unrc.edu.ar)

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es calcular la radiación solar con la temperatura del aire utilizando el modelo de Hargreaves-Samani. El modelo utiliza los valores máximos y mínimos de temperatura diarios estimando la radiación solar con una buena precisión mediante una constante de ajuste "a" denominada transmitancia atmosférica. La radiación solar en la tierra considerando un plano horizontal viene determinada por:  $H = aH_0 (T_{max} - T_{min})^{1/2}$ , donde:  $a$  es la constante que a sugerencia de los autores puede tomar un valor de 0.162 para regiones no costeras al mar,  $H$  es la Radiación solar diaria en Wh/m<sup>2</sup>;  $H_0$  es la Radiación solar extraterrestre diaria calculada en Wh/m<sup>2</sup>; y  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria respectivamente. Se aplicó el modelo a la Ciudad de Río Cuarto - Argentina, tomando valores de temperaturas máxima y mínima diarias datos obtenidos por la Red Estaciones Meteorológicas de Córdoba, mientras que los valores diarios de radiación se obtuvieron de datos publicados en la página de internet de la NASA. Como resultados de este trabajo se espera tener un método para lograr datos de radiación solar diaria para la provincia de Córdoba. La validez del método utilizado es verificada a través de la elevada correlación encontrada entre los datos estimados y los datos medios.

**Palabras clave:** energía solar, irradiación solar, temperatura, modelo de Hargreaves-Samani.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

El gran incremento de la demanda energética producido en las últimas décadas ha llevado a buscar alternativas en la producción de la energía y que sea amigable con el medio ambiente. La energía solar es una de las alternativas más atractivas ya que es muy abundante y su acceso es prácticamente gratuito, salvos los costos tecnológicos asociados. La ciudad de Río Cuarto y su región de influencia presenta un potencial solar muy alto para la utilización de equipamientos que funcionan a partir de la energía solar, pero no cuenta con suficientes datos de irradiación solar diaria. Para el dimensionamiento de sistemas generadores de energía solar fotovoltaica o térmica es necesario contar con datos diarios y hasta horarios de irradiación solar, como también para uso de aplicaciones solar térmicas y arquitectura solar.

En el presente artículo se estima la irradiación solar global diaria en la Ciudad de Río Cuarto. Para estimar la irradiación diaria hemos utilizado un método que puede ser fácilmente replicable en otras localidades. En la metodología propuesta se toman datos de temperaturas de Estaciones Meteorológicas del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba de Argentina [1], y se estima la irradiación diaria utilizando el modelo de Hargreaves y Samani [2], que utiliza la irradiación solar extraterrestre, la diferencia de temperaturas diaria para el lugar y una serie de constantes para obtener la irradiación solar diaria.

## 2. METODOLOGÍA

Por simplicidad e inmediatez se puede trabajar perfectamente con el modelo de Hargreaves y Samani [2], sin sacrificar precisión, por lo que en el presente trabajo se utiliza este modelo para estimar la irradiación global diaria en la ciudad de Río Cuarto. En este modelo la irradiación solar diaria se relaciona de manera lineal con la raíz cuadrada de la diferencia, entre la temperatura máxima ( $T_{max}$ ) y temperatura mínima ( $T_{min}$ ), modulada por la constante solar y un coeficiente "a".

El modelo utilizado se desarrolló combinando la ecuación original de Hargreaves para la estimación de la irradiación solar con la ecuación desarrollada junto con Samani. El modelo utiliza parámetros térmicos y la irradiación solar extraterrestre, que se estima a partir de la latitud. El método presenta la ventaja de que se puede aplicar con sólo datos de temperatura, pero es necesario resaltar que la ecuación supone que la diferencia de temperaturas máxima y mínima se relaciona con la irradiación solar, por este motivo el modelo está sujeto a errores ocasionados por factores meteorológicos como son el viento o la nubosidad al influir estos en el rango térmico diario, y en consecuencia se recomiendan la utilización del método en intervalos de tiempos largos.

Para obtener la irradiación solar extraterrestre es necesario conocer las relaciones astronómicas tierra-sol, los distintos términos y conceptos que definen la posición y el movimiento aparente del sol con respecto a la tierra en determinados momentos, y sirven para poder estimar la irradiación que llega a la tierra.

La declinación solar es el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre la normal a un plano horizontal en la superficie de la Tierra a medida que recorre su órbita. En el hemisferio sur el ángulo de declinación solar varía desde  $+23.45^\circ$  en el solsticio de invierno (21 o 22 de junio) hasta  $-23.45^\circ$  en el solsticio de verano (20 o 21 de diciembre) y se hace nulo en los equinoccios (22 de marzo y 22 de setiembre). La declinación se puede calcular mediante distintas ecuaciones existentes como la propuesta por Spencer [3]:

$$\delta(n) = 0.006918 - 0.0399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 58 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \quad (1)$$

donde  $\Gamma$  es el ángulo diario [rad] que viene determinado por:  $\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{365}$ , y  $n$  es el número de día en el año juliano.

Debido a que la fórmula de Spencer es fácil de utilizar en cálculos por computadora y posee un menor margen de error, calculamos la declinación mediante esta fórmula (1), dando el resultado en grados ( $^\circ$ ). La Figura 1 muestra los valores de declinación en grados para cada día del año en Río Cuarto.

El ángulo horario  $\omega$  indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora debido a la rotación de la tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, positivo en la mañana y negativo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y el de un observador ubicado en el hemisferio sur. Lo importante para este trabajo es el valor del ángulo horario a la salida o puesta del sol, el cual se calcula mediante la ecuación (2):

$$\cos(\omega_s) = -tg(\phi) * tg(\delta) \quad (2)$$

donde  $\phi$  es la Latitud del Lugar [ $^\circ$ ]



Figura 1: Valores de declinación terrestre diaria en [°]

La órbita terrestre no es circular, sino que es elíptica con el sol en un foco, la órbita posee una excentricidad y en consecuencia la distancia de la tierra al sol varía en el tiempo y la irradiación presenta una variación estacional de  $\pm 3\%$  debido a esta excentricidad. Para considerar este efecto se utiliza el coeficiente  $E_0$  denominado corrección por excentricidad de la órbita o corrección orbital, que Spencer [3], propone la siguiente expresión en función del ángulo día:

$$E_0 = 1,000110 + 0,034221 \cos(\Gamma) + 0,001280 \sin(\Gamma) + 0,000719 \cos(2\Gamma) + 0,000077 \sin(2\Gamma) \quad (3)$$

La constante solar representa el flujo de radiación proveniente del sol que cruza por unidad de área, medida en la parte superior de la atmósfera terrestre y en forma normal a los rayos del sol, considerando una distancia de la tierra al sol de 1 UA (unidad astronómica). El valor de la constante solar considerado en este trabajo es  $I_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$ .

La irradiación solar extraterrestre no tiene el mismo valor que el de la constante solar todos los días, el valor de la irradiación varía diariamente de acuerdo a las condiciones astronómicas y también que este último valor se calcula para un plano horizontal y no para uno normal. Por lo que se debe calcular la radiación solar extraterrestre diaria.

La irradiación solar extraterrestre es la energía por unidad de área sobre un plano horizontal ubicado fuera de la atmósfera. Para calcular la irradiación solar extraterrestre  $H_0$  en un día y latitud determinados, utilizamos la siguiente ecuación tomada de Cooper[4]:

$$H_0 = 24 I_{CS} E_0 (\cos\delta \cos\phi \sin\omega_s + \omega_s \sin\delta \sin\phi) \quad (4)$$

dónde:  $H_0$  es la Irradiación solar extraterrestre en un día [ $\text{kWh/m}^2/\text{día}$ ]. En la Figura 2 se muestran los valores de  $H_0$  para cada día del año.

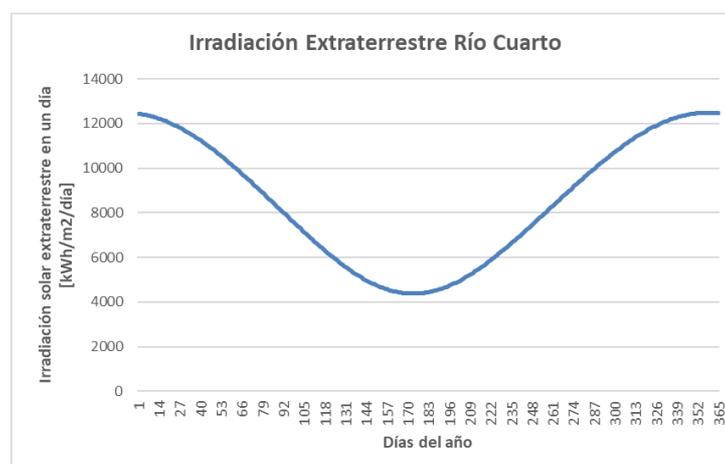


Figura 2: Radiación extraterrestre diaria [ $\text{Wh/m}^2$ ]

La localidad bajo estudio es Río Cuarto, una ciudad localizada en centro de Argentina, se ubica a  $33^\circ 19'$  de latitud sur y  $64^\circ 30'$  de longitud oeste. Presenta un clima desértico con una temperatura caliente-árida con una media anual de  $25^\circ\text{C}$ , posee una clasificación climática Cfa en la escala de

Köppen-Geiger [5], como se puede apreciar en la Figura 3. El potencial solar de esta ciudad y región es alto nivel, como se puede observar en el Atlas de Energía Solar de la República Argentina [6], pero no se dispone de datos diarios que permita diseñar las aplicaciones que utilizan la radiación solar.

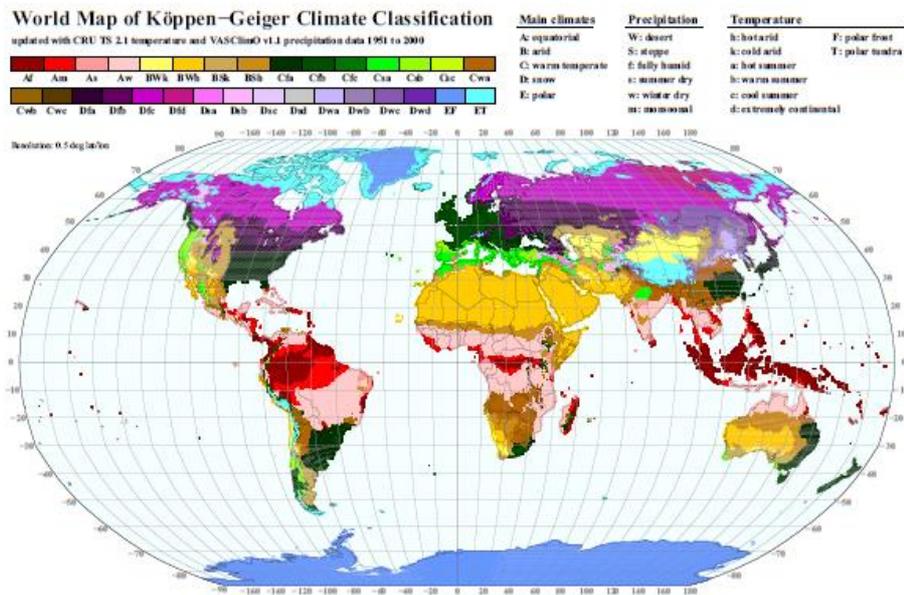


Figura 3: Mapa de Clasificación Climática Köppen-Geiger obtenido de [5]

El método desarrollado en este trabajo consiste en estimar la irradiación solar diaria a partir de datos de temperaturas diarias máxima y mínima. En este caso los datos de temperatura fueron obtenidos del sitio EM [1], el cual registran datos diarios de temperaturas en diversas ciudades de la provincia de Córdoba desde el año 2003, con un Tipo de Estación: OMXH - MAGYA RAD\_OMX. La Figura 4 muestra los datos de temperaturas máximas y mínimas diarias para Río Cuarto en el año 2017. Para determinar la constante de ajuste del método se adoptó la propuesta de Annadale [7], y se verifico la correlación utilizamos los datos de radiación global que se encuentran en el sitio web de la NASA [8].

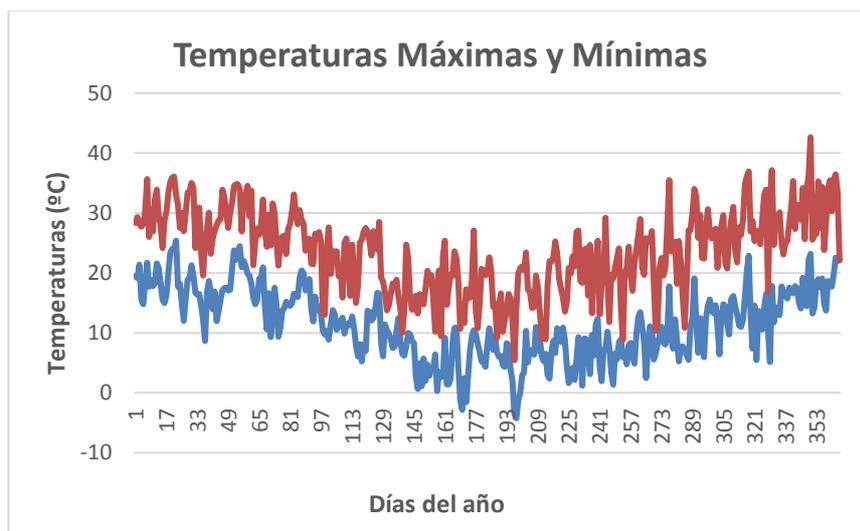


Figura 4: Valores de temperatura máxima y mínima del año 2017 de Río Cuarto

Para estimar esta radiación hemos utilizado el modelo de Hargreaves-Samani, el cual utiliza los valores máximos y mínimos de temperatura diarios y mediante una constante de ajuste “a” denominada transmitancia atmosférica, estima la radiación solar con una buena precisión. La radiación solar diaria en la tierra considerando un plano horizontal en Wh/m<sup>2</sup>, viene determinada por:

$$H = a H_0 \sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (5)$$

donde  $a$  es =constante de ajuste que representa la transmitancia atmosférica,  $H_0$  es Radiación solar extraterrestre diaria en  $Wh/m^2$  calculada por la ecuación (4).  $T_{max}$  es la temperatura máxima diaria  $^{\circ}C$  y  $T_{min}$  temperatura mínima diaria en  $^{\circ}C$ .

### 3. RESULTADOS

A partir de la irradiación solar extraterrestre, las relaciones astronómicas y los valores máximos y mínimos de temperaturas, vistos anteriormente se puede estimar la irradiación solar diaria sobre la tierra, la cual es diferente a la irradiación extraterrestre debido a la atmosfera y de los efectos climáticos.

Los valores de temperaturas diarios los hemos obtenido anteriormente, y la diferencia de temperaturas se puede obtener fácilmente a partir de estas. En la Figura 5 se muestran los valores diarios de diferencia de temperaturas entre  $T_{max}$  y  $T_{min}$ , en Río Cuarto para el año 2017, en el mismo se pueden observar las amplitudes térmicas diarias dando noción de proporcionalidad con los valores de radiación.

La constante de ajuste “ $a$ ” se obtiene basándonos en la propuesta de Annandale et al. (2002), que modificaron el modelo incluyendo una corrección por altitud, proponiendo un nuevo coeficiente:

$$a = (1 + 2,7 \times 10^{-5} z) a' \quad (6)$$

En esta ecuación “ $a$ ” es el coeficiente propuesto por Hargreaves [9] para zonas costeras y  $z$  la elevación sobre el nivel del mar (m).

Para Río Cuarto utilizando la ecuación (6), con una Altitud de 451,00 m da un valor de constante “ $a$ ” de 0.16194832.

El coeficiente obtenido, está entre los sugerido sugeridos en la bibliografía, que propone que sea igual al valor de 0.16 para localizaciones de interior y 0.19 para zonas costeras.

Con los datos obtenidos se procedió a calcular los valores de radiación a partir del modelo de Hargreaves-Samani, y su correlación con los datos de NASA.

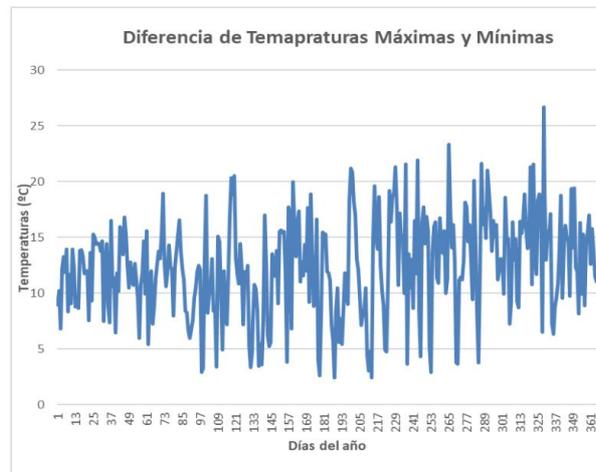


Figura 5: Diferencia entre las Temperaturas Máxima y Mínima [°]

El gráfico de dispersión obtenido a partir de la correlación de estos datos se muestra en la Figura 6. Se obtiene un coeficiente de correlación de 0.90 lo cual representa un valor muy aceptable. El coeficiente de correlación  $R^2$  toma un valor aproximado de 0.82 por lo que es comparable con los valores obtenidos por la mayoría de los autores en trabajos concernientes a la estimación de la irradiación solar. De este modo se valida el método utilizado en este trabajo y el modelo de Hargreaves-Samani en Río Cuarto. Los datos estadísticos de la correlación se muestran en la Tabla 1. La Figura 7 muestra una comparación entre los datos medidos y los estimados en el presente trabajo. Se aprecia como la línea roja que representa los valores medidos se asemeja a la línea azul que representa los valores estimados mediante el modelo.

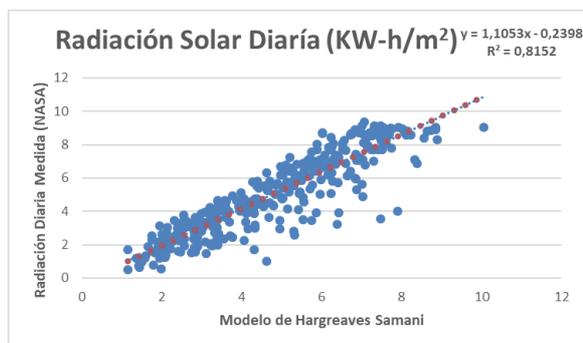


Figura 6: Correlación entre datos estimados por el modelo y medidos

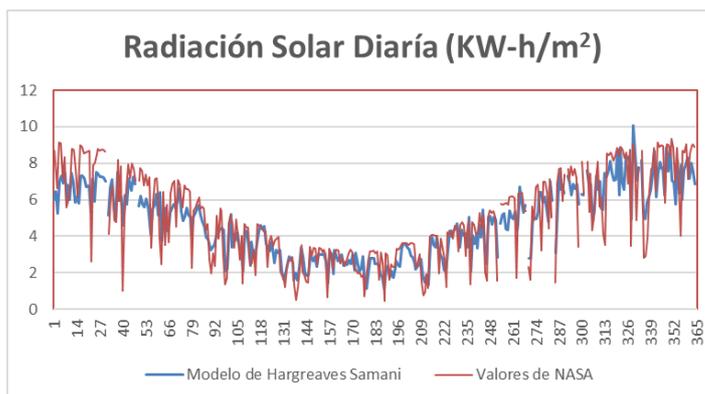


Figura 7: Comparación entre los valores estimados mediante el modelo HS [KWh/m²] y los obtenidos de NASA

Números de datos	365
Valores medios de los datos Medidos NASA	4.96 kW/m <sup>2</sup>
Valor medio de Hargreaves Samani	4.81 kW/m <sup>2</sup>
Coefficiente de correlación (de Pearson)	0.9028
Coefficiente de Determinación R <sup>2</sup>	0.8152

Tabla 1: Valores estadísticos de la correlación entre los datos medidos y el modelo de Hargreaves Samani.

#### 4. CONCLUSIONES

Este trabajo fue realizado con la finalidad de proporcionar un método fácil y confiable de estimar datos diarios de irradiación solar que sirvieran para facilitar y promover las aplicaciones en energía solar. Así también proporcionar un modelo factible para realizar la evaluación de la energía solar en la ciudad de Río Cuarto y en la Región Sur de Córdoba de una manera rápida y segura.

Para estimar la irradiación solar se utilizó el modelo de Hargreaves-Samani. El método utilizado tiene la ventaja de estimar la irradiación solar a partir los datos de temperaturas máximas y mínimas, los cuales son fáciles de obtener y se cuenta con estos en casi todo el país. Con estas consideraciones concluimos que:

- El modelo de Hargreaves-Samani es un método aplicable, confiable y válido para estimar la radiación solar en alguna localidad. Para Río Cuarto, se obtuvo un coeficiente de correlación de 0.8152 entre los datos estimados y los datos medidos, lo cual valida y da fiabilidad al uso de este modelo para estimar la radiación en esta localidad.
- Se obtuvo un valor para la transmitancia atmosférica "a" igual a 0.16194832, el cual coincide con el valor de 0.162 estimado para locaciones que no están en la costa.

La ciudad de Río Cuarto tiene una irradiación solar global de 4.96 kWh/m<sup>2</sup>/día en promedio anual, proporcionando una energía total anual de 2.10 MWh/m<sup>2</sup>, por lo que posee un potencial solar muy rentable de acuerdo con la clasificación de la Organización Latinoamericana de Energía OLADE, la cual menciona que radiación solar mayor a 4,0 kWh/m<sup>2</sup>/día son rentables y de 5,0 kWh/m<sup>2</sup>/día muy rentable. Los valores de irradiación más altos corresponden a los meses de diciembre y enero.

## 5. REFERENCIAS:

- [1] EM [en línea] Estaciones Meteorológicas del Ministerio de Agricultura y Ganadería de la Provincia de Córdoba de Argentina <<https://magya.omixom.com/>> [consulta febrero 2022].
- [2] Hargreaves G.; Samani Z. (1982). Estimating Potential Evapotranspiration, Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol. 108, n° 3, pp. 225-230.
- [3] Spencer, J. W. (1971). Fourier series representation of the position of the sun, Search, vol. 2, n° 5, p. 172.
- [4] Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. Solar Energy, vol. 12, pp. 333-346.
- [5] Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B. y Rubel F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated, Meteorologische Zeitschrift, vol. 15, n° 3, pp. 259-263.
- [6] Grossi Gallegos H.y Righini R. (2007). Atlas de Energía Solar de la República Argentina. ISBN: 978-987-9285-36-7.
- [7] Annandale, J.G., Jovanic, N.Z., Benade, N. y Allen, R.G. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. Irrigation Science 21: 57-67.
- [8] NASA [en línea] Prediction Of Worldwide Energy Resources <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>> [consulta febrero2022].
- [9] Hargreaves, G.H. (1994). Simplified coefficients for estimating monthly solar radiation in North America and Europe. Dept. Paper. Dept. Biol. And Irrig. Eng., Utah State Univ., Logan, Utah.

# EFECTO DE EXTRACTOS DE PLANTAS EN LA ESTRUCTURA DE POROS DE MORTEROS CEMENTICEOS

Delbianco, Natalia<sup>a,b</sup>; Peralta Ring, Rocío<sup>b</sup>; Priano, Carla<sup>b</sup>

a Becaria doctoral CONICET

b Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur  
natalia.delbianco@uns.edu.ar

## RESUMEN

Un factor importante para considerar en un medio poroso, como el hormigón, es el volumen de vacíos. Las propiedades de transferencia en estos materiales dependen tanto de la distribución de tamaño de poros como de su conectividad. La porosidad y la durabilidad tienen una relación directa debido a que existen ciertos agentes agresivos, como los cloruros y el dióxido de carbono, que ingresan a la estructura y causan una disminución en la vida útil. En el presente trabajo, se estudia el efecto de extractos acuosos de orégano y de yerba mate en la estructura de poros mediante el ensayo de porosimetría por intrusión de mercurio. Estos compuestos están siendo analizados para ser incorporados a la masa del hormigón armado como inhibidores de corrosión en el marco de una tesis doctoral. Luego de analizar los resultados, se pudo observar que el extracto obtenido a partir de orégano tiene una mejor performance que el extracto de yerba mate, ambos respecto a una muestra de referencia.

**Palabras Claves:** Hormigón, Corrosión, Inhibidores, Plantas, Porosidad.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales cuyo uso está muy difundido en la industria de la construcción, debido a su versatilidad, resistencia, bajo costo de fabricación y mantenimiento. Está constituido por una mezcla de cemento, arena, piedra, agua y, si se trata de hormigón armado, se incluyen barras de acero que quedan embebidas en el hormigón. Las estructuras de hormigón armado pueden deteriorarse por la presencia de agentes agresivos en el ambiente en el que se encuentran emplazadas.

La corrosión de las armaduras es una de las patologías más habituales de deterioro en el hormigón armado. Este proceso es electroquímico y genera una alteración de las propiedades del metal tanto físicas como químicas debido a su interacción con el medio que lo rodea, que pueden ser cloruros (corrosión por cloruros) o dióxido de carbono (corrosión por carbonatación), que penetran en la estructura por los poros de la matriz cementícea.

Las barras de acero embebidas en el hormigón se encuentran protegidas de la corrosión por dos efectos: la elevada alcalinidad y la barrera física del recubrimiento de hormigón. Sin embargo, existen diversos factores capaces de generar su despasivación y destruir la película protectora. A nivel mundial, un alto porcentaje de las estructuras de hormigón armado necesitan alguna reparación, lo cual implica un considerable costo económico [1]. La corrosión se manifiesta en la reducción de la sección transversal del acero y en el desprendimiento del recubrimiento del hormigón por la acción expansiva de los óxidos. Debido a ello, se pierde la adherencia entre el hormigón y el acero además de disminuir la resistencia de este último, por lo que, su vida útil se ve afectada.

Debido a los problemas mencionados anteriormente, el estudio de sistemas o sustancias capaces de retardar o impedir la corrosión del acero son de gran importancia, ya que los costos de reparación superan notablemente a los sistemas de prevención y las pérdidas económicas derivadas de las estructuras dañadas por corrosión han superado cifras alarmantes [2]. El uso de inhibidores de corrosión dentro del hormigón es una alternativa viable para controlar el fenómeno de la corrosión mediante la reducción de su velocidad a valores tolerables [3]. Desde los años '70 se han usado compuestos inorgánicos, entre los que se destaca el nitrito de calcio que, en presencia de cloruros, retrasa la iniciación de la corrosión. Sin embargo, se ha demostrado que la mayoría de los inhibidores sintéticos son tóxicos para el ser humano y el ambiente [4]. Con el objeto de buscar soluciones más sustentables, se han comenzado a estudiar compuestos orgánicos naturales para inhibir la corrosión del acero.

Los extractos derivados de vegetales son una alternativa interesante, dado que son un recurso económico renovable y más seguro para el ambiente [5, 6]. Los extractos de banana [7], café [8] y pimienta negra [9], entre otros, fueron ensayados en medios ácidos como inhibidores solubles de la corrosión del acero. Se ha demostrado que la aloína, compuesto predominante de la planta de Aloe vera, actúa como un buen inhibidor de la corrosión en materiales metálicos [10] y que el gel natural extraído de las hojas del Aloe vera resulta efectivo para inhibir la corrosión del acero [11]. Un caso particular de protección lo constituye la yerba mate (*Ilex paraguariensis*), de la cual se han reportado gran cantidad de compuestos antioxidantes presentes en el extracto acuoso [12], que pueden actuar como inhibidores orgánicos de la corrosión [4]. Se ha estudiado el extracto acuoso de la yerba mate como inhibidor de la corrosión del aluminio y del cobre inmerso en solución de cloruro de sodio [13] y del acero SAE 1010 [14]. Se demostró que los extractos pueden ser incorporados como aditivos en pinturas anticorrosivas, debido a que reducen la velocidad de corrosión del acero, generando películas protectoras sobre su superficie. Por otra parte, ha sido informado que los extractos acuosos de orégano presentan una importante actividad antioxidante in vitro [15] y que también pueden ser utilizados como inhibidores en los procesos de corrosión del acero de bajo contenido de carbono [16]. Sin embargo, al incorporar extractos vegetales con el objetivo de controlar la corrosión de armaduras, se podría estar modificando otras propiedades de la matriz cementícea como, por ejemplo, los tiempos de fragüe, resistencias mecánicas y, en particular, la estructura de poros.

En estudios previos de los autores se utilizaron extractos acuosos de yerba mate y orégano para analizar sus propiedades como inhibidores de la corrosión [17]. Allí se registraron algunos problemas en el uso de los extractos en forma líquida relacionados con el desarrollo de colonias fúngicas a lo largo del tiempo que pueden causar variaciones en la composición. Como solución a este inconveniente surgió la liofilización de los extractos (o deshidratación por congelación) como método de conservación del compuesto.

Un factor importante para considerar en un medio poroso, como el hormigón, es el volumen de vacíos. Las propiedades de transferencia de líquidos y/o gases en estos materiales dependen tanto de la distribución de tamaño de poros como de su conectividad. La porosidad de una matriz cementícea es una propiedad muy significativa para evaluar la durabilidad de las estructuras de hormigón armado. Una menor porosidad significaría una disminución en la probabilidad de entrada de los agentes agresivos, como pueden ser los cloruros para generar un proceso de corrosión en las barras de acero de refuerzo del hormigón [18].

El presente trabajo está orientado a estudiar el efecto de incorporar extracto acuoso preparado a partir de yerba mate y orégano sobre la estructura de poros de morteros cementíceos. Este estudio resulta complementario al análisis de su efecto en la corrosión, debido a que está directamente relacionado con la durabilidad de las estructuras de hormigón.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Extractos acuosos de yerba mate y orégano

Se prepararon extractos acuosos de orégano (*Origanum vulgare*) y yerba mate (*Ilex paraguariensis*), ambos de origen comercial. La extracción se realizó a partir de mezclas de material vegetal seco y agua, las cuales fueron colocadas durante 2 horas a 40°C, en baño ultrasónico para aumentar la eficiencia de extracción. Luego, el sobrenadante que contiene los compuestos antioxidantes fue separado del residuo sólido por filtración y posteriormente centrifugado. En esta etapa se obtiene el extracto en forma líquida (Figura 1).



Figura 1 Extracto acuoso de orégano (izquierda) y yerba mate (derecha)

Para liofilizar los extractos, las muestras centrifugadas fueron colocadas primero en bandejas de aluminio con la tapa perforada y freezadas a -35°C a presión atmosférica. Luego, fueron liofilizadas en vacío, a -40 °C y con una presión de 0,040 mmHg por 4 días, con un equipo Rificor, modelo L-A-B4 (Figura 2). Finalmente, los extractos liofilizados (Figura 3A) fueron molidos (Figura 3B) y almacenados en un desecador al vacío en un ambiente oscuro.



Figura 2 Liofilizador

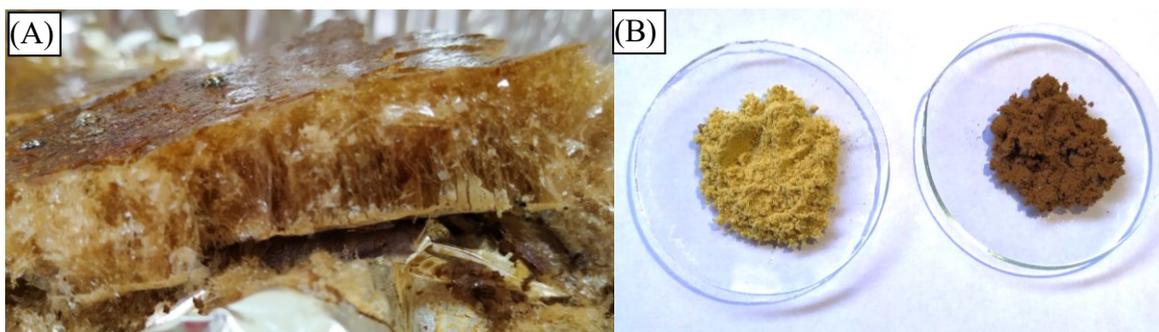


Figura 3 (A) Extracto liofilizado (B) Extracto liofilizado molido de yerba mate (izquierda) y orégano (derecha)

## 2.2 Elaboración de morteros

Se realizaron tres tipos de morteros: referencia o sin extracto, con el agregado del extracto acuoso de orégano y con el agregado de extracto acuoso de yerba mate.

En la Tabla 1 se detalla la dosificación para 1 litro de cada una de las mezclas. Se utilizó un cemento portland CPN40, proveniente de la provincia de Buenos Aires, agua desmineralizada, una arena cuarcítica de módulo de finura Mf 2,67 y los extractos liofilizados, tanto de orégano como de yerba mate.

Un parámetro fundamental que condiciona la estructura de poros es la relación entre el contenido en peso de agua y cemento (a/c). Es por ello que, para obtener una adecuada durabilidad frente a determinada condición de exposición, todos los reglamentos fijan valores límites de este parámetro. Se utilizó una relación a/c=0,45 según lo requerido por el reglamento CIRSOC 201-2005 [19] para estructuras emplazadas en ambientes marinos tipo M1 y M2 (Tabla 2 y 3).

Tabla 1 Dosificación de mezclas

Materiales	Referencia	Orégano	Yerba mate
Cemento		547 g	
Agua		246 g	
Arena rubia		1520 g	
Extracto liofilizado	0 g	0,7 g	0,7 g

Tabla 2 Clases de exposición generales que causan corrosión de armaduras (Tabla 2.1, CIRSOC) [19]

1	2	3	4	5	6
EXPOSICIÓN					
Desig.	Clase	Subclase	Tipo de proceso	Descripción del medio ambiente	Ejemplos ilustrativos de estructuras donde se pueden dar las clases de exposición
<b>C L</b>	Húmedo o sumergido, con cloruros de origen diferente del medio marino		Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Superficies de hormigón expuestas al rociado o la fluctuación del nivel de agua con cloruros</li> <li>Hormigón expuesto a aguas naturales contaminadas por desagües industriales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Piletas de natación sin revestir.</li> <li>Fundaciones en contacto con aguas subterráneas</li> <li>Cisternas en plantas potabilizadoras</li> <li>Elementos de puentes</li> </ul>
<b>M 1</b>	Marino	Al aire	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>A más de 1 km. de la línea de marea alta y contacto eventual con aire saturado de sales.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Construcciones alejadas de la costa pero en la zona de influencia de los vientos cargados de sales marinas (*).</li> </ul>
<b>M 2</b>		Al aire	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>A menos de 1 km. de la línea de marea alta y contacto permanente o frecuente con aire saturado con sales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Construcciones próximas a la costa.</li> </ul>
<b>M 3</b>		Sumergidos	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sumergidos en agua de mar, por debajo del nivel mínimo de mareas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructuras de defensas costeras</li> <li>Fundaciones y elementos sumergidos de puentes y edificios en el mar</li> </ul>
		Sumergidos	Corrosión por cloruros	<ul style="list-style-type: none"> <li>En la zona de fluctuación de mareas o expuesto a salpicaduras del mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructuras de defensas costeras, fundaciones y elementos de puentes y edificios</li> </ul>

(\*) La distancia máxima depende de la dirección de los vientos predominantes. Cuando ellos provengan del mar, como ocurre en la mayor parte del litoral de la Provincia de Buenos Aires, esta zona está entre 1 km y 10 km. En la mayor parte de la Patagonia esta zona es inexistente. El Director del Proyecto deberá acotar los límites de aplicación de esta zona de agresividad.

Tabla 3 Requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones según la exposición (Tabla 2.5, CIRSOC) [19]

Requisitos	Tipos de exposición de las estructuras, de acuerdo con la clasificación de las Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4.									
	A 1	A 2	A 3 y M 1	C L y M 2	M 3	C 1 <sup>(2)</sup>	C 2 <sup>(2)</sup>	Q 1	Q 2	Q 3 <sup>(3)</sup>
a) Razón a/c máxima <sup>(1)</sup>										
Hormigón simple	---	---	---	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40

Se moldearon probetas cúbicas de 7 cm de lado con una barra de acero de refuerzo (Figura 4) y se las sometió a un proceso de curado de 28 días para realizar un ensayo de corrosión. Para acelerar dicho proceso, se redujo el espesor de recubrimiento de las armaduras cortando una rodaja, la cual se utilizó para el ensayo de porosimetría.



Figura 4 Muestra para el ensayo

### 2.3 Porosimetría por intrusión de mercurio

Se utilizó un porosímetro Micromeritics auto pore IV. Este modelo alcanza una presión de 228 MPa y permite medir diámetros de poro de 0,003 a 360  $\mu\text{m}$ . Para realizarlo se toma una muestra de aproximadamente 1  $\text{cm}^3$ . Se produce un secado de la muestra y luego, se aplican diferentes presiones.

Este ensayo permite estimar la distribución del tamaño de poros midiendo el volumen inyectado en el material con presiones crecientes y así, analizar la estructura de poros de forma comparativa.

La ley de Laplace permite calcular el diámetro  $d$  de los poros (estimados como cilindros) que se llenan a una determinada presión  $P$  (Ecuación 1).

$$d = 4\sigma \cdot \cos\Phi / P \quad (1)$$

Dónde  $\sigma$  es la tensión superficial del mercurio,  $\Phi$  es el ángulo de contacto y  $P$  es la presión aplicada [18].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 5 se observa la distribución de tamaños de poros de las muestras, mediante la relación entre el volumen y el diámetro. Se analiza la estructura de poros de la muestra referencia y cómo afecta a este parámetro, la adición de los extractos acuosos. En el caso del orégano, no se detecta una diferencia apreciable excepto por una mayor cantidad de poros de volumen entre 0,03 y 0,1  $\mu\text{m}$ . Sin embargo, al adicionar yerba mate sí se detecta un alto contraste, ya que aumenta en gran medida la cantidad de poros entre 0,2 y 4  $\mu\text{m}$ , replicándose luego ligeramente entre 10 y 20  $\mu\text{m}$ .

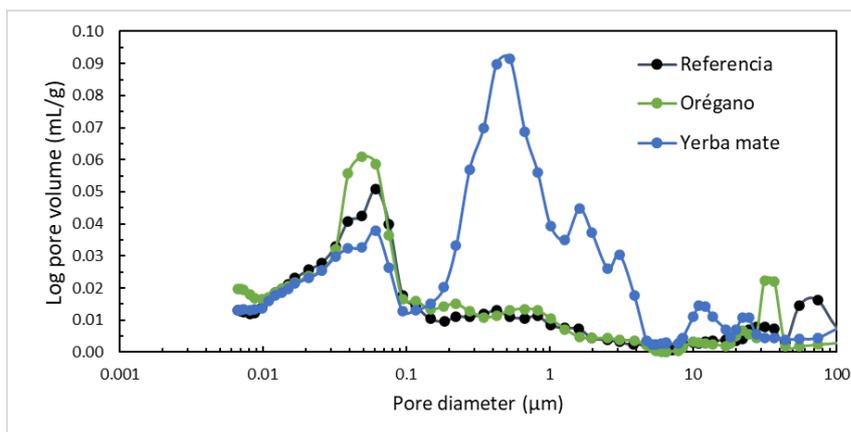


Figura 5 Distribución de tamaños de poros

Por otra parte, si se analiza el volumen de poros acumulado también se destaca el extracto de yerba mate que aumenta en gran medida dicho parámetro. En cambio, el extracto de orégano no muestra diferencias significativas con la muestra referencia (Figura 6).

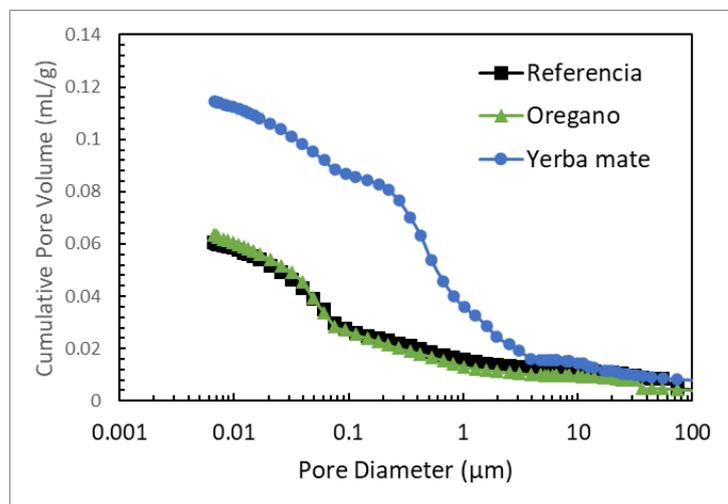


Figura 6 *Tamaños de poros acumulados*

Por último, en la Tabla 4 se exponen los parámetros evaluados en el ensayo para las diferentes muestras.

Tabla 4 *Comparación de parámetros de la estructura de poros*

Parámetro	Referencia	Orégano	Yerba mate
Porosidad (%)	12,61	13,34	21,29
Diámetro medio de poro (μm)	0,072	0,066	0,486
Volumen de intrusión total (ml/g)	0,0604	0,0636	0,1144
Área total de poros (m <sup>2</sup> /g)	5,367	6,093	5,306
Densidad aparente (g/ml)	2,387	2,418	2,364
Permeabilidad (mDarcy)	393,69	76,15	1836,89
Tortuosidad	3,8941	8,8393	1,9353

En primer lugar, se observa el valor de porosidad, que es la relación del volumen de vacíos respecto al volumen total. Se destaca la similitud entre la muestra referencia y la que tiene adicionado extracto de orégano. Estos valores están en el mismo orden que los presentados por Bonilla Mielles para morteros con la misma relación a/c, donde aplica inhibidores comerciales superficiales [20]. En concordancia con la discusión de la figura anterior, la porosidad que genera el extracto de yerba mate es la mayor.

Por otro lado, los morteros con yerba mate tienen un diámetro medio de poro mayor a las muestras con orégano o referencia. Una tendencia similar se detecta en el análisis del volumen de intrusión total de mercurio y en la permeabilidad. En esta última, es notoria la diferencia entre la muestra referencia y la que contiene orégano, ya que la primera es 5 veces mayor que la segunda. La tortuosidad de la estructura de poros otorga una noción de la conectividad entre poros. Un aumento en este parámetro significa una mejora a nivel de durabilidad de la estructura. En las muestras analizadas, se detecta un marcado aumento en este parámetro en las que tienen incorporado el extracto de orégano con respecto a la de referencia y, a la inversa, un marcado descenso de las muestras con yerba mate respecto a la misma referencia.

Es interesante destacar que, en un trabajo previo de los autores [21], se pudo comprobar el efecto anticorrosivo de ambos extractos sobre barras de acero de refuerzo en solución simulada de poros.

### 3. CONCLUSIONES.

El ensayo de porosimetría permitió evaluar parámetros significativos de la estructura de poros de morteros cementíceos y tener más información en cuanto al efecto que tienen los extractos acuosos de yerba mate y orégano, que están en proceso de estudio para aplicarlos como inhibidores de corrosión.

Luego del análisis de los resultados, se concluye que el extracto de orégano tiene una mejor performance frente al de yerba mate, lo que indicaría una menor probabilidad de entrada de agentes agresivos en el hormigón y una mejora a nivel de durabilidad de la estructura.

Este resultado permite avanzar con la línea de investigación mediante ensayos de corrosión en barras embebidas en morteros y hormigón para analizar la respuesta de los extractos dentro de matrices cementíceas.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] Revie R.W., Uhlig H.H. (2008) *Corrosion and corrosion control*. Edición N°4, John Wiley & Sons.
- [2] Castañeda-Valdéz A. y Rodríguez-Rodríguez, M. (2014). "Las pérdidas económicas causadas por el fenómeno de la corrosión atmosférica del acero de refuerzo embebido en el hormigón armado". *Revista CENIC, Ciencias Químicas*, 45, 52-59. Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/1816/181632610001.pdf>
- [3] Abdulrahman A. S., Mohammad I., Mohammad S. H. (2011). "Corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete: A review". *Scientific Research and Essays*, 6(20), 4152-4162.
- [4] Satapathy A.K., Gunasekaran G., Sahoo S.C., Rodríguez P.V. (2009). "Corrosion inhibition by Justicia gendarussa plant extract in hydrochloric acid solution". *Corrosion Science*, 51 (12), 2848-2856.
- [5] Kesavan D., Gopiraman M., Sulochana N. (2012). "Green inhibitors for corrosion of metals: A review". *Chemical Science Review and Letters*, 1 (1), 1-8.
- [6] Abdullah Dar, M. (2011). "A review: plant extracts and oils as corrosion inhibitors in aggressive media". *Industrial Lubrication and Tribology*, 63 (4), 227-233.
- [7] Ji G., Anjum S., Sundaram S., Prakash R. (2015). "Musa paradisica peel extract as green corrosion inhibitor for mild steel in HCl solution". *Corrosion Science*, 90, 107-117.
- [8] Vasconcelos Torres V., Salgado Amado R., Faia de Sá C., Lopez Fernandez T., da Silva Riehl C., Guedes Torres A. (2011). "Inhibitory action of aqueous coffee ground extracts on the corrosion of carbon steel in HCl solution". *Corrosion Science*, 53, 2385-2392.
- [9] Raja P., Sethuraman M. (2008). "Inhibitive effect of black pepper extract on the sulphuric acid corrosion of mild steel". *Materials Letters*, 62, 2977-2979.
- [10] Prato M., Ávila R., Donquis C., Medina E., Reyes R. (2008). "Antraquinonas en Aloe Vera Barbadosensis de zona semiáridas de Falcón, Venezuela, como inhibidores de la corrosión". *Multiciencias*, 8 (2), 148-154.
- [11] Herrera Hernández H., Franco Tronco M., Miranda Hernández J., Hernández Sánchez E., Espinoza Vázquez A., Fajardo G. (2015). "Gel de Aloe Vera como potencial inhibidor de la corrosión del acero de refuerzo estructural". *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6 (3), 9-23.
- [12] Bracesco N., Sanchez A., Contreras V., Menini T., Gugliucci A. (2011). "Recent advances on Ilex paraguariensis research: Minireview". *Journal of Ethnopharmacology*, 136 (3), 378-384.
- [13] Derna A., Méndez C., Gassa L., Ares A. (2017). "Green extract of mate tea as corrosion inhibitor of copper and aluminum". *Proceedings of the 3rd Pan American Materials Congress. The Minerals, Metals & Materials Series*, 135-144.
- [14] Roselli, S., Bogdan, S., Deyá, C., Romagnoli, R. (2016). "Inhibidor anticorrosivo eco-amigable para recubrimientos acuosos protectoras del acero: *Ylex paraguariensis* (yerba mate)". *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 7 (3), 65-72.
- [15] Pérez M., Banek S., Croci C. (2011). "Retention of antioxidant activity in gamma irradiated argentinian sage and oregano". *Food Chemistry*, 126, 121-126.
- [16] Challouf H., Souissi N., Messaouda M., Abidi R., Madani A. (2016). "Origanum majorana Extracts as Mild Steel Corrosion Green Inhibitors in Aqueous Chloride Medium". *Journal of Environmental Protection*, 7, 532-544.
- [17] Delbianco N., Priano C., Pérez M., Señas L. y Ortega N. (2018). "Estudio de morteros cementíceos con inhibidores orgánicos de corrosión". VIII Congreso Internacional - 22a Reunión técnica de la AATH, Olavarría, Argentina.
- [18] Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. (2001). "Durabilidad del Hormigón Estructural", Autoeditor, Argentina.
- [19] CIRSOC. (2005) "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón". Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina.
- [20] Bonilla Mielles, A.F. (2017). "Eficacia de los inhibidores de corrosión en la reparación estructural". Trabajo final de "Máster universitario en ingeniería de las estructuras, cimentaciones y materiales", Universidad Politécnica de Madrid.
- [21] Delbianco N., Alonso M.C., Irassar E.F., Peralta Ring R. y Priano C. (2022). "Análisis electroquímico del efecto de extractos acuosos de plantas como inhibidores de corrosión del acero en solución simulada de poros", X Congreso Internacional y 24° Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón.

### Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja por permitir realizar la pasantía, en el marco de la cual se realizaron los ensayos presentados. Además, se agradece al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

# GEOTERMIA DE BAJA ENTALPÍA APLICADA A UNA VIVIENDA UNIFAMILIAR SUSTENTABLE EN BRANDSEN. DIMENSIONAMIENTO DE INTERCAMBIADOR DE CALOR TIERRA-AIRE (POZO CANADIENSE O PROVENZAL)

Birche, María Belén (Autor 1)<sup>a</sup> Czajkowski, Jorge Daniel (Autor 2)<sup>b</sup> Ferrer Tevar, José Antonio (Autor 3)<sup>c</sup>

a Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable FAU-UNLP / CIC

b Laboratorio de Arquitectura y Hábitat Sustentable FAU-UNLP / CIC / CONICET

c Unidad de Investigación sobre Eficiencia Energética en Edificación CIEMAT  
mariabelenbirche@gmail.com

## RESUMEN.

El objetivo de este trabajo es poner de manifiesto un caso de aplicación de un sistema de aprovechamiento de energía geotérmica de baja entalpía. Para ello se dimensiona un intercambiador de calor tierra-aire comúnmente conocido como Pozo Canadiense o Provenzal en una vivienda unifamiliar en la Provincia de Buenos Aires. A partir de la revisión bibliográfica se utiliza una metodología, la cual se ajusta a las características locales del suelo, clima y requerimientos normativos. Los resultados obtenidos demuestran que el sistema permite alcanzar el confort térmico durante el verano a una temperatura de 24°C, mientras que en el periodo invernal no se logra alcanzar los 20°C requeridos por las condiciones de confort térmico. A pesar de ello, se logra elevar la temperatura hasta los 15°C, reduciendo la demanda de energía en calefacción.

**Palabras Claves:** Geotermia de baja entalpía, Pozo canadiense, Intercambiador de calor tierra-aire, Acondicionamiento térmico.

**Área Temática:** Energías sustentables.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

Nuestro país puede recorrerse de norte a sur y de este a oeste y es mayoritaria la forma común de materializar edificios para cualquier función. A medida que avanzó la industria del vidrio y de los metales no ferrosos fue creciendo su uso que junto al hormigón armado y al ladrillo hueco cocido prácticamente monopolizan las edificaciones. Pero no se ha considerado la variable climática, la adaptación al sitio o el uso de pautas bioclimáticas. Esto debido a que se propone un modo casi homogéneo de construcción con un uso variable de energía en climatización sustentado en subsidios crecientes. Esto lleva a que no se han incorporado en los edificios técnicas adecuadas de mitigación del cambio climático, sea por "contenido energético" del edificio al momento de su habilitación y durante su "vida útil".

Las normativas existentes, en particular las Normas IRAM, si bien han sido actualizadas, no son de aplicación obligatoria en la mayor parte del país y las prácticas parecieran apuntadas a resolver sólo la reducción del costo inicial del edificio. Queda para los usuarios sean públicos o privados resolver las deficiencias, las patologías debidas al tipo de ocupación, la reposición y mantenimiento, y los altos costos operativos con sus recursos. En síntesis: costo inicial lo más bajo posible y no consideración del costo total en el ciclo de vida del edificio, que en algunos casos triplica el costo inicial.

El cuadro antes descrito señala una alta ineficiencia energética de los edificios que implica una excesiva demanda energética por m<sup>2</sup> habitable o km<sup>2</sup> urbanizado.

Se destaca que, de acuerdo al Balance Energético Nacional del año 2021 [1] y los datos del mismo año del informe anual de la Compañía Administradora del Mercado Eléctrico Mayorista [2]:

- El 88% de la energía total (primaria + secundaria) de la matriz nacional en el año 2021 proviene de fuentes fósiles tales como: gas natural, petróleo, carbón y sus derivados. El 4% se obtiene a partir de represas hidroeléctricas de alto impacto, el 1% a partir de centrales nucleares y solo el 7% corresponde con fuentes renovables. Se llama fuentes renovables al conjunto compuesto por energía eólica, solar, biomasa, biogás e hidro-renovable (de bajo impacto).
- Si observamos únicamente la generación de energía eléctrica por fuente, el porcentaje que se obtiene a partir de recursos fósiles es menor y corresponde al 64%, la energía hidráulica a un 17%, el porcentaje de energía nuclear es del 7% y las renovables representan un 12% del total.
- El 34% de la energía total nacional es consumida por el sector residencial, comercial y público.

Como se vio anteriormente, la matriz de generación eléctrica argentina se basa principalmente en energías generadas mediante combustibles fósiles. Es conocido que el precio de dichos combustibles se encuentra en aumento, como puede observarse en los datos históricos de [3]. En los últimos años se ha observado un importante incremento en los precios internacionales de las materias primas, tanto de alimentos y minerales, como del petróleo. En el caso del crudo, los precios reales de comienzos de 2011 fueron tres veces más elevados que el promedio de los años noventa, superando además los niveles récord de las cuatro décadas anteriores, con excepción de 2008. Los cambios que tuvieron lugar en los balances de oferta-demanda habrían sido una de las principales causas de las fluctuaciones de precios ocurridas en este último periodo. [4] Además se vuelve cada vez más urgente la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero para asegurar que la temperatura media mundial se mantenga por debajo de 2 °C sobre los niveles preindustriales y limitar ese aumento a 1,5 °C, lo que reduciría considerablemente los riesgos y el impacto del cambio climático. Al ratificar la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), nuestro país asumió una serie de obligaciones, entre las que figuran reportar sus inventarios nacionales de Gases de Efecto Invernadero "GEI" y establecer programas nacionales que contengan medidas para mitigar y facilitar la adecuada adaptación al cambio climático [5].

La energía geotérmica de muy baja temperatura basa sus aplicaciones en la capacidad que el subsuelo posee de acumular calor, y de mantener una temperatura sensiblemente constante a determinada profundidad, a lo largo de todo el año. Por otra parte, las necesidades energéticas más comunes de los seres humanos, en los hogares, se centran en la calefacción y el agua caliente sanitaria (52% y 18% respectivamente, del gasto energético doméstico) [6] por lo que utilizando este recurso para satisfacer las mencionadas necesidades, se puede reducir hasta un 70% el gasto energético de las viviendas de cualquier sitio de nuestro país y del planeta entero, ya que en toda la corteza terrestre puede encontrarse energía geotérmica de muy baja temperatura. Aprovechando esa temperatura prácticamente estable del subsuelo hacer circular el aire por un pozo canadiense mejorará sensiblemente esa temperatura y, aunque no consiga la temperatura adecuada de refrigeración (o calefacción), como si puede conseguirse con otros sistemas de

captación de energía geotérmica de baja entalpía, siempre mejorará el rendimiento al partir de una temperatura más próxima a la de demanda [6].

## 2. DESCRIPCIÓN DEL CASO EN ESTUDIO

### 2.1. La vivienda

La vivienda en estudio se encuentra en la provincia de Buenos Aires, partido de Brandsen, en el barrio El Mirador, actualmente se encuentra en construcción. El proyecto cuenta con un subsuelo, planta baja y primer piso. Tiene un total cubierto útil sin galerías de 257,12 m<sup>2</sup>. En la planta del subsuelo se previó una instalación de acondicionamiento térmico por geotermia de baja entalpía conocida comúnmente como “Pozo canadiense”.

A fin de garantizar el funcionamiento bioclimático la vivienda poseerá suficiente inercia térmica interior que se materializará con tapias de tierra cruda estabilizada, obtenida de la excavación de fundaciones y sótano. La envolvente (muros, techos, pisos y aberturas) tendrán una transmitancia térmica ponderada de 0.60 W/m<sup>2</sup>K que cumple sobradamente lo exigido por la ley 13059/03 y su decreto reglamentario 1030/10. En lo estructural la vivienda tendrá un sistema convencional de H°A° en cimientos, tabiques estructurales, columnas y vigas, sumado a las losas pretensadas. Se eliminarán puentes térmicos con un aislamiento continuo de 5cm de EPS 30kg/m<sup>3</sup> o 4 cm de PUR 30Kg/m<sup>3</sup> en muros, 10 cm de lana de vidrio de 12 kg/m<sup>3</sup> en cielorrasos suspendidos, aberturas de PVC con DVH LowE de 1.86 W/m<sup>2</sup>K.

La planta baja posee cubiertas de losas premoldeadas tipo SHAP que se cubrirán con un techo verde de bajo mantenimiento. La envolvente vertical serán dobles muros con tapia o bloques de BTC al interior, un alma de aislamiento térmico de alta densidad (EPS o PUR) y el exterior con ladrillos de BTC vistos, protegidos inicialmente por un tratamiento alquídico “tipo Bricol”. Para la planta alta, los muros y aberturas son iguales a la planta baja pero el techo es liviano. Conformado por chapa trapezoidal de color negro engrampada en una estructura de perfiles de chapa doblada galvanizada con una capa de PUR de 3cm en el interior. Luego un ático ventilado con un cielorraso suspendido de placas de yeso y 10 cm de lana de vidrio con foil de aluminio.

Respecto al aprovechamiento de la energía, la planta baja cuenta con un invernadero adosado con un grueso muro de carga de 40 cm de espesor que actúa como sistema solar pasivo. Sobre el invernadero se ubica parte de un generador fotovoltaico (6 paneles de 400 W) y 18 paneles en la planta superior sobre el techo (aprox. 10 kW) de potencia para lograr la autosuficiencia eléctrica. Toda esta planta funcionará con la estrategia de ventilación selectiva y de geotermia de baja entalpía. Cuenta además con un piso radiante eléctrico energizado por el generador solar en combinación de una estufa de masa tipo BBR en el estar y una cocina económica en el cuarto de cocina-comedor, ambas a leña. El sistema pasivo de climatización se activa con el calor generado en el interior de la vivienda sumado al del invernadero adosado que comienzan a aspirar por chimeneas solares el aire viciado. La planta alta cuenta con un muro Trombe-Michel orientado al norte y ventilación cruzada en verano más inercia térmica.

Toda la iluminación será tipo LED energizada por el generador solar. El agua de cubiertas metálicas se recogerá y enviará a una cisterna enterrada en la arista noreste para riego. El de cubiertas verdes se enviará a un estanque ubicado al norte. Las aguas jabonosas se separarán y tratarán en una cámara de lecho de raíces previo envío al estanque. Las aguas negras se tratarán con una cámara séptica más un biodigestor “tipo Rotoplas”, previo envío a un lecho nitrificante bajo la huerta, al sur. La meta es obtener de mínima una vivienda energía cero (< 15 kWh/m<sup>2</sup>.año), que pueda evolucionar a energía plus conectada a red y de bajas emisiones de CO<sub>2</sub>eq en su ciclo de vida.

### 2.2. El clima

El clima del sitio fue analizado mediante el procesamiento de los datos meteorológicos de un archivo EPW (EnergyPlus Weather Data File) con el programa Climate Consultant 6.0. Este archivo contiene datos históricos referidos al clima de la localización (temperatura de bulbo seco, velocidad del viento, humedad relativa, entre otros). Los mismos pueden descargarse del Repositorio de datos climáticos gratuitos para la simulación del rendimiento de edificios [7]. Se utilizó el correspondiente a la ciudad de La Plata ya que resulta la ubicación más cercana a Brandsen del repositorio. Los datos meteorológicos en este sitio se derivan de una serie de fuentes públicas, para el caso del EPW utilizado en este análisis se obtuvieron en [8]. Esta página contiene información sobre cada conjunto de datos.

Según la fuente mencionada, la temperatura máxima de diseño del aire alcanza su máximo en enero (35,1°C) y su mínimo en junio (-1,5°C). La temperatura media anual es de 16,7°C y la humedad relativa media anual es de 77,9 %. La humedad relativa de enero de acuerdo a los datos de Climate Consultant tiene un valor de 73% y en junio 82%. La ubicación corresponde a la zona bioambiental IIIb de la norma IRAM 11603 (templado cálido).

### **2.3. El suelo**

Los suelos de la zona son suelos sedimentarios. De acuerdo al estudio de suelos realizado por la empresa Atterberg S.R.L [9], el perfil del terreno auscultado, es homogéneo y parejo, ya sea por las características de textura y plasticidad de los sedimentos que lo forman, como por su densificación relativa medida a través de los ensayos penetrométricos. El perfil estudiado está integrado en la profundidad investigada por: Hasta -2,50 m arcillas limosas de plasticidad moderada y coloración castaña, pertenecientes al subgrupo CL del Sistema de Clasificación Unificado ideado por Arturo Casagrande. Entre -2,50 m y -4,50 m, sedimentos limos arcillosos de plasticidad media y coloración castaña, clasificados como ML en el sistema antes mencionado. Entre -4,50 m y -7,50 m, suelos limos arcillosos de plasticidad elevada, tipo MH. Entre -7,50 m y -9,50 m, sedimentos limos arenosos de plasticidad nula y coloración castaña, también tipo ML en el Sistema Unificado. El nivel de agua libre fue ubicado a una profundidad promedio de 8,12 metros de profundidad.

### **2.4 La instalación: pozo canadiense**

Existen diferentes formas de aprovechar la energía geotérmica de baja entalpía. Los pozos canadienses o provenzales cuentan con tres elementos principales: la torre de aspiración por donde ingresa el aire a acondicionar, un intercambiador de calor que básicamente consiste en uno o más tubos de cierto material y espesor que permita el intercambio y un sistema de impulsión de aire, que puede ser mecánico o pasivo (chimeneas solares).

Dentro de estos intercambiadores térmicos existen varias tipologías, la elección de una u otra dependerá del espacio disponible y necesario para la instalación, del caudal del aire a tratar, de las exigencias de calefacción y refrigeración y la superficie a climatizar. Se pueden agrupar en tres grupos: directos aislados (anillo), distribución Techelmann (rejilla) y bloque Techelmann (bloque-rejilla) [8].

La torre de aspiración capta el aire exterior y lo transporta verticalmente hasta el tubo intercambiador. Se realiza la primera depuración del aire mediante un filtro que minimiza el paso de partículas y polen a los conductos enterrados. [10]. También impide el ingreso de animales que puedan hacer un nido o depositar sus excrementos y así contaminar el sistema [11]. La torre debe estar razonablemente protegida de la incidencia constante de la radiación solar, ya que se calentaría el aire interior induciendo un movimiento contrario al que deseamos [10]. El punto de captación del aire debe ubicarse por lo menos entre 1 y 1,5 metros sobre el nivel del suelo para evitar el ingreso de gas radón al sistema [11]. El radón es un gas radiactivo incoloro, inodoro e insípido. Se produce por desintegración radiactiva natural del uranio presente en suelos y rocas. El radón emana fácilmente del suelo y pasa al aire, donde se desintegra y emite otras partículas radiactivas. Al respirar se inhalan esas partículas, que se depositan en las células que recubren las vías respiratorias, donde pueden dañar el ADN y provocar cáncer de pulmón [12]. El gas radón se genera de forma natural en la corteza terrestre y con mayor intensidad en zonas volcánicas. Como es más pesado que el aire, tiende a acumularse en zonas bajas y donde no hay circulación de aire [11]. La OMS recomienda establecer un promedio anual de referencia de 100 Bq/m<sup>3</sup> en todos los países y, si se dan circunstancias concretas que impiden alcanzarlo, fijar un nivel que no supere los 300 Bq/m<sup>3</sup>. Según las mediciones de Canoba, A.C. y López, F.O. [13] de las 2689 viviendas analizadas son muy pocos los valores que superan los 200 Bq/m<sup>-3</sup> y ninguno supera los 300 Bq/m<sup>-3</sup>, la media de todas las viviendas fue de 41,6 Bq/m<sup>-3</sup>.

El conducto o tubo intercambiador es el elemento principal del sistema, allí ocurre el intercambio de calor. Son tubos macizos cuya resistencia debe soportar los esfuerzos a los que se encuentra sometido. Deben ser óptimos en la estanqueidad del aire y en la evacuación de condensados. Igualmente, deben ser posibles las intervenciones de mantenimiento y reparación. Para mejorar la calidad del aire es aconsejable que los conductos estén provistos de una capa interior antimicrobiana. Comercialmente encontramos distintos materiales y dimensiones. Debido al cambio de temperatura del aire o a la situación bajo tierra de los conductos es posible que se formen condensaciones o se infiltre parte del agua desde el terreno. En ambos casos para garantizar la calidad del aire y evitar la aparición de bacterias y malos olores debemos ser capaces de eliminar

el agua del interior de los conductos. La primera medida que debe tomarse es la colocación de los tubos con inclinación hacia un punto donde pueda recogerse el agua. Esta agua se deriva hacia un colector estanco mediante un desagüe y posteriormente se expulsa mediante una bomba [10].

### 3. METODOLOGÍA

Para realizar el cálculo de la instalación del caso en estudio se utilizó la metodología propuesta en [10] con algunas modificaciones en la obtención de datos climáticos y utilización de normativas para la aplicación en Argentina. Se analizó el comportamiento térmico del suelo siguiendo las pautas de [14] En Argentina se cuenta como antecedente el caso [15] que sigue otra metodología de las disponibles para realizar el dimensionado.

#### 3.1. Temperatura del suelo

Para el dimensionamiento del intercambiador suelo-aire de desarrollo horizontal del presente trabajo, nos bastará con comprender como se comportan las capas más superficiales, que como se mencionó anteriormente, están influenciadas por las condiciones atmosféricas y el aporte de energía solar. La variación de temperatura de la capa superficial va estabilizándose con la profundidad, donde se aproxima a la temperatura media anual de la zona. La ondulación de temperaturas no sólo se reduce, sino que también se desfasa debido a la inercia térmica. [10] La temperatura del suelo se obtiene a partir de la siguiente ecuación, que supone un suelo homogéneo con propiedades térmicas constantes según [14].

$$T(z, t) = T_m - A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \cos \left[ \frac{2\pi}{365} \left( t - t_0 - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{365}{\pi\alpha}} \right) \right] \quad (1)$$

Donde,

- T (z,t) es la temperatura en °C del suelo en el tiempo t (en días) a una profundidad z (en centímetros).
- T<sub>m</sub> es la temperatura media anual del suelo en °C (a una profundidad en donde no son perceptibles las variaciones de temperatura), se puede asumir como constante hasta profundidades de 100 metros y se estima como la temperatura media anual atmosférica del sitio.
- A<sub>s</sub> es la oscilación de la temperatura superficial en °C. Es el valor medio entre la temperatura máxima de diseño anual y la temperatura mínima de diseño anual.
- t<sub>0</sub> el desfase en días. El desfase en días (t<sub>0</sub>) se refiere al desplazamiento de la temperatura superficial con la profundidad. Un valor típico de este parámetro es 35 ± 10 días (análisis de Kusuda).
- α es la difusividad térmica del suelo en cm<sup>2</sup>/día. Los valores de la difusividad térmica del suelo dependen del tipo de suelo y del contenido de agua. Se define como el ratio entre la capacidad de conducción del terreno y la capacidad térmica del terreno. Se mide en m<sup>2</sup>/s. El rango de valores para la difusividad térmica, de acuerdo con los trabajos de Labs y Harrington (1982), va desde 0,36 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s hasta 0,8 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, según sea el suelo seco o húmedo, mientras que Givoni y Katz seleccionaron como valores límites 0,4 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s para suelo seco y 1,08 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s para suelo húmedo.

A partir de la ecuación (1) se puede obtener la expresión de temperatura máxima (T<sub>H</sub>) y mínima (T<sub>L</sub>) en el terreno, adoptando una profundidad, que ocurrirá cuando la función coseno se iguale a uno. Entonces:

$$T_L(z) = T_m - A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (2)$$

$$T_H(z) = T_m + A_s e^{-z^2 \sqrt{\frac{\pi}{365\alpha}}} \quad (3)$$

Tabla 1: Valores de conductividad y capacidad térmica para distintos suelos. Fuente: (ATECYR, 2010)

Rocas sedimentarias	Conductividad térmica (W/mK)			Capacidad térmica volumétrica (MJ/m <sup>3</sup> K)
	Mín.	Valor típico	Máx.	
Caliza	2,5	2,8	4,0	2,1-2,4
Marga	1,5	2,1	3,5	2,2-2,3
Cuarcita	3,6	6,0	6,6	2,1-2,2

Sal	5,3	5,4	6,4	1,2
Arenisca	1,3	2,3	5,1	1,6-2,8
Limolitas y argilitas	1,1	2,2	3,5	2,1-2,4
Rocas no consolidadas				
Grava, seca	0,4	0,4	0,5	1,4-1,6
Grava, saturada de agua	Aprox. 1,8			Aprox. 2,4
Arena, seca	0,3	0,4	0,8	1,3-1,6
Arena, saturada de agua	1,7	2,4	5,0	2,2-2,9
Arcilla/limo, seco	0,4	0,5	1,0	1,5-1,6
Arcilla/limo, saturado de agua	0,9	1,7	2,3	1,6-3,4
Turba	0,2	0,4	0,7	0,5-3,8

### 3.2. Selección de tubo intercambiador de calor, velocidad del aire y cálculo del caudal de aire

Selección de variables:

- Diámetro interno (D)
- Espesor (e)
- Material del tubo: Conductividad térmica del tubo ( $\lambda$ )

Deberá seleccionarse el diámetro, material y espesor del intercambiador de calor de acuerdo a la disponibilidad ofrecida por catálogos locales, teniendo en cuenta que el diámetro del conducto se encuentra estrechamente ligado al caudal de aire que debemos climatizar. Diámetros menores de 20 centímetros no son aconsejables ya que para mantener la velocidad del aire que deseamos vamos a necesitar muchos conductos. Tampoco está recomendado superar los 60 centímetros ya que el intercambio de calor con las capas más cercanas al centro del tubo no se realiza correctamente [10].

Respecto al espesor de las paredes de los conductos, cuanto menor sea el espesor de la pared mayor intercambio de calor se producirá con el terreno, pero el conducto debe resistir los esfuerzos verticales y horizontales del terreno adecuadamente. De esta manera el espesor más apropiado será el mínimo suficiente para soportar las cargas [10]. La conductividad térmica del tubo puede obtenerse de los catálogos o de [16].

- Velocidad del aire dentro del intercambiador (v)

Según [17] para evitar el ruido de la ventilación en las viviendas ha de limitarse la velocidad en los conductos a un máximo de 5 m/s. La velocidad del aire en el intercambiador quedará determinada por el sistema mecánico de impulsión de aire en caso de contar con uno. El aire también podrá ser impulsado de forma pasiva mediante el uso de chimeneas solares con velocidades menores que favorecen el confort. Una vez adoptada la velocidad del aire en el conducto deberá verificarse que el caudal (q) resulte mayor al caudal mínimo reglamentario de acuerdo a [18]. También se puede verificar según los requerimientos de [19].

Cálculo del caudal de aire (q):

$$q = 4v/(\pi \cdot D^2) \quad (4)$$

### 3.3. Temperatura media en el conducto para calefacción y refrigeración

Para conocer la temperatura media en el conducto es necesario conocer:

- Temperatura del terreno ( $T_{terr}$ )
- Temperatura del aire de entrada ( $T_{ae}$ )
- Temperatura del aire de salida ( $T_{as}$ )

La temperatura del terreno para el dimensionamiento de calefacción será igual a la temperatura mínima del terreno ( $T_L$ ) calculada según se indica en el apartado 3.1 mediante la ecuación (2) y para el dimensionamiento de refrigeración será igual a la temperatura máxima ( $T_H$ ) que se calcula mediante la ecuación (3) del mismo apartado.

La temperatura del aire de entrada para el dimensionamiento de calefacción será igual a la temperatura atmosférica mínima de diseño obtenida del análisis del clima del apartado 2.2. Para el caso del dimensionamiento de refrigeración será igual a la temperatura atmosférica máxima de diseño que se obtiene del mismo apartado que la anterior.

La temperatura del aire de salida se debe adoptar teniendo en cuenta que ( $T_{as}$ ) deberá ser menor que ( $T_{terr}$ ) para el dimensionamiento de calefacción y para el caso de refrigeración, donde el terreno recibe calor del aire, ( $T_{as}$ ) deberá ser mayor que ( $T_{terr}$ ). Podría llegarse hasta la propia temperatura del terreno, pero eso implicaría una longitud excesiva [10].

Conociendo estas temperaturas se puede calcular la Temperatura media en el conducto ( $T_{ma}$ ):

$$T_{ma} = (T_{ae} + T_{as}) * 0.5 \quad (5)$$

### 3.4. Resistencia térmica del conducto

La resistencia térmica del conducto total ( $R$ ) es la suma de la resistencia térmica por conducción ( $R_{cd}$ ) y la resistencia térmica por convección ( $R_{cv}$ ):

$$R = R_{cd} + R_{cv} \quad (6)$$

$$R_{cd} = e/\lambda \quad (7)$$

$$R_{cv} = 1/(5,55 * v^{0,8}) \quad (8)$$

Donde ( $e$ ) es el espesor del intercambiador de calor, ( $\lambda$ ) es la conductividad térmica del tubo y ( $v$ ) es la velocidad del aire dentro del intercambiador, de acuerdo al apartado 3.2.

### 3.5. Flujo de calor medio

El flujo de calor medio ( $\phi_m$ ) se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\phi_m = T_{terr} - T_{ma} / R \quad (9)$$

Las variables ( $T_{terr}$ ), ( $T_{ma}$ ) se encuentran definidas en el apartado 3.3 y ( $R$ ) en el apartado 3.4. Se obtendrá un valor para el caso de calefacción y otro valor para el caso de refrigeración.

### 3.6. Energía aportada al aire

Se calcula la energía que debe aportarse al aire ( $E_e$ ) con la siguiente expresión:

$$E_e = (i_s/V_{es}) - (i_e/V_{ee}) \quad (10)$$

Donde:

Entalpía del aire de salida ( $i_s$ )

Volumen específico del aire de salida ( $V_{es}$ )

Entalpía del aire de entrada ( $i_e$ )

Volumen específico del aire de entrada ( $V_{ee}$ )

Para ello se requiere obtener con anterioridad la entalpía y volumen específico a partir del ábaco psicrométrico del aire utilizando como dato de entrada la humedad relativa y la temperatura del aire de entrada y de salida. Los ábacos psicrométricos se encuentran disponibles de forma gratuita en numerosas páginas de internet tanto en forma gráfica como en forma de calculadora. Se obtendrá un valor para el caso de calefacción y otro valor para el caso de refrigeración. Datos requeridos:

Humedad relativa del aire de salida ( $HR_s$ )

Temperatura del aire de salida ( $T_{as}$ )

Humedad relativa del aire de entrada ( $HR_e$ )

Temperatura del aire de entrada ( $T_{ae}$ )

Los valores de las temperaturas fueron definidos en el apartado 3.3. La humedad relativa de entrada y de salida para calefacción y refrigeración se adopta igual a la definida en el apartado 2.2 en correspondencia con el mes de la temperatura de diseño del aire.

### 3.7. Superficie de intercambio de calor y longitud del intercambiador

La superficie de intercambio (S) necesaria para efectuar el intercambio de calor será:

$$S = E_e \cdot q / \varphi_m \quad (11)$$

Donde, la energía que debe aportarse al aire ( $E_e$ ) se calcula de acuerdo al apartado 3.6, el caudal de aire ( $q$ ) se calcula según el apartado 3.2 y el flujo de calor medio ( $\varphi_m$ ) según el apartado 3.5.

Conocida la superficie de intercambio (S) y el perímetro interno (P) del intercambiador de calor puede calcularse la longitud del intercambiador de calor:

$$L = S/P \quad (12)$$

Se obtendrán dos valores, uno para el caso de calefacción y otro para el caso de refrigeración. Finalmente se adopta la mayor longitud entre los dos casos.

## 4. RESULTADOS

Por medio de la ecuación (1) se obtuvo el comportamiento del suelo de la zona en estudio a diferentes profundidades. A continuación se adjunta un gráfico con el comportamiento obtenido para el caso en estudio:

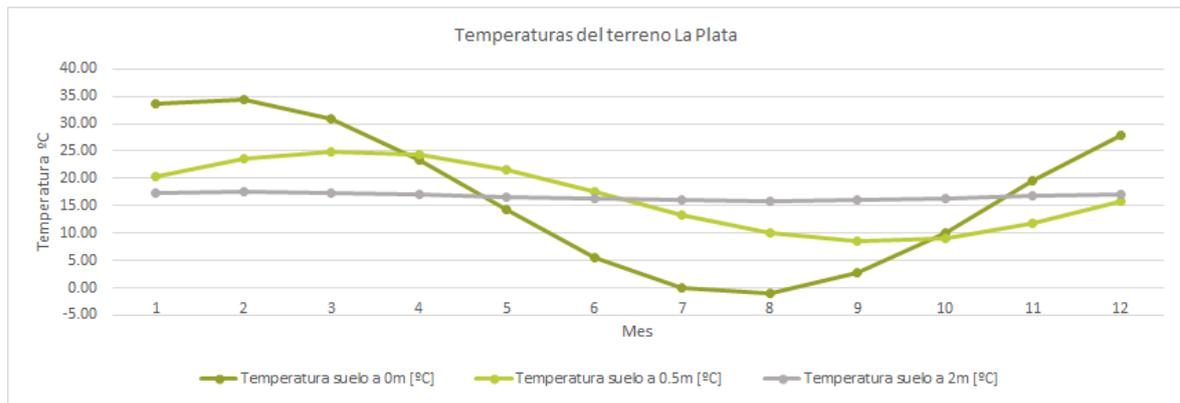


Figura 1: Temperaturas del suelo en la ciudad de La Plata a diferentes profundidades. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Temperaturas del suelo en la ciudad de La Plata a diferentes profundidades. Fuente: Elaboración propia.

Mes	t	Temperatura suelo a 0m [°C]	Temperatura suelo a 0.5m [°C]	Temperatura suelo a 2m [°C]
Enero	15	33.56	20.22	17.43
Febrero	46	34.44	23.56	17.47
Marzo	74	30.98	24.96	17.32
Abril	105	23.41	24.30	16.99
Mayo	135	14.28	21.65	16.59
Junio	166	5.54	17.57	16.22
Julio	196	0.01	13.37	15.98
Agosto	227	-1.12	9.96	15.93
Septiembre	258	2.71	8.42	16.10
Octubre	288	10.14	9.12	16.42
Noviembre	319	19.58	11.92	16.83
Diciembre	349	27.99	15.90	17.19

Valores adoptados para las variables intervinientes	
Temperatura media anual del suelo $T_m$	16.7 °C
Oscilación de la temperatura superficial $A_s$	18.3 °C
Desfase $t_0$	35.0 días
Difusividad térmica del suelo $\alpha$	34.6 cm <sup>2</sup> /día
Profundidad $z$	50.0 cm
Profundidad $z$	200.0 cm

La temperatura media anual del suelo se obtuvo a partir de los datos del clima del sitio indicados en el apartado 2.2, al igual que la oscilación de la temperatura superficial. El desfase en días se adopta  $t_0 = 35$  días. Respecto a la difusividad térmica del suelo, el suelo presenta arcillas limosas, y la napa freática se encuentra varios metros por debajo. De acuerdo a la tabla 1, la conductividad térmica típica para arcilla/limo seco, tiene un valor de 0,5 W/m<sup>0</sup>K y su capacidad térmica volumétrica es 1,5MJ/m<sup>3</sup>°K, haciendo el cociente entre ambos valores se obtiene que  $\alpha = 0,33 \cdot 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s. Para el presente dimensionado se adoptará el mínimo obtenido por Givoni y Katz de 0,4  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s para suelo seco. Entonces  $\alpha = 34,6$  cm<sup>2</sup>/día. Reemplazando los valores adoptados en las ecuaciones (2) y (3) para la profundidad promedio del intercambiador de 200 centímetros se

obtiene que  $T_L = 15,92^\circ\text{C}$  y  $T_H = 17,50^\circ\text{C}$ . Para definir las dimensiones del tubo se recurrió a [20] que utiliza polipropileno con pintura antimicrobiana. A continuación se adjunta una tabla con el caudal calculado para la instalación Y luego los resultados obtenidos para la longitud de intercambio:

Tabla 3: Caudal de aire requerido y longitud requerida para el intercambiador de calor. Fuente: Elaboración propia.

CAUDAL DE AIRE		
Velocidad del aire (v)	0.4	m/s
Espesor del tubo (e)	13.5	mm
Diámetro interior del tubo (D)	400	mm
Área interna del tubo	125664	mm <sup>2</sup>
Caudal de aire (q)	50	l/s
Volumen de la vivienda	771	m <sup>3</sup>
Ocupantes	4	u
Cubaje	193	m <sup>3</sup> /u
Caudal mínimo por persona dec. 351/79	18	m <sup>3</sup> /(uh)
Caudal mínimo dec. 351/79	20	l/s
Ocupantes	4	u
Caudal mínimo categoría IDA 2	12.5	l/(su)
Caudal mínimo RITE	50	l/s

### CALEFFACCIÓN

Temperatura media en el conducto. Calefacción	
Temperatura del aire de salida $T_{as}$	15 °C
Temperatura del aire de entrada $T_{ae}$	-1.5 °C
Temperatura del terreno $T_{terr}$	15.92 °C
Temperatura media en el conducto $T_{ma}$	6.75 °C

Resistencia térmica del conducto. Calefacción	
Espesor e	0.014 m
Conductividad del tubo $\lambda$	0.220 W/(mK)
Velocidad del aire v	0.400 m/s
Resistencia por conducción $R_{cd}$	0.061 m <sup>2</sup> K/W
Resistencia por convección $R_{cv}$	0.375 m <sup>2</sup> K/W
R total	0.436 m <sup>2</sup> K/W

Flujo de calor. Calefacción	
Temperatura del terreno $T_{terr}$	15.920 °C
Temperatura media en el conducto $T_{ma}$	6.750 °C
R total	0.436 m <sup>2</sup> K/W
Flujo de calor $\phi$	21.013 W/m <sup>2</sup>

Temperatura del aire de entrada $T_{ae}$	-1.5 °C
Humedad relativa del aire de entrada $HR_e$	82 %
Temperatura del aire de salida $T_{as}$	15 °C
Humedad relativa del aire de salida $HR_e$	82 %
Entalpía $i_e$	9.5 kJ/kg
Volumen específico $V_{ee}$	0.77 m <sup>3</sup> /kg
Entalpía $i_s$	25.8 kJ/kg
Volumen específico $V_{es}$	0.81 m <sup>3</sup> /kg

Energía aire $E_a$	19514.19 Ws/m <sup>3</sup>
Flujo de calor $\phi$	21.01 W/m <sup>2</sup>
Caudal de aire q	0.05 m <sup>3</sup> /s
Superficie de intercambio S	46.68 m <sup>2</sup>
Perímetro P	1.26 m
Longitud del intercambiador L	37 m

### REFRIGERACIÓN

Temperatura media en el conducto. Refrigeración	
Temperatura del aire de salida $T_{as}$	24 °C
Temperatura del aire de entrada $T_{ae}$	35.1 °C
Temperatura del terreno $T_{terr}$	17.5 °C
Temperatura media en el conducto $T_{ma}$	29.55 °C

Resistencia térmica del conducto. Refrigeración	
Espesor e	0.014 m
Conductividad del tubo $\lambda$	0.220 W/(mK)
Velocidad del aire v	0.400 m/s
Resistencia por conducción $R_{cd}$	0.061 m <sup>2</sup> K/W
Resistencia por convección $R_{cv}$	0.375 m <sup>2</sup> K/W
R total	0.436 m <sup>2</sup> K/W

Flujo de calor. Refrigeración	
Temperatura del terreno $T_{terr}$	17.500 °C
Temperatura media en el conducto $T_{ma}$	29.550 °C
R total	0.436 m <sup>2</sup> K/W
Flujo de calor $\phi$	27.613 W/m <sup>2</sup>

Temperatura del aire de entrada $T_{ae}$	35.1 °C
Humedad relativa del aire de entrada $HR_e$	73 %
Temperatura del aire de salida $T_{as}$	24 °C
Humedad relativa del aire de salida $HR_e$	73 %
Entalpía $i_e$	103.3 kJ/kg
Volumen específico $V_{ee}$	0.91 m <sup>3</sup> /kg
Entalpía $i_s$	59 kJ/kg
Volumen específico $V_{es}$	0.86 m <sup>3</sup> /kg

Energía aire $E_a$	44911.83 Ws/m <sup>3</sup>
Flujo de calor $\phi$	27.61 W/m <sup>2</sup>
Caudal de aire q	0.05 m <sup>3</sup> /s
Superficie de intercambio S	81.76 m <sup>2</sup>
Perímetro P	1.26 m
Longitud del intercambiador L	65 m

Se adoptarán tres tubos de 20 metros de largo cada uno.

## 5. CONCLUSIONES

La instalación calculada permitirá alcanzar el confort térmico durante el verano a una temperatura de 24°C. Es decir que no será necesario el uso de aire acondicionado. Durante el invierno se podrá elevar la temperatura hasta los 15°C, no se alcanzarán los 20°C de confort. Sin embargo, la calefacción necesaria será menor y podrá ahorrarse energía. Teniendo en cuenta que el 52% de la

energía consumida en una vivienda corresponde con energía de calefacción [6], el pozo canadiense permite aprovechar la inercia térmica del terreno y producir un aporte significativo en el diseño de viviendas de consumo energético cero.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Energía y Minería. (2021). *Balances Energéticos Argentina*. Ministerio de Energía y Minería Web Page. <https://www.argentina.gob.ar/produccion/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>
- [2] CAMMESA. (2021). *Informe anual 2020*.
- [3] Organization of the Petroleum Exporting Countries. (2022). OPEC Reference Basket in nominal and real terms. OPEC Web Page. [https://asb.opec.org/ASB\\_Charts.html?chapter=227](https://asb.opec.org/ASB_Charts.html?chapter=227)
- [4] Lanteri, Luis N.. (2014). Determinantes de los precios reales del petróleo y su impacto sobre las principales variables macroeconómicas: EU, España, Noruega y Argentina. *Economía: teoría y práctica*, (41), 45-70. Recuperado en 30 de noviembre de 2022, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-33802014000200003&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-33802014000200003&lng=es&tlng=es).
- [5] Secretaría de energía. (2019) *Introducción a la generación distribuida de energías renovables*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. 1ª Edición. Nicolás Birrúm.
- [6] Trillo, G. L., & Angulo, V. R. (2008). *Guía de la energía geotérmica*. Dirección General de Industria, Energía y Minas.
- [7] Climate.OneBuilding.org. (2022). Repository of free climate data for building performance simulation. From the Creators of the EPW. Climate.Onebuilding.Org Web Page.
- [8] Bre, F., & Fachinotti, V. D. (2016). Generation of typical meteorological years for the Argentine Littoral Region. *Energy and Buildings*, 129, 432–444. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.006>
- [9] Atterberg S.R.L. (2021) *Estudio de suelos*
- [10] Díaz, Sergio Martín (2008) *El terreno como intercambiador. Enfriamiento pasivo aplicado a un edificio de nueva planta*.
- [11] Pacheco Rivas, Igma (2016) *Cómo Construir un Pozo Canadiense: Un Sistema de Climatización que Utiliza la Energía del Subsuelo*. Recuperado en: <https://about-haus.com/como-construir-un-pozo-canadiense/>.
- [12] Organización mundial de la salud (2021). *El radón y sus efectos en la salud*. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>.
- [13] Canoba, A.C. y López, F.O. (2006) *Mediciones de radón 222 en el interior de viviendas de la República Argentina*.
- [14] Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración ATECYR (2010). *Guía técnica, Diseño de sistemas de bomba de calor geotérmica*.
- [15] Carro Pérez, M. E., Peiretti, A., & Francisca, F. M. (2018). “Energía geotérmica de baja entalpía en suelos loésicos: cálculo y diseño para caso de estudio.” *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 23–27.
- [16] Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL (2007) *Prontuario de soluciones constructivas. Código técnico de la edificación web*.
- [17] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid (2014) *Guía de renovación de aire eficiente en el sector residencial*
- [18] Ministerio de Justicia y Derechos Humanos. (1979). Reglamentación de la Ley No 19.587, aprobada por Decreto No 351/79. InfoLeg (Web Page). <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/30000-34999/32030/dto351-1979-anexo1.htm>
- [19] Ministerio de la Presidencia de España (2007) *Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios de España*. [Real Decreto 1027/2007.] Actualizado en 2021.
- [20] REHAU. (2017). *Ventilación ecoeficiente en edificios*. REHAU Web Page. <https://www.rehau.com/es-es/intercambiador-de-aire-awadukt-thermo>

## Agradecimientos

A la Arq. Elena Romero por su aporte gráfico para llevar adelante la investigación y a la familia Frassinelli por brindarnos la oportunidad de pensar de otra manera la forma de funcionar de su vivienda.

# **ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD DE ACCESO DE CENTRAL DE BIOGÁS EN RED DE DISTRIBUCIÓN PARA APROVECHAMIENTO DE EFLUENTES AGROECOLÓGICOS**

Manassero, Ulises; Sanseverinatti, Carlos I.; Espíndola, Francisco; Perdomo, M.; López, Diego

Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica y Sistemas Energéticos (CIESE) (Lavaise 610, Santa Fe), Facultad Regional Santa Fe, UTN.

## **RESUMEN.**

La energía derivada de biomasa es una fuente de energía renovable constante y almacenable que permite la generación de energía eléctrica y térmica a través de la transformación de desechos en recursos productivos. En este trabajo se evalúa la factibilidad técnica y económica de acceso a la red de distribución de una central de generación de biogás en base a los efluentes agroindustriales existentes en la zona de influencia de la localidad de Gobernador Crespo, provincia de Santa Fe. En primer lugar, se calcula el potencial de producción de biogás y se dimensiona el módulo de potencia nominal teórico de la central. Seguidamente, se analiza su acceso en las redes aledañas de media tensión. Para ello, se efectúan estudios eléctricos estáticos en condiciones de red normal y de emergencia mediante modelado y simulación de la red, a los fines de cuantificar el impacto de la nueva central en las variables de operación del sistema. En una segunda etapa de análisis se procede a la evaluación económica a partir del estudio del flujo de caja resultante de los ingresos y egresos del proyecto para un período de 20 años, y se obtienen índices de rentabilidad económica del proyecto. Finalmente, se realiza el balance energético para evaluar el impacto de la nueva central en el abastecimiento de la energía anual operada por la red, así como también en sus pérdidas. Como resultado, se obtiene una generación que verifica los límites admisibles de tensión y cargabilidad de la línea, con un payback de 11 años y una reducción del 5% en las pérdidas eléctricas.

**Palabras Claves:** Biogás; Energía Renovable; Payback; Balance Energético; Red de Distribución.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos tiempos, se ha observado un importante aumento en la inserción de energías renovables en redes de distribución, impulsado por políticas ambientales y sustentables [1]. En este sentido, las centrales térmicas de biogás se presentan como una alternativa con alto potencial para la generación de energía eléctrica en zonas con alta actividad ganadera, dado por el posible aprovechamiento de residuos agroecológicos y su funcionalidad como centrales de tipo gestionables. De esta manera, esta generación no sólo logra disminuir la contaminación ambiental de la actividad agroindustrial, sino que permite reducir los impactos causados por la generación convencional, y aumentar la confiabilidad de la red [2].

Argentina presenta un gran potencial energético como productor de biomasa. Con el fin de incentivar la inversión en materia de energías renovables, en 2016 se crea el programa “RenovAr”, que comprende licitaciones públicas periódicas en las que distintas empresas presentan sus proyectos de inversión y el precio al cual están dispuestos a vender su capacidad [3]-[4]-[5]. De esta manera se busca promover una matriz energética sustentable.

En particular, las centrales térmicas a base de biogás (CTB) poseen notables ventajas, como la posibilidad de generar energía de manera flexible y controlada, garantizar una potencia firme y con un alto factor de utilización, entre otras [2]. Además, la energía derivada de biomasa es una fuente de energía renovable constante y almacenable, que puede utilizarse no sólo para generación de energía eléctrica, sino también en sistemas térmicos, calefaccionando procesos, sistemas de agua, etc. [6].

En este trabajo se realiza la evaluación de la instalación de una CTB a partir del tratamiento de efluentes de actividades agrarias llevadas a cabo en el distrito de Gobernador Crespo de la provincia de Santa Fe. En función al dimensionado del generador, se analizan los impactos técnicos y su factibilidad económica, además de los impactos posibles a ocasionar en la red.

## 2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para el estudio de factibilidad de ingreso de la CTB se presenta en la Figura 1.

Primeramente, se lleva a cabo el relevamiento de procesos agroindustriales y efluentes de la zona factibles de utilizar como sustrato para la instalación de la CTB. Luego, se procede al dimensionamiento de un módulo de potencia factible de acuerdo al potencial energético de los sustratos y a las posibles restricciones de la red de media tensión (MT) a la cual se pretende vincular la nueva generación. Finalmente, se realiza el análisis técnico, la evaluación económica y el balance energético de la inyección de potencia de la CTB a la red, priorizando su contribución a la mejora en la operación del sistema.

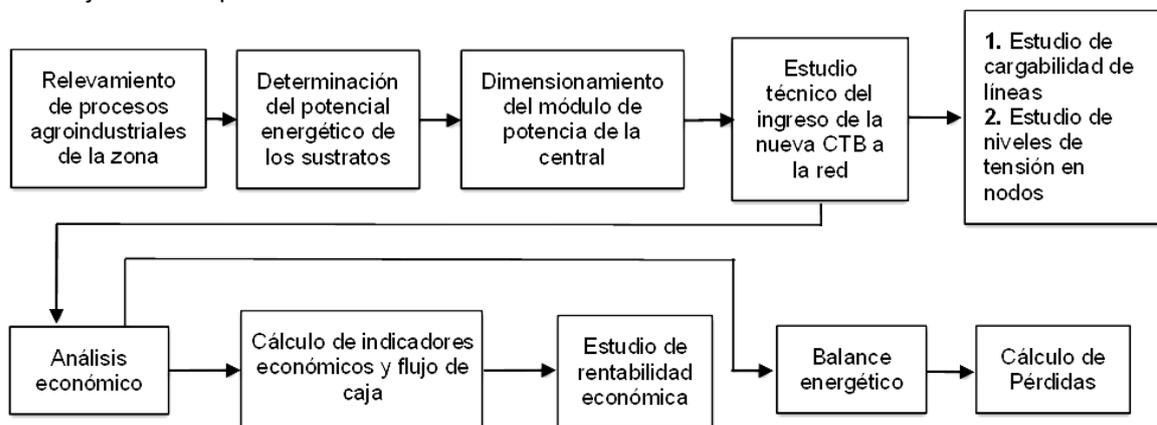


Figura 1 Metodología aplicada para dimensionamiento y análisis de factibilidad técnico-económica de la CTB

### 2.1. Hipótesis de Trabajo

Para llevar a cabo el estudio, se consideraron las hipótesis detalladas a continuación:

- Se analiza el funcionamiento de la red de subtransmisión y distribución en condiciones de operación normal y en contingencia simple.
- Se considera el escenario de demanda pico para el análisis de la cargabilidad de líneas aéreas y el escenario de valle para verificar que no se produzcan sobretensiones en ningún nodo al ingresar la nueva generación.
- El motogenerador de la CTB opera en modo factor de potencia (fp) constante con un rango de 0,95 capacitivo a 0,85 inductivo.
- Las variaciones de tensión en el nodo de conexión de la nueva generación no deben superar un valor de  $\pm 3\%$  en comparación de la tensión sin sistema de generación presente.

## 2.2. Descripción del subsistema en estudio

El estudio de inserción de la CTB se realiza sobre las redes de 33 kV y 13,2 kV perteneciente a la Empresa Provincial de la Energía de Santa Fe (EPESF), la cual abastece los distritos de Gobernador Crespo, Colonia Dolores, La Penca y Caragatá, La Criolla y Colonia Silva, pertenecientes al departamento San Justo de la provincia de Santa Fe.

La red de subtransmisión en 33 kV abastece de energía eléctrica a una fábrica de productos lácteos y a la estación de rebaje (ER) Crespo de 33/13,2 kV. La misma posee una topología radial y es abastecida desde la estación transformadora (ET) Crespo de 132/33/13,2 kV.

Por su parte, la ER Crespo, en el nivel de 13,2 kV, posee un esquema de simple barra con tres distribuidores de salida, denominados Crespo, La Criolla y Silva, los cuales están conformados por líneas aéreas trifásicas y rurales monofásicas con conductores de aluminio de 25 mm<sup>2</sup>. La topología de la red descrita se puede visualizar en la Figura 2.

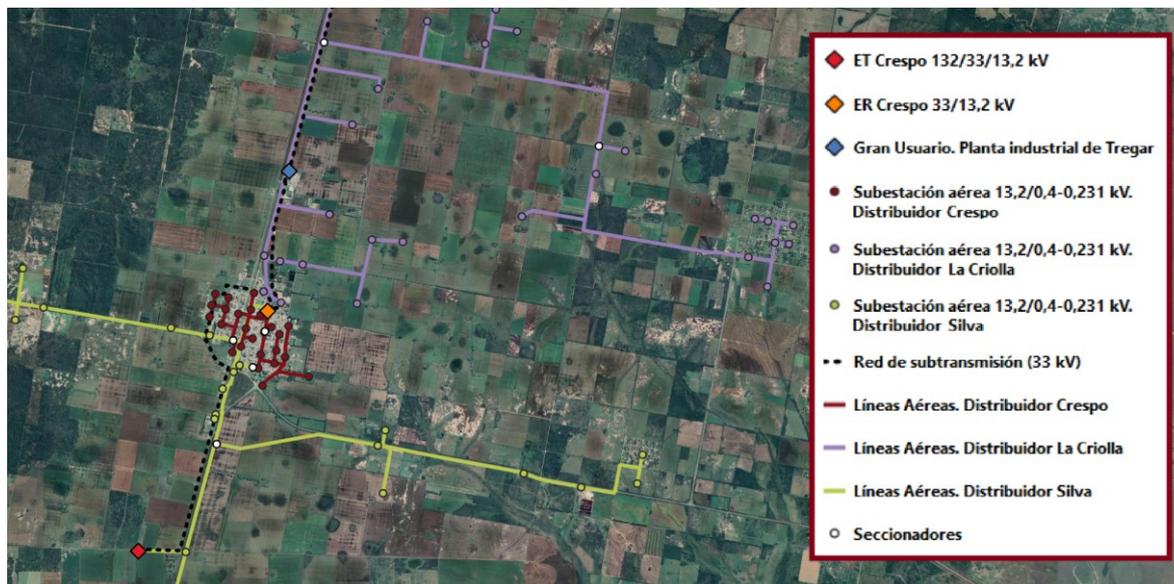


Figura 2 Mapa georreferenciado de la red bajo análisis para la inserción de la CTB.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Potencial de producción de biogás.

En base al relevamiento de actividades agroindustriales llevadas a cabo en el distrito de Gobernador Crespo, se obtienen los datos que se muestran en la Tabla 1. Estos datos fueron suministrados por la empresa láctea instalada en la región de estudio.

Tabla 1 Efluentes de procesos lácteos de la zona.

Lugar de Procedencia	Efluentes Diarios m <sup>3</sup> /día	DBO mg/l
Producción de Lácteos	4.000	2.500
Criadero de Cerdos	45	35.000

El volumen diario de efluentes del criadero de cerdos es de 45.000 litros diarios, lo que equivale a 46.215 kg de materia húmeda que ingresa diariamente al biodigestor considerando una densidad medida de los purines de cerdo de 1,027 kg/lit. En general, para conocer la producción específica de biogás por kg de efluente húmedo es necesario considerar el contenido de materia seca del efluente. Sin embargo, estos datos no eran conocidos por la empresa láctea relevada, por lo que, aunque el cálculo puede presentar más error, se procede a obtener valores de tabla [7]. Si se adopta como producción específica de biogás 0,06 m<sup>3</sup> por cada kg de estiércol [7], la producción diaria es de aproximadamente 2.773 m<sup>3</sup>. Al considerar que cada m<sup>3</sup> de biogás producido por purines porcinos contiene un 60% de metano, la cantidad producida diariamente solo por los efluentes del criadero de cerdos es de alrededor de 1.664 m<sup>3</sup> diarios.

En base a la cantidad de desechos orgánicos factibles para la producción de biogás, es necesario considerar la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO) de los efluentes producidos, la cual es de 2.500 mg/l (estos efluentes están compuestos por desechos lácteos, suero, agua de limpieza de equipos e instalaciones, etc.). Tomando como referencia la DBO de un litro de leche entera, la cual es de 110.000 mg/litro [8], y, aplicando como hipótesis simplificadora la existencia de una relación lineal entre la DBO y el contenido de componentes lácteos en los efluentes, se tiene una

concentración de 2,7% de desechos lácteos. Como se producen 4000 m<sup>3</sup>/día de efluentes con una concentración de 2,7% de compuestos lácteos, se obtiene una producción total aproximada de 90.910 lt/día (90,91 m<sup>3</sup>/día) de desechos orgánicos lácteos. Debido a que los mismos están compuestos por lácteos y suero, se adopta como densidad media de los desechos el promedio entre la densidad de la leche entera y la densidad del suero, lo que equivale a una densidad de 1,0285 kg/l. Esto resulta en un total de producción de 93,5 toneladas de materia húmeda factible de ingresar en el biodigestor para su descomposición anaeróbica. Considerando como referencia la cantidad de biogás producida por el lactosuero, la cual es de 50 m<sup>3</sup> por tonelada [8], el potencial de producción diaria de biogás es de aproximadamente 4.675 m<sup>3</sup>, lo que equivale a alrededor de 2.478 m<sup>3</sup> diarios de metano producido sólo por medio de los lactosueros al ser su concentración en el biogás producido de un 53% [9].

Finalmente, el volumen diario de biogás se obtiene sumando la producción a partir del estiércol de cerdo y los desechos lácteos, lo cual da un total de 7.448 m<sup>3</sup>. Así, considerando la concentración de metano en el biogás producido por los diferentes sustratos, el potencial de producción diaria de metano en el biodigestor es de 4.142 m<sup>3</sup>, lo que equivale a una concentración de metano de 56% en la mezcla gaseosa. El poder calorífico del biogás es de 4.801 kCal/ m<sup>3</sup>.

### 3.2. Dimensionamiento de Generador para la CTB.

De acuerdo a la producción media horaria de biogás y el poder calorífico, es posible determinar la potencia térmica desarrollada por la CTB a partir de la Ecuación (1):

$$P_{\text{term}} = P_{\text{cb}} \times \text{PBC}_{\text{diaria}}/24 \quad (1)$$

Donde P<sub>term</sub> es la potencia térmica obtenida, PBC<sub>diaria</sub> es la producción diaria de biogás, y P<sub>cb</sub> es el poder calorífico del biogás producido por la mezcla de sustratos. Se obtiene una potencia térmica de la CTB de 1.732 kW. A partir de este resultado, es posible elegir el motogenerador factible de la central, para lo cual se selecciona un generador Jenbacher Tipo 3 - Modelo J312, el cual, operando a potencia activa nominal, requiere una potencia térmica que es acorde al potencial energético de la central.

Las características del equipo seleccionado se resumen en la Tabla 2. Es dable destacar que la potencia térmica del biogás producido resulta ser mayor a la requerida por el equipo seleccionado, por lo que el biogás en exceso puede ser utilizado para la calefacción de procesos industriales o del propio biodigestor de la central.

Tabla 2 *Parámetros del motogenerador Jenbacher Tipo 3 – Modelo J312.*

Parámetro	Valor
Velocidad	1500 rpm (50 Hz)
Tensión nominal	34,5 kV
Potencia activa nominal	635 kW
Rendimiento a potencia nominal	40,2 %

### 3.3. Análisis técnico

En función del modelo de la CTB, se procede a evaluar las condiciones operativas de la red a la cual se pretende vincular la nueva generación. Para esto, se realiza el modelado y la simulación de flujo de potencia de la red con y sin el ingreso de la CTB para un período de 20 años, considerando el año 2021 como base. La nueva generación es vinculada al nodo de 33 kV desde el cuál es abastecida la demanda de la industria láctea (GU TREGAR).

En la Figura 3 se observa el diagrama georreferenciado de un tramo de la red de 33 kV en el cual está representada la CTB en un área factible para su emplazamiento, dada su proximidad con la planta láctea y el criadero de cerdos.



Figura 3 Mapa satelital con el diagrama georreferenciado de la red de 33 kV y la CTB proyectada.

En condiciones de operación normal y de demanda pico, se evalúan los valores de cargabilidad en la red de 33 kV. En la Figura 4 se representan los porcentajes de cargabilidad del alimentador entre la salida de la ET Crespo y la ER Crespo (denominado A-CRE-1), con y sin el ingreso de la CTB.

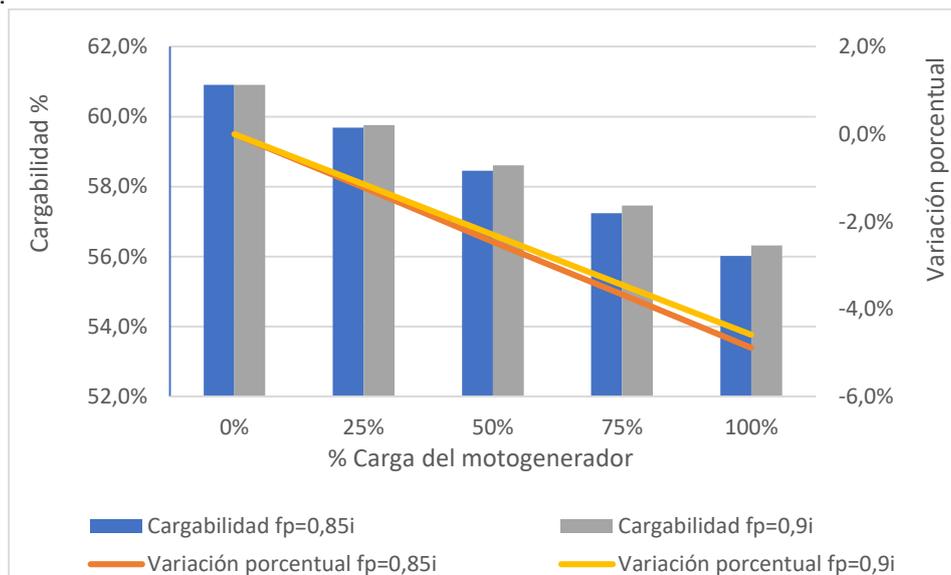


Figura 4 Cargabilidad del alimentador A-CRE-1. Red en operación normal para escenario de carga pico

En base a las simulaciones realizadas y operando en modo factor de potencia constante, la cargabilidad del alimentador A-CRE-1 disminuye a medida que incrementa la potencia activa y reactiva inyectada a la red, lo cual se logra modificando el caudal de biogás del motor primario del motogenerador y la corriente de excitación respectivamente. Si se incrementa la corriente de excitación sin modificar el caudal de combustible, se reduce el factor de potencia del motogenerador, el cual si se encuentra operando a potencia nominal, se logra una reducción adicional de la cargabilidad del alimentador.

La cargabilidad mínima se logra con el motogenerador operando a potencia activa nominal y con un factor de potencia de 0,85 inductivo, la cual es de 56,82% significando una reducción de aproximadamente un 5% respecto de la cargabilidad del alimentador sin ingreso de generación. En condiciones de operación normal y para demanda de tipo valle, se realizan simulaciones de flujo de potencia con el fin de determinar los niveles de tensión en los nodos de la red de 33 kV al ingresar la nueva generación. En la Figura 5 se observan las tensiones en los nodos de vinculación a la red de 33 kV de la ER Crespo y en el nodo GU Tregar.

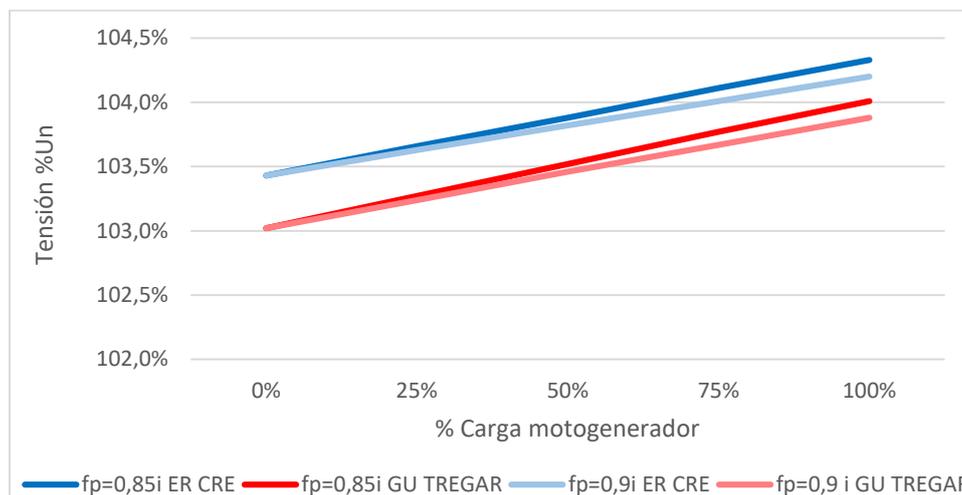


Figura 5 Tensiones en los nodos de 33 kV de la ER Crespo y el nodo GU Tregar. Red en operación normal. Escenario de tipo valle

El ingreso de la nueva generación resulta en un aumento en los niveles de tensión en los nodos mencionados, el cual se acentúa a medida que incrementa la potencia activa y reactiva inyectada a la red, operando el motogenerador en modo factor de potencia constante. Los mayores niveles de tensión se presentan operando a potencia activa nominal y con un factor de potencia de 0,85 inductivo. En estas condiciones, la tensión máxima en el nodo de 33 kV de la ER Crespo es de 104,33% y de 104,01% de la tensión nominal en el nodo del GU Tregar, significando una variación respecto de sus tensiones sin el ingreso de generación de 0,9% y 1,0% respectivamente.

En ningún caso se presentaron sobretensiones en nodos de carga de la red de subtransmisión, por lo cual la misma no representa ninguna limitación al ingreso de la CTB.

### 3.4. Análisis económico

A continuación, se presenta el estudio de rentabilidad de la instalación de la CTB, considerando la inversión global asignada a su construcción, la valorización de los costos de operación y mantenimiento, y los ingresos percibidos a partir de la energía eléctrica generada.

#### 3.4.1 Ingreso por Energía Generada

En primer término, se determina la energía prevista factible de generarse en la CTB considerando un factor de carga del 95%, un factor de disponibilidad anual del 93% (contemplando las salidas de servicio programadas por mantenimiento) y una cantidad de horas anuales de operación prevista de 6500 horas. Con esta información se determina la producción anual de energía eléctrica prevista, tal como se indica en la Ecuación (2):

$$E_{\text{anual}} = f_c \times 93/100 \times t_{\text{op-anual}} \times P_{\text{inst}} \quad (2)$$

$$E_{\text{anual}} = 0,95 \times 93/100 \times 6500 \text{ [hs/año]} \times 0,635 \text{ [MWh/año]} = 3.647 \text{ [MWh/año]}$$

Siendo  $E_{\text{anual}}$  la energía anual prevista a generar,  $f_c$  el factor de carga,  $t_{\text{op-anual}}$  la cantidad de horas anuales de operación, y  $P_{\text{inst}}$  la potencia instalada de la CTB.

Adoptando como referencia de precio 157 U\$/MWh, correspondiente al precio ponderado de los proyectos de CTB adjudicados en la provincia de Santa Fe en el marco de las convocatorias del programa RenovAr [3]-[4]-[5], el ingreso anual por energía generada es de 572.579 U\$/Año.

#### 3.4.2 Costo total de Inversión

El costo unitario de referencia de ejecución de la CTB, conforme al Artículo 7 de la Resolución 275-E/2017 del Ministerio de Energía y Minería de la Nación, es de 5.500.000 U\$/MW. El monto de inversión a amortizar es de 3.492.000 U\$.

#### 3.4.3 Costo de operación y mantenimiento

Los costos totales de operación y mantenimiento (O&M) de la central están representados en la Tabla 3 [10]. El costo total anual en O&M es de 190.785 U\$/Año.

Tabla 3 Costos de O&M de la CTB.

Tipo de Costo	Costo Unitario
Costos Fijos	42.000 [U\$/MW-Año]
Costos Variables	45 [U\$/MWh]

### 3.4.4 Amortización

Para el cálculo de amortización se consideran los siguientes datos financieros de referencia; una tasa de interés del 12%, un período de amortización de 10 años y un monto total a amortizar de 3.492.000 U\$S. Aplicando el sistema de amortización francés, la cuota anual es de 497.000 U\$S/Año. De esta forma se deberá pagar la misma cuota anual durante 10 años hasta lograr la cancelación total de la deuda asociada a la instalación de la central.

### 3.4.5 Flujo de Caja de Inversión

Los ingresos se dan en concepto de energía generada y los egresos abarcan la cuota anual de amortización, los costos fijos y los costos variables de O&M de la central. En la Figura 6 se muestra el flujo de caja acumulado asociado a la instalación de la nueva CTB.

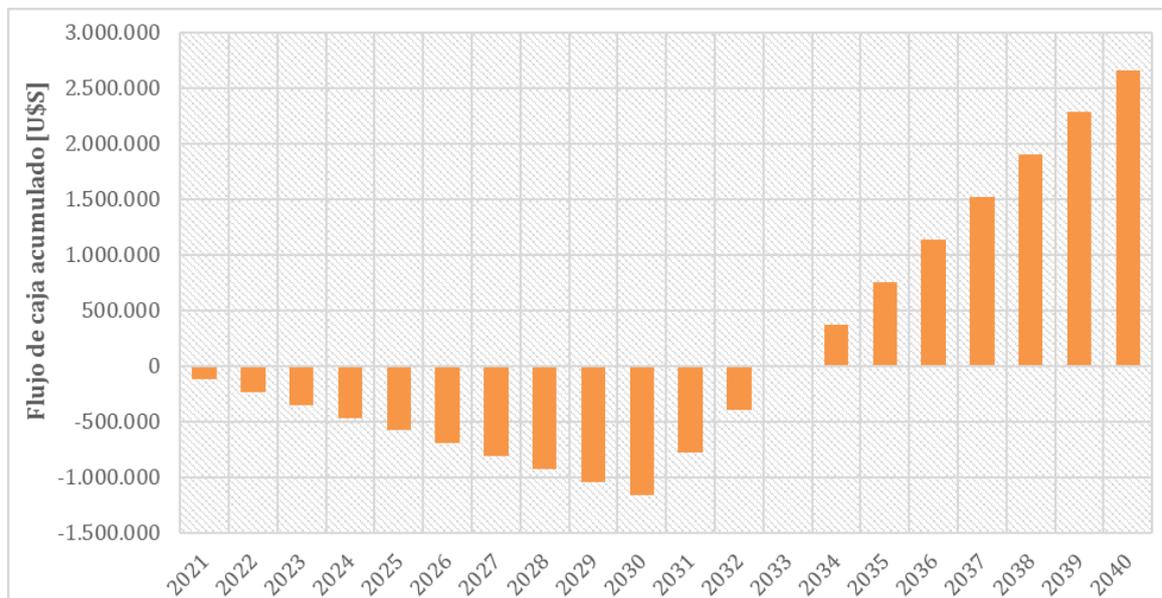


Figura 6 Flujo de Caja acumulado para el período de estudio

El flujo de fondos netos anuales es negativo durante todo el período de amortización. A partir del año 2031 y hasta la finalización de la vida útil de la central, el flujo de caja es positivo ya que las únicas erogaciones se dan en concepto de costos fijos y costos variables de O&M.

Analizando el flujo de caja acumulado, la instalación de la CTB presenta un payback de 11 años. El déficit se va incrementando durante el período de amortización, superando el millón de dólares en el año 2030. Una vez finalizado, el déficit comienza a reducirse y se mantiene hasta el año 2033. Al año siguiente, el flujo de caja acumulado comienza a ser positivo hasta el final de la vida útil de la central. El cash flow acumulado en el último año de vida útil de la central es de 2.662.235 U\$S.

### 3.4.6 Indicadores Económicos

Por medio de indicadores financieros, como el valor actual neto VAN y la inversión a valor presente (Ivp) se calcula el indicador VAN/Ivp, el cuál expresa la utilidad neta obtenida en el período de análisis considerado con relación al monto total efectivizado. Si el mismo da un valor positivo, el proyecto es rentable y crea valor en la empresa que lo lleva adelante y, si es negativo, no es rentable y destruye valor en la empresa. En la Tabla 4 se encuentran los indicadores económicos obtenidos aplicando una tasa de descuento del 7%, donde queda evidenciado que el proyecto de construcción de la CTB es poco rentable, dado principalmente por su indicador VAN/Ivp cercano a cero.

Tabla 4 Indicadores económicos de la instalación de la CTB.

VAN	IVP	VAN/IVP
41.781 USD	4.972.534 USD	0,008

Es importante mencionar que en el estudio económico solo se ha considerado los ingresos por energía eléctrica generada para solventar la totalidad de los gastos. La producción de energía térmica en el motogenerador y el biogás remanente podrían ser utilizados para la calefacción de una parte de los procesos industriales de la planta, resultando un ahorro en el uso de otros combustibles; además de producir biofertilizantes para uso agrícola que se pueden comercializar. Estos ingresos adicionales pueden resultar en un payback más bajo y en una mayor rentabilidad del proyecto.

### 3.5. Balance Energético

El balance energético es un conjunto de relaciones de equilibrio que permite cuantificar los flujos de energía desde su producción hasta su consumo final. La inyección de potencia de la nueva CTB a la red da como resultado una modificación en el balance energético. Sin el ingreso de esta nueva fuente de energía, la totalidad de la demanda, como así también las pérdidas globales de la red, son abastecidas únicamente desde la ET Crespo. Al vincular la CTB a la red de 33 kV desde el nodo del GU Tregar, se disponen de dos puntos de suministro, lo cual deriva en una modificación de la energía distribuida desde la ET Crespo, como así también en una variación de las pérdidas eléctricas globales.

En base al perfil de demanda horaria de la ET Crespo, se determina que la energía distribuida anualmente a la red en condiciones operativas normales es de 39.360,6 MWh/Año. Por otra parte, las pérdidas anuales de la red son de 1.280,55 MWh/Año.

Al conectarse la CTB en paralelo con la red de 33 kV, comienza a abastecer parcialmente la demanda del GU Tregar a través del nodo homónimo. Esto da como resultado una reducción de la energía anual suministrada desde la ET Crespo, tal como se indica en la Tabla 5.

Tabla 5 Energía anual suministrada desde la ET Crespo hacia la red de estudio

Sin Generación [MWh/año]	Con Generación [MWh/año]	
39360,60	Factor de potencia: 0,90 i	35652,98
	Factor de potencia: 0,85 i	35647,76

La reducción en la energía abastecida desde la ET Crespo se debe no sólo al abastecimiento parcial de la demanda de la industria láctea desde la CTB, sino también a causa de la reducción de las pérdidas globales de la red. Esto se debe a un uso menos intensivo del alimentador de 33 kV para el abastecimiento de la fábrica láctea, reduciéndose las corrientes de línea y por lo tanto las pérdidas.

Al incrementar la inyección de reactivo a la red, la componente inductiva de las corrientes de línea de los alimentadores se reduce dando como resultado una reducción adicional de las pérdidas, tal como se ilustra en la Figura 7.

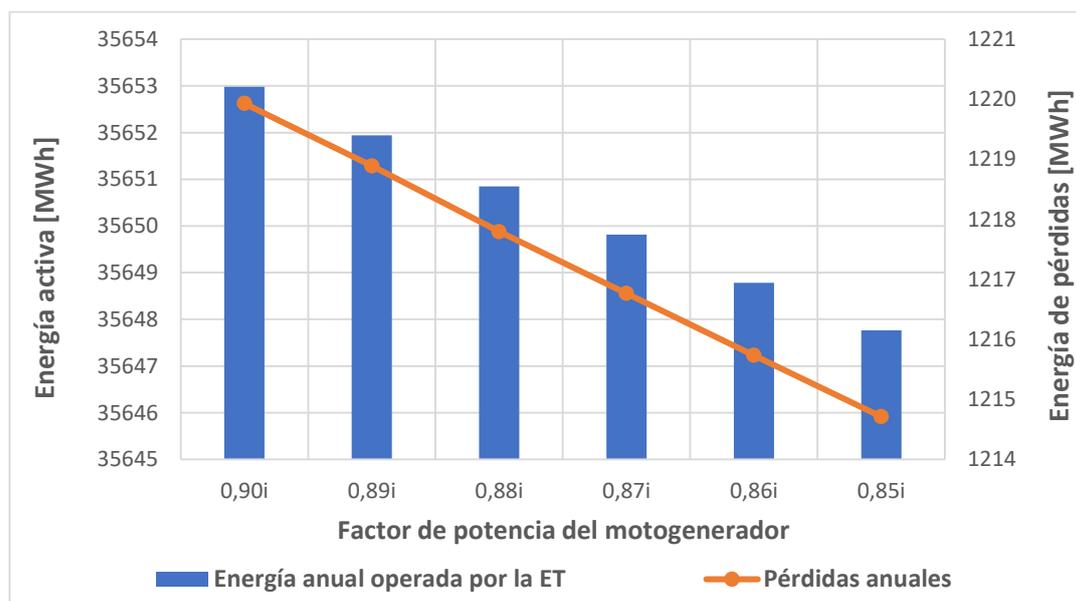


Figura 6 Pérdidas globales de energía en la red con el ingreso de la CTB

La energía anual abastecida desde la ET Crespo es de 3.712,84 MWh/Año con la CTB operando a plena carga y con un factor de potencia de 0,85 inductivo, lo cual representa una reducción de aproximadamente 9,4 % respecto de la energía anual suministrada sin el ingreso de generación. De los 3712,84 MWh/Año suministrados anualmente a la red, 65,84 MWh/Año corresponde a pérdidas eléctricas, representando una reducción de más del 5% respecto de las pérdidas globales sin el ingreso de generación renovable.

Al incrementar la potencia reactiva inyectada no se logran variaciones significativas en la energía suministrada por la ET Crespo y en las pérdidas.

En conclusión, la vinculación a la red de 33 kV de la CTB da como resultado la reducción de la energía total anual suministrada desde la ET Crespo a raíz del autoabastecimiento parcial de la demanda del GU Tregar y de la reducción de pérdidas de la red, lo que a su vez implica un menor costo operativo del alimentador de 33 kV que abastece la ER Crespo y la fábrica láctea.

#### 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se ha analizado la viabilidad técnica y económica del ingreso de una central de generación de energía de biogás a la red de subtransmisión de 33 kV considerando el potencial de los sustratos producidos en dos de las principales actividades agro-ganadera e industrial que se llevan a cabo en la región de estudio.

Si bien la potencia instalada de la central no resulta significativa, la evolución de los indicadores técnicos de la red a la cual se vincula la nueva generación presenta importantes beneficios técnicos, ya que al encontrarse la generación próxima a los puntos de consumo permite reducir la cargabilidad de las líneas de subtransmisión, lo que conlleva a una reducción de las pérdidas energéticas en la red, y contribuye a la fiabilidad y calidad del sistema eléctrico. Por otro lado, la incorporación de centrales de biogás promueve el aprovechamiento de fuentes de energías de tipo renovables, significando un importante beneficio medioambiental al reducir el potencial contaminante de los desechos orgánicos derivados de actividades industriales y agro-ganaderas. A pesar de presentar una baja rentabilidad y una tasa de retorno de once años, es posible mejorar su nivel de rentabilidad considerando los potenciales ingresos adicionales por producción de energía térmica y biofertilizantes.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] World Energy Council (2020). "Decoding New Signals of Change", *World Energy Issues Monitor*.
- [2] Markus Lauer (2020). "Economic assessment of biogas plants as a flexibility option in future electricity systems", ISSN: 2197-4632, Alemania.
- [3] Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2016). "Resolución N° 106-2016: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 1".
- [4] Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017). "Resolución N° 252-2016: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 1.5".
- [5] Ministerio de Energía y Minería de la Nación (2017). "Resolución N° 275-2017: Convocatoria Programa RenovAr Ronda 2".
- [6] German Agency for Technical Cooperation (2003). "Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe". *CEPAL*, Chile.
- [7] Secretaría de Agroindustria (2019). "Guía Teórico Práctica Sobre el Biogás y los Biodigestores". *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires*, Argentina.
- [8] Erica Schmidth (2013). "Caracterización y Tratamiento de Efluentes Líquidos de la Industria Láctea". *Instituto Nacional de Tecnología Industrial*, Argentina.
- [9] Dirección de Sustentabilidad, Medio Ambiente y Cambio Climático (2017). "Manual de Biogas: Conceptos Básicos. Beneficios de su producción y aplicación de sus sub-productos". Buenos Aires, Argentina.
- [10] "Sabino Mastrangelo, Economía en Sistemas de Potencia y Manejo de Activos. Postgrado de Especialización en Energía Eléctrica, Mención Generación, Mención Transmisión y Distribución, 2017"

# ANÁLISIS DE METODOLOGÍA DE RECUPERACIÓN DE MÓDULOS SOLARES FV DAÑADOS EN PARQUES SOLARES

Rojo, Jeremías <sup>a</sup>, Speroni, Alejandro <sup>a</sup>.

a Universidad Siglo 21  
rojojeremias@gmail.com

## RESUMEN

El presente análisis tiene como objetivo describir la metodología utilizada para evaluar la reutilización de módulos solares fotovoltaicos dañados durante la fase de construcción de un parque solar. En esta etapa los módulos solares pueden presentar diversos daños físicos (rotura de vidrio superior, marcos, cables, conectores, etc.) o daños eléctricos internos (puntos calientes, celdas dañadas, corto circuito, entre otros). Generalmente estos módulos son descartados debido a que los niveles de exigencia respecto a la generación de energía son muy elevados, siendo inviable su utilización y fomentando el recambio de los mismos. En la mayoría de las construcciones de parques solares antes de comenzar con el montaje de los módulos se realizan ensayos de electroluminiscencia, en donde se descartan los módulos que cuentan con celdas dañadas. Luego, una vez instalados los módulos aprobados se realiza un trazado de curvas I-V, y en caso de que alguno de los módulos presente algún tipo de falla, también es descartado. Este tipo de práctica de control de calidad en la mayoría de los casos genera que una parte importante de módulos queden separados o fuera de uso. Sumado a esto, también se contabilizan los dispositivos que son dañados físicamente durante el montaje en sus respectivas estructuras de soporte, ya sea por errores en la manipulación o por efecto de algún evento climático/meteorológico (rafagas de viento de alta velocidad durante el momento del montaje o posibles tormentas).

**Palabras clave:** módulos solares fotovoltaicos, reutilización, energía solar fotovoltaica, vida útil.

**Área temática:** Energía y Medio Ambiente. Desafíos para las ciudades.

**Categoría del trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. Introducción:

A continuación se pretende resolver un problema ambiental, social y económico que afecta actualmente a las empresas desarrollistas de parques solares, debido a que los módulos fotovoltaicos dañados durante las fases de construcción, operación y mantenimiento actualmente no tienen un destino final ambientalmente correcto. En la mayoría de los casos estos dispositivos se encuentran en almacenes sin poder ser utilizados y sin finalidad alguna. Mediante una novedosa metodología se espera extender la vida útil de los módulos dañados y generar energía eléctrica renovable a partir de un elemento que no está cumpliendo con su función principal.

Si bien las energías renovables son una forma de generar energía con un menor impacto ambiental, actualmente no existe una solución precisa sobre qué hacer con los módulos solares descartados por las empresas desarrolladoras de parques solares o instalaciones solares de baja potencia. Por ello, este trabajo intenta dar respuesta al problema evaluando la reutilización de los dispositivos y aplicando un proceso de reconstitución que permita a los mismos ser reutilizados en instalaciones con menores niveles de exigencia en cuanto a generación eléctrica se refiere. En el documento se exponen los resultados de ensayos realizados a módulos dañados durante el proceso de construcción de un parque solar, y que fueron sometidos a un tratamiento físico permitiendo su reutilización.

### 1.1 Proceso de recuperación de módulos FV con vidrio superior roto:

Para realizar el ensayo, inicialmente se seleccionaron cuatro módulos fotovoltaicos marca Jetion de 330 Wp de potencia, que presentaban daños en el vidrio superior y por lo cual no podían ser utilizados en el parque solar donde se llevó a cabo la investigación. Este es un tipo de daño frecuente durante el proceso de construcción de parques solares ya que los módulos suelen caerse o golpearse durante la etapa de montaje.

#### 1.1.1 Acondicionamiento de los módulos FV:

Antes de comenzar con el tratamiento físico de recuperación a los dispositivos seleccionados se les retiró la tierra y suciedad usando medios físicos (aire comprimido y franelas), como también químicos, empleando una solución concentrada agua - detergente al 0.56% (V/V) y secándolos posteriormente con una franela absorbente. Procurando no generar mayores daños sobre los módulos se evitó el uso excesivo de agua. Para finalizar el proceso de limpieza se utilizó producto limpia cristal eliminando cualquier película de grasa o micro polvo que pudiera haber quedado en etapas anteriores, garantizando óptimos resultados en el trazado de curvas I-V, y una buena adherencia de la pintura que se aplicó posteriormente a los módulos. El proceso de limpieza no requirió de enjuagues, ya que no dejó rastros, secándose rápidamente a temperatura ambiente. Previo al inicio del proceso físico de recuperación se identificó a cada módulo con una numeración binaria, acompañada del n° de serie del dispositivo e identificando el tipo de pintura que se le aplicaría tal como se detalla en la **tabla 1**.

#### 1.1.2 Primer trazado de curvas I-V:

Una vez limpios los módulos, y antes de recibir la capa de pintura protectora se hizo el trazado de curvas I-V con un equipo marca HT, modelo I-V 500W, con el objetivo de hacer futuras comparaciones entre los valores de potencia arrojados por los módulos antes y después de ser pintados. Las mediciones preliminares de este primer trazado se realizaron a las 13:00 hs, contando con óptimas condiciones meteorológicas y un nivel de irradiancia mayor a 800 W/m<sup>2</sup>. Los primeros resultados de curvas I-V arrojaron que los módulos con fallas físicas contaban con una pérdida de potencia eléctrica de entre -40% a -60% respecto a los valores (STC) definidos por el fabricante del módulo. Los resultados obtenidos se detallan en las **tablas 2, 3 y 4**. En la **tabla 2** se presentan los parámetros característicos de los módulos solares FV extrapolados a condiciones nominales de operación (1000W/m<sup>2</sup> y 25°C), de esta manera es posible comparar la potencia máxima entregada por cada módulo vs. la potencia máxima teórica indicada por el fabricante como se indica en la columna **ΔPmax[%]**. En este punto la potencia de los cuatro módulos medidos durante esta fase varía de -60.69% a -43.40%, dependiendo dicha variación y en mayor medida del tipo y gravedad de las fallas presentadas. En la **tabla 3** se visualizan los parámetros característicos de los módulos FV en condiciones estándar (STC) y definidas por el fabricante en cada data sheet. Por último, en la **tabla 4** se presentan los parámetros bajo condiciones de operación (OPC), es decir niveles de irradiancia y temperatura al momento en que se realizó la medición.

### 1.1.3 Preparación de pinturas y cristales testigo:

Durante esta etapa se prepararon las distintas pinturas que se aplicaron a la superficie del vidrio superior de los módulos solares seleccionados. Se trabajó con tres tipos de pinturas químicamente diferentes para estudiar su comportamiento, buscando la impermeabilización y protección de los módulos bajo efectos de la intemperie y permitiendo una buena absorción lumínica en el espectro de luz visible. Las pinturas utilizadas fueron: poliuretánica transparente con catalizador (código: PO 555), epóxica transparente con catalizador (código: IP 335) y acrílica semi transparente (código: CB 3020). Con la ayuda de un sensor de irradiancia y con el objeto de medir la pérdida de irradiancia que generaría el uso de las pinturas sobre la superficie de los módulos, primero se seleccionaron cuatro cristales testigo de iguales dimensiones (25 x 25 cm) y características fisicoquímicas, y se preparó 1 cristal sin pintar y 3 cristales pintados (con una pintura diferente cada uno). Acto seguido, se posicionó el cristal no pintado sobre el sensor de irradiancia comparando el resultado de irradiancia obtenido vs. los resultados obtenidos al colocar sobre el sensor de irradiancia los demás cristales, incluyendo la medición de irradiancia sin posicionar ningún cristal sobre el sensor. En la **tabla 5** se muestran los resultados finales y se concluye que, si bien todos los cristales testigo disminuyen los valores de irradiancia (inclusive el cristal testigo sin pintar), los cristales pintados con pinturas (IP 3020) y (PO 555) no presentaron pérdidas en la absorción de luz vs. el cristal sin pintar, por lo tanto en este caso se observó que la pintura no afecta a los valores de irradiancia.

### 1.1.4 Pintado y secado de los módulos solares fotovoltaicos:

En primer lugar y antes de comenzar, los módulos se apoyaron en una base fija manteniéndose en una posición horizontal a 0°. La metodología de pintado fue relativamente sencilla y consistió en verter pequeñas porciones de pintura en la cara frontal (vidrio superior) de los dispositivos, que luego eran esparcidas con la ayuda de espátulas de plástico buscando generar fuerzas de sobrepresión sobre las fisuras del panel y obteniendo una mayor adherencia del producto. Cabe aclarar que para esta ocasión todo el proceso se realizó en una sola capa de pintura. Una vez tratado cada módulo con su respectiva pintura, los mismos fueron llevados a la cámara de secado, que consistió en un contenedor limpio y seco a temperatura ambiente, y donde no existían corrientes de viento que podían llegar a contaminar la pintura fresca. En ese lugar los módulos se mantuvieron durante aproximadamente 15 horas mientras se curaban.

### 1.1.4 Segundo trazado bajo curvas I-V final:

Una vez secos los módulos, se realizó un nuevo trazado de curvas I-V con el fin de conocer de que manera la aplicación de las diferentes pinturas utilizadas en los módulos modificaba la capacidad de generación eléctrica. Para ello se analizaron las curvas I-V de los cuatro módulos estudiados y se determinó la potencia entregada por cada uno. Los valores obtenidos se observan en la **tabla 6**, y en la **figura 1** se detalla el trazado correspondiente al módulo n° 76 (PAg45400D01C19) luego de realizarse el tratamiento.

## 1. ECUACIONES, FIGURAS Y TABLAS:

Tabla 1: identificación del tipo de pintura aplicada a cada módulo.

Tipo de pintura	Identificación del módulo	
CB 3020 (Acrílica)	75 (PAg68420D01C19)	
PO 555 (Poliuretánica)	74 (PAg12010D02A19)	76 (PAg45400D01C19)
IP 335 (Epóxica)	73 (PAg39891M02A19)	

Tabla 2: resultados del trazado de curvas I-V con extrapolación a condiciones estándar (STC).

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Impp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	FF [%]	ΔPmax [%]
73 STC	172,98	43.82	36.44	4.75	6.3	1000	63	-47.50
74 STC	186.48	44.88	35.69	5.23	8.43	1000	49	-43.40
75 STC	177.69	42.84	33.93	5.24	7.16	1000	58	-46.07
76 STC	129.53	43.35	36.12	3.59	5.62	1000	53	-60.69

Tabla 3: parámetros nominales (STC) para un módulo JETION 330Wp.

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Impp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	FF [%]
Nominal (STC)	330	45.70	37.30	8.89	9.35	1000	78

Tabla 4: resultado del trazado de curvas I-V en condiciones de operación (OPC).

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Impp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	FF [%]
73 OPC	156.63	43.87	36.75	4.26	5.71	898	62
74 OPC	156.85	44.70	36.04	4.35	7.22	833	49
75 OPC	156.11	42.80	34.28	4.55	6.35	870	57
76 OPC	111.10	43.31	36.34	3.06	4.98	853	51

Tabla 5: valores de irradiancia medidos en cristales testigo pintados y no pintados.

Tipo de pintura	Cristal sin pintar [W/m <sup>2</sup> ]	Cristal pintado [W/m <sup>2</sup> ]	Sin cristal [W/m <sup>2</sup> ]
IP 3020 (Epóxica)	600	600	700
CB 3020 (Acrílica)	600	530	700
PO 555 (Poliuretánica)	640	640	740

Tabla 6: resultados del trazado curvas I-V post-tratamiento.

Módulo	Pmax (W)	Voc (V)	Vmpp (V)	Impp (A)	Isc (A)	Irradiancia [W/m <sup>2</sup> ]	FF [%]	ΔPmax [%]
73 STC	176.63	45.58	39.06	4.52	6.25	1000	62	-46.39
74 STC	177.60	45.61	37.69	4.71	7.78	1000	50	-46.10
75 STC	180.94	41.85	33.91	5.34	7.05	1000	61	-45.08
76 STC	152.96	44.80	37.75	4.05	5.79	1000	59	-53.57

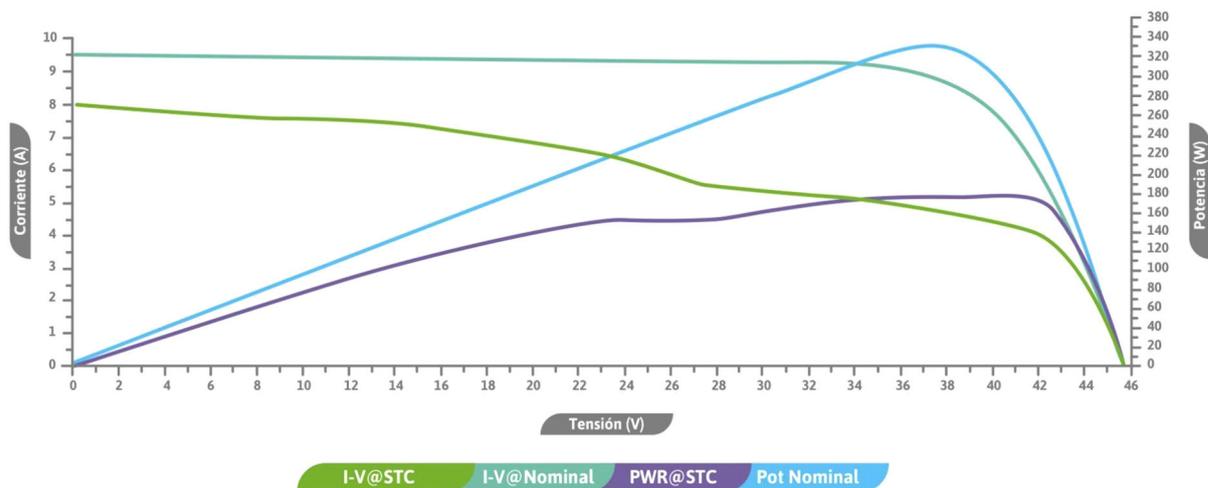


Figura 1: trazado de curvas I-V finalizado el tratamiento del módulo n° 76 (PAg45400D01C19).

### 3. CONCLUSIONES:

Las pruebas demostraron que tanto la pintura epoxi como la poliuretánica no limitan los niveles de irradiancia como sí sucede con la pintura de tipo acrílica, y que durante las mediciones presentó una disminución en los niveles de irradiancia sobre el cristal testigo. Con respecto a los resultados obtenidos en las mediciones de curvas I-V, y comparando los valores obtenidos antes y después de tratar los módulos, se concluye que las diferencias de  $\Delta P_{max}$  (variación de potencia máxima) en las mediciones no presentaron grandes modificaciones. Salvo en el caso del módulo n° 76 que pasó de tener una variación de potencia máxima de -60.69% a -53.57%. Es importante mencionar que el instrumento trazador de curvas I-V lo que hace es comparar la potencia máxima medida en (OPC) vs. la potencia máxima que indica el fabricante (STC). Si bien en todos los módulos medidos la caída de potencia nominal (STC) es mayor al 40%, también hay que destacar que en mediciones realizadas a módulos sin ningún daño se detectó una pérdida de potencia de alrededor del 13%, y que se debe considerar dentro de la caída total de potencia  $\Delta P_{max}$ . Teniendo en cuenta los valores obtenidos se concluye que tanto la pintura del tipo epoxi como la poliuretánica pueden aplicarse en los módulos con vidrio superior dañado, ya que no afecta de ninguna manera los valores de irradiancia, y como consecuencia los de potencia eléctrica. A su vez el tratamiento con este tipo de pinturas permite generar una capa impermeable que sella de forma definitiva las roturas y fisuras del vidrio superior, permitiendo que los módulos fotovoltaicos puedan ser reutilizados en instalaciones que requieran menores valores de potencia, por ejemplo: instalaciones de baja potencia.

### 4. REFERENCIAS:

- [1] González Cano, M; Moretón, A. (2020). "Estudio económico de la reutilización de paneles solares en pequeñas instalaciones fotovoltaicas". XVII Congreso Ibérico y XIII Congreso Iberoamericano de Energía Solar. España.
- [2] Reguera Gil, Francisco Jesús. (2015). "Análisis de la degradación de módulos fotovoltaicos". Edición electrónica. 978-84-7993-682-2. Editorial. Universidad Internacional de Andalucía.
- [3] Juan Pablo Romero Campos. (2019). "Análisis ciclo de vida y económico aplicado a la reutilización y reciclaje de paneles solares fotovoltaicos". Santiago de Chile.

# INCORPORACIÓN DE RESIDUOS DE UN TIPO DE CATALIZADOR EN MATRICES CEMENTICEAS

Peralta Ring, Rocío<sup>a</sup>, Delbianco, Natalia<sup>b</sup> y Priano, Carla<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Dep. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, 8000, Bahía Blanca,*

<sup>b</sup> *Becaria doctoral CONICET, 8000, Bahía Blanca, Argentina.  
rocio.peralta@uns.edu.ar*

## RESUMEN

Los catalizadores son desechos obtenidos de la industria del petróleo, detectados en un relevamiento de residuos industriales realizado en la ciudad de Bahía Blanca. Este material es utilizado en el proceso de craqueo catalítico en lecho fluido, para convertir las fracciones del crudo de petróleo de alto grado de ebullición en combustible y otros productos. El objetivo de este trabajo es analizar la factibilidad de reciclar un tipo de catalizador mediante su incorporación, como reemplazo del cemento, en matrices cementiceas. Se realizó su caracterización mediante un ensayo de distribución del tamaño de partículas, determinación de la densidad absoluta, y difracción de rayos X. Además, se evaluaron las resistencias a compresión de morteros, incorporando el catalizador como reemplazo parcial del cemento en distintos porcentajes (0, 15 y 25%). Se encontró que este residuo tiene una interesante potencialidad de uso para ser incorporado en matrices cementiceas, como paso previo al estudio en hormigón.

**Palabras Claves:** Residuos, Catalizadores, Morteros cementiceos.

**Área Temática:** Arquitectura ambientalmente consciente. Edificación sustentable

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

El aumento y la diversificación de la actividad industrial no permiten la asimilación por parte de la naturaleza de los residuos que se generan, convirtiéndose en una seria amenaza para el ambiente. La gestión de residuos industriales constituye uno de los principales problemas de los países desarrollados.

La ciudad de Bahía Blanca se caracteriza por tener un preponderante polo petroquímico, integrado por diversas industrias que concentran el 64% de la producción nacional [1]. Los diferentes procesos de las fábricas que se encuentran en la ciudad generan desechos, de los cuales la gran mayoría son enviados a rellenos sanitarios comunes o en caso de ser considerados peligrosos, se los disponen en rellenos de seguridad.

Una posible solución, para la disposición final de los residuos generados en diferentes industrias, consiste en la estabilización dentro de una matriz estructural. El residuo es químicamente estabilizado y físicamente modificado en una matriz sólida de baja permeabilidad, reduciéndose la lixiviación de sus constituyentes peligrosos al medio [2].

Una de las principales consecuencias de la industria petrolera se basa en el gran impacto ambiental que provoca debido a los residuos generados. La contaminación de suelos y la utilización de catalizadores en las etapas de craqueo catalítico representan un serio problema ambiental a nivel mundial [3]. El uso de catalizadores en los procesos para convertir las fracciones del crudo de petróleo de alto grado de ebullición en combustible y otros productos, se ha extendido durante los últimos años a muchas plantas petroquímicas [4]. Este material se ha utilizado ampliamente en las refinerías de petróleo y las industrias petroquímicas, y se produce una cantidad significativa de desechos al finalizar su vida útil [5]. Se usan en los procesos petroquímicos de desintegración, reformación de combustible, hidrotratamientos, hidrogenación, oxidación, alquilación e isomerización, entre otros.

Los catalizadores, dada su composición química (aluminosilicatos), pueden utilizarse como adición en el hormigón [6]. En los últimos años ha crecido el interés por la utilización de los catalizadores gastados como material de construcción debido a su posible efecto puzolánico, por lo que se está investigando en este ámbito.

Los materiales puzolánicos, que por sí solos no presentan actividad cementante, en presencia de agua y finamente molidos pueden reaccionar con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente, para formar compuestos con propiedades cementantes. Las mejoras más significativas que se consiguen con la inclusión de puzolanas en morteros y hormigones, son el aumento de las resistencias mecánicas a largo plazo y la mejora en la durabilidad frente al ataque de ciertos químicos. Ello es debido a la reducción de la permeabilidad, como consecuencia de la ubicación en los poros de la matriz cementicia, de los productos provenientes de la reacción puzolánica [7]. Físicamente, estos materiales actúan como filler al mejorar la interfaz de partículas de pasta de cemento-agregado y forman una microestructura más densa y homogénea en la zona de transición. Químicamente, experimentan la puzolanicidad al reaccionar con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) en el sistema cementante y aceleran la hidratación del cemento. Cuanto más finas y vítreas son las puzolanas, más rápida es su reacción con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Por lo tanto, los hormigones y morteros que incorporan estos materiales muestran una mayor resistencia a la compresión y durabilidad [8].

Estudios realizados con catalizadores usados de craqueo catalítico han puesto de manifiesto su comportamiento como una puzolana muy activa debido a sus características fisicoquímicas y composición silico-aluminosa. Incorporados como un componente más del hormigón, como forma de deposición final, pueden reemplazar a parte del cemento y hasta mejorar varias de las propiedades del hormigón [9,10]. No obstante, la característica específica de esta puzolana, que la diferencia de otras más conocidas, es su elevada reactividad a tiempos cortos [11].

La reutilización de catalizadores consumidos de unidades de craqueo catalítico como materiales puzolánicos en la producción de cemento y hormigón ofrece una serie de beneficios importantes [12]. Se ha examinado la naturaleza puzolánica de este material mediante técnicas térmicas y espectroscópicas y se demostró que su capacidad para reaccionar con el hidróxido de calcio es similar a la de la sílice [13]. Un estudio de viabilidad de la reutilización del catalizador de desecho indica que la adición puede sustituir hasta un 15-20% del cemento o un 10% del árido fino sin modificar la calidad de los morteros [14]. Otros trabajos indican que la utilización de este residuo como adición no afecta las propiedades mecánicas y de trabajabilidad, cuando se utiliza un 5% de reemplazo con respecto al peso del cemento [15]. El uso de distintos catalizadores con un tamaño de partícula más fino, presentan un mejor efecto filler y una mejora en la actividad puzolánica [16]. Las puzolanas convencionales se comportan como inertes para cortos tiempos de curado, dado que la reacción de fijación del hidróxido de calcio por la puzolana es lenta, en el caso de los catalizadores, la reacción es muy rápida, produciendo un aumento de las resistencias mecánicas a tiempos cortos de curado [17].

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento de morteros cementicios con incorporación de un catalizador como adición, a edades tempranas. El catalizador desechado fue obtenido de una empresa petroquímica en un relevamiento de residuos industriales de la localidad

de Bahía Blanca. Estas investigaciones son necesarias para posteriormente, evaluar el comportamiento de morteros y hormigones con este desecho a corto y largo plazo.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la primera etapa de trabajo, se caracterizó el catalizador (C), obtenido de una empresa petrolera en un relevamiento en la ciudad de Bahía Blanca.

En la industria petroquímica relevada se utiliza el C para el craqueo en lecho fluido, el cual permite obtener de una determinada cantidad de petróleo crudo, fracciones de combustible dos veces mayor que la extraída por destilación. Este material, una vez cumplida su vida útil, es desechado a una empresa encargada de la gestión de residuos de la localidad.

En esta instancia, se decidió caracterizar el material e incorporarlo como reemplazo parcial del cemento en morteros cementicios.

Se realizó un ensayo granulométrico para determinar las fracciones porcentuales en peso de partículas entre  $0,01 \mu\text{m}$  y  $300 \mu\text{m}$  mediante un sedígrafo Micromeritics, Sedi-Graph 5000, determinación de la densidad absoluta según Norma IRAM 1624 [18] y difracción de rayos X mediante un Difractómetro Rigaku D-Max III C, con radiación de Cu K $\alpha$  y monocromador de grafito a 35 Kv y 15 mA.

Una vez caracterizado el C (Figura 1), se decidió utilizarlo como reemplazo del cemento en morteros cementicios. Para la elaboración de las mezclas se utilizó agua desmineralizada (para mezclado y curado), cemento proveniente de una fábrica de la provincia de Buenos Aires, caratulado como portland normal CPN40 de densidad  $3,09 \text{ g/cm}^3$  y como agregado fino, una arena natural cuarcítica. El C fue incorporado en dos proporciones diferentes de reemplazo: 15% (C<sub>15</sub>) y 25% (C<sub>25</sub>), respecto al peso del cemento, para comparar resultados con una muestra de referencia, sin incorporación del residuo (PC).

Se dosificaron morteros con relación agua/material cementicio de 0,50 en peso. Se moldearon 3 juegos de 3 probetas prismáticas de 4x4x16 cm para cada uno de los reemplazos del C. Las mezclas se realizaron con 1350g de arena, 225ml de agua y 450g de material cementicio con el correspondiente porcentaje de reemplazo del C.

Se evaluó la fluidez en las mezclas frescas, siguiendo lo establecido en la Norma IRAM 1634 [19]. Para evaluar el desempeño mecánico de los morteros cementicios, se realizaron ensayos de resistencia a compresión, según la metodología indicada en la norma IRAM 1622 [20], a la edad de 7 y 28 días.



Figura 1. Catalizador

Se determinó el índice de actividad puzolánica (IAP), como el cociente entre la resistencia a compresión del mortero de cemento con el C y la del mortero control (UNE-EN 450-1). La norma UNE-EN 450-1 [21] especificada para cenizas volantes y con una sustitución del 25% del cemento portland, propone que una adición mineral se comporta como puzolana cuando el IAP es superior a 75% a los 28 días y a 85% a los 90 días.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Densidad absoluta

El resultado de la determinación de densidad absoluta del C fue de 1,67. Se observa que es significativamente menor respecto al cemento portland utilizado en las muestras.

Este parámetro es de gran importancia para realizar las diferentes dosificaciones de los morteros y hormigones, en una instancia posterior.

### 3.2 Tamaños de partículas

La finura es una propiedad fundamental del cemento y debe controlarse cuidadosamente, dado que ejerce gran influencia sobre la velocidad de hidratación y desarrollo de resistencia del

cemento. Por esta razón, se realizó un ensayo granulométrico mediante sedígrafo y se determinaron los tamaños de las partículas del C.

A partir del análisis granulométrico de una muestra representativa del catalizador (Figura 2), se determinó que el mayor porcentaje de partículas tiene un tamaño nominal entre 30 y 100  $\mu\text{m}$ .

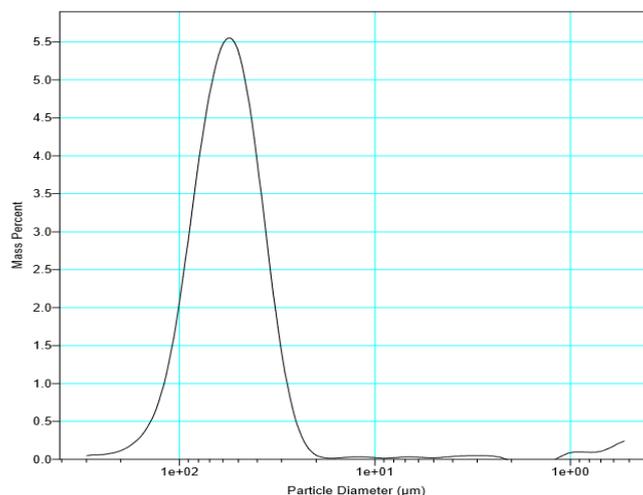


Figura 2. Distribución de tamaños

### 3.3 Rayos X.

En la Figura 3, se muestra el espectro obtenido mediante difracción de rayos X del catalizador. Se observa una estructura cristalina, aunque con gran cantidad de material amorfo evidenciado entre los  $20^\circ$  y  $30^\circ$ , coincidente a una faujasita (subgrupo de zeolita) compuesta por aluminio y sílice.

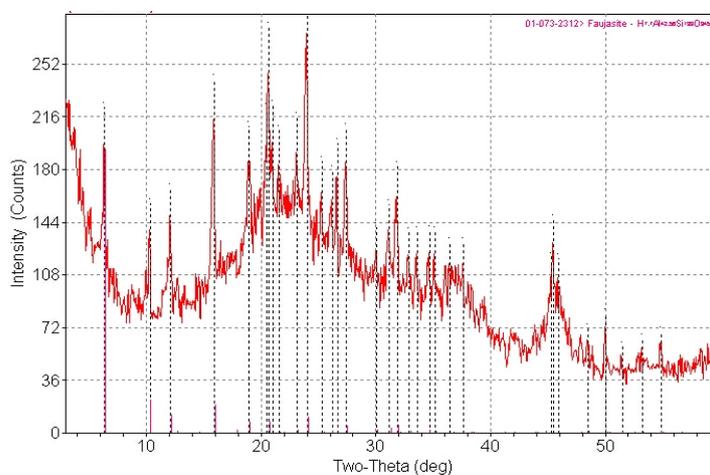


Figura 3. Espectrometría de Rayos X

### 3.4 Fluidez.

La Figura 4 muestra los valores de fluidez de los morteros, una vez finalizado el mezclado. Se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de C incorporado en los morteros, se verifica un menor extendido de las mezclas. El mortero elaborado con un 25% de C fue el que registró una mayor pérdida de fluidez con respecto a la muestra patrón (75%).

El C tiene una densidad muy inferior a la del cemento y el reemplazo utilizado es en peso. Por lo tanto, el volumen que ocupa el residuo incorporado respecto al cemento que reemplaza, es mayor y además, se incrementa el número de partículas que se agregan. En consecuencia, la cantidad de partículas a humedecer es mayor y menor el agua disponible para favorecer la fluidez. Este fenómeno podría explicar la disminución registrada en la fluidez de las mezclas a medida que se incrementa el porcentaje de C en reemplazo del cemento.

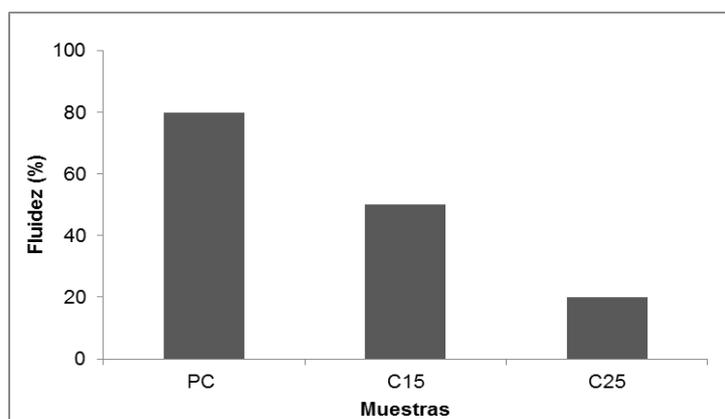


Figura 4. Fluidez de las muestras

### 3.5 Resistencias a compresión.

Se realizó el ensayo de resistencia a compresión a 7 y 28 días de edad, sobre las barras de mortero elaboradas. Las probetas de 4x4x16 cm se dividieron en tres partes iguales para la realización del ensayo a las diferentes edades (Figura 5). En la Figura 6, se representan las resistencias de todas las mezclas para las dos edades ensayadas. Se observa que a medida que el porcentaje de incorporación del C es mayor, las resistencias disminuyen. Para los dos porcentajes de reemplazo estudiados (15% y 25%), las pérdidas de resistencia a los 7 días de edad son del 24,2% y 49,8%. A los 28 días de edad, las mermas son del 15,6% y 47,5%, respectivamente.

Para el reemplazo del 15% y 25% de C, el IAP a los 28 días resultó de 84% y 53%, respectivamente. En el caso de las muestras C<sub>15</sub>, el IAP es superior a 75% a los 28 días de edad. Se puede observar que, si bien se registra una pérdida de resistencia en los morteros con menor contenido de clinker, ésta se va reduciendo con la edad. Además, el IAP de las muestras C<sub>15</sub> indica que este residuo podría comportarse como como puzolana (Figura 7). Teniendo en cuenta este comportamiento en morteros, es fundamental evaluar la resistencia a 56 y 90 días, sobre todo en las muestras con la incorporación del 15% de C, ya que no se registró una reacción rápida a corto plazo.



Figura 5. Barras de mortero fraccionadas

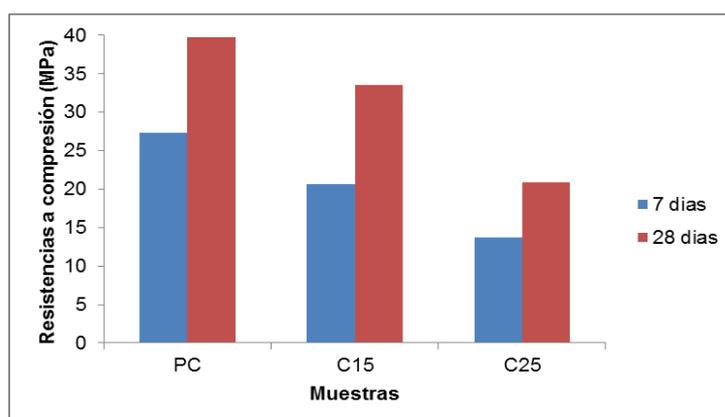


Figura 6. Resistencias a compresión

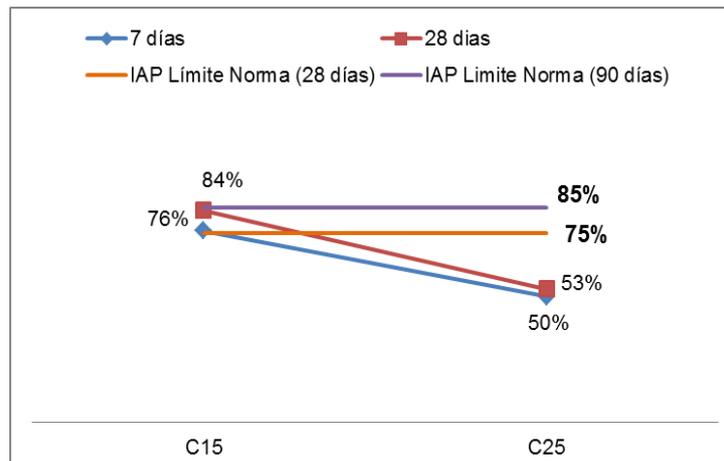


Figura 7. Valores IAP

#### 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo de investigación se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El reemplazo de cemento por el catalizador afectó significativamente las características y propiedades de las mezclas cementicias analizadas.
- La incorporación del catalizador genera una disminución importante en la fluidez de las mezclas de morteros, con ellos elaboradas.
- El reemplazo de cemento por el catalizador en 15% y 25%, afecta significativamente las resistencias a compresión en las primeras edades, reduciéndose dicha merma con el paso del tiempo para el porcentaje del 15% de reemplazo. Es necesario evaluar el comportamiento de las muestras a largo plazo para establecer el posible efecto puzolánico del C.
- Se debería complementar con estudios de la evolución de los productos de hidratación para verificar que el residuo incorporado desarrolle efectivamente una actividad puzolánica y no esté actuando como una adición inerte, en la cual sus partículas funcionen como centros de nucleación favoreciendo el crecimiento de los productos de hidratación del material cementicio al cual fue incorporado.
- Como trabajo futuro se realizará el ensayo de lixiviados de las aguas de curado. El resultado determinará si la incorporación del C en mezclas cementicias puede resultar una alternativa posible, para realizar la disposición final de un desecho sin afectar al ambiente.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] Artopoulos, A. (2016). *Bahía Blanca: ciudad del nuevo desarrollo. Ciudades inteligentes el aporte de las tic a la comunidad*, Editorial Autores de Argentina. Buenos Aires.
- [2] Malviya, R.; Chaudhary R. (2006). "Factors affecting hazardous waste solidification/stabilization: a review". *Journal Hazardous Materials*. 137, 267-76.
- [3] Khosravi, E.; Ghasemzadeh, H.; Sabour, M. (2013). "Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite". *Engineering Geology*. 166, 11–16.
- [4] Payá J.; Borrachero, M. V.; Monzó, J.; Soriano, L. (2009). "Estudio del comportamiento de diversos residuos de catalizadores de craqueo catalítico (FCC) en cemento Portland". *Materiales de Construcción* 59, 296, 37-52.
- [5] Nan, S.; Hung-Yuan, F.; Zong-Huei, C.; FuShung L. (2000). "Reuse of waste catalysts from petrochemical industries for cement substitution". *Cement and Concrete Research* 3, 1773-1783.
- [6] Neves, R.; Vicente, C.; Castela, A.; Montemor, M.F. (2015). "Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst". *Cement & Concrete Composites* 55, 308–314.
- [7] Hosseini, P.; Moradian, M.; Esmaili, A. H.; Ghorbani, M.; Shekarchi, M.; Sharifi, E. (2017). "Performance of pozzolanic admixtures on mechanical and durability properties of concrete." *2nd International conference on Microstructural-related Durability of Cementitious Composites*. Amsterdam, Países Bajos.
- [8] Ferella, F.; Innocenzi, V.; Maggiore, F.. (2016): "Oil refining spent catalysts: a review of possible recycling technologies." *Resources, Conservation and Recycling* 108, 10-20.
- [9] Neves, R.; Vicente, C.; Castela, A.; Montemor, M. F. (2015). "Durability performance of concrete incorporating spent fluid cracking catalyst." *Cement and Concrete Composites* 55, 308-314.

- [10] Soriano, L.; Payá, J.; Monzó, J.; Borrachero, M. V.; Tashima, M. M. (2016). "High strength mortars using ordinary Portland cement–fly ash–fluid catalytic cracking catalyst residue ternary system (OPC/FA/FCC)." *Construction and Building Materials* 106, 228-235.
- [11] Jung-Hsiu W.; Wan-Lung W.; Kung-Chung H. (2003). "The effect of waste oil-cracking catalyst on the compressive strength of cement pastes and mortars". *Cement and Concrete Research* 33, 245–253.
- [12] Allahverdi, A.; Shahrababaki, M. N.; Ghezelasheghi, M. Mahinroosta, M. (2019). "Sulfate resistance of RFCC spent catalyst-blended Portland cement". *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio* 58, 103-114.
- [13] Pacewska B.; Wilinska I.; Kubissa J. (1998). "Use of spent catalyst from catalytic cracking in fluidized bed as a new concrete additive". *Thermochim* 322 (2), 175–181.
- [14] Su, N.; Chen Z.H.; Fang H.Y. (2001). "Reuse of spent catalysts as fine aggregate in cement mortar". *Cement Concrete Composite* 23 (1), 111–118.
- [15] Yongqi Da, T.; Minhao Wang, C. S.; Rongsheng Xu, R. Y. (2020). "The effect of spent petroleum catalyst powders on the multiple properties in blended cement". *Cement and Concrete Research* 231, 117–203.
- [16] Hsiu Lian, C.; Yun Sheng, T.; Kung Chung, H. (2004). "Spent FCC catalyst as a pozzolanic material for high performance mortars". *Cement and Concrete Research* 26, 657-664.
- [17] Borrachero, M.V.; Monzó, J.; Payá J.; Peris-Mora E.; Vunda C.; Velázquez S., Soriano L. (2002). "El catalizador gastado de craqueo catalítico adicionado al cemento portland: las primeras 48 horas de curado y la evolución de la resistencia mecánica". *VIII Congreso Nacional de Propiedades Mecánicas de Sólidos*. Gandía, España. 1
- [18] IRAM 1624: Método de ensayo para la determinación de la densidad. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2005), pp 9.
- [19] IRAM 1634: Cemento portland. Método para la determinación del contenido de aire en morteros. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (1963), pp 5.
- [20] IRAM 1622: Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas. Instituto Argentino de Normalización y Certificación, (2006), pp 25.
- [21] UNE EN 450-1: Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad, AENOR, (2013), 34 pág.

### **Agradecimientos**

Las autoras agradecen al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur por el apoyo brindado para el desarrollo de estas investigaciones.

# CONSTRUCCIÓN DE UN COLECTOR DISCO PARABÓLICO Y DETERMINACIÓN DE SU EFICIENCIA ÓPTICA

D Panaroni<sup>1</sup>, L Martorelli<sup>1</sup>, AM Castro Luna<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratorio de Óptica, Calibración y Ensayo LOCE-Universidad Nacional de La Plata  
dario.panaroni@gmail.com

<sup>2</sup>EnAITecS-Centro de Codiseño Aplicado CODAPLI Facultad Regional La Plata UTN  
castrolu@gmail.com

## RESUMEN.

El desarrollo de la vida humana en el siglo XXI depende en gran medida del suministro de energía obtenida principalmente de combustibles fósiles. Este recurso es limitado y su disponibilidad está retaceada por cuestiones políticas, por lo que resulta imprescindible buscar nuevas formas de satisfacer la carencia. La energía solar es una de las formas de energía alternativa con el potencial de suministrar el calor y la energía que demanda toda la población de la Tierra. La tecnología de energía solar concentrada utiliza una superficie espejada que refleja y concentra los rayos en el foco, donde un receptor absorbe la energía solar, transfiriéndola como calor, al fluido que circula en su interior y que se usa en procesos industriales o en la generación de vapor para la producción de electricidad. La eficiencia del sistema depende de la calidad óptica del espejo concentrador. En este trabajo, se determina la eficiencia óptica ( $\eta_{op}$ ) de un disco parabólico prototipo, mediante un calorímetro que actúa como receptor, obteniéndose un valor  $\eta_{op}=0,71\pm0,02$ . Se valida el método aplicando el ensayo de barrido óptico de Hartmann modificado, resultando  $\eta_{op}=0,70\pm0,02$  para el método del factor de intercepción y  $\eta_{op}=0,69\pm0,02$  para la simulación óptica.

**Palabras Claves:** Energía Solar Térmica, Disco Parabólico, Eficiencia, Calorímetro.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda global de energía, esencial para el desarrollo económico mundial, se encuentra hoy seriamente amenazada, entre otros, por el conflicto entre Ucrania y Rusia. Este hecho, junto con la preocupación por el agotamiento de los recursos de combustibles fósiles y la gran contaminación ambiental, obliga a científicos y tecnólogos a centrar su atención en energías alternativas económicas y fiables, potencialmente capaces de sustituir los suministros energéticos convencionales. La energía solar es una de las formas de energía alternativa con el potencial de suministrar el calor y la energía que demanda toda la población de la Tierra [1]. La energía solar es un recurso limpio, que puede satisfacer las necesidades de la población mundial proporcionando anualmente una cantidad de energía de aproximadamente  $10^8$  veces la utilizada por año por todos los seres humanos [2].

Cuando la radiación solar interactúa con semiconductores se obtiene electricidad porque con estos materiales es posible la fotoemisión de electrones, dando lugar a la obtención de electricidad usando la tecnología fotovoltaica. Otro modo de obtener electricidad es aquel en el que la radiación solar concentra los rayos incidentes en el foco de una superficie espejadora llamada concentrador. En ese foco se ubica un receptor que absorbe la energía solar concentrada y la transfiere como calor al fluido que circula en su interior para finalmente ser utilizada ya sea en procesos industriales que requieren energía térmica o en la producción de energía eléctrica.

Existen diferentes sistemas capaces de enfocar los rayos del Sol, i) sistemas de enfoque longitudinal (cilindro parabólico y Fresnel longitudinal) en los que los espejos siguen al Sol a lo

largo de un eje y ii) sistemas de enfoque radial (torre y disco parabólico), en los cuales los espejos siguen al Sol a lo largo de dos ejes [3]. Aunque se sabe que en todos los sistemas la eficiencia varía con la ubicación, la hora del día y la estación del año, la mayor eficiencia óptica se obtiene con el disco parabólico, debido a que el eje óptico del colector siempre es paralelo a los rayos del Sol y el flujo energético que atraviesa el plano de apertura es máximo en cualquier posición diurna del Sol. Los rayos incidentes en el disco concentrador se reflejan en una misma región focal, generando un área de alta exergía con temperaturas superiores a 800 °C. Estas temperaturas elevadas permiten una alta eficiencia en la conversión de energía termo-mecánica y, en consecuencia, alta eficiencia de conversión de energía solar en eléctrica, cuando se combina con una máquina térmica (motor Stirling, turbina Rankine, turbina Brayton, etc.) [4].

Para determinar la cantidad de energía térmica disponible en el área del receptor, es indispensable conocer la calidad óptica del concentrador. Por esto, es necesario su caracterización a través de mediciones precisas, económicas y rápidas. Se han propuesto y aplicado una variedad de métodos ópticos, tales como los de barrido de pendiente con haz láser, análisis de patrones trazados sobre la superficie reflectiva, análisis de patrones reflejados por el concentrador, etc. Es importante destacar que muchos de estos métodos se han desarrollado para evaluar concentradores con facetas espejadas curvadas [5].

En las tecnologías que tratan la concentración de la radiación solar, los espejos que constituyen el concentrador son componentes claves en el proceso de conversión de energía, ya que si la radiación solar no es reflejada en la dirección del receptor existirá una pérdida en la eficiencia del sistema. En consecuencia, es importante contar con espejos de alta reflectancia, parámetro que determina la cantidad de radiación incidente que es reflejada por el espejo. Es necesario que los errores de curvatura (errores de pendiente) del concentrador sean pequeños y como el concentrador suele construirse con facetas espejadas, que el error de alineamiento de las mismas sea bajo.

Existen también técnicas utilizadas en otros campos, además de la óptica, que se han adaptado a la evaluación de los concentradores solares con resultados satisfactorios, entre estas últimas el uso de calorímetros. Diferentes autores proponen que utilizando calorímetros en los que existe una variación constante de masa de un fluido que se calienta por acción de los rayos solares, y midiendo el incremento de la temperatura que ocurre en fluido al atravesar el calorímetro, es posible medir la potencia térmica entregada por el concentrador [6]. Estos dispositivos requieren de caudalímetro de precisión, bombas de agua, refrigeradores, tanques, tuberías, etc.

En el laboratorio, se ha construido un disco-parabólico prototipo, con facetas espejadas triangulares planas, para producir electricidad utilizando como receptor un motor Stirling. De acuerdo a la bibliografía, no hay una oferta suficiente de métodos simples y económicos que permitan la rápida evaluación de espejos concentradores construidos con facetas planas. Para medir la calidad óptica de este concentrador se propone un método sencillo que no requiere de instrumental complejo para su implementación, denominado calorímetro de masa constante.

En este trabajo, se realiza una validación de los datos obtenidos al utilizar el calorímetro de masa constante comparándolos con un método óptico ampliamente difundido para analizar la eficiencia del concentrador de disco parabólico prototipo, conocido como ensayo del barrido óptico de Hartmann (SHOT, Scanning Hartmann Optical Test), que emplea un láser como fuente de luz puntual que simula al Sol [7]. Debido a que el concentrador fue construido con facetas planas, es necesaria una simulación adicional por método Monte Carlo utilizando los datos experimentales obtenidos con el ensayo SHOT.

## 1. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra un esquema de la concentración de los rayos en un disco parabólico

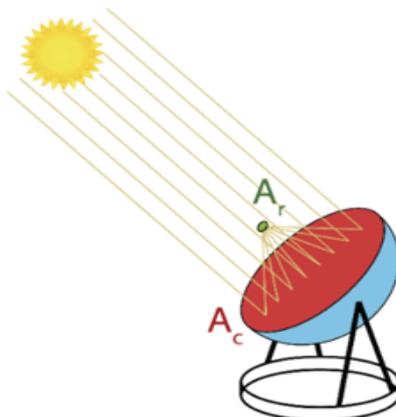


Figura 1 un esquema de la concentración de los rayos en un disco parabólico.

La superficie reflectante concentra un área incidente de luz solar  $A_c$ , definida por su plano de apertura, en un área de concentración  $A_r$ . Puede definirse entonces la razón de concentración como  $RCR = A_c/A_r$ . Esta relación da cuenta de la concentración del colector. En la práctica estos valores suelen encontrarse entre 1000 y 4000 para reflectores con espejos curvos. En la zona focal, el receptor absorberá la radiación solar reflejada por el concentrador y la transformará en energía térmica

Se define la eficiencia óptica del sistema,  $\eta_{op}$ , como la relación entre la potencia térmica entregada al receptor  $P_r$  por el concentrador y  $P_c$  la potencia solar disponible en el área  $A_c$ .

$$\eta_{op} = P_r / P_c \quad (1)$$

En el laboratorio, se construyó un concentrador tipo disco parabólico con un área de  $A_c = 1,77 \text{ m}^2$ , Figura 1. El foco se encuentra en el eje óptico con una relación focal de 0,6, valor habitual para este tipo de concentrador.



Figura 2 Disco Parabólico construido en el laboratorio.

La superficie óptica del concentrador fue construida con la composición de triángulos equiláteros, Figura 2, cada uno alineado con una guía láser y fijados entre sí con silicona. Debido a que cada espejo triangular actúa de forma independiente y está sujeto a su propio error de alineación resulta complejo determinar  $\eta_{op}$ . Por esta razón se aborda esta dificultad en forma experimental. Para medir la eficiencia óptica,  $\eta_{op}$ , se utiliza un calorímetro de masa constante que se ubica como receptor en el área focal del concentrador. El calorímetro contiene agua que absorbe la energía solar que llega desde el concentrador en forma de energía térmica en la zona focal del concentrador se ubica el receptor capaz de capturar los rayos solares y transformarlos en energía térmica por absorción de radiación. En el ensayo, el receptor fue un calorímetro construido con materiales de elevado calor específico y aislado exteriormente para reducir las pérdidas térmicas.

## 2.1 Método del calorímetro de masa constante

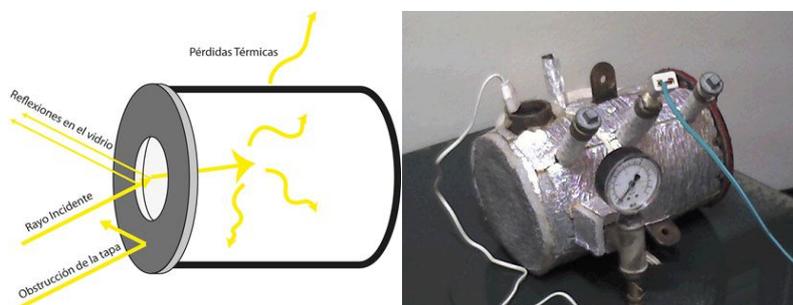


Figura 3 Esquema del balance térmico del calorímetro y una fotografía del mismo.

El calorímetro (Figura 3) consiste de un reservorio cilíndrico de acero con orificios para colocar termocuplas con las que medir la temperatura interior, una entrada ciega y una entrada de agua. El dispositivo cuenta también con una válvula de seguridad y un manómetro.

El calorímetro posee en su cara expuesta al colector una tapa compuesta por un anillo de acero grueso de 0,18 m de diámetro externo y 0,09 m de diámetro interno, el orificio central es cerrado con una placa de vidrio de borosilicato de 0,02 m de espesor que permite la entrada de los rayos de luz solar.

La superficie externa del calorímetro se encuentra cubierta por un aislante de espuma de polietileno de 0,01 m de espesor. Esta cobertura polimérica está recubierta exteriormente por una lámina de aluminio reflectante para minimizar las pérdidas térmicas por emisión radiativa. El calorímetro contiene agua como en su interior que absorbe la energía solar proveniente del concentrador solar parabólico, y la almacena como energía térmica. El balance energético del calorímetro estará dado por la siguiente ecuación:

$$P_t = P_r - P_{pt} - P_{pr} = I_s \eta_{op} A_c - P_{pt} - P_{pr} = CdT/dt \quad (2)$$

Dónde  $P_t$  es la potencia térmica neta del calorímetro que puede medirse cuantificando la diferencia de la temperatura interna en función del tiempo ( $dT/dt$ ) si la capacidad calorífica ( $C$ ) del calorímetro es conocida.  $P_t$  será también igual al balance de potencias del calorímetro, teniéndose que  $P_r$  es la potencia solar que refleja el disco parabólico,  $P_{pt}$  las pérdidas térmicas debido a la convección y radiación del calorímetro, y  $P_{pr}$  las pérdidas reflectivas de aquella fracción de rayos que refleje el cristal de la ventana del calorímetro. Además se tiene que  $P_r$  puede escribirse también en función de la intensidad solar ( $I_s$ ) incidente por el área de apertura ( $A_c$ ) por la eficiencia óptica ( $\eta_{op}$ ) del disco parabólico.

$C$  puede obtenerse tomando en cuenta la masa de acero, agua y vidrio, así como los calores específicos de cada material, resulta  $C = 15\,700 \pm 100 \text{ J/}^\circ\text{C}$  y se considera constante en el rango de temperatura medido ( $30 \text{ }^\circ\text{C} - 85 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

$P_{pt}$  puede obtenerse midiendo la temperatura del calorímetro mientras se enfría, para esto se realiza un ensayo bajo condiciones controladas en un ambiente a  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Se calienta el calorímetro hasta sobrepasar los  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  utilizando una resistencia eléctrica en su interior, luego se retira y se mide la temperatura a medida que se enfría en intervalos de un segundo utilizando una termocupla propia del calorímetro hasta una temperatura interna de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  es alcanzada. Utilizando la ecuación 2 y siendo que tanto  $P_r$  y  $P_{pr}$  son nulas, se tiene que  $P_r = P_{pt} = 62,5 \pm 0,5 \text{ W}$ .

Para conocer el valor de la pérdida de potencia reflectante,  $P_{pr}$ , el ángulo máximo de incidencia del plato parabólico se fija en  $46 \text{ }^\circ$ . Luego, recurriendo a las fórmulas de Fresnel y Snell se determina la cantidad de radiación solar reflejada por la primera y segunda superficie de la cubierta de vidrio, que expresadas en porcentaje de la radiación incidente ( $I_s$ ), resultan 4,6% y 0,6%, respectivamente.

Conociendo las características del calorímetro, puede obtenerse  $\eta_{op}$  ensayando el disco parabólico con el mismo, para esto sólo es necesario conocer el valor de  $I_s$  mediante la utilización de una estación meteorológica mientras se mide la temperatura interna del calorímetro.

## 2.2 Método de barrido óptico de Hartmann SHOT

Debido a las particularidades del concentrador prototipo (facetas planas) se realiza el ensayo SHOT modificado para determinar  $\eta_{op}$ . La modificación del ensayo SHOT consiste en ubicar un láser autonivelante a 6 metros de altura, como un objeto luminoso posicionado en el infinito óptico. El concentrador se coloca con su plano de apertura perpendicular al haz incidente. Mediante una plataforma mecánica es posible desplazar el láser en coordenadas ( $x, y$ ) logrando que incida en el centro de cada una de las facetas triangulares seleccionadas en el concentrador para realizar la medición. Cuando el haz láser es dirigido al centro de un espejo triangular, resulta reflejado en un objetivo, iluminando un punto sobre el mismo. El objetivo, que está ubicado en el foco del concentrador, cuenta con una cuadrícula graduada que permite medir la posición de dicho impacto en coordenadas ( $x, y$ ), Figura 4.

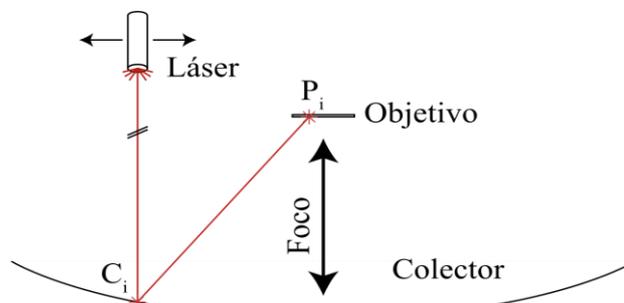


Figura 4 Esquema del método SHOT modificado.

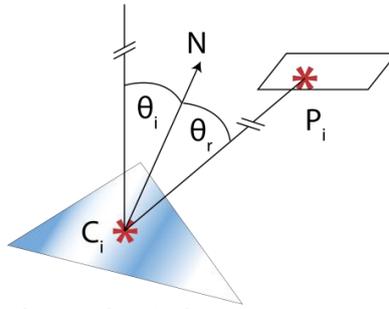


Figura 5 Ángulo de incidencia  $\theta_i$ , de reflexión  $\theta_r$  y  $N$  vector normal de la superficie de una faceta.

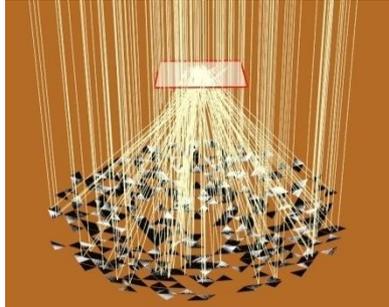


Figura 6 Simulación Monte Carlo en Tonatiuh Raytracer. Se observa el modelo CAD compuesto por las facetas ensayadas.

Se ensayan 309 facetas espejadas, escogidas de forma aleatoria, conformando una porción representativa del concentrador. Para cada espejo analizado se obtiene un punto  $C_i$  de coordenadas  $(x,y,z)$  en el centro del espejo y un punto de impacto  $P_i$  de coordenadas  $(x,y,z)$  en el objetivo.

Utilizando el conjunto de datos  $P_i$  puede obtenerse el factor de intercepción ( $\gamma$ ) sobre un área determinada mediante la siguiente expresión:

$$\gamma = \text{rayos impactados dentro de un área dada} / \text{total de rayos ensayados} \quad (3)$$

Al disminuir el tamaño del área receptora también lo hace  $\gamma$ , puesto que menos rayos impactarán en dicha área. Sin embargo el flujo radiante medio aumenta puesto que la porción central receptora cuenta con una mayor intensidad radiativa que la periferia. Un mayor flujo radiante medio implica tener mayor exergía y menores zonas expuestas al ambiente, disminuyendo las pérdidas térmicas del receptor. Es por esto que debe elegirse un área receptora con un valor de compromiso para interceptar la mayor cantidad de energía sin disminuir en demasía el flujo radiante medio.

Como se pretende realizar una validación del método del calorímetro de masa constante a través de la comparación de los resultados obtenidos por ese método y los obtenidos por el ensayo SHOT, el área de impacto elegida coincidirá con la de un círculo de 0,09m de diámetro, idéntico a la ventana de entrada del calorímetro.

La eficiencia óptica se relaciona con  $\gamma$  [8] a través de la ecuación:

$$\eta_{op} = \gamma \rho \quad (4)$$

Donde  $\rho$  es la reflectancia de los espejos, siendo  $\rho = 0,95$  el valor considerado para espejos de la calidad empleada [9].

Debido a que el láser solo impacta en una pequeña área central de cada faceta es necesario realizar un análisis más riguroso en la determinación de  $\eta_{op}$ . Para esto, se realiza una simulación computacional que toma en cuenta el área total de la faceta.

Considerando cada faceta triangular como un espejo plano y siendo que el ángulo de incidencia es igual al ángulo de reflexión, como se observa en la Figura 5, puede obtenerse un vector normal a la superficie de cada espejo medido utilizando el conjunto de puntos experimentales.

Las simulaciones Monte Carlo suelen utilizarse para describir procesos de flujos, en particular flujos radiativos. Es por esto que es una herramienta habitual en el análisis de potencias lumínicas en sistemas ópticos.

Con el conjunto de vectores normales se construye un modelo CAD de los espejos para utilizarlo en el programa Tonatiuh Ray Tracer [10] y realizar una simulación por método Monte Carlo (Figura 6), obteniéndose un mapa de intensidad lumínica de la zona focal. La simulación utiliza una distribución de Buie para los rayos solares, considerada válida para dicho propósito [11]. La reflectividad de los espejos es  $\rho = 0,95$  y los errores pendiente son nulos.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Método del calorímetro de masa constante

El disco parabólico es ensayado colocando el calorímetro a 0,87 m del vértice del concentrador, de modo que la ventana del calorímetro coincide con el área de entrada de los rayos solares. Las experiencias se realizaron en días despejados con baja humedad relativa para evitar la dispersión de los rayos solares; una temperatura máxima del agua el valor se fijó en 85 °C en todas las experiencias. Al comienzo de cada experiencia, se deja reposar el calorímetro durante unos minutos para lograr el equilibrio térmico. Entonces, el colector se orienta hacia el Sol y se sigue continuamente su posición para alcanzar la máxima concentración de rayos.



Figura 7 Disposición de calorímetro y disco parabólico

Utilizando la ecuación 2 y los valores de temperatura vs tiempo obtenido de cada experiencia se obtiene la Tabla 1

*Tabla 1 Datos de las experiencias con el calorímetro*

n.º de Medida	$P_i$ [W]	$I_s$ [W/m <sup>2</sup> ]	$\eta_{op}$
1	927 ± 3	870 ± 10	0,69 ± 0,01
2	919 ± 3	830 ± 10	0,70 ± 0,01
3	942 ± 3	840 ± 10	0,73 ± 0,02
4	978 ± 4	811 ± 10	0,78 ± 0,02
5	820 ± 3	803 ± 10	0,67 ± 0,02
6	861 ± 2	880 ± 10	0,64 ± 0,02
7	893 ± 3	880 ± 10	0,66 ± 0,01
8	890 ± 3	870 ± 10	0,67 ± 0,01
9	918 ± 4	850 ± 10	0,71 ± 0,01
10	889 ± 3	830 ± 10	0,70 ± 0,02
11	855 ± 3	790 ± 10	0,71 ± 0,02
12	867 ± 3	740 ± 10	0,77 ± 0,02
13	912 ± 3	770 ± 10	0,77 ± 0,00
<b><math>\eta_{op}</math> Promedio</b>			<b>0,71 ± 0,02</b>

La eficiencia óptica promedio  $\eta_{op}$  para el concentrador resulta 0,71 ± 0,02.

#### 3.2 Medidas de la eficiencia óptica por el método SHOT modificado

Utilizando como una primera aproximación las ecuaciones 3 y 4, el conjunto de puntos  $P_i$  dentro del círculo central de 0,09 m de diámetro, se obtuvo un factor de intercepción  $\gamma = 0,74 \pm 0,02$  y un valor de eficiencia óptica  $\eta_{op} = 0,70 \pm 0,02$  (Figura 8). Se debe tener en consideración que el haz láser solo impacta el centro de cada faceta, lo que posibilita que una faceta considerada dentro del área a interceptar sólo lo haga parcialmente o bien que una faceta cuya reflexión en su centro no impacte en el área receptora, esté participando con un área menor. Para resolver esta dificultad es necesario combinar el método SHOT con una simulación computacional.

Recurriendo a la simulación por método Monte Carlo se analiza el mapa de intensidad del área que ocupa la ventana del calorímetro (Figura 9). De la simulación se calcula que la radiación que impacta el modelo CAD del prototipo tiene una potencia de 792 W mientras que la potencia calculada dentro del área central de 0,09 m de diámetro es de 550 W. Finalmente, utilizando la ecuación (1) se obtiene una eficiencia óptica  $\eta_{op} = 0,69 \pm 0,02$ .

Aunque el valor de  $\eta_{op}$  obtenido por el método de factor de intercepción no discrepa significativamente con el valor obtenido mediante simulación computacional (diferencia de 0,01) puede obtenerse más información analizando el mapa de flujo radiativo. Se observa cómo algunos espejos impactan parcialmente en el área central y cómo la forma central es circular debido a la superposición de gran cantidad de reflexiones de diferentes facetas. Este análisis resulta útil para el diseño del receptor ya que facilita la toma de decisión en las dimensiones de la ventana de entrada de los rayos solares, de modo de producir una relación de compromiso entre la energía recolectada y el tamaño del orificio de entrada al receptor que minimice las pérdidas térmicas.

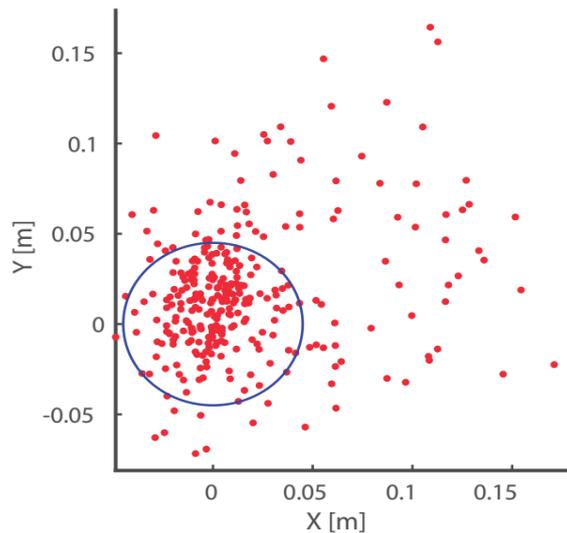


Figura 8 Puntos  $P_i$  sobre el objetivo en círculos rojos. El círculo azul delimita el área por donde ingresaban los rayos al calorímetro.

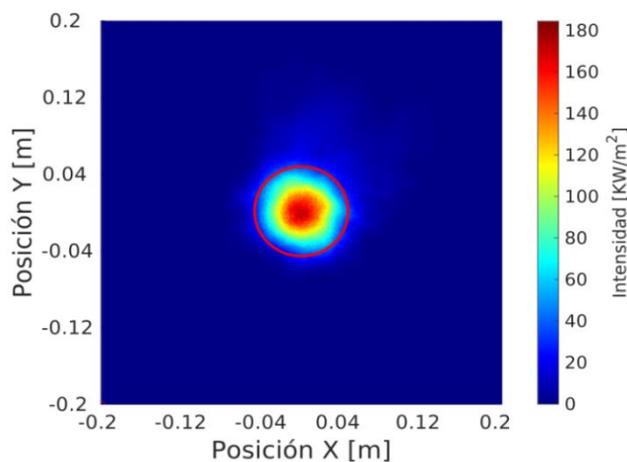


Figura 9 Mapa de intensidad del objetivo por simulación Monte Carlo. En círculo rojo el área central de 0,09m de diámetro.

### 3.3 Comparación de los resultados de eficiencia óptica según el método utilizado

Los valores obtenidos utilizando los distintos métodos resultan ser similares. Si bien pareciera existir una pequeña sobreestimación en el valor obtenido mediante el método del calorímetro de masa constante, lo cierto es que los valores de  $\eta_{op}$  determinados por los tres métodos se encuentran dentro del rango de incertidumbre de las medidas. Consecuentemente, la metodología del calorímetro de masa es considerada válida para concentradores de disco parabólico con características similares al analizado. Si bien la utilización de la metodología SHOT y su variante con simulación Monte Carlo permiten obtener mayor información sobre el concentrador, como por ejemplo conocer la distribución de los impactos o el mapa de intensidad de flujo en la zona focal (o en cualquier otro sitio del recorrido de los rayos), ambas metodologías resultan complejas en su ejecución y demandan una medición rigurosa.

Adicionalmente, la simulación Monte Carlo, que es un requisito para analizar geometrías no continuas, necesita de complejos algoritmos informáticos con cálculos específicos según la geometría del concentrador. En oposición, el método del calorímetro de masa constante resulta muy sencillo y requiere poca preparación previa, exigiendo solamente conocer las pérdidas térmicas del calorímetro. Las mediciones con el concentrador pueden realizarse en pocos días con resultados inmediatos.

Esta simplicidad y celeridad resulta excelente para la evaluación de concentradores prototipos que aún pueden necesitar modificaciones adicionales en su construcción.

### 3. CONCLUSIONES

Es posible realizar un análisis de la eficiencia óptica obtenida con un prototipo experimental construido con espejos triangulares planos.

Un valor de  $\eta_{op} = 0,71 \pm 0,02$  se obtiene cuando se utiliza el método del calorímetro de masa constante, de realización rápida y simple.

El análisis del concentrador prototipo por el método SHOT evalúa el factor de interceptación y y posibilita la determinación de la eficiencia óptica  $\eta_{op} = 0,70 \pm 0,02$ . La aplicación de una simulación

adicional por método Monte Carlo permite el análisis del mapa de flujo lumínico en la zona focal y proporciona un  $\eta_{op} = 0.69 \pm 0,02$ .

Los valores obtenidos mediante los diferentes métodos resultan similares, con una variación de  $\pm 0,03$  entre ellos considerando su incertidumbre. Es posible concluir que el método del calorímetro de masa constante resulta validado por los valores de  $\eta_{op}$  obtenidos por del método SHOT y su variante.

El método del calorímetro evalúa el concentrador del disco parabólico de forma sencilla, rápida y económica sin exigir demasiada preparación ni instrumental específico.

El método SHOT requiere un tiempo mayor para realizar la medición, puesto que es necesario numerar y caracterizar cada faceta del espejo concentrador. Además, necesita mayor procesamiento de datos mediante la utilización de herramientas computacionales complejas. Se concluye que, si bien el método SHOT modificado permite una mejor caracterización, la evaluación resulta lenta y laboriosa para prototipos susceptibles a modificaciones.

El concentrador prototipo analizado demuestra que es posible concentrar la luz solar utilizando espejos triangulares planos, mostrando un  $\eta_{op}$  adecuado para su uso como concentrador.

#### 4. REFERENCIAS.

- [1] Höök, M., & Tang, X. (2013). Depletion of fossil fuels and anthropogenic climate change— A review. *Energy Policy*, 52, 797-809. doi: 10.1016/J.ENPOL.2012.10.046
- [2] MICHAELIDES, Efsthios E. *Alternative Energy Sources* [online]. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2012. Green Energy and Technology. ISBN 978-3-642-20950-5. <http://alternativeenergysourcesv.com/>
- [3] Romero Álvarez, M. (2006). *Introducción a la energía solar termoeléctrica*. Madrid, España, CIEMAT
- [4] Lovegrove, K., & Stein, W. (2012). *Concentrating solar power technology. Principles, developments and applications*. UK: Woodhead Publishing
- [5] SKOURI, Sefa, BOUADILA, Salwa, BEN SALAH, Mohieddine y BEN NASRALLAH, Sassi. Comparative study of different means of concentrated solar flux measurement of solar parabolic dish. *Energy Conversion and Management* [online]. 1 Dic. 2013. Vol. 76, p. 1043-1052. DOI 10.1016/j.enconman.2013.08.058. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413005347>
- [6] Willoughby, A. B. Absolute water flow calorimeter for the measurement of intense beams of radiant energy. *Review of Scientific Instruments* [online]. 29 Jul. 1954. Vol. 25, no. 7, p. 667-670. DOI 10.1063/1.1771155. <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.1771155>
- [7] WENDELIN, T J, JORGENSEN, G J y WOOD, R L. SHOT: a method for characterizing the surface figure and optical performance of point focus solar concentrators. In : *Proceedings of the ASME-JSES-JSME International Solar Energy Conference*. 1991. p. 555-560.
- [8] FLORIDES, G.A., KALOGIROU, S.A., TASSOU, S.A. y WROBEL, L.C. Modelling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system. *Applied Thermal Engineering* [online]. 1 Ago. 2002. Vol. 22, no. 12, p. 1313-1325. DOI 10.1016/S1359-4311(02)00054-6. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431102000546>
- [9] JAMALI, Hamzeh. *Investigation and review of mirrors reflectance in parabolic trough solar collectors (PTSCs)*. 1 Nov. 2019. Elsevier Ltd.
- [10] BLANCO, Manuel J., AMIEVA, Juana M. y MANCILLAS, Azael. The Tonatiuh Software Development Project: An Open Source Approach to the Simulation of Solar Concentrating Systems. In : *Computers and Information in Engineering* [online]. ASME, 1 Ene. 2005. p. 157-164. ISBN 0-7918-4214-2. <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1580262>
- [11] BUIE, D., MONGER, A. G. y DEY, C. J. Sunshape distributions for terrestrial solar simulations. *Solar Energy*. 1 Feb. 2003. Vol. 74, no. 2, p. 113-122. DOI 10.1016/S0038-092X(03)00125-7.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen, a la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires CICPBA por financiación, a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata UTN-FRLP y a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la UNLP por los espacios físicos brindados para realizar el presente estudio.

# PREDIMENSIONAMIENTO DE INSTALACION FOTOVOLTAICA CON APLICACIÓN EN UN ORGANISMO DEL ESTADO

**BALIÑO, Eduardo Marcos<sup>(1)</sup>, ORTEGA María Eugenia<sup>(2)</sup>, VINANTE Humberto<sup>(3)</sup>**

1 Ingeniero Electricista (UTN) – Esp. en Aplicaciones de la Tecnología Nuclear (Inst. Balseiro)

2 Profesora de Matemática (ISFDN°79), Dip. en Eficiencia Energ. y Energías Renovables (UNRaf)

3 Ingeniero Industrial (UNCUYO) – Esp. en Aplicaciones de la Tecnología Nuclear (Inst. Balseiro)

e-mail: edumaba@yahoo.com.ar

## RESUMEN

En el marco de la adhesión de la Argentina a los compromisos internacionales que conllevan a la implementación de políticas orientadas al avance en torno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), el país ha definido metas específicas para distintas áreas de gobierno, y diseñado programas a partir de los cuales garantizar el cumplimiento de dichas metas, para ello se requiere de la participación de una diversidad de instituciones y actores, tanto en el nivel nacional, como en el provincial y municipal.

Por requerimiento de las autoridades del Partido de Villarino, quienes asumieron un fuerte compromiso en cuanto al cuidado del medio ambiente se refiere, entre otras cosas mediante la firma del Pacto Global de Alcaldes; y siendo estos miembros integrantes de la Red Argentina de Municipios frente al Cambio Climático (RAMCC), se realizó el presente estudio, dada su positiva influencia sobre la protección de recursos, disminución de costos de provisión de servicios energéticos y mitigación de problemas ambientales asociados a la producción, transporte, distribución y consumo de la energía, como parte del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PROUREE).

En este sentido el proyecto busca la posibilidad de generación propia a través del empleo de energías renovables, contribuyendo a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>) reflejando, además, ahorros energéticos y económicos.

La instalación predimensionada es del tipo Solar Fotovoltaica on grid sin almacenamiento, con la capacidad necesaria para abastecer la mayor demanda posible del complejo del Palacio Municipal.

**Palabras Claves:** Eficiencia, Sostenible, Sustentable, Fotovoltaica, Renovable.

**Área Temática:** Producción y Gestión.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de Docentes.

## **1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1. Objetivo**

El estudio consiste en determinar una potencia de diseño necesaria para definir el equipamiento de una instalación solar con paneles fotovoltaicos de manera de poder cubrir la demanda energética del municipio. Para el dimensionamiento se analizan distintas alternativas basadas en datos de facturación y registros de mediciones; dichos valores son incorporados en un software específico, el PVSyst; potente herramienta de diseño, que permite la selección de tipo y potencia de paneles, inversores, y configuración física de los mismos adaptada a las necesidades de cada instalación.

Además el estudio contempla para el diseño de la instalación la orientación e inclinación de los paneles solares con un análisis de asoleamiento de manera de optimizar el rendimiento y poder definir el emplazamiento óptimo utilizando el software Ecotec Analysis como herramienta de cálculo. El edificio en estudio cuenta con abastecimiento de energía a través de cuatro medidores de acceso en baja tensión, suministrados por la empresa Edesur S.A. (Empresa Distribuidora

Sur S.A.). El proyecto establece como base de diseño la inyección de energía solar a través de las mismas acometidas quedando dividida la planta de generación en cuatro fuentes constituidas cada una por los paneles solares con una configuración serie paralelo y su respectivo inversor. Por ser un edificio de la administración pública, en donde la jornada laboral es mayoritariamente a la mañana, no se considera en el diseño baterías de respaldo por no haber actividad nocturna.

### **1.2. Datos empleados**

- ✓ Registro de energía de los cuatro puntos de suministro (Facturaciones correspondientes a la empresa Distribuidora de Energía Eléctrica EDES S.A. Período: año 2020).
- ✓ Registro de consumos horarios de corriente por medidor (Período: dos semanas mes de abril año 2021)
- ✓ Software de cálculo PVSyst. Base meteorológica empleada (datos climatológicos importados para la localidad de Médanos desde Meteonorm).

### **1.3. Información adicional**

- ✓ Planos de planta del Municipio.
- ✓ Planos del Municipio con descripción de cubiertas.
- ✓ Registros fotográficos de equipamiento y sectores.

## **2. PREDIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA, ANÁLISIS DE LA INSTALACIÓN DE UN SISTEMA ALTERNATIVO DE ENERGÍA.**

### **2.1. Demanda energética**

Para un balance energético anual, se analiza la demanda anual a través de datos de facturación y se coteja con la energía calculada por medio de los datos de potencia de la instalación con los correspondientes factores de uso y de simultaneidad. A su vez para el diseño se tomaron registros de corriente y picos de consumo.

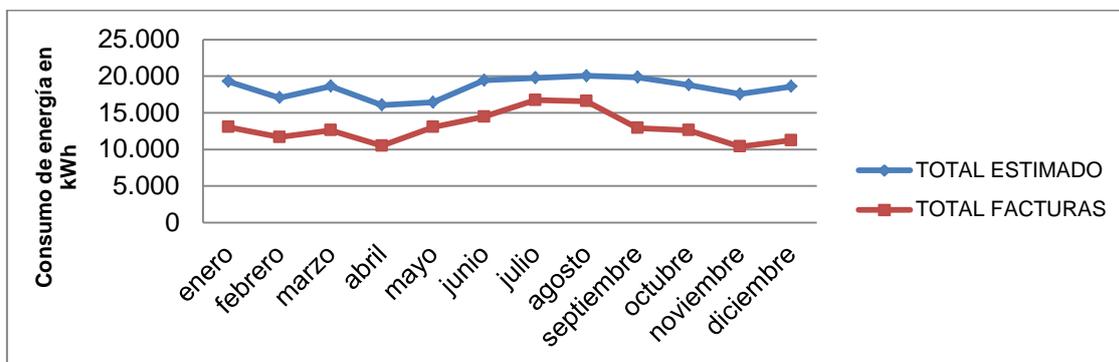


Figura 1 Demanda de energía anual del edificio

CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA DEL EDIFICIO: ~ 156.000 kWh (registros facturación año 2020)  
 CONSUMO ANUAL DE ENERGÍA DEL EDIFICIO: ~ 220.000 kWh (estim. c/datos de Pot. inst.)

A nivel de evaluación energética del predio, se tienen en cuenta y se calcularon los indicadores que se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1 Indicadores Energéticos

INDICADOR	VALOR	UNIDADES
Índice de consumo energético por área total	6,41	$\frac{\text{kWh}}{\text{mes} \cdot \text{m}^2}$
Índice de consumo energético por persona	36,91	$\frac{\text{kWh}}{\text{mes} \cdot \text{persona}}$
Índice de Potencia instalada por área total	15,97	$\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
Índice de Potencia instalada por persona	92,02	$\frac{\text{W}}{\text{persona}}$
Índice de emisiones de CO <sub>2</sub> por área total	2,74	$\frac{\text{KgCO}_2\text{eq}}{\text{mes} \cdot \text{m}^2}$
Índice de emisiones de CO <sub>2</sub> por persona	15,80	$\frac{\text{KgCO}_2\text{eq}}{\text{mes} \cdot \text{persona}}$

## 2.2. Hipótesis de diseño

- ✓ Esquema eléctrico: Conservando la disposición de alimentación eléctrica actual a través de cuatro medidores.
- ✓ Configuración Ongrid sin almacenamiento - Paneles e inversor "por cada medidor".

## 2.3. Criterio adoptado

- ✓ En base a los registros de energía y los datos de consumos medidos, se determina la potencia de diseño de cada uno de los sistemas.
- ✓ Elección de situación más desfavorable: Mes en el que sucede el solsticio de invierno, mes de Junio.
- ✓ Realización de dos simulaciones con ángulo de inclinación óptima e inclinación de estructuras solidarias a los techos.
- ✓ Análisis de sombras para determinación de la disposición de los paneles.

## 2.4. Análisis de demanda de potencia y energía

Dado que el dimensionamiento de las instalaciones ON GRID requiere una estimación lo más precisa posible de la potencia pico propia de cada circuito para determinar la potencia del inversor, y la cuantificación de la cantidad de energía a suministrar para el dimensionamiento de los paneles, se realiza el cómputo de dicho valor de potencia y el dimensionamiento de los paneles generadores cotejando dos criterios de cálculo, por un lado a través de los registros de facturación y por otro lado por los valores obtenidos durante un periodo de medición, con la premisa de que puedan generar la energía que permite administrar la potencia del inversor en cuestión.

### 2.4.1. Potencia estimada de cálculo

Se establece la potencia máxima calculada mediante registros de intensidad en mediciones realizadas en horario laboral, valores contrastados con la determinación de la potencia a partir de los datos de facturación realizando una estimación de horas equivalentes, adoptándose como valor el que resulta mayor entre las dos situaciones.

#### 2.4.1.1. Determinación de potencia mediante análisis de registros

Los datos obtenidos mediante las mediciones se observan en Tabla N° 2.

Tabla 2 Registro de consumos promedio quincenal

Variable	PROMEDIO DE REGISTROS HORARIOS								PICO DE POTENCIA
	07:00hs	08:00hs	09:00hs	10:00hs	11:00hs	12:00hs	13:00hs	14:00hs	
Medidor M <sub>1</sub> - N° 613001069									
[A]	23,05	25,88	27,20	27,49	27,38	23,42	21,5	20	<b>41,4</b>
[KW]	4,82	5,41	5,68	5,74	5,72	4,89	4,49	4,18	<b>8,65</b>
Medidor M <sub>2</sub> - N° 186441									
[A]	49,28	57,37	47,48	58,05	60,57	56,11	49,64	56,24	<b>88,6</b>
[KW]	10,29	11,99	9,92	12,13	12,65	11,72	10,37	11,75	<b>19,10</b>
Medidor M <sub>3</sub> - N° 613001586									
[A]	8,40	8,63	11,92	8,94	10,52	10,17	8,99	7,34	<b>26,7</b>
[KW]	1,75	1,80	2,49	1,86	2,19	2,12	1,87	1,53	<b>5,81</b>
Medidor M <sub>4</sub> - N° 003660135									
[A]	14,67	15,47	14,75	16,17	17,94	16,32	14,29	16,02	<b>30,2</b>
[KW]	3,06	3,23	3,08	3,38	3,75	3,41	2,98	3,34	<b>6,57</b>

#### 2.4.1.2. Determinación de potencia mediante la estimación de las horas equivalentes

Las mediciones de intensidades, potencia trifásica y consumo de energía realizadas durante dos semanas, en horario laboral, a lo largo del mes de abril de 2021 muestran que la potencia consumida en la tarde es el 32% de la de la mañana para el medidor M<sub>1</sub>, 67% para el M<sub>2</sub>, 40% para el M<sub>3</sub> y 58% para el M<sub>4</sub> (Centro de Monitoreo). En los cálculos se considera la relación 0,5 para los medidores M<sub>1</sub>, M<sub>2</sub> y M<sub>3</sub> y 0,58 para M<sub>4</sub>.

Se estima que la demanda fuera del horario laboral (de 14 a 7 hs) y durante los días feriados es la mitad de la potencia media en el horario de la mañana. Se determina así el número equivalente de horas a plena potencia mensuales y con el consumo mensual y número de horas equivalentes a plena potencia "promedio" se calcula la potencia máxima de 7 a 14. Se elige la del mes de mayor consumo. Los valores de potencias obtenidos se observan en Tabla N° 3

Tabla 3 Potencias obtenidas utilizando método de las horas equivalentes

Medidor	Potencia de diseño (KW)
M <sub>1</sub> - N° 613001069	<b>4,96</b>
M <sub>2</sub> - N° 186441	<b>20,58</b>
M <sub>3</sub> - N° 613001586	<b>2,34</b>
M <sub>4</sub> - N° 003660135	<b>8,99</b>

## 2.5. Dimensionamiento de las instalaciones para cada punto de acceso de energía

### 2.5.1. Potencias de los inversores

Medidor M<sub>1</sub>: potencia pico calculada 8,65 Kw; potencia inductor 10 kw

Medidor M<sub>2</sub>: potencia pico calculada 20,58 Kw; potencia inductor 25 kw

Medidor M<sub>3</sub>: potencia pico calculada 5,81 Kw; potencia inductor 6 kw

Medidor M<sub>4</sub>: potencia pico calculada 10,97Kw; potencia inductor 15 kw

## 2.5.2. Dimensionamiento de los módulos fotovoltaicos

### 2.5.2.1. Orientación:

Dado que la orientación de los edificios emplazados en el predio es de aproximadamente 11° Oeste (respecto al Norte), se realizan los cálculos tomando esos grados como ángulo en el diseño, respetando el trazado de las calles y adoptado una configuración de paneles que siga la línea de las estructuras de los techos.

### 2.5.2.2. Inclinación:

- Inclinación óptima de los paneles 36° respecto de la horizontal, para esta alternativa será necesario considerar el correspondiente dimensionamiento de estructuras soportes adicionales.
- Inclinación de los paneles 5°/10° apoyados directamente sobre las cubiertas, paneles ocultos a la vista.

### 2.5.2.3. Resultados de simulaciones

Con los datos indicados de potencia, orientación e inclinación se efectuaron simulaciones teniendo en cuenta la georeferenciación del lugar. Además se presentan tablas comparativas entre energía producida por la instalación solar y la consumida según los registros de facturación por medidor. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Medidor N°1

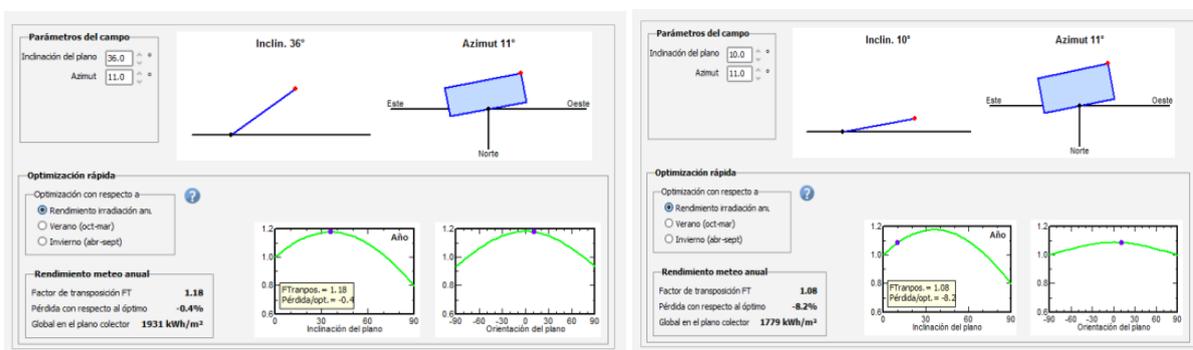


Figura 2 Factor de transposición medidor  $M_1$ : a- Inclinación 36° b- Inclinación 10°

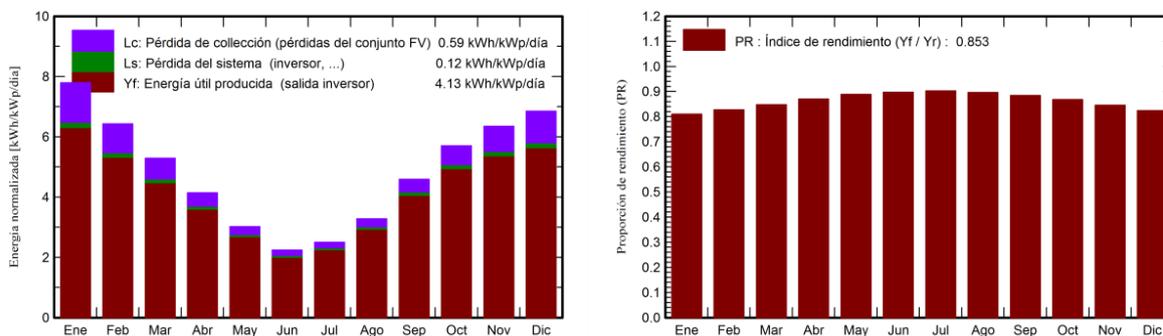


Figura 3 Energías del sistema e Índice de rendimiento para  $M_1$ , Inclinación 10°

Tabla 4 Rendimiento de la instalación para  $M_1$

FECHA	CONSUMO kWh EA	E. ENTR.- Incl. 36°	% SOLAR	E. ENTR.- Incl. 10°	% SOLAR
DICIEMBRE	1627	1646	101%	1819	112%
NOVIEMBRE	1575	1564	99%	1675	106%
OCTUBRE	1797	1629	91%	1594	89%
SEPTIEMBRE	1739	1429	82%	1267	73%
AGOSTO	2068	1189	57%	946	46%
JULIO	1999	1002	50%	727	36%
JUNIO	2152	884	41%	626	29%
MAYO	2085	1175	56%	866	42%
ABRIL	1974	1382	70%	1124	57%
MARZO	1912	1577	82%	1444	76%
FEBRERO	1950	1527	78%	1550	79%
ENERO	1949	1868	96%	2034	104%
	22827	16872	74%	15672	69%

Medidor N°2

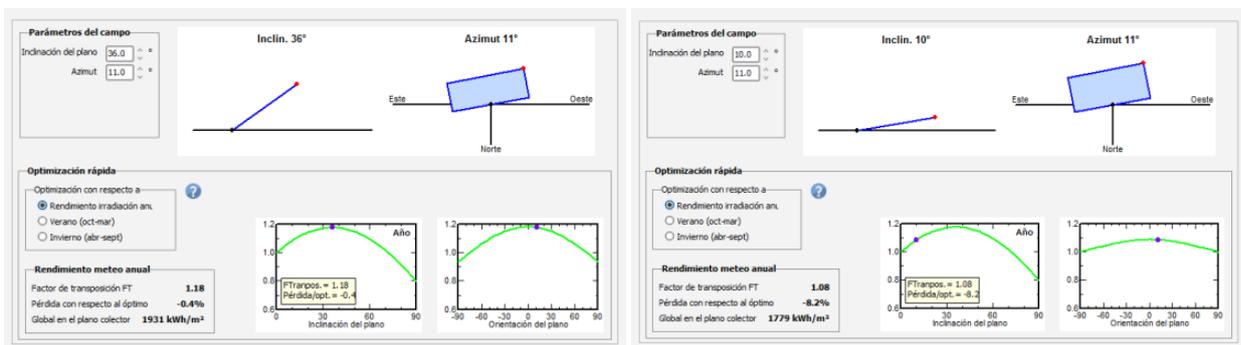


Figura 4 Factor de transposición medidor  $M_2$ : a-Inclinación 36° b- Inclinación 10°

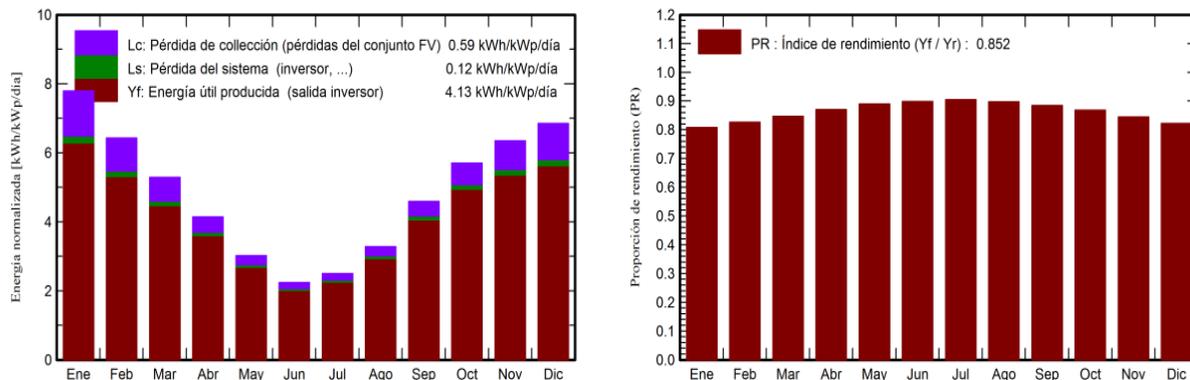


Figura 5 Energías del sistema e Índice de rendimiento para  $M_2$ , Inclinación 10°

Tabla 5 Rendimiento de la instalación para  $M_2$

FECHA	CONSUMO kWh EA	E. ENTR.- Incl. 36°	% SOLAR	E. ENTR.- Incl. 10°	% SOLAR
DICIEMBRE	6599	3537	61%	3.909	59%
NOVIEMBRE	5823	3363	56%	3.602	62%
OCTUBRE	6299	3506	54%	3.433	55%
SEPTIEMBRE	6825	3075	44%	2.728	40%
AGOSTO	8772	2561	29%	2.041	23%
JULIO	9169	2160	21%	1.569	17%
JUNIO	8374	1904	26%	1.351	16%
MAYO	7042	2530	36%	1.866	26%
ABRIL	5167	2974	60%	2.421	47%
MARZO	7363	3390	48%	3.107	42%
FEBRERO	6421	3280	52%	3.332	52%
ENERO	7810	4011	45%	4.370	56%
	85664	36291	42%	33.729	39%

## Medidor N°3

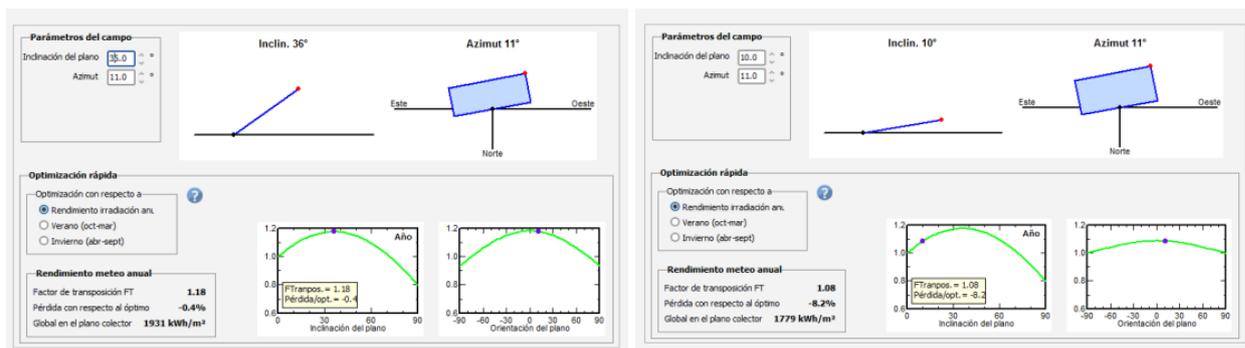


Figura 6 Factor de transposición medidor M<sub>3</sub>: a-Inclinación 36° b- Inclinación 10°

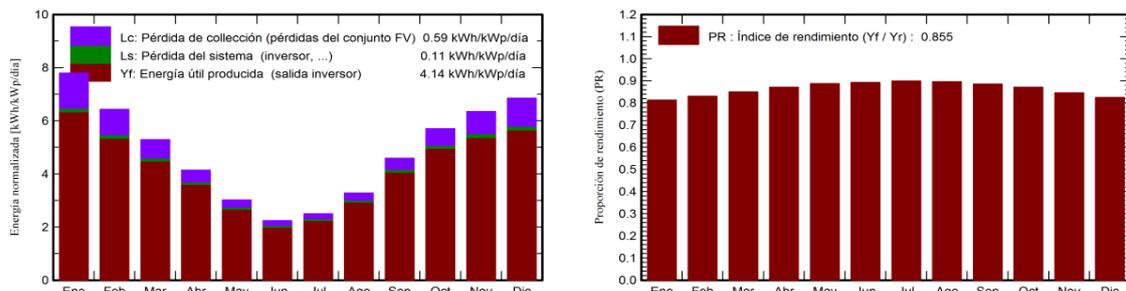


Figura 7 Energías del sistema e Índice de rendimiento para M<sub>3</sub>, Inclinación 10°

Tabla 6 Rendimiento de la instalación para M<sub>3</sub>

FECHA	CONSUMO kWh EA	E. ENTR.- Incl. 36°	% SOLAR	E. ENTR.- Incl. 10°	% SOLAR
DICIEMBRE	564	759	135%	841	149%
NOVIEMBRE	545	721	132%	773	142%
OCTUBRE	795	755	95%	739	93%
SEPTIEMBRE	770	661	86%	585	76%
AGOSTO	1052	550	52%	437	42%
JULIO	1017	462	45%	334	33%
JUNIO	754	408	54%	288	38%
MAYO	731	543	74%	399	55%
ABRIL	649	640	99%	520	80%
MARZO	629	731	116%	669	106%
FEBRERO	673	706	105%	718	107%
ENERO	672	865	129%	942	140%
	8851	7801	88%	7.245	82%

## Medidor N°4

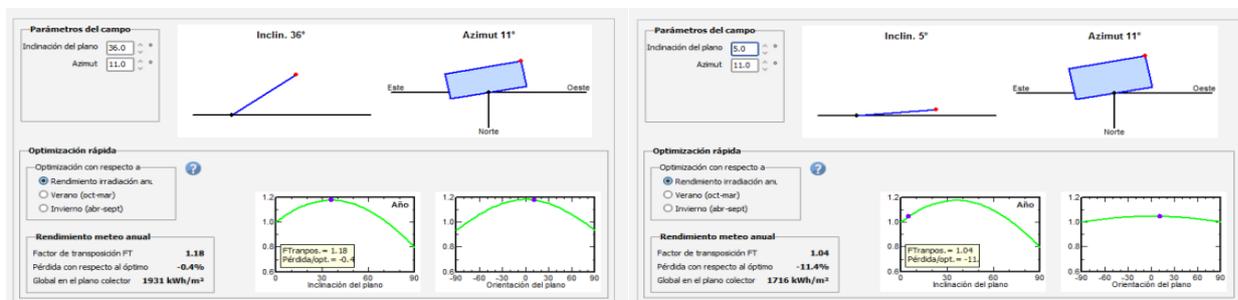


Figura 8 Factor de transposición medidor M<sub>4</sub>: a-Inclinación 36° b- Inclinación 10°

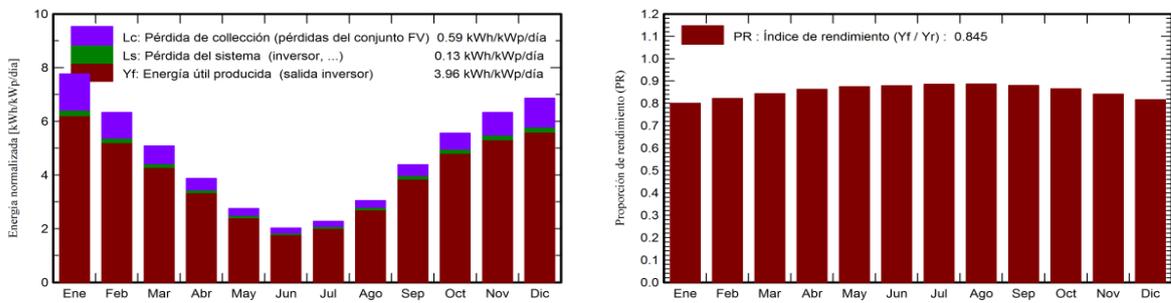


Figura 9 Energías del sistema e Índice de rendimiento para  $M_4$ , Inclinación  $10^\circ$

Tabla 7 Rendimiento de la instalación para  $M_4$

FECHA	CONSUMO kWh EA	E. ENTR.- Incl. $36^\circ$	% SOLAR	E. ENTR.- Incl. $5^\circ$	% SOLAR
DICIEMBRE	2453	1879	77%	2084	85%
NOVIEMBRE	2453	1792	73%	1915	78%
OCTUBRE	3715	1869	50%	1789	48%
SEPTIEMBRE	3592	1639	46%	1388	39%
AGOSTO	4698	1364	29%	1006	21%
JULIO	4547	1149	25%	749	16%
JUNIO	3180	1015	32%	640	20%
MAYO	3179	1349	42%	896	28%
ABRIL	2711	1584	58%	1202	44%
MARZO	2711	1803	67%	1595	59%
FEBRERO	2625	1741	66%	1749	67%
ENERO	2625	2119	81%	2312	88%
	38489	19303	50%	17325	45%

## 2.6. Asoleamiento del terreno

Para la determinación de las interferencias y pérdidas, tanto con PVSyst como con los ábacos de Asoleamiento de la Guía del Recurso Solar de la Secretaría de Energía, fue necesario modelar las zonas de proyección de sombras a lo largo del año, utilizando la herramienta Ecotec Analysis donde se realizó un modelo digital 3D de todas las estructuras del predio. A partir de este estudio se seleccionaron aquellas cubiertas que no tuviesen o tuviesen la menor interferencia. Se usó la base de datos de Meteonorm para la determinación de las condiciones meteorológicas del lugar.

Las sombras sobre el predio en los solsticios de invierno y verano son las siguientes:

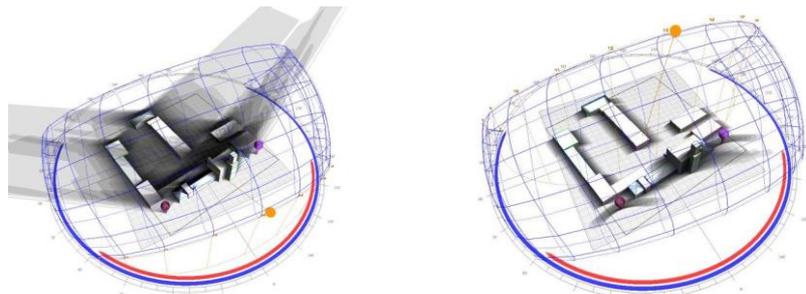


Figura 10 Solsticios: a- 21 de Junio (invierno) b- 21 de Diciembre (verano)

## 2.7. Determinación de las cubiertas

El edificio cuenta con una disposición de cubiertas con posibilidad de ser utilizadas para la implantación de los paneles según siguiente detalle:



Figura 11 Foto aérea del predio, identificación de posibles cubiertas

En los diagramas de sombras y concretamente los correspondientes a los días de los solsticios, se observa que el sector sur del edificio 12 es el único que permanece todo el año sin sombras, y particularmente el 21 de junio, así como la poca iluminación que presentan las cubiertas 4, 7, 8 y 11; que fueron descartadas como posibles lugares de emplazamiento.

## 2.8. Elección de superficies:

Medidor  $M_1$ : Cantidad de paneles: 26

Superficie elegida: Cubierta 15 – Superficie disponible 332 m<sup>2</sup> en chapa galvanizada.

Medidor  $M_2$ : Cantidad de paneles: 56

Superficie elegida: Cubierta 9' - Superficie disponible 120m<sup>2</sup>, material constitutivo chapa galvanizada (Porción de la cubierta 9 libre de sombras).

Medidor  $M_3$ : Cantidad de paneles: 12

Superficie elegida: Cubierta 10 - Superficie disponible 205m<sup>2</sup>, material constitutivo chapa galvanizada.

Medidor  $M_4$ : Cantidad de paneles: 30

Superficie elegida: Cubierta 12 (mitad sur) - Superficie 472m<sup>2</sup>, material constitutivo canalón fibrocemento.

## 2.9. Selección de sistemas y emplazamientos sugeridos

### 2.9.1. Circuito correspondiente a Medidor $M_1$

Cubierta 15 - Superficie disponible 332 m<sup>2</sup>, material constitutivo chapa galvanizada.

Arreglo constituido por:

- Módulos: 26 unidades de 400Wp, (en 2 cadenas de 13), marca Jinkosolar, modelo JKM400M-72.
- Superficie total ocupada: 52,31m<sup>2</sup>
- Inversor: 1 unidad de 10Kw marca Schneider Electric, modelo Conext TL 10000 E
- Energía producida anualmente: 15.672Kwh/año
- Rendimiento anual de la instalación:  
69% (inclinación 10° siguiendo la estructura de los techos)  
74%(inclinación óptima 36° prever para su  
instalación los soportes adecuados).

### 2.9.2. Circuito correspondiente a Medidor $M_2$

Cubierta 9' - Superficie disponible 120m<sup>2</sup>, material constitutivo chapa galvanizada (Porción de la cubierta 9 libre de sombras).

Arreglo constituido por:

- Módulos: 56 unidades de 400Wp, (en 4 cadenas de 14), marca Jinkosolar, modelo JKM400M-72.
- Superficie total ocupada: 112,67m<sup>2</sup>
- Inversor: 1 unidad de 25Kw marca Schneider Electric, modelo Conext CL 25000 E
- Energía producida anualmente: 33.729Kwh/año
- Rendimiento anual de la instalación:  
39% (inclinación 10° siguiendo la estructura de los techos)  
42%(inclinación óptima 36° prever para su instalación los soportes adecuados).

### **2.9.3.Circuito correspondiente a Medidor M<sub>3</sub>**

Cubierta 10 - Superficie disponible 205m<sup>2</sup>, material constitutivo chapa galvanizada.  
Arreglo constituido por:

- Módulos: 12 unidades de 400Wp, (en 2 cadenas de 6), marca Jinkosolar, modelo JKM400M-72.
- Superficie total ocupada: 24,14m<sup>2</sup>
- Inversor: 1 unidad de 6Kw marca AEG, modelo AS-IC01-6000-2
- Energía producida anualmente: 7.245Kwh/año
- Rendimiento anual de la instalación:  
82% (inclinación 10° siguiendo la estructura de los techos)  
88%(inclinación óptima 36° prever para su instalación los soportes adecuados).

### **2.9.4.Circuito correspondiente a Medidor M<sub>4</sub>**

El circuito correspondiente al centro de monitoreo actualmente tiene una instalación realizada, de la misma no se pudo acceder a los datos técnicos, los módulos se encuentran ubicados sobre la cubierta 11, dicha cubierta presenta sombras considerables durante gran parte del año, la cubierta más apta para la instalación de los paneles sería la mitad sur de la 12. La distribución calculada para este sector es la siguiente:

Cubierta 12 (mitad sur) - Superficie 472m<sup>2</sup>, material constitutivo canalón fibrocemento.  
Arreglo constituido por:

- Módulos: 30 unidades de 400Wp, (en 3 cadenas de 10), marca Jinkosolar, modelo JKM400M-72.
- Superficie total ocupada: 60,36m<sup>2</sup>
- Inversor: 1 unidad de 15Kw marca Schneider Electric, modelo TL 10000 E
- Energía producida anualmente: 17.325Kwh/año
- Rendim. anual de la instalación:  
45% (inclinación 5° siguiendo la estructura de los techos)  
50%(inclinación óptima 36° prever para su instalación los soportes adecuados).

## **2.10. Cómputo total**

- ✚ Módulos: 124 unidades de 400Wp.
- ✚ Inversores: 1 unidad de 10Kw; 1 unidad de 25Kw; 1 unidad de 6Kw; 1 unidad de 15Kw.
- ✚ Cableado necesario para la totalidad de las configuraciones.
- ✚ Soportes adicionales para lograr la inclinación de los paneles de decidir el ángulo de 36°.
- ✚ Medios de sujeción para la vinculación a las estructuras portantes de las cubiertas con el objeto absorber los esfuerzos del viento.

## **3. CONSIDERACIONES**

Al momento de definir la instalación se deberán tener presentes los siguientes aspectos:

- ✚ Estudio de estructuras para montaje.
- ✚ Sistema eléctrico: De acuerdo a las mediciones realizadas, el sistema eléctrico presenta

un importante desequilibrio de corrientes por fase, por lo que debe hacerse una redistribución de cargas para el correcto funcionamiento de la instalación.

- ✚ Normativa vigente: Referente a un Sistema ONGRID sin inyección a la red de distribución ni almacenamiento.

#### **4. CONCLUSIONES**

- ✚ Los equipamientos fueron dimensionados para lograr abastecer la demanda del edificio en las condiciones actuales de funcionamiento, cubriendo aproximadamente un 25 % en promedio de la energía demandada en el mes de peor rendimiento y aproximadamente un 100 % en promedio en el mes de mejor rendimiento, asegurando una cobertura anual en promedio del 60%.
- ✚ Un estudio de eficiencia puede optimizar las condiciones de consumo y así aumentar el porcentaje de energía provista por los paneles solares.
- ✚ Debido a la magnitud del sistema, se recomienda tener presente que la adquisición de forma separada de cada tipo de equipamiento puede conducir a complicaciones al momento de su instalación.
- ✚ Al momento de la instalación se deberán tener presentes aspectos técnicos como así también la normativa vigente.
- ✚ Constituyendo el presente informe un asesoramiento contribuyente al estudio integral de eficiencia energética en edificios públicos, es dable aclarar que finalizado dicho estudio, con las conclusiones a las que se arribe, como ser: buenos hábitos de consumo, recambio de determinados elementos, implementación de automatización de equipamientos, entre otras; las condiciones de borde para el dimensionamiento de las instalaciones de alimentación fotovoltaica pueden verse modificadas considerablemente en beneficio del sistema en general.

#### **AGRADECIMIENTOS**

El primer lugar se desea agradecer la hospitalidad y predisposición del Intendente del partido de Villarino Dn. Carlos Bevilacqua, como así también del Ingeniero Sergio Daich referente principal en Cambio Climático y Desarrollo Sostenible de la Agencia de Energías Renovables y Ambiente (AERA) y a todos el personal que desarrolla tareas en el edificio municipal cabecera del Partido.

## BIBLIOGRAFÍA

- Navntoft, Christian; Biurrún, Nicolás; Cristófalo, María Paz; Cuccorese, Santiago; Ramos Defferrari, Ignacio & Raggio, Daniel. *Manual de Generación Distribuida Solar Fotovoltaica. 1º edición Revisada. ISBN 978-987-47110-4-5* [Versión digital]. Subsecretaria de Energías Renovables y Eficiencia Energética. Secretaria de Energía. Presidencia de la Nación. República Argentina. Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2019.
- Norma IRAM 210012 (1994). *Sistemas Solares Fotovoltaicos. Método de dimensionamiento simplificado*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales
- Navntoft, Christian & Cristófalo, María Paz. *Guía del Recurso Solar. 1 Edición Revisada. ISBN 978-987-47110-1-4*. [Versión digital]. Subsecretaria de Energías Renovables y Eficiencia Energética. Secretaria de Energía. Presidencia de la Nación. República Argentina. Ciudad Autónoma de Buenos Aires 2019.
- AEA 90364-Parte 7-Sección 712 (2015). *Reglamentación de Instalaciones Eléctricas en Inmuebles. Reglas particulares para las Instalaciones y Lugares especiales. Sistemas de Suministro mediante sistemas de energía mediante paneles solares fotovoltaicos*. Asociación electrotécnica Argentina.
- Wills Rosalie; Milke James A., Royle Sara & Steranka Kristin. *Best Practices for Commercial Roof-Mounted Photovoltaic System Installation. Springer Verlag. ISBN 978-1-4939-2882-8*
- Manual PVSyst V7 (2021). [Versión digital] Software desarrollado por Grupo de Energía. Instituto de Ciencias del Medio Ambiente. Universidad de Ginebra
- Manual de Ecotec Analysis (2011) [Versión digital]. Software desarrollado por Asidek.
- Manual de Meteororm. [Versión digital]. Software desarrollado por compañía fabricante suiza Meteotest AG.
- Alexandre, Charles K. & Sadiku Matthew N. O. *Fundamentos de circuitos eléctricos Quinta Edición ISBN: 978-607-15-0948-2*. The McGraw-Hill Companies México 2013.

# TRANSFORMACIÓN DE LA MATRIZ ELÉCTRICA ARGENTINA A FUENTES RENOVABLES, ANÁLISIS DEL IMPACTO EN LA REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CARBONO

Keesler, María Daniela<sup>a</sup>

a Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería  
[daniela.keesler@fio.unicen.edu.ar](mailto:daniela.keesler@fio.unicen.edu.ar)

## RESUMEN

Bajo la premisa de mantener el incremento de la temperatura media del planeta bajo umbrales aceptables para nuestra especie y el resto de los seres vivos, se buscan medidas tendientes a la reducción de emisiones de gases de carbono causantes de este fenómeno. Una de las principales fuentes de gases de efecto invernadero es el sector energético, y dentro de este la generación eléctrica es la que mayores avances ha tenido en la búsqueda de medidas para reducir las emisiones de carbono a la atmósfera, gracias al desarrollo y auge de las energías renovables. Pero, ¿es suficiente con el reemplazo de las tecnologías de generación eléctrica por fuentes renovables para lograr una reducción de emisiones de GEI significativa? La modelación de escenarios energéticos permite evaluar el impacto de estas medidas a mediano y largo plazo. En el presente documento se presenta un escenario tendencial para el sector energético argentino y se compara con un escenario alternativo en el que se transforma totalmente la matriz de generación eléctrica a fuentes renovables al año 2050. A partir de la demanda de combustible total en el período considerado se obtienen los senderos de emisiones asociados a cada escenario. Los resultados muestran que la conversión de la matriz de generación eléctrica es condición necesaria pero no suficiente para lograr una reducción significativa de las emisiones de GEI. Resulta necesario impulsar medidas para reducir el consumo de combustibles fósiles en el resto de los sectores de la economía.

**Palabras Claves:** Generación eléctrica, Energía renovables, Emisiones de carbono, Transformación energética, Escenarios energéticos.

**Área Temática:** ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES: Energía y medio ambiente.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desafío de mantener el incremento de la temperatura media del planeta dentro de límites aceptables para no afectar significativamente la vida tal cual la conocemos lleva a los países a tomar medidas tendientes a lograr una reducción de las emisiones en los diferentes sectores de la economía. A nivel global el sector con mayor responsabilidad sobre las emisiones de GEI es el sector de la energía (73,2% [1]), es por ello que los gobiernos impulsan medidas para transformar sus matrices energéticas altamente dependientes de los hidrocarburos hacia matrices con mayor participación de renovables. Uno de los sectores con mayor avance en este sentido, es el sector de generación eléctrica, que ha alcanzado un 28,3% [2] de participación de renovables en el año 2021, impulsado principalmente por la energía solar y eólica. Los países esperan que limpiar su matriz de generación eléctrica ayude a reducir sus inventarios de GEI de forma considerable.

La Argentina alcanzó un récord de 13 % de energía eléctrica generada a partir de fuentes renovables en 2021. Y apunta a continuar incrementando este personaje con medidas como la Ley 27.424 de Fomento a la Generación Distribuida de Energía Renovable.

La conversión de la matriz de generación eléctrica a fuentes renovables es condición necesaria para reducir la dependencia de los combustibles fósiles de las economías actuales y disminuir las emisiones de GEI, pero, ¿es suficiente para lograr una reducción significativa de las emisiones que asegure mantener la temperatura media del planeta dentro de los límites esperados? A continuación, se presenta el análisis de dos escenarios para la matriz de generación eléctrica argentina, el primero alcanza el 100% de energías renovables al 2050 (Escenario Alternativo) y se compara con un segundo escenario donde se continúan las políticas actuales en materia energética y se contemplan las medidas planteadas por el gobierno en la Resolución 1036/2021 de la Secretaría de Energía [3] (Escenario Tendencial).

En la sección dos se muestra cómo se llevó a cabo el proceso de modelado tanto de la demanda como de la oferta de energía, las decisiones y medidas modeladas en cada escenario. En la sección tres se presentan los resultados obtenidos para los dos escenarios modelados. Por último, en la sección cuatro se hace un breve análisis de los resultados obtenidos.

## 2. CONSTRUCCIÓN DE LOS ESCENARIOS

Para comprender el potencial de reducción de emisiones de la incorporación de las energías renovables en la matriz energética argentina, se propone el desarrollo de escenarios energéticos alternativos con alta penetración de la energía solar y eólica en la matriz de oferta eléctrica, considerando tanto la generación en forma concentrada como distribuida.

Para el desarrollo de los escenarios energéticos se utilizó como base la metodología SIMESEN (“Simulación de Escenarios Energéticos”—Simulation of Energy Scenarios) desarrollada por Instituto de Ingeniería Energética de la Universidad Politécnica de València [4]. La modelación de los escenarios energéticos se realizó con el apoyo del software LEAP (Low Emissions Analysis Platform), herramienta desarrollada por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo [5].

### 2.1. Modelado de la demanda

Para la demanda se modeló solo un escenario posible que considera que los diferentes sectores tendrán a futuro un comportamiento similar al presentado en el pasado. Por ello, para modelar su crecimiento, se utilizan las series históricas de crecimiento poblacional, crecimiento del PBI, crecimiento de cantidad de hogares y crecimiento del parque automotor. Estas series se obtuvieron de estadísticas oficiales de entes gubernamentales como el Instituto Nacional de Estadística y Censo (INDEC) y el Ministerio de Economía de la Nación. En la Tabla 1 se muestran las tasas de crecimiento interanual de cada una de las principales variables consideradas.

Tabla 1. Tasa de crecimiento interanual proyectada para las principales variables relacionadas a la demanda final de energía

Variable	Tasa de crecimiento interanual	Proyección utilizada
Población	0.7%	INDEC
PIB	2.0%	Elaboración propia en base histórico de INDEC

Parque automotor	2.5%	Elaboración propia en base histórico de AFAC <sup>1</sup>
Personas por hogar	-0.9%	Elaboración propia en base histórico de INDEC

Para determinar el mix de recursos energéticos consumidos por cada sector de demanda se utilizó el histórico del Balance Energético Nacional (BEN).

Los resultados obtenidos (Figura 1) están en línea con el crecimiento de la demanda de energía prevista por el Gobierno Nacional en la Resolución 1036/2021 de la Secretaría de Energía [3]. Además, se incorporaron en el modelado las medidas de eficiencia propuestas en la misma Resolución 1036/2021, que comprenden:

- Mejoras en la eficiencia del sector residencial (electrodomésticos más eficientes, iluminación LED, mejoras en la generación de agua caliente sanitaria, economización en el uso de agua, aislación térmica de edificios).
- Medidas de eficiencia en el sector industrial, incluyendo sistemas de gestión de la energía.
- Medidas de eficiencia en el transporte, cambio en patrones de movilidad urbana, recambios tecnológicos como incorporación de vehículos con tecnología flex, autos y buses eléctricos y mayor participación del GNC en toda la flota viva.

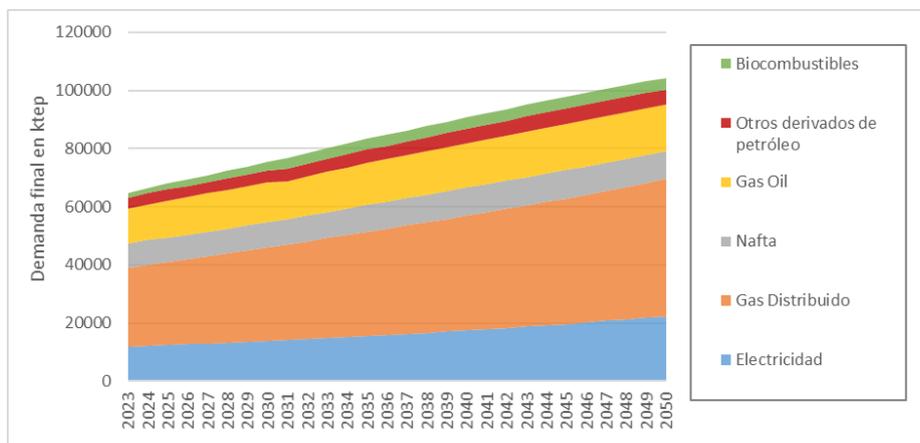


Figura 1. Demanda final por energético

## 2.2. Modelado de la oferta

En cuanto a los escenarios de oferta se consideran dos escenarios diferentes, un Escenario Tendencial y un Escenarios Alternativo.

El Escenario Tendencial se modela en base a la continuidad de las políticas actuales en materia energética, así como los lineamientos incluidos en la Resolución 1036/2021 de la Secretaría de Energía [3]. Se consideran, por lo tanto, la construcción de la cuarta central nuclear, la construcción de varias represas hidroeléctricas hoy dentro de la cartera de inversiones futuras (como las centrales Aña Cua y Chihuido I), así como la conclusión de obras en ejecución como las centrales sobre el Río Santa Cruz. Se contempla el cumplimiento de los porcentajes establecidos en la Ley 27.191 respecto de la participación de renovables en la matriz eléctrica y se proyecta continuar con la incorporación de renovables hasta el año 2050 con la misma tendencia actual. De esta forma, se alcanza una participación de 50% de renovables a 2050 en la matriz eléctrica. Además, se considera el reemplazo gradual de combustibles fósiles como fuel oil y diésel en centrales térmicas por gas natural. En lo que respecta a la producción hidrocarburífera nacional se consideraron las proyecciones del Estado Nacional tanto para los yacimientos convencionales como no convencional. Por otro lado, el Escenario Alternativo fue modelado buscando la transformación completa del parque de generación eléctrica a tecnologías libres de emisiones de GEI. Para ello se produce la salida de servicio escalonada de las centrales térmicas hoy existentes y la incorporación paulatina de fuentes renovables. Esta transformación se planteó en un horizonte de tiempo de casi 30 años, alcanzando la transformación total a 2050. A lo largo de todo el período de análisis se consideró mantener un margen de reserva<sup>2</sup> de potencia de entre 10 y 20% según estándares internacionales

<sup>1</sup> Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes (<http://www.afac.org.ar/>)

<sup>2</sup> Margen de reserva: Porcentaje excedente de potencia firme instalada sobre la potencia pico de demanda.

para el sistema eléctrico. Para las incorporaciones de potencia renovable se consideraron mejoras en los factores de capacidad en coincidencia con las tendencias mundiales [6]. En la Figura 2 se muestran las potencias instaladas necesarias en cada escenario de oferta planteado para asegurar el abastecimiento de la demanda y mantener el margen de reserva. El escenario alternativo requiere una potencia total instalada a 2050, 87% mayor que el escenario tendencial.

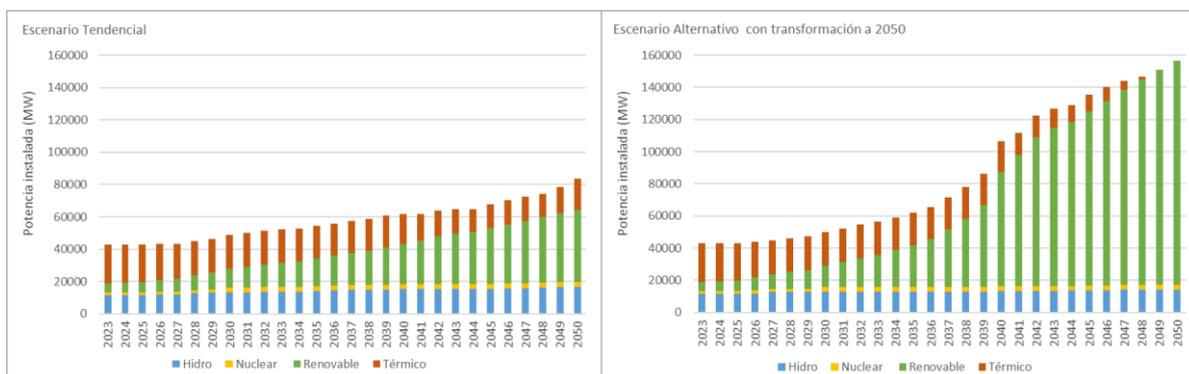


Figura 2. Potencia instalada para los dos escenarios de oferta eléctrica analizados

Esta diferencia en la necesidad de potencia instalada entre uno y otro escenario se da a causa de que, las tecnologías de generación eléctrica a partir de fuentes renovables como el recurso solar y eólico aportan una menor potencia firme al sistema debido a la intermitencia de la disponibilidad de estas fuentes. Por esta razón se requiere de mayor potencia instalada para asegurar la potencia firme necesaria para mantener el margen de reserva en los estándares especificados.

### 2.3. Estimación de los senderos de emisiones de GEI

Para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de cada uno de los escenarios se consideró el uso de combustibles en la demanda final y el uso de combustibles en las centrales térmicas para generación de energía eléctrica. En este último uso es dónde se da la diferencia en los escenarios planteados, por ello resulta relevante su correcto análisis.

La estimación del uso de combustible anual en el parque de generación eléctrica se realizó con la Ecuación (1):

$$M_i = \sum_{j=1}^n \frac{E_{(i,j)}}{PC_i \cdot \eta_j \cdot 8760 \cdot FC_j} \quad (1)$$

Donde,

$M_i$ : Consumo del combustible  $i$  ( $i$  = gas natural, gas oil, fuel oil, kerosene, carbón):

$E_{(i,j)}$ : Energía eléctrica generada a partir del combustible  $i$  en la central  $j$ , con  $j$  desde 1 hasta  $n$ , considerando todas las centrales térmicas del parque de generación que usan combustibles fósiles;

$PC_i$ : Poder calorífico del combustible  $i$ ;

$\eta_j$ : Rendimiento de la central  $j$ ;

8760: cantidad de horas de un año;

$FC_j$ : Factor de carga de la central  $j$ .

En la Tabla 2 se muestra el listado de centrales térmicas modeladas, con los valores de rendimiento y factor de carga utilizados. Además, se consideraron diferentes regímenes de despacho para cada central térmica, a fin de tener mayor precisión del uso efectivo de cada central y el consumo real de combustible. Los regímenes de despacho considerados fueron:

- "Full Capacity" (entrega toda la energía que genera) para las centrales de cogeneración
- "Running cost" (entra en funcionamiento según los costos de despacho) para el resto de las centrales.

Tabla 2. Centrales térmicas consideradas y sus principales variables

Central	Tipo	Situación	Factor de carga	Rendimiento
AES PARANA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	52%
COSTANERA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	41%

DOCK SUD	Ciclo Combinado	Existente	0.8	52%
GRAL BELGRANO	Ciclo Combinado	Existente	0.8	53%
GENELBA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	51%
CENTRAL PUERTO	Ciclo Combinado	Existente	0.8	46%
TIMBUES	Ciclo Combinado	Existente	0.8	53%
CENTRO	Ciclo Combinado	Existente	0.8	35%
PILAR	Ciclo Combinado	Existente	0.8	42%
AGUA DEL CAJON	Ciclo Combinado	Existente	0.8	25%
ALTO VALLE	Ciclo Combinado	Existente	0.8	36%
CAPEX	Ciclo Combinado	Existente	0.8	53%
LOMA DE LA LATA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	45%
LUJAN DE CUYO	Ciclo Combinado	Existente	0.8	46%
TUCUMAN	Ciclo Combinado	Existente	0.8	47%
PATAGONIA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	35%
BUENOS AIRES	Ciclo Diesel	Existente	0.45	34%
CENTRO	Ciclo Diesel	Existente	0.45	33%
COMAHUE	Ciclo Diesel	Existente	0.45	38%
CUYO	Ciclo Diesel	Existente	0.45	30%
NEA	Ciclo Diesel	Existente	0.45	36%
NOA	Ciclo Diesel	Existente	0.45	36%
COMAHUE	Ciclo Diesel	Existente	0.45	30%
BUENOS AIRES	Ciclo Diesel	Existente	0.45	30%
PATAGONIA	Ciclo Diesel	Existente	0.45	30%
LITORAL	Turbina de Gas	Existente	0.45	36%
BRIGADIER LOPEZ	Turbina de Gas	Existente	0.8	36%
GUILLERMO BROWN	Turbina de Gas	Existente	0.45	37%
ENSENADA	Turbina de Gas	Existente	0.8	37%
VUELTA DE OBLIG	Turbina de Gas	Existente	0.8	34%
CENTRO	Turbina de Gas	Existente	0.45	31%
COMAHUE	Turbina de Gas	Existente	0.45	33%
CUYO	Turbina de Gas	Existente	0.45	28%
NEA	Turbina de Gas	Existente	0.45	22%
NOA	Turbina de Gas	Existente	0.45	33%
TUCUMAN	Turbina de Gas	Existente	0.45	31%
TERMOANDES	Turbina de Gas	Existente	0.45	34%
PATAGONIA	Turbina de Gas	Existente	0.45	24%
BUENOS AIRES	Turbina de Gas	Existente	0.45	34%
COMAHUE	Turbina de Gas	Existente	0.45	32%
PATAGONIA	Turbina de Gas	Existente	0.45	25%
PIEDRABUENA	Turbina de Vapor	Existente	0.45	32%
BUENOS AIRES	Turbina de Vapor	Existente	0.45	27%
COSTANERA	Turbina de Vapor	Existente	0.45	32%
CENTRAL PUERTO	Turbina de Vapor	Existente	0.45	37%
SAN NICOLAS	Turbina de Vapor	Existente	0.45	33%
SORRENTO	Turbina de Vapor	Existente	0.45	31%
CENTRO	Turbina de Vapor	Existente	0.45	42%
CUYO	Turbina de Vapor	Existente	0.45	46%
GUEMES	Turbina de Vapor	Existente	0.45	36%

BUENOS AIRES	Turbina de Vapor	Existente	0.4	30%
NEA	Turbina de Vapor	Existente	0.4	30%
BRIGADIER LOPEZ	Ciclo Combinado	Existente	0.8	60%
ENSENADA	Ciclo Combinado	Existente	0.8	60%
VUELTA DE OBLIGADO	Ciclo Combinado	Existente	0.8	60%
COMAHUE	Turbina de Gas	Existente	0.8	42%
BUENOS AIRES	Ciclo Diesel	Futuro	0.8	34%
BUENOS AIRES	Turbina de Gas	Existente	0.85	38%
CENTRO	Turbina de Gas	Existente	0.8	39%
NOA	Turbina de Gas	Existente	0.85	38%
CUYO	Turbina de Gas	Existente	0.8	41%
NOA	Ciclo Diesel	Existente	0.8	44%
RIO TURBIO	Turbina de Vapor	Existente	0.8	35%
BUENOS AIRES	Cogeneración	Existente	0.9	58%
CUYO	Cogeneración	Existente	0.9	56%
Carbón IGCC	Ciclo Combinado	Futuro	0.8	48%
Carbón SC PCC	Turbina de Vapor	Futuro	0.8	42%
CICLO COMBINADO	Ciclo Combinado	Futuro	0.8	60%
TURBINA GAS	Turbina de Gas	Futuro	0.8	40%
COGENERACION	Cogeneración	Futuro	0.8	40%
MOTORES	Ciclo Diesel	Futuro	0.8	40%

Para la determinación de las emisiones de gases de efecto invernadero de cada escenario se consideraron los factores de emisión utilizados en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero [7], que a su vez se basan en las Guías Metodológicas 2006 del IPCC (Panel Intergubernamental del Cambio Climático) [8]. El potencial de calentamiento de cada gas considerado se tomó del Segundo Informe de Evaluación del IPCC [9], en coincidencia también con el adoptado por la Argentina para su Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.

Cabe aclarar que solo se consideran las emisiones de la quema de los combustibles utilizados en cada escenario, no así las emisiones fugitivas ligadas a la producción y transporte de esos combustibles.

### 3. RESULTADOS

La Figura 3 muestra el consumo total de combustibles de origen fósil en cada uno de los escenarios modelados, incluyendo el consumo de combustibles tanto en la demanda final como en la generación de energía eléctrica. En el Escenario Tendencial el consumo de combustible presenta una tendencia creciente constante durante el período de tiempo considerado. Mientras que para el Escenario Alternativo la pendiente de crecimiento del consumo de combustibles total es menor en los primeros años, para luego presentar un leve descenso a medida que más centrales térmicas alimentadas por combustibles fósiles salen de servicio. Pero finalmente el consumo vuelve a subir, debido al continuo aumento de la demanda final de combustibles en sectores como el transporte, la industria y el sector residencial. La reducción en el consumo de combustibles que presenta el escenario Alternativo respecto del Escenario Tendencial es de 14% (13 Mtep).

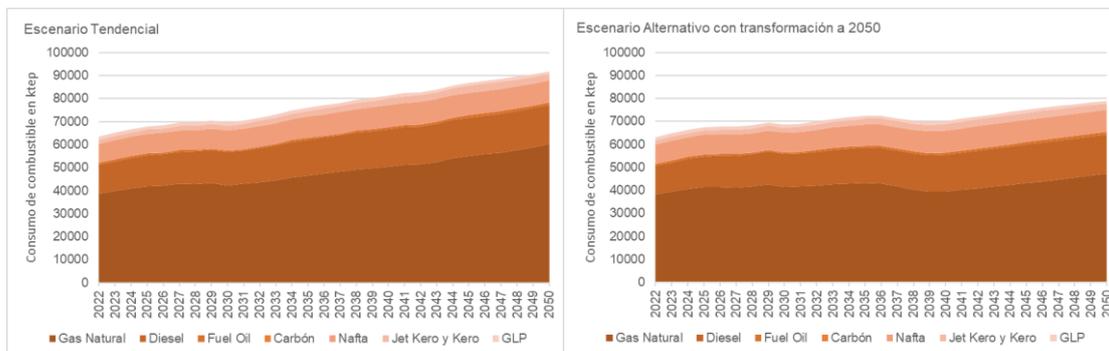


Figura 3. Consumo de combustibles en los escenarios analizados

Estos escenarios de consumo final de combustibles están ligados a los senderos de emisiones que se muestran en la Figura 4. El primero gráfico muestra las emisiones totales de GEI para cada escenario, mientras que el segundo gráfico muestra solo las emisiones generadas por la matriz eléctrica de cada escenario. La reducción de emisiones lograda en el Escenario Alternativo, debido a la transformación completa del parque de generación eléctrica hacia fuentes renovables, respecto al Escenario Tendencial es de 30 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>e. Esto representa una reducción de casi el 13% comparando ambos escenarios a 2050.

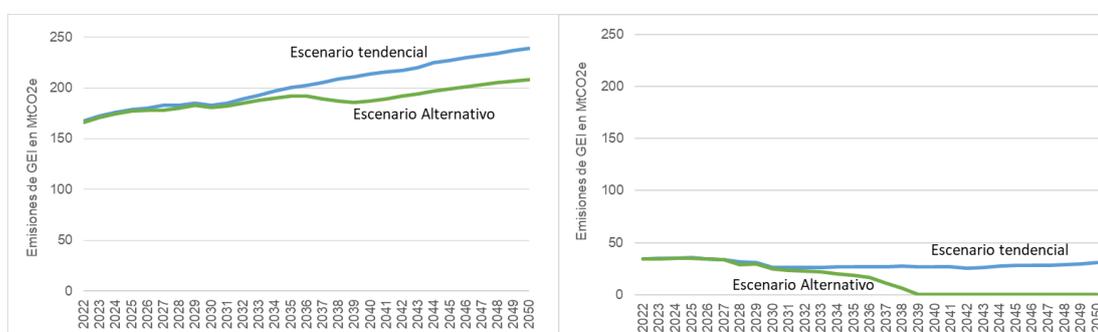


Figura 4. Comparativa de los senderos de emisiones totales de GEI y emisiones de la matriz eléctrica para el Escenario Tendencial y para el Escenario Alternativo

Además, se compararon las emisiones totales del sector de la energía a 2050 obtenidas para los escenarios modelados (239 MtCO<sub>2</sub>e para el Escenario Tendencial y 208 MtCO<sub>2</sub>e para el Escenario Alternativo) con las emisiones actuales del sector, las cuales fueron de 185,5 MtCO<sub>2</sub>e considerando el último Inventario de Gases de Efecto Invernadero de la Argentina del año 2018 publicado en 2021 (Figura 5).

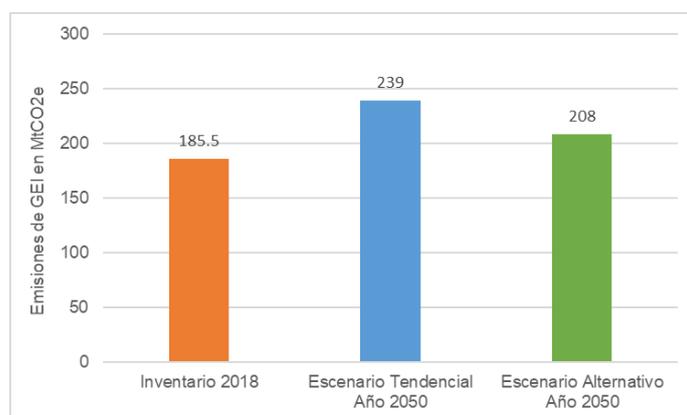


Figura 5. Emisiones del sector "Energía" actuales (año 2018) y futuras (año 2050)

De la Figura 5 se observa que las emisiones del sector crecerán un 29% a 2050 considerando el Escenario Tendencial y un 12% considerando el Escenario Alternativo. De este análisis se desprende que, a pesar de la transformación completa de la matriz de generación eléctrica a fuentes libres de emisiones de carbono, las emisiones del sector energético continuarán creciendo en el

futuro si no se adoptan medidas más abarcativas para el sector, que no sólo contemplen el subsector eléctrico, sino el resto de los subsectores que conforman el sector de la energía.

#### 4. CONCLUSIONES

La conversión de la matriz de generación eléctrica a una matriz totalmente renovable y limpia de combustibles fósiles, sin hacer ningún cambio significativo en los sectores de demanda final, se estima que logrará una reducción de emisiones de GEI de 30 MtCO<sub>2e</sub> respecto de las emisiones que se tendrán de continuar con la tendencia actual. Esta reducción significa apenas un 8% de las emisiones actuales de la Argentina (366 MtCO<sub>2e</sub> para el año 2018). Y si se tiene en cuenta las emisiones totales del sector energético, estas seguirán creciendo respecto de los valores actuales, aun cuando la matriz de generación eléctrica deje de aportar a las mismas.

Los resultados de las modelaciones muestran que la conversión de la matriz de generación eléctrica es condición necesaria pero no suficiente para lograr una reducción significativa de las emisiones de GEI. Resulta necesario impulsar medidas para reducir el consumo de combustibles fósiles en el resto de los sectores de la economía. Esto incluye la conversión de los diferentes sectores de demanda hacia otras tecnologías, como la electrificación de los consumos tanto sea residenciales, como el transporte; incorporación de nuevas formas de energía, como podría ser el uso de hidrógeno como vector energético; medidas de eficiencia energética más significativas; y, por último, pero no menos relevante, el cambio en los patrones de consumo.

La modelación de escenarios energéticos, como la realizada en el presente trabajo, es una herramienta que puede brindar información valiosa acerca de los resultados que pueden presentarse, tanto en el mediano como largo plazo, a raíz de la toma de diferentes decisiones para el sector energético y de la aplicación de diferentes medidas como las mencionadas en el párrafo anterior.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Ritchie, Hannah. Our World in Data, 2020: <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. Data sources: Climate Watch, World Resources Institute, 2020.
- [2] REN21. (2022). Renewables 2022 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat. ISBN 978-3-948393-04-5.
- [3] Ministerio de Economía (2021) Resolución 1036/2021. Anexo I, Lineamientos para un Plan de Transición Energética al 2030 de la Secretaría de Energía.
- [4] Peñalvo-Lopez, Elisa; Cárcel-Carrasco, Francisco Javier; Devece, Carlos; Morcillo, Ana Isolda. (2017). "A Methodology for Analysing Sustainability in Energy Scenarios". Sustainability. Vol. 9, no 9, p. 1590.
- [5] Heaps, Charles. (2022) LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.62] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. <https://leap.sei.org>
- [6] IRENA. (2022) Renewable Power Generation Costs in 2021. International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. ISBN 978-92-9260-452-3.
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Cuarto Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Argentina.
- [8] IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 2 Energía. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [9] IPCC. (1995) Segundo Informe de Evaluación (SAR).

# ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA EN EVAPORACIÓN EN UN INGENIO DE TUCUMÁN, ARGENTINA, DURANTE 10 AÑOS

Cruz, M. Carolina <sup>a</sup>, Diaz Gisela <sup>a</sup>, Franck Colombres Federico <sup>a</sup> y Dora Paz <sup>a</sup>  
Cruz, M. Carolina <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales  
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC)  
ccruz@eeaoc.org,ar

## RESUMEN

La evaporación del jugo de caña de azúcar es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar y representa el principal consumidor de vapor escape y en consecuencia es un factor determinante de la eficiencia energética de la planta. En este trabajo se evaluó el sistema de Calentamiento y Evaporación en un ingenio de Tucumán en forma periódica entre los años 2012 y 2021, y en base a estrategias de uso racional de la energía, se fueron planteando y realizando modificaciones tendientes a disminuir el consumo de vapor en el sector. Las modificaciones incluyeron principalmente el incremento de las extracciones de vapores vegetales y el aumento de temperatura de jugo claro. Para las evaluaciones se realizaron mediciones con instrumental apropiado y, con los datos obtenidos y el programa SIMCE 3.0, se resolvieron los balances de materia y energía. Se definió como "eficiencia de evaporación" a la relación entre el caudal másico de agua evaporada y vapor escape, la cual se tomó como indicador de la performance del sistema. Con respecto a la situación inicial de 2012, en la actualidad, se logró reducir el consumo de vapor escape en un 21,3% logrando un sistema 33,94% más eficiente.

**Palabras Claves:** Mediciones en fábrica, Uso racional de energía, Eficiencia energética.

**Área Temática:** Uso racional y eficiente de energía.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaporación de jugo de caña es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar, y su configuración es un factor que determina ampliamente la eficiencia energética de la planta industrial. Esta operación incrementa la concentración de jugo clarificado hasta un contenido de sólidos disueltos alrededor de 65-68%, lo cual la convierte en el principal consumidor de vapor. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que requiere la fábrica, y por lo tanto el arreglo de evaporadores es de gran importancia [1]. El evaporador más usado es de tipo Roberts, el cual está constituido esencialmente por una calandria tubular que tiene la función de intercambiar calor entre el vapor de calefacción que baña los tubos por el exterior y el jugo a evaporar que circula por el interior [2].

La eficiencia de evaporación se define como la relación entre el caudal másico total de agua evaporada y el vapor escape suministrado al primer efecto. Para incrementar la eficiencia de evaporación, se analizan estrategias de uso racional de la energía, las cuales dependen, entre otros, de tres factores: número de efectos, extracciones de vapor vegetal y temperatura del jugo a la entrada al primer efecto.

### 1.1 Número de efectos

Según Rillieux [1] en una evaporación de multiefecto con  $i$  efectos, sin extracciones de vapor vegetal, un kg de vapor evaporará aproximadamente  $i$  kg de agua. Por consiguiente, en un tren de evaporadores de dos efectos, un kg de vapor evaporará dos kg de agua, en uno de tres efectos, tres kilogramos de agua, etc. Por lo tanto, el vapor requerido para la evaporación de 1 unidad de masa de agua es aproximadamente  $1/i$  unidades.

El número óptimo de efectos se obtiene a partir de un balance económico teniendo en cuenta el ahorro de vapor de agua que se obtiene con el incremento en el número de efectos y la inversión adicional que se requiere.

### 1.2 Extracciones de vapor vegetal

El efecto de las extracciones de vapor vegetal efectuadas en los evaporadores sobre la eficiencia en una fábrica, se puede predecir con relativa precisión a partir del segundo principio de Rillieux. De acuerdo con esto, 1 kg de vapor vegetal extraído de un primer efecto, utilizado en reemplazo de vapor de escape para calentamiento, permite ahorrar en cuádruple efecto  $1/4=0,25$  kg de vapor escape, y en quíntuple efecto  $1/5=0,20$  kg de escape. Por ejemplo, si se extrae 1 tonelada de vapor vegetal del primer efecto de un quíntuple efecto, para realizar un calentamiento que antes se hacía con vapor escape, se logra ahorrar 0,2 toneladas de vapor escape, es decir, si antes se necesitaban en total 2 toneladas de vapor escape para el calentamiento y la evaporación, ahora se necesitarán en total 1,8 toneladas.

A medida que se incrementa el número del efecto desde el cual se extrae vapor, la temperatura de extracción es menor. En consecuencia para mejorar la eficiencia en el sistema de calentamiento y evaporación (y a menudo la capacidad), se prefiere efectuar las extracciones desde un efecto tan cerca del último como sea posible (naturalmente esto estará condicionado por la tarea para la cual sea utilizado el vapor). Es decir, por ejemplo, si en un sistema en quíntuple efecto para reemplazar vapor escape en calentadores se extrae 1 kg de vapor del primer efecto, se tendrá un ahorro de  $1/5$  kg de escape en el sistema, pero si en su lugar se emplea 1 kg de vapor del segundo efecto, el ahorro sería de  $2/5$  kg de escape, y si se empleara 1 kg de vapor del tercer efecto, el ahorro ascendería a  $3/5$  kg de escape.

### 1.3 Temperatura de entrada de jugo clarificado

Si el jugo claro ingresa a una temperatura menor a la temperatura de saturación de la caja evaporadora, parte del calor que transfiere el vapor escape calienta primero el jugo, hasta alcanzar dicha temperatura, y luego recién comienza la evaporación del jugo. Bajo estas circunstancias el evaporador pierde eficiencia, ya que funciona parte como calentador y parte como evaporador. Si el jugo claro ingresa a la temperatura de saturación del cuerpo, el calor que transfiere el vapor se emplea solo para evaporar el agua presente en el jugo. Por ejemplo, si el jugo claro ingresa a  $95^{\circ}\text{C}$  al primer efecto y este trabaja a una temperatura de  $115^{\circ}\text{C}$ , el jugo dentro del cuerpo, primero se calentará desde  $95$  a  $115^{\circ}\text{C}$  y recién a partir de allí, comenzará a evaporarse. Es decir el evaporador trabajará como calentador para luego trabajar como evaporador, con lo cual se pierde eficiencia.

En trabajos anteriores [3], [4], [5], ya se analizó el uso de esta metodología de análisis para ingenios de distinta concepción tecnológica, con el objetivo de evaluar este tipo de sistemas de calentamiento y evaporación (C-E), con resultados satisfactorios.

Existen también publicaciones previas [6], [7] con el uso del software de simulación SIMCE que resuelve los balances de materia y energía del sistema de C-E.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los períodos entre 2012 y 2021, en el transcurso de 7 zafras: 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2021, se realizaron estudios de eficiencia energética que comprenden ensayos de medición, evaluación energética y propuestas de mejoras en el sector de Calentamiento y Evaporación (C-E). A partir de estos ensayos, que permiten determinar el estado operativo del sistema al momento de su realización, se propusieron cambios en el esquema de calentamiento y evaporación, con el objetivo de aumentar su eficiencia, y en un periodo posterior se evaluó su desempeño. Las modificaciones propuestas se hicieron en base a estrategias de uso racional de la energía, e incluyeron principalmente mayores extracciones de vapores vegetales y aumento de temperatura de jugo claro antes de su ingreso a la evaporación.

### 2.2. Descripción del sistema de Calentamiento - Evaporación (C-E).

En la Figura 1 se muestra el esquema de evaporación, tal cual se encontraba en el año 2012, cuando se inició el estudio. En el mismo se indican las superficies en m<sup>2</sup> de cada cuerpo de evaporación y las superficies de calentamiento disponibles en los calentadores de jugo encalado.

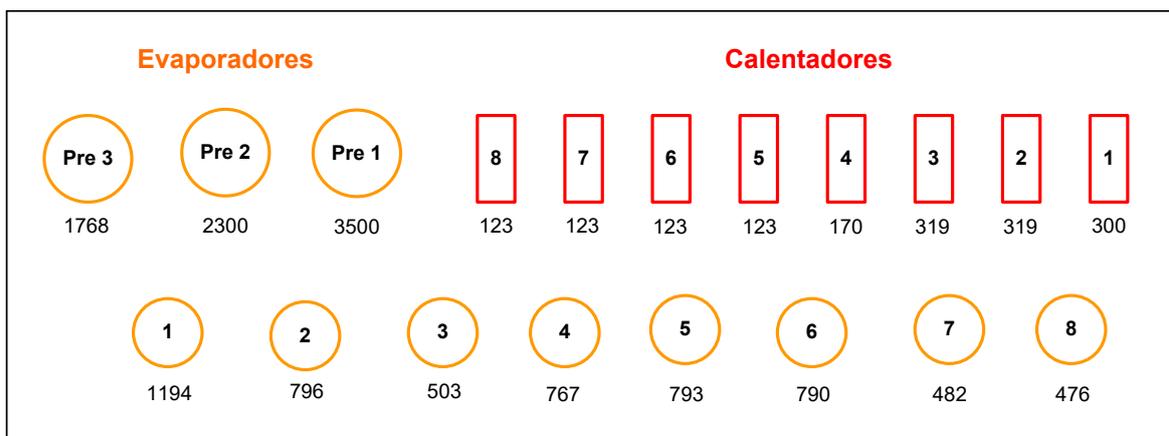


Figura 1. Esquema del sistema de calentamiento y evaporación correspondiente a la zafra 2012.

El ingenio en estudio tenía en 2012 una mollienda que rondaba, en promedio, 5800 TCD. El sistema de evaporación de cuádruple efecto tenía a disposición un total de 11 cajas de evaporación denominadas: Pre 1, Pre 2, Pre 3, Cajas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

Generalmente como primer efecto funcionaban pares de Pre 1, Pre 2 y Pre 3, como segundo efecto las Cajas 1, 2, y 3, como tercer efecto la Caja 5 ó la 6 y como cuarto efecto un par conformado por las Cajas 7 y 8.

El primer efecto se alimentaba con vapor escape (VE) en paralelo, y en serie con el jugo. Lo mismo ocurría con los demás efectos conformados por más de una caja, que se alimentaban con vapor vegetal del efecto anterior en paralelo, y en serie con respecto al jugo.

Los calentamientos de jugo encalado se efectuaban en intercambiadores de calor de tubos-carcaza. Dicho calentamiento se realizaba con vapor vegetal del primer efecto (VG1) y vapor vegetal del segundo efecto (VG2), utilizando para ello los calentadores en serie (Calentadores JE) denominados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. En ese momento no se realizaba recalentamiento de jugo claro antes de su ingreso al primer efecto de evaporación.

Con respecto a los consumos adicionales de vapores vegetales, se extraía vapor del primer efecto para abastecer a la refinería y vapor del segundo efecto para calentar los tachos de cocimiento de la fábrica de crudo (Figura 2).

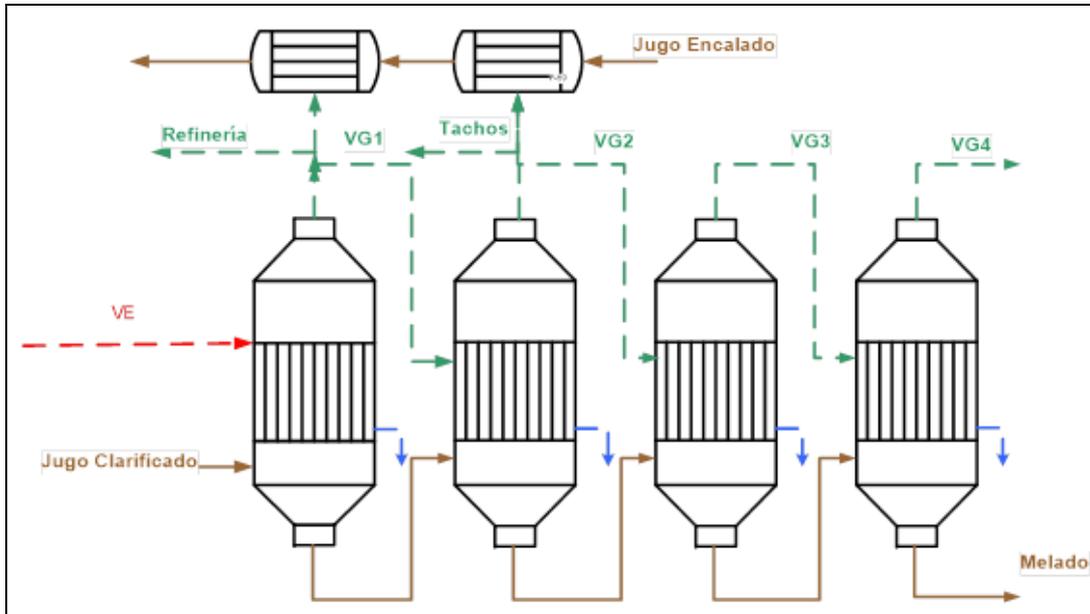


Figura 2. Esquema de evaporación del ingenio en estudio correspondiente a la zafra 2012. Elaboración propia.

### 2.3. Modificaciones en el sistema de C-E.

Durante los años que el ingenio fue evaluado, se realizaron cambios en el sistema, con el objetivo de hacerlo más eficiente, a partir del uso racional de la energía. En tal sentido, se recomendó aumentar el uso de vapores vegetales, incorporando las extracciones de vapor vegetal de los últimos efectos para el calentamiento de jugo encalado, y VG1 para calentamiento de jugo clarificado. Además se aconsejó que el consumo vapor escape de refinería se realice con VG2 y que tres tachos (los más pequeños y sin agitación) se alimenten con VG1. El ingenio fue adoptando estos cambios de manera progresiva en la medida de sus posibilidades.

En el año 2012, cuando se comenzó con la evaluación del sistema C-E, el ingenio incorporó una caja de evaporación nueva al sistema, llamada Pre 1 (Figura 1) de 3541 m<sup>2</sup> de superficie, con el objetivo de aumentar la molienda en próximas zafras.

Durante las zafras 2014 y 2015 se trabajó con extracción de vapor vegetal del tercer efecto para calentar jugo encalado y se implementó el recalentamiento de jugo clarificado, antes de su ingreso al primer cuerpo de evaporación, con vapor vegetal del primer efecto y luego con vapor escape (Figura 3).

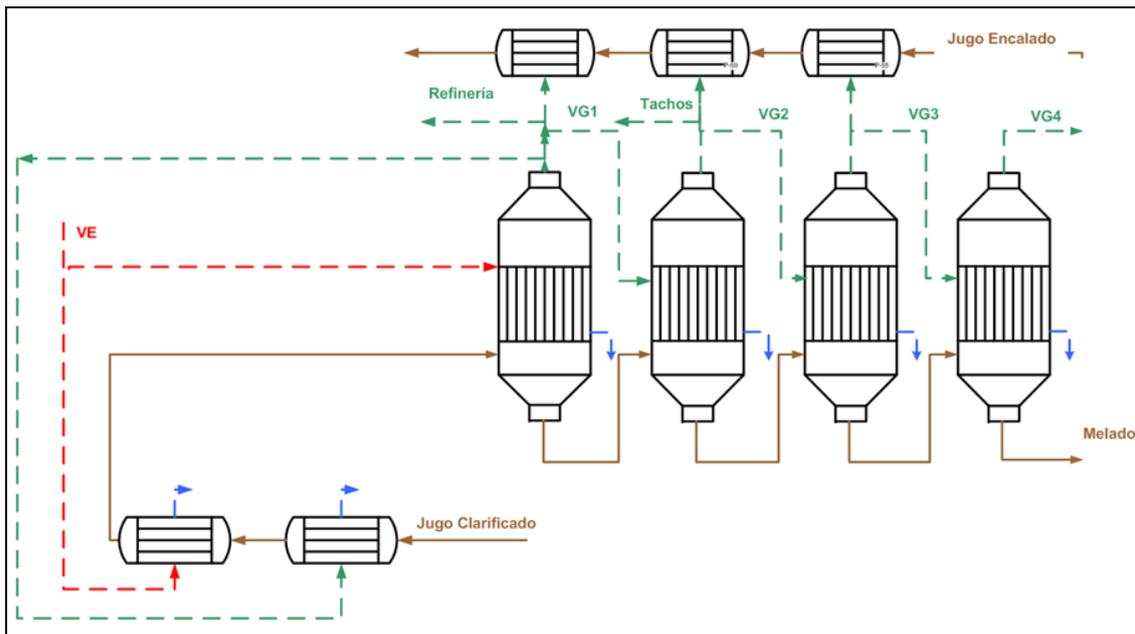


Figura 3. Sistema de C-E con extracción de vapor vegetal del tercer efecto y la incorporación de recalentadores de jugo claro con VG1 y VE correspondientes a las zafras 2014 y 2015. Elaboración propia.

Durante las zafras 2016 y 2017 se añadió la extracción de vapor vegetal del cuarto efecto para calentar la primera etapa de jugo encalado y se continuó con el trabajo de recalentar jugo clarificado antes de su entrada al tren de evaporación (Figura 4).

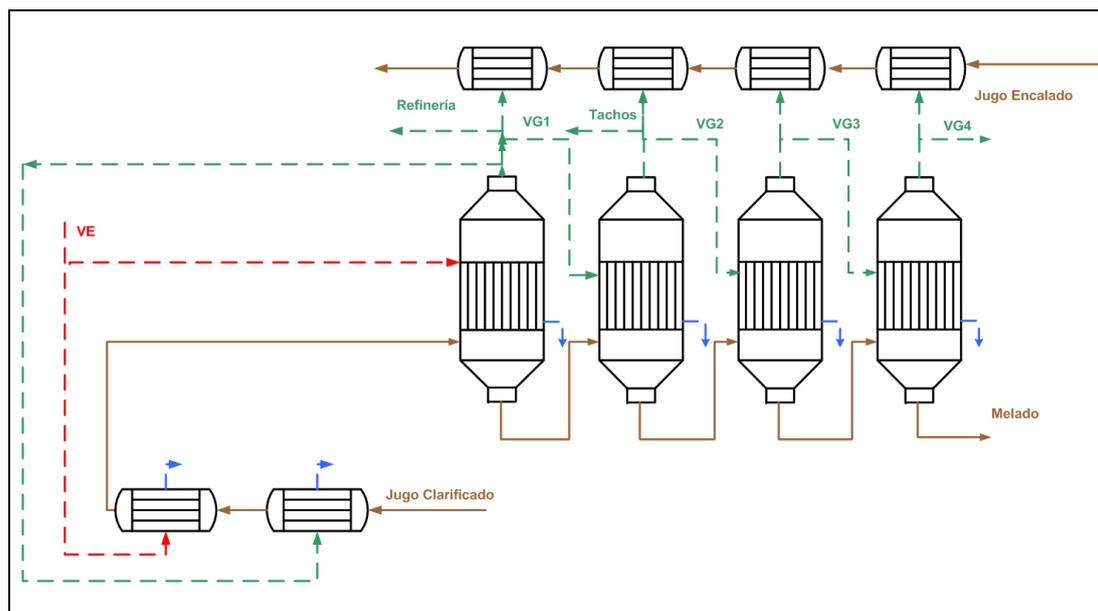


Figura 4. Sistema de C-E con extracción de vapor vegetal del cuarto efecto correspondiente a las zafras 2016 y 2017.

En el año 2019 se agregó una nueva caja de evaporación de iguales características que la llamada Pre 1. Se comenzó a derivar VG2 para tachos y refinera y solo tres tachos pequeños quedaron abastecidos por VG1.

A partir de la zafra correspondiente al año 2020, el ingenio se mantuvo en características similares al año 2019, el sistema quedó conformado como se ve en la Figura 5. Los equipos en líneas de trazos son los que se incorporaron al sistema durante las zafras estudiadas.

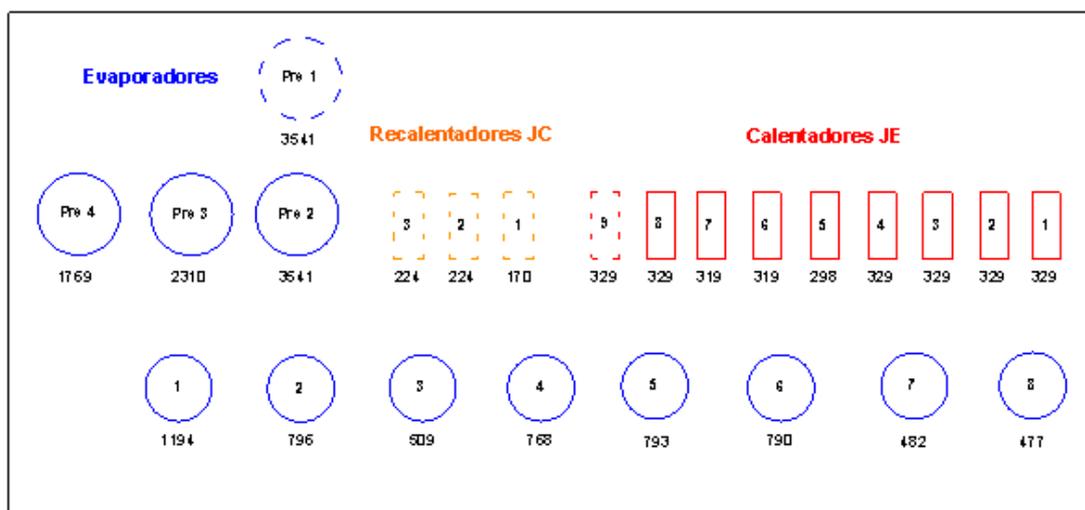


Figura 5. Esquema del Sistema Calentamiento y Evaporación correspondiente al año 2021.

#### 2.4. Mediciones en fábrica

Los ensayos de medición en fábrica se llevaron a cabo durante 7 zafras correspondientes a los años 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2021. Generalmente los ensayos de evaporación en fábrica se realizan de tres a siete días, dependiendo del requerimiento y disponibilidad de la fábrica. Durante los ensayos se miden caudales y temperaturas de jugo clarificado y encalado, y temperatura del vapor de calefacción en las diferentes etapas de calentamiento. Este ingenio cuenta con medidores de temperatura de jugo en los calentadores, cuyos valores se registraron para luego ser comparados con los valores medidos con instrumental de la EEAOC.

En el sistema de evaporación ensayado en fábrica, se tomaron muestras de las entradas y salidas de jugo en las cajas, que luego fueron analizadas con instrumental del ingenio y de la EEAOC, para la determinación de Brix. Además se midieron temperaturas de jugo, vapor de calefacción y vapor vegetal. También se tomaron nota de los valores de presiones y temperaturas de los vapores de las cajas.

## 2.5. Balances de masa y energía en el sistema C-E.

Para resolver los balances de masa y energía y conocer el caudal de vapor escape consumido durante los ensayos, se utilizó la simulación de procesos por computadora, empleando el programa de simulación SIMCE 3.0 [8], [9]. Este software permite resolver los balances de masa y energía en estado estacionario de sistemas de C-E de la industria azucarera. La técnica consiste en la representación del proceso industrial mediante un modelo matemático, cuya resolución permite predecir la performance probable del proceso real. La utilidad práctica de esta técnica radica en pronosticar la tendencia de evolución de las variables de proceso en respuesta a diversos juegos de valores de entrada y condiciones de operación.

En la Figura 6 se observa un esquema del modelo de evaporador empleado.

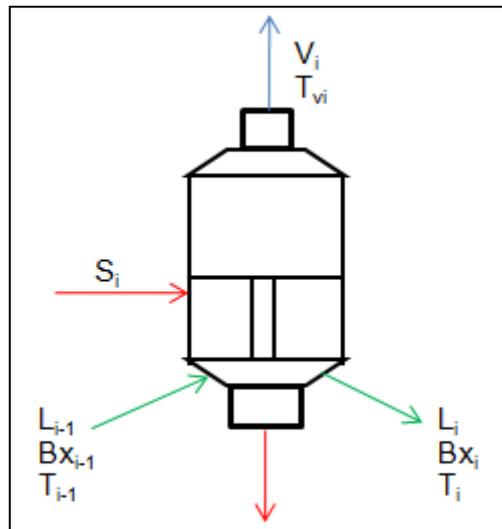


Figura 6. Modelo de evaporador empleado para el efecto i. Elaboración propia.

### 2.5.1. Balances de masa

En la Ecuación (1) se plantea el balance de masa total y en la Ecuación (2) el balance de sólidos.

#### 2.5.1.1. Balance total:

$$L_{i-1} = L_i + V_i \quad (1)$$

#### 2.5.1.2. Balance de sólidos:

$$L_{i-1} * Bx_{i-1} = L_i * Bx_i \quad (2)$$

Donde:

Bxi: Brix del líquido a la salida del efecto i.

Bxi-1: Brix del líquido a la entrada del efecto i-1.

Li: caudal másico del líquido a la salida del efecto i.

Li-1: caudal másico del líquido a la salida del efecto i-1.

Vi: caudal másico del vapor vegetal producido en el efecto i.

### 2.5.2. Balance de energía:

Se toma la temperatura del líquido a la salida de cada efecto como la temperatura de referencia, entonces el balance de energía resultante es el expresado en la Ecuación (3).

$$(1 - \epsilon) * S_i * \lambda_{Si} + L_{i-1} * C_{pi-1} * [T_{i-1} - T_i] = V_i * [C_{pag} * (T_{vi} - T_i) + \lambda_{vi}] \quad (3)$$

Dónde:

Cpag: calor específico del agua en estado líquido.

Cpi-1: calor específico a presión constante del líquido.

Si: caudal másico del vapor calefaccionante del efecto i.

Ti: temperatura de salida del líquido a la salida del efecto i.

Ti-1: temperatura de salida del líquido a la salida del efecto i-1.

Tvi: temperatura del vapor producido en el efecto i.

$\lambda_{Si}$ : calor latente de vaporización del vapor calefaccionante del efecto i.

$\lambda_{vi}$ : calor latente de vaporización del agua a Tvi.

$\epsilon$ : fracción de pérdidas calóricas por radiación.

### 2.5.3. Ecuación de transferencia de calor

En la Ecuación (4) se plantea el balance de transferencia de calor donde se pone en juego, el coeficiente de transferencia de calor (U) y la superficie necesaria (A) para el fenómeno de transporte que tiene lugar.

$$U * A * [T_{Si} - T_i] = S_i * \lambda_{Si} * (1 - \epsilon) \quad (4)$$

Dónde:

A: superficie de calefacción del efecto i.

T<sub>Si</sub>: temperatura del vapor calefaccionante del efecto i.

U: coeficiente de transferencia de calor del efecto i.

Para resolver el modelo del evaporador ensayado también fue necesario considerar ecuaciones complementarias y empíricas para calcular el aumento del punto de ebullición (IPE), el coeficiente de transferencia (U), los calores latentes de vaporización ( $\lambda_v$  y  $\lambda_s$ ) y el calor específico (cp). Estas ecuaciones a su vez dependen de los valores de Brix de jugo de entrada ( $Bx_{i-1}$ ) y Brix de salida ( $Bx_i$ ) de cada efecto, de la temperatura de vapor de calefacción y de vapor vegetal; y se encuentran con más detalle en [10].

### 2.6. Simulación

Para la simulación se emplearon los valores promedio de: molienda, caudal de jugo claro y encalado (en % caña), Brix de jugo claro, encalado y melado, temperatura de saturación correspondientes a las presiones de cada efecto, temperatura de vapor escape (saturado), temperatura de jugo encalado en los calentadores y temperatura de entrada de jugo claro al primer efecto.

### 2.7. Eficiencia en evaporación

Las modificaciones que se realizaron durante las zafas se tradujeron en una disminución del consumo de vapor escape. Para poder analizar la evolución del ingenio se calculó para cada año la eficiencia en evaporación que se definió según Ecuación (5):

$$\eta_{evap} = AE / VE \quad (5)$$

Dónde:

AE: cantidad de agua evaporada, en [tn/h].

VE: cantidad de vapor escape total insumido en la evaporación, en [tn/h].

Además, se determinó para cada año, la mejora que se obtuvo con respecto al año anterior. Esta mejora se calculó según Ecuación (6):

$$\% \text{ mejora} = \frac{\eta_{evap(n)} - \eta_{evap(n-1)}}{\eta_{evap(n-1)}} * 100 \quad (6)$$

Dónde:

$\eta_{evap(n)}$ : eficiencia en evaporación del año en estudio, en %.

$\eta_{evap(n-1)}$ : eficiencia en evaporación de año anterior, en %.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1, se pueden observar las principales variables evaluadas en el sistema de C-E de jugo, para las zafas analizadas. Se detalla la molienda, la temperatura del jugo clarificado antes de su ingreso a la primera etapa de evaporación y la concentración del melado.

Tabla 1. Cuadro resumen de los datos obtenidos de las variables consideradas durante las siete zafras (2012 – 2021).

Variables promedio consideradas								
Parámetros	Unidad	Ensayo 2012	Ensayos 2014	Ensayos 2015	Ensayos 2016	Ensayos 2017	Ensayos 2020	Ensayos 2021
Molienda	TCD	5.776	6.781	7.001	7.035	7.677	8.884	9.718
	t/h	240,7	282,6	291,7	293,1	319,9	370,2	404,9
Temperatura de jugo claro, de entrada al 1º efecto de evaporación.	°C	94	103,2	101,4	104,6	111,8	110,5	111,0
Brix melado	%Bx	65,0	67,1	66,5	65,5	60,4	62,8	67,8
Area total instalada de evaporación	m <sup>2</sup>	9.918	10.230	10.335	9.989	10.313	14.261	14.261

La molienda aumentó durante el período evaluado, esto se puede ver gráficamente en la Figura 7. Para el año 2021 se incrementó en un 68,2 % con respecto al año de inicio (2012) de los ensayos de evaporación en el ingenio.

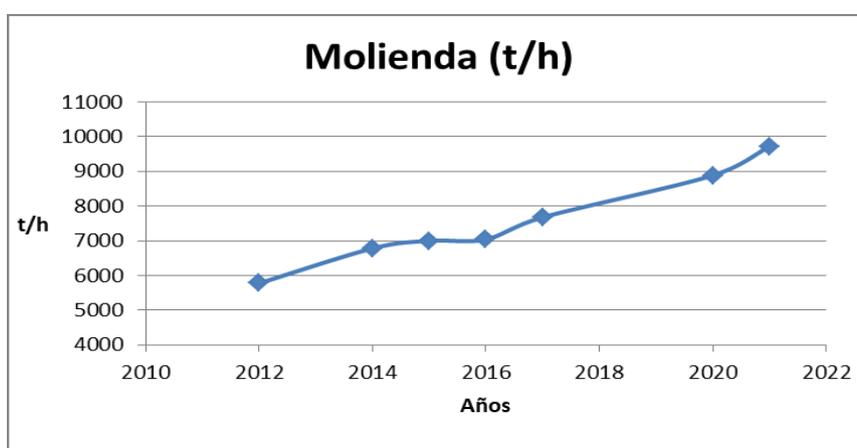


Figura 7. Evolución de la molienda durante las siete zafras (2012 - 2021).

A partir de la incorporación de recalentadores de jugo clarificado (2014), la temperatura del mismo se aproximó a la temperatura de saturación del primer cuerpo (114 – 115 °C), logrando que el evaporador trabaje de manera más eficiente.

Si nos enfocamos en la concentración del melado durante el período analizado se observó un valor mínimo de 60,4 Brix en el año 2017 y un valor máximo de 67,8 Brix en la zafra 2021, lográndose un incremento de 12,3%.

El área total de evaporación instalada tiene en cuenta el promedio de la superficie que estuvo en operación durante las mediciones. Como se mencionó antes, se incorporaron dos cajas de similares características durante los años 2012 y 2019, esto representa un incremento de 43,79% de superficie de evaporación disponible.

En Tabla 2 se presentan los resultados de las variables calculadas más relevantes del sistema.

Tabla 2. Cuadro resumen de los datos obtenidos de variables calculadas, desde el año 2012 al año 2021.

Variables calculadas								
Parámetros	Unidad	Ensayos 2012	Ensayos 2014	Ensayos 2015	Ensayos 2016	Ensayos 2017	Ensayos 2020	Ensayos 2021
Extracción total de VG1	%C	19,9	22,6	16,2	18,5	15,8	6,9	8,0
Extracción total de VG2	%C	18,0	11,5	15,4	14,5	13,1	17,5	18,0
Extracción de VG3	%C	-	5,9	4,6	4,5	3,3	4,0	4,0
Extracción de VG4	%C	-	-	-	4,3	5,1	3,6	3,4
VG4 al condensador	%C	5,7	3,2	4,2	1,4	1,58	2,3	1,4
Vapor escape	T/h	114,6	125,1	131,0	130,7	130,0	138,9	151,5
	%C	<b>47,6</b>	44,5	44,9	44,6	40,6	37,5	<b>37,4</b>
Agua evaporada (AE)	T/h	<b>181,3</b>	204,6	214,0	231,4	239,7	282,0	<b>294,0</b>
	%C	75,3	72,5	73,4	79,0	74,9	76,2	72,6
Eficiencia en evaporación = AE/VE	-	<b>1,58</b>	1,63	1,63	1,77	1,84	2,12	<b>2,12</b>
% Mejora	%	-	2,91	0,33	8,33	4,14	14,99	0,00

En Tabla 2, en las filas 3 y 4, de extracciones de VG3 y de VG4, se observan los valores en % caña de los vapores derivados para calentamiento de jugo encañado. En el año 2020, se decidió derivar VG1 para alimentar solo a tres tachos, los más pequeños existentes en línea, y el resto de tachos y el consumo de refinería se alimentó con VG2. Es por ello, que desde el 2020, la extracción de VG1 a tachos es inferior a la cantidad extraída de VG2 para tachos y refinería.

La cantidad de vapor que se dirigió al condensador barométrico es una medida del uso de los vapores vegetales. Se trató de minimizar este caudal para mejorar la eficiencia del sistema. Si comparamos el año 2021 con el año 2012, se logró reducir la cantidad de vapor al condensador barométrico en un 75,4 %.

En la Figura 8 se presenta gráficamente la producción de agua evaporada. Aquí se observa claramente que la cantidad de agua evaporada fue en ascenso, reflejando un buen desempeño del cuádruple efecto. Este valor se incrementó en un 62,2 % en TCD desde 2012 a 2021.

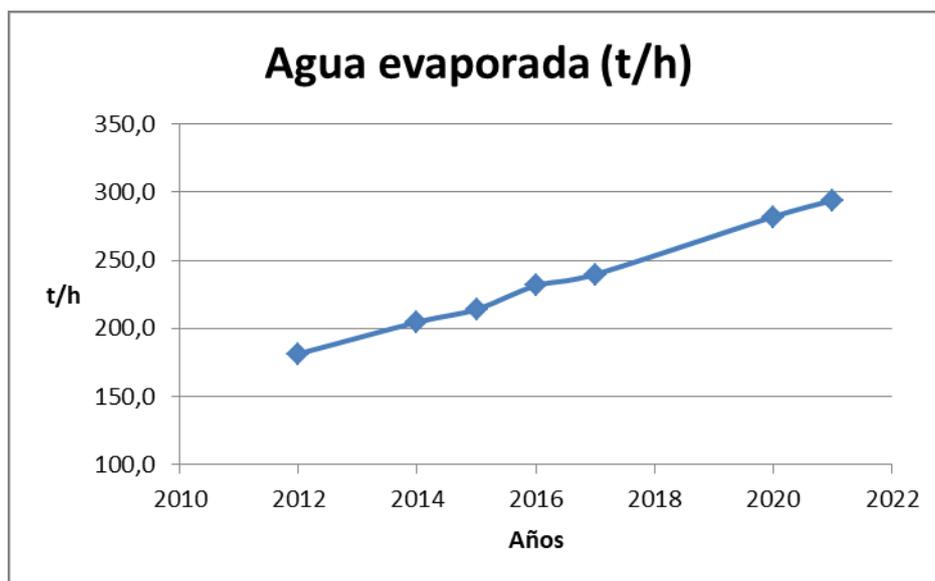


Figura 8. Cantidad de agua evaporada por el sistema durante los años en estudio.

En la Figura 9 se observa la evolución del consumo de vapor escape. En este sentido se demostró gráficamente que este consumo fue disminuyendo a través de las modificaciones que se realizaron en el sistema de C-E. Si comparamos el consumo de vapor escape en el año 2021 con el del año 2012, este valor disminuyó un 21,4 %.

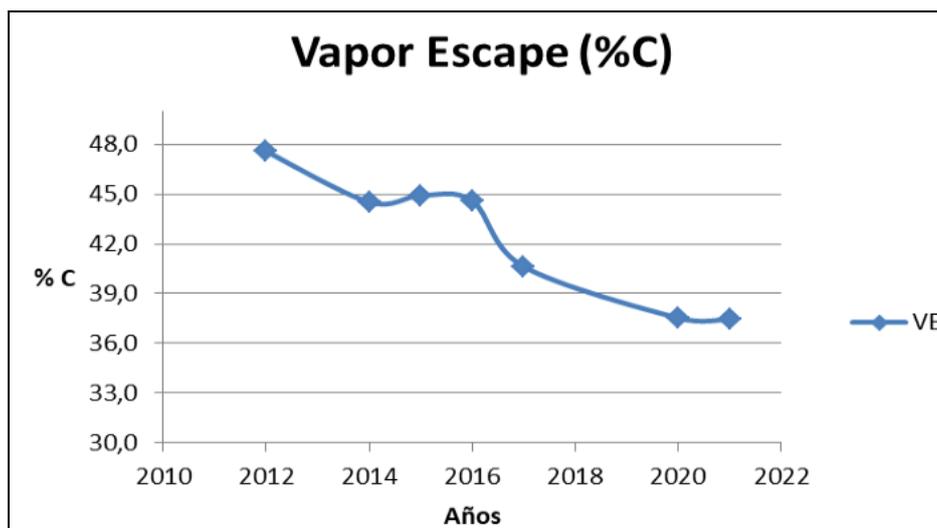


Figura 9. Consumo de vapor escape durante las zafas en estudio.

En la Figura 10, se muestra la eficiencia que tuvo el sistema de evaporación durante el tiempo analizado. Para los dos últimos años, obtuvo un valor de 2,12. Asimismo para 2021 el sistema fue 33,94 % más eficiente comparado con el año 2012.

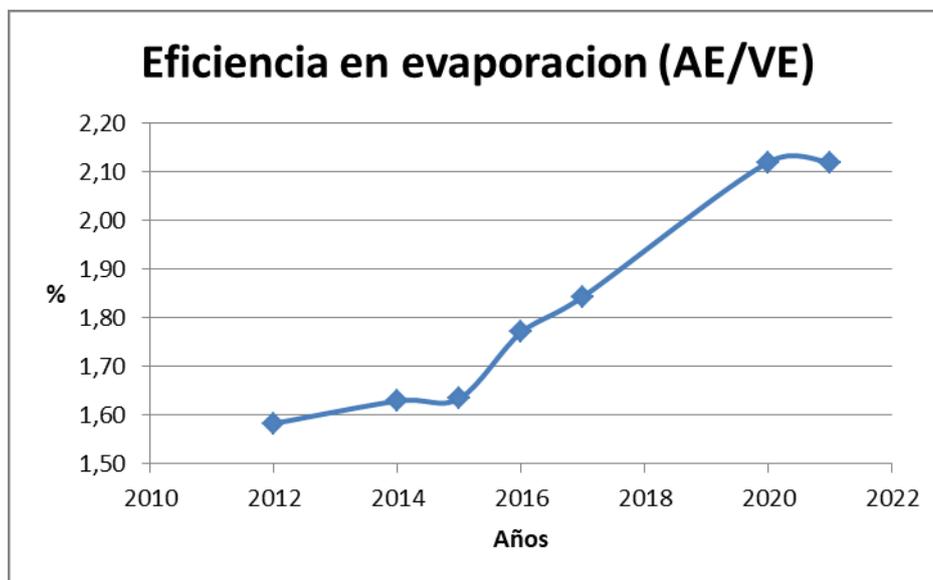


Figura 10. Eficiencia en el sistema C-E durante los años en estudio.

Los valores de mejora para cada año con respecto al año anterior fueron siempre positivos, lo que indica que las estrategias implementadas basadas en el uso racional de la energía fueron beneficiosas para el sistema. El porcentaje de mejora para los últimos años fue de 14,99 %.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que se mejoró el sistema de calentamiento y evaporación desde el año 2012 hasta el año 2021, siendo el sistema más eficiente en un 33,94 % para este último año, si se analiza la eficiencia de evaporación. Esto fue consecuencia de la implementación de estrategias de uso racional de la energía, a partir de las cuales se incorporaron estratégicamente nuevas extracciones de vapor vegetal para calentamiento de jugo encalado y nuevos equipos calentadores de jugo clarificado. Asimismo la mejora de cada año con respecto al año anterior fue siempre positiva, habiendo logrado el mayor valor entre el año 2020 y el 2021, con un 14,99%.

Este trabajo refleja la importancia y el potencial de los estudios realizados sobre los sistemas de calentamiento y evaporación, que permiten analizarlos para proponer posibles mejoras y luego comprobarlas. En este caso se logró una importante disminución del consumo de vapor escape, del 21,30 %, que está directamente relacionada con una mejora en la eficiencia de la planta fabril, lo que podría traducirse en una disminución del consumo de combustible fósil o un aumento de excedentes de energía eléctrica para la red. Además del beneficio económico que ello conlleva, implica también propender a la sustentabilidad, es decir, hacer un uso consciente y responsable de los recursos, sin agotarlos o exceder su capacidad de renovación, y sin comprometer el acceso a estos por parte de generaciones futuras.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA CITADA

- [1] Peter Rain. 2012. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlin 2012.
- [2] Almirón M. y Paz, D. 2006. Evaporadores empleados en la industria azucarera de caña. 2006. Avance Agroind.(38): 33-38.
- [3] Ruiz. R.M., Paz de Vazquez, D., Cárdenas G. y Aso G. 1991. Evaluación térmica experimental de evaporadores. Comparación con resultados obtenidos por simulación digital. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 68 (1-2):149-163.
- [4] Ruiz. R.M., Paz de Vazquez D., Cárdenas G. y Aso G. 1992. Análisis de las diferentes alternativas de evaporación de la industria azucarera mediante simulación digital. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 69 (1-2):119-129.
- [5] Diez. O. A., Aso G., Paz D. y Cárdenas, G. 1998. Mejoramiento energético de un ingenio mediante reordenamiento de equipos existentes. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 75 (1-2):11-24.
- [6] Paz D.; Ruiz, R.M.; Aso G. y Cárdenas, G.J. 2003. Optimización del balance de vapor de la fábrica cuando se reemplazan los tradicionales molinos por un difusor de caña. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 80 (1-2):11-24.
- [7] Diez, O.A.; Cruz, C. y Cárdenas, G.J. 2011. Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol en Tucumán, R. Argentina. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 88 (2):27-40.

- [8] Lopez, A.O.; Paz, D.; Diez, O.A. y Cárdenas, G.J.. 2000. SIMCE 2.0: nuevo software para el análisis de sistemas de calentamiento, evaporación y cocimientos de la industria azucarera. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán 77 (1):89-98.
- [9] Paz D., Cárdenas G.J., Diez, O.A. y Lopez, A.O. 2000. Inscripción en Dirección Nacional del Derecho del autor como obra publicada (Nº 105662) del software SIMCE 2.0, especialmente preparado para el análisis, diseño y simulación de sistemas de calentamiento evaporación y cocimiento en la industria azucarera.
- [10] Lopez, A.O.; Paz, D.; Diez, O.A. y Cárdenas, G.J.. 2000. Manual del usuario de SIMCE 2.0.

# GENERACIÓN DE ENERGIA ELÉCTRICA EMPLEANDO UNA PLATAFORMA BASADA EN PIEZOELECTRICIDAD

Sandoval-Rodríguez, Camilo Leonardo, Ascanio -Villabona, Javier Gonzalo, Rincón -Quintero, Arly Darío, Lengerke, Omar, Castillo, Nilson Yulián, Duran, Miguel Arlenzo

Sandoval-Rodríguez, Camilo Leonardo<sup>a-b</sup>, Ascanio -Villabona, Javier Gonzalo<sup>a-b</sup>, Rincón -Quintero, Arly Darío<sup>a-b</sup>, Lengerke, Omar<sup>a</sup>, Castillo, Nilson Yulián<sup>a</sup>, Duran, Miguel Arlenzo<sup>a-b</sup>

a Unidades Tecnológicas de Santander

b Universidad del País Vasco UPV/EHU

csandoval@correo.uts.edu.co

## RESUMEN.

En este proyecto de investigación se realiza el estudio cuantitativo para la evaluación del potencial energético aprovechando el fenómeno piezoeléctrico. Tomando en cuenta que en la actualidad existen diferentes variedades de generación energética que comúnmente se utilizan, con el fin de conocer más sobre las energías limpias en este caso la obtenida a partir del fenómeno piezoeléctrico, se decide construir 2 prototipos (uno de generación eléctrica y otro para las mediciones de forma remota) que permitirán hacer un continuo monitoreo en tiempo real sobre la generación eléctrica basada en la tecnología piezoeléctrica. Cabe destacar que este principio ha sido utilizado en el pasado y que actualmente se encuentra en auge a nivel mundial. En este sentido, se busca el aprovechamiento del potencial energético producido por el paso de las personas en las zonas de circulación que se elegirán como parte del desarrollo del trabajo.

**Palabras Claves:** Autogeneración, Energía, Piezoeléctrico, Prototipo.

**Área Temática:** Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables.

**Categoría del Trabajo:** Trabajos de Docentes-Investigadores-Profesionales

## 1. INTRODUCCIÓN

Entre las diversas tecnologías de captación de energía, la vibración piezoeléctrica ha surgido como un método para recolectar desde la escala macro a micro[1–6] . Los materiales piezoeléctricos se pueden diseñar para manejar una amplia gama de frecuencias de entrada y fuerzas que permiten que se produzca la recolección de energía. Aunque los estudios sobre sistemas de captación de energía piezoeléctricos se han realizado de manera extensa en los últimos años, esta aplicación aún está en desarrollo y, por lo tanto, su potencial aún no se ha explotado por completo[7–10]. Los estudios basados en la recolección de energía piezoeléctrica de la fuerza humana incluyen la energía obtenida de la flexión de las articulaciones del codo o el dedo, los implantes en las articulaciones de la rodilla [9], los módulos piezoeléctricos insertados debajo de las plantas de los zapatos o el movimiento de las extremidades humanas.[10, 12].

Sin embargo, los casos de generación mencionados anteriormente no se pueden considerar como macro-fuentes debido a su área de instalación limitada. No obstante, se pueden plantar unidades independientes como baldosas piezoeléctricas sobre un área más amplia; por lo tanto, se pueden utilizar como fuentes de energía macro. Los aspectos clave del uso de baldosas piezoeléctricas a gran escala son la reducción de costos y la calidad de los sistemas de cosecha[1, 13, 14]. El primer aspecto depende principalmente del uso eficiente del sistema, la integración de varias tecnologías piezoeléctricas, la reducción de los tiempos de interrupción del dispositivo mediante la búsqueda de nuevos materiales y el diseño de instalaciones de transferencia de energía adecuadas [2] .Este trabajo de investigación muestra como el uso de los materiales piezoeléctricos ayudan a contribuir en el desarrollo de tecnologías ambientalmente sostenibles y dejar la dependencia de los combustibles fósiles los cuales emiten gases tóxicos contaminantes a la atmósfera terrestre. Los cuales generan efectos adversos conocidos como por ejemplo el “Efecto invernadero”[4, 15, 16].

## 2. MATERIALES Y METODOS.

### 2.1. Construcción del prototipo piezoeléctrico

Para la selección del elemento principal de la plataforma (sensores piezoeléctricos), se utiliza una matriz de priorización (ver figura 1) en la cual se enmarcan tres criterios, la accesibilidad en el mercado que hace referencia al costo y si este debe ser exportado o se encuentra en el mercado local. El otro criterio a evaluar es la eficiencia energética, que se debe tener en cuenta por la finalidad de la plataforma que se utiliza con el objetivo de la generación de energía. Para finalizar se analiza la durabilidad del elemento que hace referencia a su fragilidad o capacidad para soportar golpes y deformarse.

CRITERIOS	Eficiencia energética	Accesibilidad en el mercado	Durabilidad	Sumatoria	Porcentaje
Generador piezoeléctrico de doble cristal	2	1	2	5	62.5
Cuarzo	0	2	1	3	37.5
Sulfato de litio	0	0	1	1	12.5
Total				8	100

Fig. 1. Matriz de Priorización

El piezoeléctrico utilizado fue el generador eléctrico de doble cristal de 80X33mm, en configuración paralelo, empleando un regulador LM317 como se muestra en la figura 2ª y 2b.

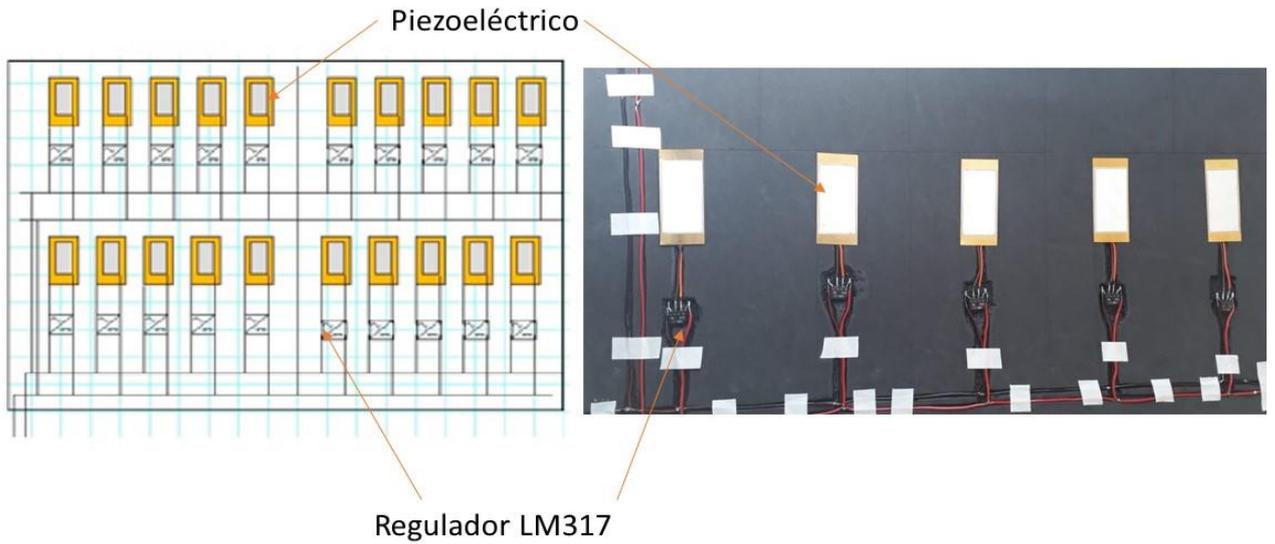


Fig. 2a Esquemático de las conexiones. 2b. Conexión real

## 2.2. Construcción del prototipo de medición de tensión

Para la realización de las pruebas se establece que la comunicación en la toma de datos debe ser de tipo remota, para ello se plantean dos tecnologías existentes en el mercado llamadas módulos Rf y Xbee Pro y se interfazan con ARDUINO (ver figura 3). Con el propósito de seleccionar el dispositivo adecuado para este tipo de comunicación se realiza una tabla comparativa (Tabla 1), donde se exponen sus características.

Tabla 1: Características de los módulos inalámbricos

Dispositivos	Características
<b>Módulos Rf</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Módulos de bajo costo y fácil uso</li> <li>➤ Comunicación simple</li> <li>➤ Baja velocidad de comunicación (433Mhz)</li> <li>➤ Utilización para operaciones básicas</li> <li>➤ Corto alcance</li> </ul>
<b>Xbee Pro</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Módulos de costo elevado</li> <li>➤ Manejo avanzado</li> <li>➤ Comunicación compleja y alta velocidad (2.4Ghz)</li> <li>➤ Largo alcance</li> </ul>

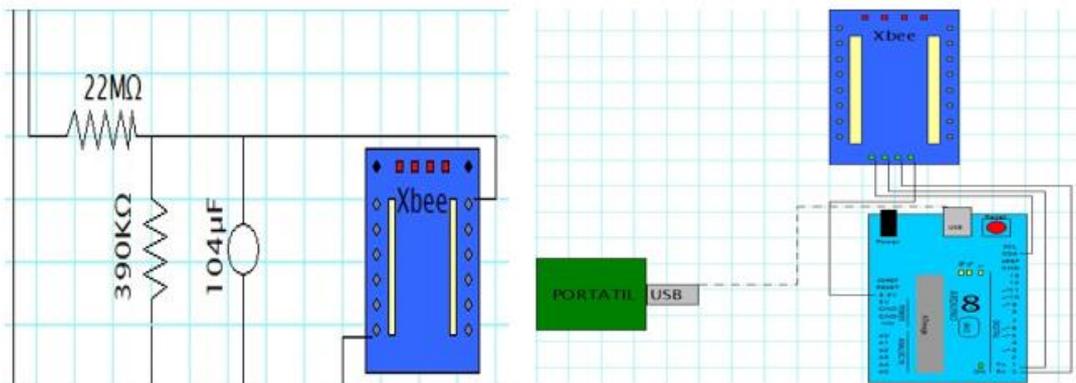


Fig. 3 Esquemático de las conexiones. por bloques

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1 Prueba del material de contacto

Para conocer el material indicado para el prototipo, se dispone de tres materiales los cuales aportan estabilidad y amortiguamiento [10, 16,15]. Se estudiaron dos formas de aplicación de la presión (con la mano y con el pie), como la presión es directamente proporcional a la fuerza ejercida sobre el área es por ello que la presión con el pie es superior a la ejercida con la mano. En la tabla dos se observan los resultados obtenidos al ensayar con estos materiales en función de la generación eléctrica de los piezoeléctricos.

Tabla 2: Prueba del material de contacto

Pruebas con tres materiales (1 piezoeléctrico)		
Material	Voltaje	Tipo de prueba
Material Dura Mat	44,2	Presión con la mano
Madera de Balso	21,6	
Foamy	23,8	
Material Dura Mat	30	Presión con el pie
Madera de Balso	30	
Foamy	32,2	

En la Figura 4, se muestran los resultados para el material EVA. En la Figura 5, se muestran los resultados para los datos con resorte.



Fig. 4. Amortiguamiento con la goma EVA

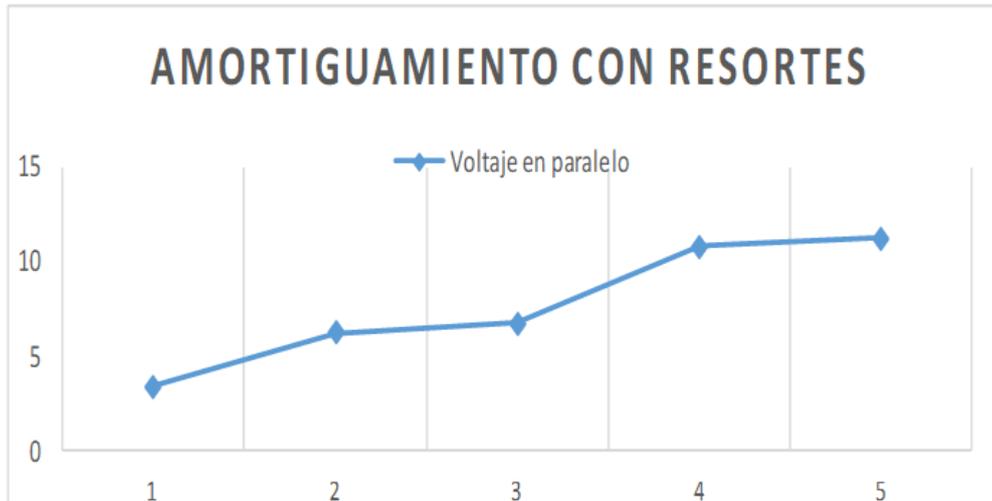


Fig. 5. Amortiguamiento con resortes

Las pruebas hechas con el diseño de láminas de goma Eva muestran que esta opción tiene un comportamiento simple y eficaz, el funcionamiento de los generadores perdura a medida que aumenta la cantidad de pasos y mantiene los rangos de voltaje.

### 3.2. Prueba de Conexión eléctrica

Teniendo en cuenta lo explicado por [5, 12, 17], se plantea realizar las pruebas de conexión (paralelo y serie) (como se evidencia en las figuras 6 y 7,) respectivamente.

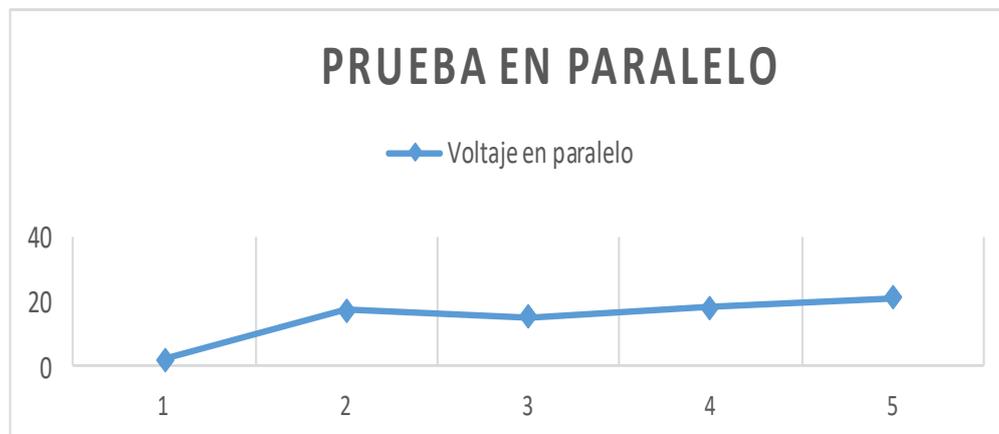


Fig. 6. Prueba conexión paralelo

Como resultado de las pruebas se observa que la conexión en serie genera un rango superior de voltaje en comparación a la conexión en paralelo. Como la diferencia entre los rangos de voltaje de las dos conexiones es reducido se decide evaluar un segundo parámetro, en este caso la seguridad de la conexión. Por lo cual es evidente que la conexión en paralelo garantiza la continuidad en la generación así haya un piezoeléctrico dañado o con una desconexión.

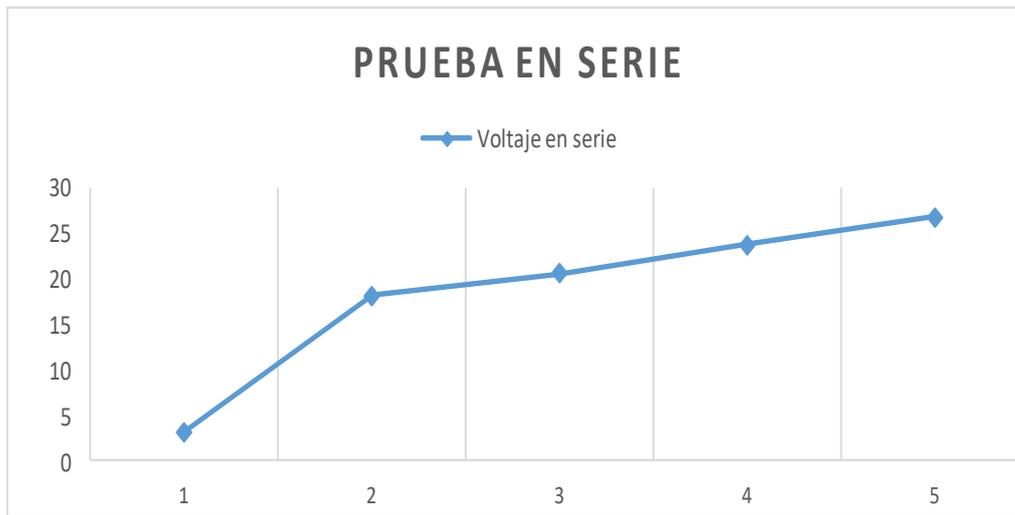


Fig. 7 Prueba conexión serie

### 3.3. Pruebas con el modelo funcional.

Siguiendo el diseño experimental propuesto por [1, 18] ,se plantea realizar dos pruebas para conocer la afluencia de personas sobre el prototipo. Prueba realizada a las 6:00 a.m Figura 8, y prueba realizada a las 8:00 pm Figura 9. Ambas en una institución educativa.

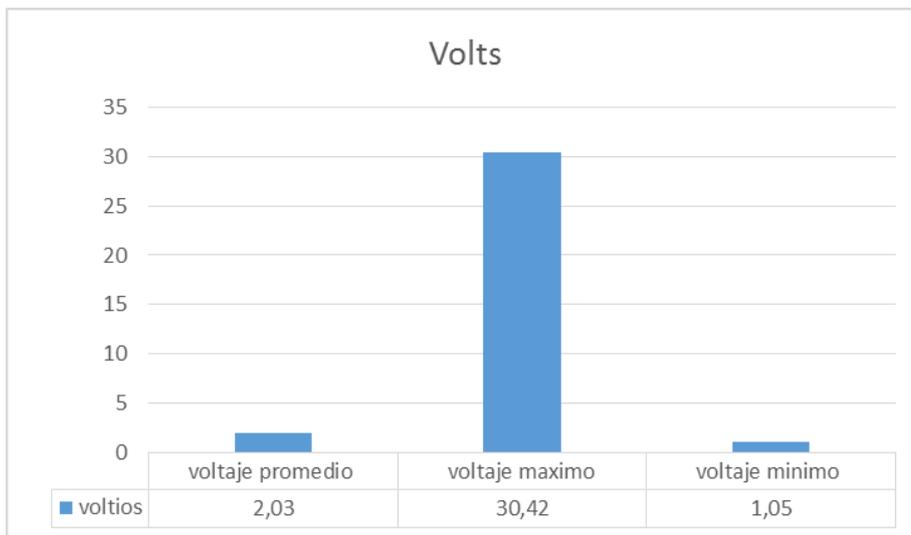


Fig. 8 Prueba 6:00 am

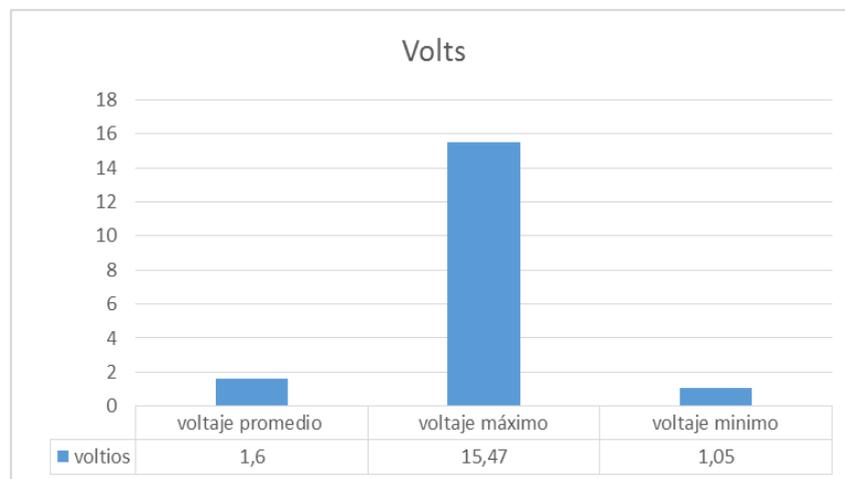


Fig. 9 Prueba 8:00 am

Como resultado de las pruebas se observa que la prueba N° 1 realizada en el intercambio de clase registra un valor de voltaje promedio superior en comparación a la segunda prueba, la cual fue realizada en un horario de clase habitual. Para la ejecución de las pruebas se plantea estudiar la variable en los cinco intercambios de clase que existen en la institución y en periodo de cuatro días, la variable depende únicamente de la afluencia de personas y no del comportamiento de los días de la semana comprendidos de lunes a viernes. Teniendo en cuenta lo anterior, se desarrollaron 24 pruebas en diferentes días de la semana, el comportamiento se muestra en un ejemplo el día 6 en la Figura 10. En el anexo también puede verse la evidencia del montaje y pruebas.

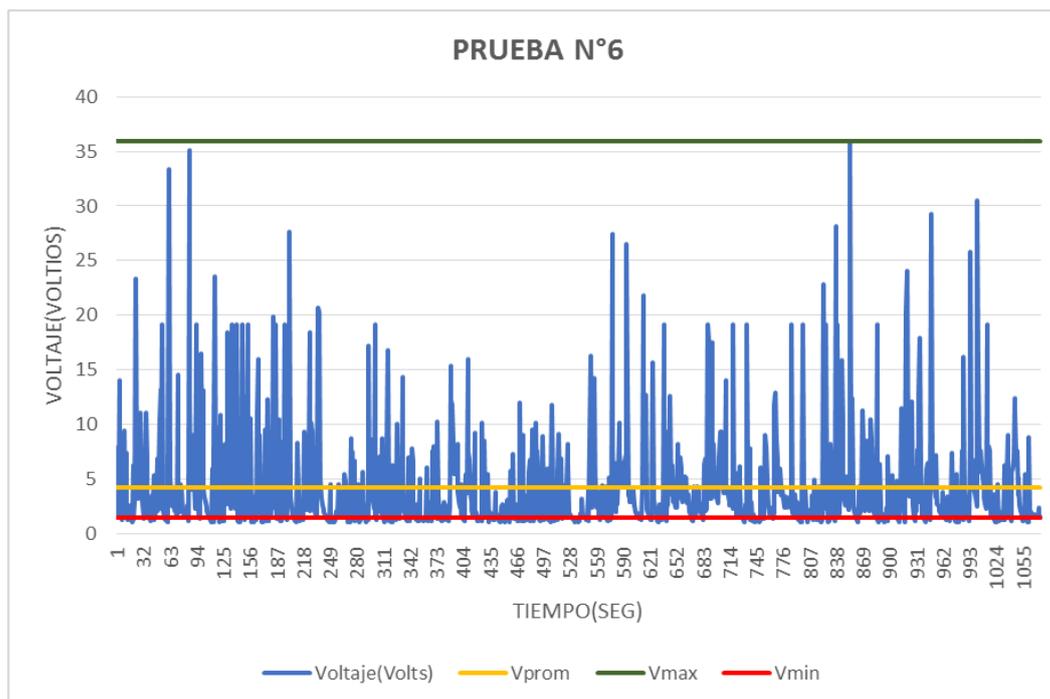


Fig. 10 Ejemplo día 6 registro de 1055 s

#### 4. CONCLUSIÓN.

Se logró identificar el comportamiento de los elementos piezoeléctricos como generadores, al usarse dentro de una plataforma debidamente diseñada, la cual permite captar los pasos de las personas y transmitir la fuerza de impacto a los piezoeléctricos. La conexión ideal para la elaboración del tapete es en paralelo. Es eficiente y segura en comparación a la conexión en serie. En relación a lo antes expuesto se evidencio que los piezoeléctricos son completamente funcionales, ya que durante la totalidad de las pruebas no se presentaron fallas en el prototipo. Demostrando así que los generadores y los materiales de amortiguamiento son los indicados para la construcción de estos prototipos.

Finalmente se observa que el estudio realizado permite evaluar el potencial energético de una organización, basándose en el principio piezoeléctrico al tener la disponibilidad de los datos de generación en el momento que se requiera. Si bien, las pruebas demuestran un promedio bajo de tensión con una potencia que de 40 mW aproximadamente para una corriente teorica de 8mA, abre también una variedad de posibilidades y retos en relación al uso de energía propia de actividades cotidianas realizadas al interior de cualquier organización y su posible aprovechamiento.

#### 4. REFERENCIAS.

- [1] S. J. Hwang *et al.*, "Designing and manufacturing a piezoelectric tile for harvesting energy from footsteps," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 6, pp. 669–674, 2015.
- [2] F. Cascetta, A. Lo Schiavo, A. Minardo, M. Musto, G. Rotondo, and A. Calcagni, "Analysis of the energy extracted by a harvester based on a piezoelectric tile," *Curr. Appl. Phys.*, vol. 18, no. 8, pp. 905–911, 2018.
- [3] B. C. Chew, H. S. Loo, I. A. Bohari, S. R. Hamid, F. H. Sukri, and R. Kusumarwadani, "Feasibility of piezoelectric tiles adoption: A case study at Kuala Lumpur International Airport (KLIA) Malaysia," in *AIP Conference Proceedings*, 2017, vol. 1818, no. 1, p. 20009.
- [4] J. A. C. Gutiérrez, "Baldosa piezoeléctrica para alimentar sistemas de iluminación de bajo consumo energético," in *Departamento de Ingeniería Mecatrónica*, Escuela de Ingeniería de Antioquia, 2013.
- [5] N. Sezer and M. Koç, "A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting," *Nano Energy*, vol. 80, p. 105567, 2021.
- [6] X. Cao, Y. Xiong, J. Sun, X. Zhu, Q. Sun, and Z. L. Wang, "Piezoelectric Nanogenerators Derived Self-Powered Sensors for Multifunctional Applications and Artificial Intelligence," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 31, no. 33, p. 2102983, 2021.
- [7] J. M. Moreno *et al.*, "Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático," 2005.
- [8] S. Do Hong *et al.*, "Enhanced energy-generation performance of a landfilled road-capable piezoelectric harvester to scavenge energy from passing vehicles," *Energy Convers. Manag.*, vol. 215, p. 112900, 2020.
- [9] SEPÚLVEDA OROZCO, Esteban. Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico (Energy Harvesting) Mediante Optimización Topológica que Maximice la Transformación de Energía Mecánica en Eléctrica Generada por un Ser Humano al Caminar. Escuela de Mecatrónica, 2015.
- [10] E. Maghsoudi Nia, N. A. Wan Abdullah Zawawi, and B. S. Mahinder Singh, "Design of a pavement using piezoelectric materials," *Materwiss. Werksttech.*, vol. 50, no. 3, pp. 320–328, 2019.
- [11] A. D. Rincón-Quintero, C. L. Sandoval-Rodriguez, N. D. Zanabria-Ortigoza, C. G. Cárdenas-Arias, J. G. Ascanio-Villabona, and M. A. Durán-Sarmiento, "Generation and capture of electric energy using piezoelectric materials: a review," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1154, no. 1, p. 12031.
- [12] K.-B. Kim *et al.*, "Optimized composite piezoelectric energy harvesting floor tile for smart home energy management," *Energy Convers. Manag.*, vol. 171, pp. 31–37, 2018.
- [13] D. Kumar, P. Chaturvedi, and N. Jejurikar, "Piezoelectric energy harvester design and power conditioning," in *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 2014, pp. 1–6.
- [14] J. G. Tapias, C. L. Sandoval, and J. J. C. Sánchez, "Análisis de prospectiva del sector energético de Colombia, para la integración de fuentes fotovoltaicas en los sistemas de distribución de energía eléctrica aplicando una revisión en bases de datos científicas," *Rev. Colomb. Tecnol. Av.*, vol. 2, no. 32, pp. 109–119, 2018.
- [15] P. GUTIÉRREZ, "Humberto y DE LA VARA Salazar, Román," *Análisis y diseño Exp. Segunda edición. Editor. MC Graw Hill. México*, 2008.
- [16] J. D. O. García, E. L. Velasquez, and E. R. Valencia, "Propuesta de plan de acción para la implementación de un sistema de gestión de energía," *Visión electrónica*, vol. 8, no. 2, pp. 163–168, 2014.
- [17] C. Lü, Y. Zhang, H. Zhang, Z. Zhang, M. Shen, and Y. Chen, "Generalized optimization method for energy conversion and storage efficiency of nanoscale flexible piezoelectric energy harvesters," *Energy Convers. Manag.*, vol. 182, pp. 34–40, 2019.
- [18] B. S. Athira *et al.*, "High-Performance Flexible Piezoelectric Nanogenerator Based on Electrospun PVDF-BaTiO<sub>3</sub> Nanofibers for Self-Powered Vibration Sensing Applications," *ACS Appl. Mater. & Interfaces*, 2022.

**Anexo:** Se presenta una evidencia de las pruebas sobre el piezoeléctrico (banda negra en el piso).



### **Agradecimientos**

Los autores agradecen comedidamente a la dirección de investigaciones y extensión de las Unidades Tecnológicas de Santander UTS y al director de la misma Javier Mauricio Mendoza Paredes y a su equipo de trabajo, así mismo al coordinador del programa de electromecánica

# **Análisis de datos de irradiancia solar medidos en la ciudad de Junín, provincia de Buenos Aires**

Bertolotti, Sebastián; Carrió, Florencia; Busso, Mauricio; Guerriero, Tomas

*Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires (UNNOBA)*

*sbertolotti@comunidad.unnoba.edu.ar*

*fbcarrio@comunidad.unnoba.edu.ar*

*mbusso@comunidad.unnoba.edu.ar*

*tguerriero@comunidad.unnoba.edu.ar*

## **RESUMEN.**

Cuando se requiere información sobre irradiancia o irradiación solar en la República Argentina, las fuentes de información normalmente utilizadas son GERSolar y la NASA. Esta información puede ser comparada y/o mejorada, midiéndola en un sitio particular, en vez de ser calculada mediante mediciones indirectas tal como lo realizan los entes anteriormente mencionados.

El objetivo del presente estudio es analizar los datos recolectados por el piranómetro LAMBRECHT 16106, ubicado en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (LIDER) situado en el campo experimental "Las Magnolias" de la UNNOBA (34°28'48.3"S 60°52'27.3"W) con el fin de proporcionar otra fuente de datos confiable. El Piranómetro recolecta datos sobre irradiancia solar, los que son almacenados en un Datalogger, para luego ser descargados y analizados mensualmente. A través de los análisis se obtiene información relevante de interés, tal como los valores máximos y mínimos de irradiancia e irradiación solar, y también la irradiación promedio mensual que es un dato primordial para el diseño de cualquier instalación solar.

Con el fin de brindar fiabilidad, los datos obtenidos se compararon con los de la NASA y GERSolar, obteniendo como resultado valores que se encuentran próximos a los estimados por los entes anteriormente mencionados.

**Palabras Claves:** Energía solar, Irradiación solar, Análisis de datos

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad

**Categoría del Trabajo:** Trabajos de estudiantes de grado

## 1. INTRODUCCIÓN

Tanto a nivel mundial como local los sistemas de aprovechamiento energético que utilizan energía solar como fuente primaria se incrementaron notoriamente. Estas instalaciones necesitan una evaluación pertinente con un adecuado conocimiento del recurso solar para dimensionarlos, evaluar su desempeño y factibilidad económica. Por tal motivo, conocer los valores medios de irradiación solar cumple un papel muy importante, entre otros datos.

En la actualidad, se obtiene de información suministrada por la NASA y GERSolar. Dicha información es estimada, pues se obtiene por medio de mediciones indirectas, y contiene tres tipos de errores: del instrumento de medición, del adquirente de datos que almacena los datos producidos por el instrumento de medición y de la interpolación.

El objetivo del presente trabajo, es brindar información más exacta en la ciudad de Junín, por medio de datos recolectados en el sitio particular. De todos modos, para asegurar la calidad de la información obtenida, se requiere comparar los datos obtenidos con las otras fuentes confiables ya existentes.

## 2. DESARROLLO

En primera instancia se recolectaron datos de irradiancia solar ( $w/m^2$ ) con un sensor piranométrico termoelectrónico LAMBRECHT (modelo 16106), cuya frecuencia de muestreo de datos es de uno por segundo, almacenándose las integrales cada minuto en un Data Logger. Con estos datos se obtuvo la curva diaria de irradiancia, que provee información de cómo evoluciona la potencia solar punto a punto a medida que transcurre el día y, calculando el área bajo dicha curva, se obtuvo la irradiación solar ( $Wh/m^2$ ), es decir, la energía diaria por unidad de superficie.

El piranómetro se encuentra ubicado en la ciudad de Junín, particularmente en el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Energías Renovables (LIDER) situado en el campo experimental "Las Magnolias" de la UNNOBA ( $34^{\circ}28'48.3''S$   $60^{\circ}52'27.3''W$ ).

Los datos recolectados se descargaron mensualmente para ser procesados y convertidos en información de interés. Se utilizaron planillas de Excel para calcular el dato de mayor relevancia que es el valor medio mensual de irradiación solar, como también los valores de irradiancias e irradiaciones máximas, mínimas, medias, diarias y mensuales.

Por último, se compararon los valores medios mensuales obtenidos por la estación con los estimados por la NASA y GERSolar. Los valores no deben ser necesariamente coincidentes, ya que se trata de series distintas. De todos modos, un gran alejamiento entre los medidos y los estimados podrían indicar la existencia de problemas en el funcionamiento de la estación.

### 2.1. Equipamiento

#### 2.1.1 Piranómetro Lambrecht modelo 16106

Instrumento para la medición de la radiación global en un rango entre los 0 y los  $1400w/m^2$ . Es un modelo compacto, de fácil instalación para la observación meteorológica y ambiental, y se basa en los transductores de silíceo de alta calidad.



Figura 1 Piranómetro Lambrecht modelo 16106.

Características:

Fuente de alimentación: no requerida

Salida de señal: Analógica (salida pasiva) 0 ...50 mV = 0 ... 1400 W / m<sup>2</sup>

Respuesta espectral: 350 ... 1100 nm

Precisión: <4% a 1000 W / m<sup>2</sup> a 22 ° C Temperatura

de funcionamiento: -40 ... + 60 ° C Tiempo de

respuesta: << 1 seg.

Dimensiones / peso: Ø 80 mm · H 46 mm · aprox. 150 g

Consumo actual encendido: típico 7 mA

### **2.1.2 Dataloger**

Un Data Logger es un grabador independiente, típicamente pequeño y relativamente económico, que monitorea y registra datos de irradiancia en tiempo real. Está integrado en una carcasa de aluminio resistente y sus conexiones, tanto de salida como de entrada, presentan la máxima resistencia y fiabilidad.

Características:

Consumo de corriente encendido: desde 34 mA (12 V) hasta 200 mA (12 V) dependiendo de configuración

Condiciones ambientales: -30 + 70 ° C • 5 ... 95% r. h. (no condensado)

Dimensiones / peso: 135 x 135 x 72 mm • aprox. 0.9 kg

Vías de comunicación: Ser [LOG] - Usuario: ya sea a través de un dispositivo de almacenamiento USB, cable, red, Bluetooth o comunicaciones móviles

Memoria: 1 año en memoria de anillo (formato real IEEE de 8 bytes) - configuración-independiente

### **2.2. Datos NASA**

Los datos utilizados en el presente trabajo fueron obtenidos de NASA Prediction of Worldwide Energy Resource (NASA-POWER) [1]. NASA provee un conjunto de datos meteorológicos de superficie y de energía solar estimados a partir de información satelital y modelos. Los datos de radiación global están disponibles desde el año 1983, y fueron estimados a partir del balance de radiación superficial (Surface Radiation Budget - SRB V 3.0) hasta el año 2007.

Desde 2008 a la actualidad, para contemplar las observaciones de nuevos satélites, se emplearon diferentes versiones del modelo del proyecto Fast Longwave And SHortwave Radiative Fluxes (FLASHFlux) para estimar la radiación global a partir del sensor CERES que opera en distintos satélites de NASA, y mide, entre otras, la radiación solar reflejada y la emitida por la Tierra desde el tope de la atmósfera.

### **2.3. Datos GERSolar**

GERSolar [2], en conjunto con el INTA, administra una red de medición de la radiación solar en la Pampa Húmeda argentina. Cuenta con nueve estaciones instaladas a lo largo de dicha región, éstas con piranómetros termoelectrónicos Kipp&Zonen (CMP11 y CM5) y Eppley (modelo 8-48Black & White) e integradores Campbell (CR1000 y CR800). El error de sus mediciones se evalúa en un 5%, siendo despreciable el del adquisidor de datos frente al de los solarímetros.

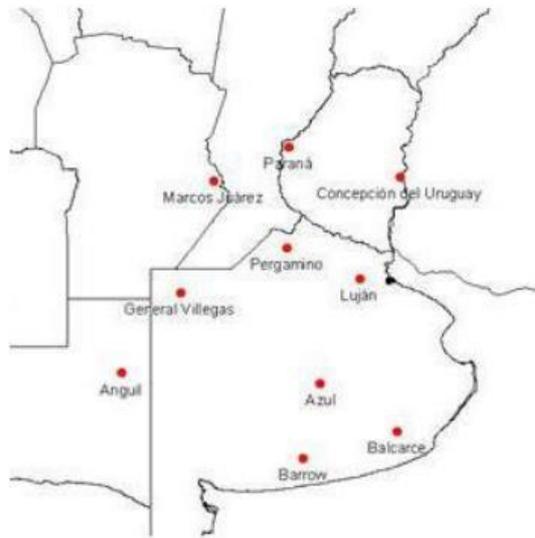


Figura 2 Red de estaciones solarimétricas pertenecientes al GERSolar.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Cálculo de valor medio mensual de irradiación solar y datos de interés

La Figura 3 muestra la irradiación solar diaria para los días del mes de enero que se midieron en la estación, lo cual se hizo para todos meses de los años analizados (2020-2021).

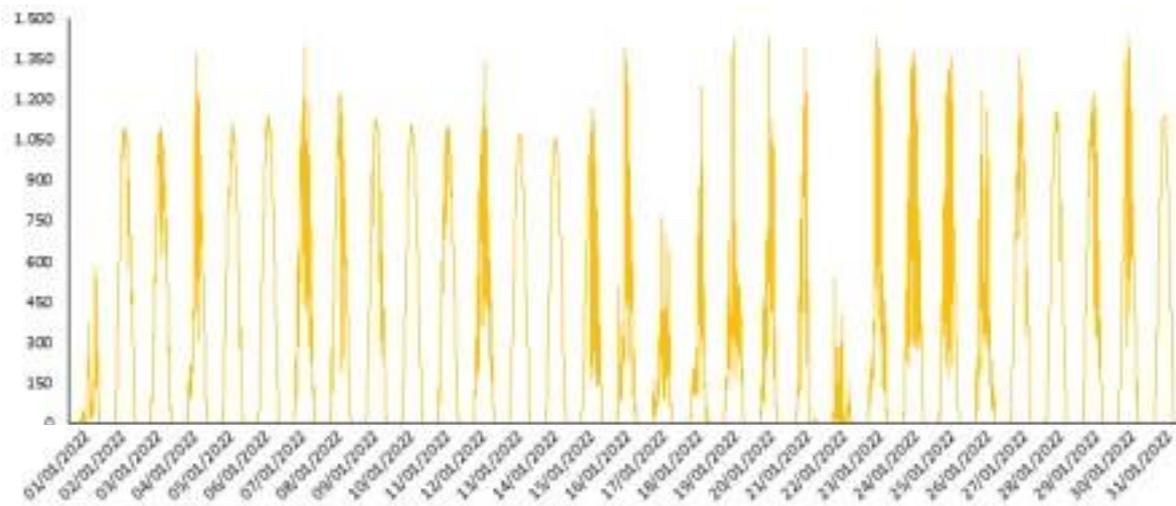


Figura 3 Irradiación diaria para los días del mes de enero

La Figura 3 está asociada a la Tabla 1, en ésta se observa la irradiación diaria y la máxima irradiancia para los días del mes de enero.

Tabla 1 Irradiación diaria y máxima irradiancia para los días del mes de enero.

Fecha	Irradiación Diaria (Wh/m <sup>2</sup> )	Máx. Irradiancia (W/m <sup>2</sup> )
01/01/2022	1407,33	574,00
02/01/2022	8819,17	1098,00
03/01/2022	8551,20	1093,00
04/01/2022	6260,80	1366,00
05/01/2022	8820,13	1107,00
<b>06/01/2022</b>	<b>9162,13</b>	<b>1140,00</b>
07/01/2022	7589,47	1399,00
08/01/2022	8691,90	1223,00
09/01/2022	8702,37	1125,00
10/01/2022	8782,68	1105,00
11/01/2022	8547,88	1096,00
12/01/2022	7115,52	1339,00
13/01/2022	8470,87	1073,00
14/01/2022	8277,02	1059,00
15/01/2022	7252,98	1167,00
16/01/2022	5360,68	1394,00
17/01/2022	2481,63	765,00
18/01/2022	2928,92	1246,00
19/01/2022	4276,58	1426,00
20/01/2022	4524,25	1423,00
21/01/2022	4293,28	1387,00
<b>22/01/2022</b>	<b>865,15</b>	<b>542,00</b>
<b>23/01/2022</b>	<b>5161,97</b>	<b>1427,00</b>
24/01/2022	7695,85	1379,00
25/01/2022	6727,92	1364,00
26/01/2022	4690,67	1236,00
27/01/2022	8601,48	1360,00
28/01/2022	8704,23	1155,00
29/01/2022	8519,07	1226,00
30/01/2022	7877,80	1427,00
31/01/2022	8620,83	1143,00
<b>Total general</b>	<b>207981,97</b>	<b>1427,00</b>

Además, en caso que se requiera, se puede realizar un análisis más profundo al observar la curva diaria de irradiancia de un día en particular o bien comparar días que correspondan al mismo mes.

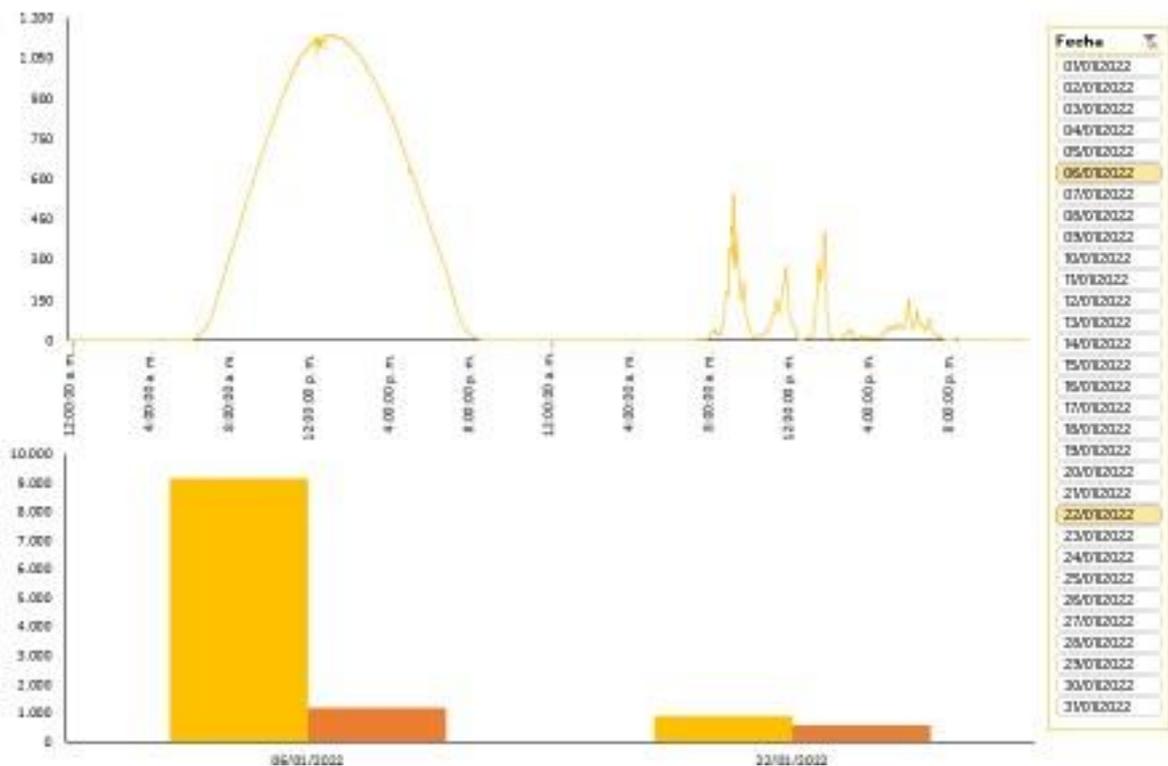


Figura 4 Comparación de curvas diarias de irradiancia de los días 6 y 22 de enero.

Por último la Tabla 2 nos brinda la media mensual de irradiación para el mes de enero y la irradiancia e irradiación máxima y mínima.

Tabla 2 *Irradiación promedio diaria para el mes de enero, irradiancia e irradiación máxima y mínima.*

Irradiación máxima (Wh/m <sup>2</sup> )	9162,13
Irradiación mínima (Wh/m <sup>2</sup> )	665,15
Irradiancia máxima (Wh/m <sup>2</sup> )	1427,00
Irradiancia mínima (Wh/m <sup>2</sup> )	542,00
Irradiación promedio diaria (KWh/m <sup>2</sup> )	6,71

### 3.2. Comparación de los valores obtenidos con los estimados por NASA y GERSolar

La Tabla 3 resume los desvíos de las medias mensuales de irradiación para cada mes, tomando como referencia los datos de NASA y GERSolar.

Tabla 3 *Diferencias porcentuales entre datos calculados por LIDER y estimados por NASA y GERSolar*

Análisis 2021-2022				Diferencia GERSolar-LIDER (%)	Diferencia Nasa-LIDER (%)
Mes	LIDER	GERSolar	NASA		
Enero	6,97	7,13	7,31	2,1	4,6
Febrero	6,61	6,25	6,83	5,7	3,3
Marzo	4,79	4,89	4,76	1,9	0,7
Abril	3,95	4,04	4,11	2,1	3,8
Mayo	2,99	2,94	3,14	1,8	4,8
Junio	2,28	2,28	2,42	0,2	5,8
Julio	2,58	2,34	2,77	10,4	6,8
Agosto	3,45	3,66	3,67	5,8	6,0

En términos generales, puede observarse que la estación del LIDER está brindando valores medios aceptables, y sus desvíos, salvo para el mes de julio, entre GERSolar y LIDER son inferiores al 7%, siendo en algunos meses insignificantes.

## 4. CONCLUSIONES.

Para determinar la fiabilidad de los datos se recurrió al artículo de Righini y Aristegui (Righini y Aristegui, 2014) [3], en el cual se menciona que un dato confiable del recurso solar depende del número de años de medición. Por lo general, dos años de medición en casi todo el territorio argentino son suficientes para obtener un error en las medias anuales del 3% y un nivel de confianza del 95%. Sin embargo, para las medias mensuales se necesitan series de datos más prolongadas. En nuestro territorio, Pampa Húmeda, serían necesario aproximadamente ocho años de medición para obtener un error del 5% y un intervalo de confianza del 95%.

No obstante, se concluye que las mediciones, a pesar de contar con un periodo de dos años para las medias mensuales, están dentro de un rango aceptable en base a los brindados por las estimaciones de NASA y GERSolar. Por ende, nuestros datos son confiables y pueden servir de referencia a todo usuario de la ciudad de Junín que lo requiera para diseñar su sistema de aprovechamiento energético de energía solar.

#### 4. REFERENCIAS.

[1] NASA (2021), <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

[2] GERSolar (2022), <http://www.gersolar.unlu.edu.ar/?q=node/5>

[3] R. Righini y R. Aristegui (2017), Metodología para el trazado de cartas solares de la Pampa Húmeda Argentina. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184) Vol. 4, pp. 11.105-11.112, (2017).

# Turbinas hidrocínéticas: Revisión de métodos de experimentación en Túneles de Viento y Ejemplos

Dr. Ing. di Prátula H.R.<sup>1</sup> - Ing. Eduardo Malchiodi<sup>1</sup> - Mg Ing. Marcelo Antón<sup>1</sup> -  
Fausto di Prátula<sup>2</sup> Carlos Pistonesi<sup>1</sup> Mauren Abril Bilbao Yeska<sup>3</sup> - - Zanfagnini  
Eliana<sup>3</sup>- Alexis Martinez<sup>3</sup> - Oga Juan José<sup>4</sup>

1 Investigadores del GESE UTN FRBB

2 Estudiante UTN Dpto. Ing. Mecánicae-

3 Becarios UTN GESE

4 UNS Dpto. Ingeniería

hrdiprat@frbb.utn.edu.ar

## RESUMEN.

Las pruebas experimentales son esenciales en el proceso de diseño de aerogeneradores, porque proporcionan información temprana sobre aerodinámica, mecánica, rendimiento y control de la turbina, pueden usarse pruebas en un entorno natural o controladas mediante túneles de viento.

El procedimiento de prueba proporciona series de tiempo de datos medidos a una tasa de muestreo determinada y necesita un procesamiento posterior de los mismos para un uso racional, siguiendo la naturaleza estocástica del viento, su tratamiento requiere herramientas estadísticas y análisis de incertidumbre apropiados. Las mediciones en el campo basadas en pruebas a escala real, permiten simular y evaluar el verdadero comportamiento de la turbina. El sitio debe cumplir con el Anexo A de IEC 61400-2- 1.

Pocos sitios tienen las características adecuadas para albergar campañas de prueba tanto de aerogeneradores como sistemas hidrocínéticos, por eso el uso de túneles de viento, con sistemas escalados, ya que las turbinas eólicas e hidrocínéticas son sistemas de mucho volumen y/o difíciles de manipular.

Luego, es difícil lograr condiciones ambientales controladas (pruebas de campo) que permitan reiterarse en igualdad de condiciones, como prototipos y/o equipos a ser instalados, sin embargo el túnel de viento permite reiterar las condiciones, o, variar las mismas, buscando medir nuevas variables.

Así, esta revisión pretende llamar la atención sobre aspectos necesarios y suficientes para realizar una experimentación en túnel de viento con sistemas escalados cuyos resultados nos orienten tanto al diseño de los álabes como a ensayos de prototipos u otras experiencias.

Los cuatro ejemplos elegidos permiten analizar aspectos diferentes en el procedimiento experimental: Medición de campo abierto y tres Mediciones en túnel de viento, incluyendo la metodología de ampliación para extrapolar los resultados de experimentos del túnel de viento con WT (turbina hidrocínética) escalada a una de tamaño completo.

**Palabras Claves:** Túnel de viento, Turbinas Hidrocínéticas, Turbina Eólica, Alabe

**Área Temática:** Energías renovables: fuentes de energía (hidrocínética)

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigadores y becarios

## 1. INTRODUCCIÓN

Como un proceso de investigación se inicia por el conocimiento temático y el desarrollo del estado del arte, en ese sentido la utilidad de este trabajo es exhibir aspectos y metodologías del uso de los túneles de viento. Algunos trabajos asociados a la experimentación efectuada en túneles de viento permitirán una orientación hacia la aplicación de los mismos llamando la atención hacia el uso del mismo, métodos y tipos de sensores que permitirán ampliar los criterios para la investigación.

Por ejemplo, su uso se ha extendido desde el desarrollo de álabes o prototipos de aviones, turbinas eólicas e hidrocinéticas o el análisis del viento en zonas urbanas, agrícolas [26], etc.

Así es que como en el túnel se pueden realizar experiencias regulando las condiciones de flujo que afectan las fuerzas en el sistema, al realizar mediciones controladas, se pueden evaluar tanto la velocidad del viento, como la presión estática y dinámica, el caudal, la temperatura y la fuerza (momento en el punto de medición) con un objetivo particular para cada uso.

El estudio comparativo entre modelo y prototipo ha mostrado con evidencia que la correspondencia de comportamiento es frecuentemente buena, fuera de las limitaciones esperadas, como lo atestigua el correcto funcionamiento de muchas estructuras diseñadas a partir de ensayos sobre modelos. La mayor dificultad parece surgir del número de Reynolds (cociente de las fuerzas de inercia y las fuerzas debidas a la viscosidad-valor adimensional dependiente del tamaño y la velocidad del fluido) ya que, como se observa tiene una dependencia del tamaño y la velocidad (ver ítem 2.6 del presente trabajo donde se trata el tema del modelo escalado), lo cual lo hace lo hace alejar del sistema escalado si se compara con el real ( $Re < 2000$  Flujo Laminar -  $Re > 4000$  Flujo turbulento):

$$Re_m = Re_p \Rightarrow (d_p \mu_p) / v_p = (d_m \mu_m) / v_m \quad (1)$$

Dónde el subíndice “m” significa modelo y “p” turbina de tamaño completo o prototipo – siendo “ $\mu$ ” ( $\text{kg s/m}^2$ ) viscosidad absoluta, “v” viscosidad cinemática del fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) y “d” radio de la tubería en m.

Sin embargo, la diferencia en casos subsónicos no afecta el escalado si se cumplen las condiciones de semejanzas (dinámica, cinemática y geométrica) necesarias.

Los túneles de viento se diseñan para un propósito específico y un rango de velocidad. Por lo tanto, hay diferentes tipos de ellos y varias formas de clasificarlos. Analizaremos aspectos tanto generales como particulares de los mismos para cumplir el cometido de diseño.

Con el fin de cumplir el objetivo del trabajo de enfocar la revisión a los aspectos vitales del uso de túneles de viento para analizar álabes o prototipos escalados realizamos la descripción de las instalaciones y los aspectos fundamentales de las experiencias, así como incluimos ejemplos que abarcan aspectos relacionados a la temática.

Primero. Medición de campo – se observan tanto los inconvenientes como las ventajas de medir directamente en el lugar de emplazamiento (método muy usado en la medición de recursos para parques eólicos) [18]. El mismo se incluye para comparar con los experimentos en túneles de viento donde las condiciones son controladas.

Segundo. Medición en túnel de viento de las palas de una WT – Exhibe el procedimiento realizado para medir variables imprescindibles para aplicar (BEM momento del elemento), incluyendo los resultados de la medición de un WT de eje horizontal. [15]

Tercero. Mediciones en túnel de viento analizando el número de Reynolds – el ejemplo menciona el problema del número de Reynolds para los sistemas escalados, pero también la solución adoptada [19].

Cuarto. Mediciones en túnel de viento a un sistema escalado y ampliando los resultados de los experimentos a la turbina de tamaño completo – El trabajo demuestra que la ampliación de escala de los resultados de un ensayo escalado de una WT sus curvas analizadas mediante CFD (Dinámica de fluidos computacional) confirmó el enfoque de ampliación [20].

Por lo tanto, los ejemplos, determinan aspectos importantes para el trabajo, ya que muestran un abanico de experiencias ordenadas con el propósito de mostrar aspectos que resaltan los puntos abarcados en el presente trabajo. Se recomienda ver el caso de ref [26] con un túnel portátil.

## 2. INSTALACIONES Y TEMAS VITALES RELACIONADOS CON LAS MEDICIONES

### 2.1. Tipos de túneles de viento

Hay varios tipos de túneles de viento y diferentes formas de clasificarlos. Veremos en las figuras (1.a.5), algunos ejemplos de los mismos y su designación [24]:

La posición de las unidades motrices puede estar en el extremo aguas abajo donde el túnel se opera como túnel de succión, o aguas arriba, que de esta manera se denominaría túnel de purga. El primero de ellos, es preferido en un diseño debido a la calidad flujo de aire.

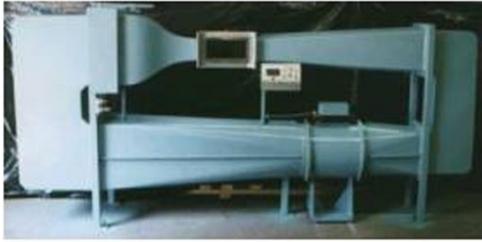


Figura 1 *Subsónico retorno cerrado (subsonic closed return)*



Figura 2 *Túnel de agua (Water Tunnel)*



Figura 3 *Escala completa subsónica de retorno abierto (subsonic open return full scale)*



Figura 4 *Propulsión supersónica de retorno cerrado (supersonic closed return propulsion)*



Figura 5a *Túnel de humo de retorno abierto subsónico (subsonic open return smoke tunnel)* y 5b *Túnel de retorno abierto existente en el GESE FRBB*

El tipo de túnel mostrado en la figura 5b, es el existente en el GESE FRBB del Aula de Energía Renovable. Generalmente a este tipo se lo denomina tipo Eiffel y está compuesto de una tobera, en la sección de prueba, un difusor y una unidad impulsora. El trabajo principal de este túnel de viento es una succión directa del aire atmosférico que se encuentra fuera del mismo, para luego llevar el fluido a la cámara de sedimentación, hasta el otro extremo mediante una unidad de conducción, expulsando el aire a la atmósfera.

En el próximo punto se describe la geometría del túnel de retorno abierto.

## 2.2 Geometría del túnel

Un túnel de viento que se encuentra abierto en ambos extremos y extrae aire de la habitación hacia la sección de prueba se denomina túnel de retorno abierto (figura 6) [24-25].

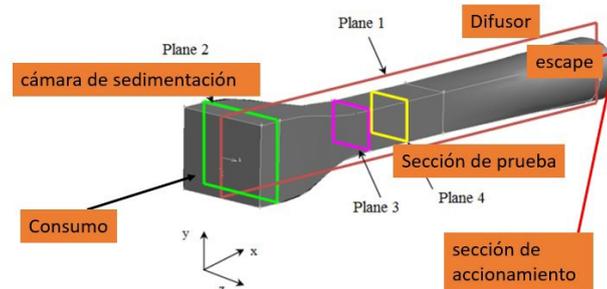


Figura 6 *Túnel retorno abierto subsónico*

Si el mismo se encuentra cerrado y recircula el aire a través de la sección de prueba, se denomina túnel de retorno cerrado

## 2.3 Régimen de Velocidad.

Los túneles de viento a menudo se indican por la velocidad del aire en la sección de prueba en relación con la velocidad del sonido [24]. La relación entre estos se denomina número de Mach:

$$(N_M = V/c = V/\sqrt{E/\rho} \text{ y para gases } c = \sqrt{kgRT}). \quad (2)$$

“v” velocidad del fluido – “c” velocidad del sonido – “T” (temperatura °Kelvin) – “R” constante del gas – “g” aceleración de la gravedad. “k” constante de Von Karman – “ρ” densidad – “E” energía específica  
 Los túneles se clasifican como subsónicos ( $M < 0,8$ ), transónicos ( $0,8 < M < 1,2$ ), supersónicos ( $1,2 < M < 5,0$ ) o hipersónicos ( $M > 5,0$ ). La distinción por número de Mach se debe a la importancia real de los efectos de compresibilidad. Para flujos subsónicos, podemos despreciar los efectos de la compresibilidad; para flujos transónicos y supersónicos, se deben considerar estos efectos.

## 2.4 Fluido

Los túneles de viento se pueden designar por el tipo de fluido [24-25] que se usa en el mismo. Para la mayoría de las pruebas de túnel de viento en aviones de baja velocidad, el aire se mueve a través del túnel. Para visualizar ondas de choque para aeronaves de alta velocidad, o para estudiar el flujo alrededor de submarinos o barcos, se utiliza agua como fluido de trabajo. Un túnel de agua se muestra en la figura 2. En algunas instalaciones hipersónicas, se ha utilizado nitrógeno o helio como fluido de trabajo. De manera similar, se ha utilizado nitrógeno criogénico para pruebas de flujos transónicos con un alto número de Reynolds.

## 2.5 Sensores y métodos experimentales

Un conjunto de sensores está dedicado a monitorear las condiciones de operación del túnel de viento (velocidad, presión y temperatura) en la entrada de la cámara de prueba y debe sincronizarse con la turbina DAS (sistema de adquisición de datos) [5-6]. Un transductor de presión diferencial se utiliza normalmente para medir la velocidad del flujo en el túnel en condiciones estacionarias. Otro conjunto de sensores está dedicado a medir la velocidad y la presión en diferentes planos aguas arriba y aguas abajo de la turbina para reconstruir la extensión de la estela. La técnica de medición puede evaluar la presión y/o la velocidad de un solo punto espacial en el campo de flujo [1]. Las incertidumbres en las mediciones de velocidad deben dar como resultado al menos un 2% después de la calibración. El alambre caliente proporciona, para cada punto de la cuadrícula de medición, el tiempo promediado y la fluctuación periódica en el tiempo de la velocidad del flujo, en función del ángulo de la posición del rotor. El componente periódico en el tiempo se obtiene promediando conjuntos, siendo el codificador montado en el rotor un factor clave. La intensidad de la turbulencia también puede determinarse, extrayendo la componente no estacionaria no resuelta de los datos de cable caliente [4]. Todo el campo de flujo se puede obtener desplazando el sensor en el espacio para reconstruir el mismo a partir de la interpolación de medidas discretas. También puede obtenerse mediante técnicas avanzadas como velocimetría de imágenes de partículas 2D [5, 6] y LDA [6] medidos en volúmenes de flujo más pequeños (Los sistemas LDA de medida de dos componentes de velocidad comercialmente disponibles, por el contrario, emplean dos longitudes de onda óptica y dos foto-detectores independientes. Las emisiones azul y verde típicas de los láseres de ion-Ar son las longitudes de onda más elegidas en este tipo de medidas). Las últimas tecnologías necesitan por lo general inyectar el flujo con partículas arrastradas por la corriente, esenciales para la visualización y captura de datos. De esta manera, el streamtube (tubo de corriente) se puede reconstruir en diferentes planos que pasan por la turbina, y otros parámetros como, la turbulencia local inducida, las trayectorias de los vórtices y el flujo másico integral calculados. Como ejemplo se muestra la figura 7 donde puede observarse una amplitud entre 0-360 grados de los campos de velocidad PIV<sup>1</sup>

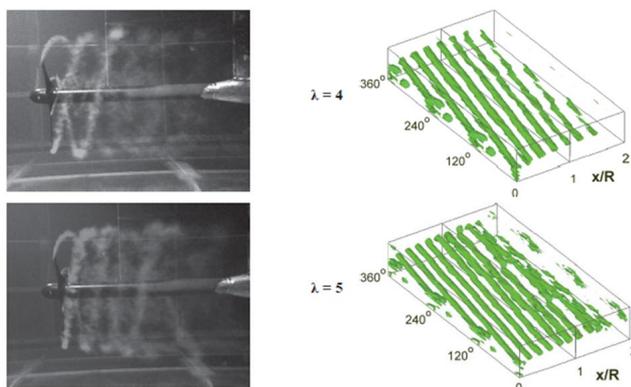


Figura 7 Visualización de la estructura de vórtice 3-D detrás del rotor: a) – visualización de tinte, b) - representación de la estructura del vórtice de la punta [6].

<sup>1</sup> (La velocimetría de imagen de partículas (PIV) es un método óptico de visualización de flujo utilizado en educación e investigación). Se usa para obtener mediciones de velocidad instantáneas y propiedades relacionadas en fluidos)

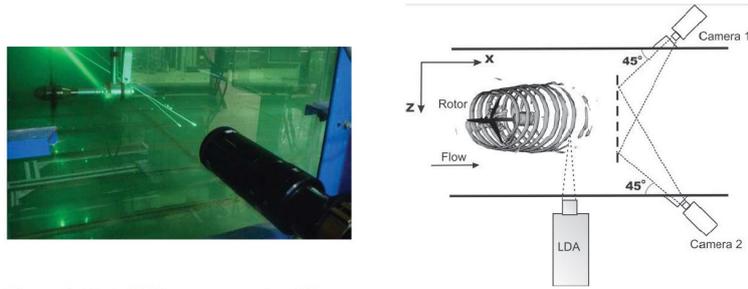


Figura 8 a)Foto LDA mediciones de caudal y pulsación detrás del rotor. b) – Esquema de medidas LDA y SPIV en sección transversal (a  $x = 9R$ )[6]

En la figura 8 se observa el procedimiento de medición donde el ángulo de ataque de la hoja se fijó para cada prueba y corresponde a la geometría de un rotor. El flujo aguas abajo del rotor se convierte en una estructura 3D [6] bien definida que consta de vórtices helicoidales de punta que se visualizan por tinte de fluorescencia y por reconstrucción de la velocidad y campo de vorticidad obtenido por velocimetría estereoscópica de partículas de la estela cercana.

## 2.6 Escalados de turbinas para medir en Túneles de viento

En la mayoría de los casos, las turbinas eólicas e hidrocinéticas son grandes máquinas y, en consecuencia, las pruebas a escala real son extremadamente complejas y costosas [1].

Se conoce que, la turbina más grande probada en unas condiciones de laboratorio poseía un diámetro de 10 m. Como consecuencia, la escala del túnel de viento aún está muy lejos de la escala real en instalaciones de energía eólica recientes que tienen rotores mayores de 100 m (hasta 250 m) [22] de diámetro.

Una alternativa de las pruebas a gran escala pueden ser experimentos en túnel de viento con maquetas a pequeña escala, que permitirán la adquisición de datos estructurales y aerodinámicos de aerogeneradores.

Sin embargo, se requiere cumplir con las leyes de semejanza por lo que surgen problemas cuando se utilizan modelos a pequeña escala en instalaciones del túnel de viento para predecir el comportamiento aerodinámico de turbinas de tamaño completo.

La teoría de la similitud, que se omite dado el objetivo del trabajo y su extensión, se desarrolla sobre la base del teorema de Buckingham [1,9] identificando las cantidades físicas que regulan la salida del flujo que deben ser satisfechas en cada punto. Estos parámetros determinan las relaciones de aspecto entre el modelo y el dispositivo real (diámetro, altura, cuerda, dimensión transversal, relación de velocidad de punta de pala (TSR), el número de Reynolds, solidez del rotor, el número de Mach, etc) de conformidad con las condiciones de semejanza (mencionadas en párrafo anterior) (geométrica, cinemática, dinámica donde la semejanza completa es una ecuación newtoniana.

Tres parámetros adimensionales gobiernan el problema que son el número de Reynolds basado en alguna escala integral de la turbina (por ejemplo, el diámetro), la relación de velocidad de punta de pala (una velocidad de rotación adimensional " $\lambda$ ") y el coeficiente de potencia (la potencia adimensional convertida por el rotor " $C_p$ "). Cuando los investigadores se enfrentan a la tarea de reproducir estos tres parámetros en turbinas de pequeña escala, fácilmente se hace evidente que no es práctico igualarlos a todos simultáneamente y, muy a menudo, el rango de números de Reynolds practicado en el laboratorio es diferente del número de Reynolds de la escala completa de la turbina.

$$C_p \text{ (potencia adimensional convertida por el rotor)} = f(\lambda) = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (3)$$

$$\lambda \text{ (velocidad de rotación adimensional)(TSR)} = \omega R / V_1 \quad (4)$$

Dónde P = potencia convertida por la turbina,  $\rho$  = densidad del fluido,  $\omega$  = velocidad angular (rad/s), R = radio del álabo (m) y  $V_1$  velocidad del viento [8].

El parámetro  $C_p$  combina las variables importantes del diseño, de tal modo que la performance de la hélice queda determinada si usamos:  $C_p = f(\lambda)$ .

Sin embargo, a pesar de que los transitorios (puesta en marcha, apagado, control de potencia, etc) no se simulan adecuadamente, durante la última década, las pruebas en túnel de viento utilizando modelos, han sido la principal herramienta para experimentar y analizar turbinas tanto eólicas como hidrocinéticas, perfiles, etc. Se obtiene información valiosa sobre las mismas a gran escala, merced a los experimentos realizados en los túneles de viento ([1], [15],[16] y [17]).

Aunque las pruebas en túnel de viento tienen algunas limitaciones, como efectos de escala y requiere controles para ayudar a las reglas de similitud, resultan más factible que las pruebas experimentales con grandes turbinas, proporcionando información aerodinámica importante para las turbinas a gran escala [1].

Recientemente, el método CFD ha entrado en la confrontación metodológica como un elemento accesorio que apoya las pruebas con turbinas de pequeña escala, agregando un factor que contribuye al refinamiento de los proyectos que usen túneles y prueben dispositivos escalados. Con el fin de ilustrar los aspectos que hacen al eje temático de revisión adoptado se incluyen los ejemplos mencionados en el resumen destacando de ese modo los puntos de revisión adoptados en el trabajo.

### 3. Descripción ensayos reales sobre turbinas de eje vertical y horizontal

#### 3.1 Primer Ejemplo: medición de campo

Se realizaron mediciones de campo (figura 9) [18] del flujo de estela producido por un aerogenerador Enercon E-70 de 2 MW usando tres lidars de viento Doppler de barrido. Se utilizó una técnica basada en GPS para determinar la posición de la turbina eólica y las ubicaciones del lidar de viento, así como la dirección de los rayos láser. Los lidars<sup>2</sup> utilizados en este estudio se caracterizan por una alta resolución espacial de 18 m, lo que permite la caracterización detallada de las estelas de aerogeneradores. Se llevaron a cabo mediciones bidimensionales de la velocidad del viento escaneando un solo lidar sobre el plano de simetría vertical de la estela. Luego se recuperó el campo de velocidad axial medio promediando escaneos 2D realizados consecutivamente. Para investigar la estela turbulenta, se realizaron mediciones lidar individuales observando el rayo láser en direcciones fijas y utilizando la frecuencia de muestreo máxima. A partir de estas pruebas, los picos en la variación de la velocidad se detectan dentro de la estela en correspondencia con la punta superior de la altura de la turbina; esta turbulencia mejorada podría representar una fuente de cargas de fatiga peligrosas para las turbinas aguas abajo.

La densidad espectral de las fluctuaciones de velocidad medidas muestra un claro comportamiento de escala de rango inercial.

Luego, se realizaron mediciones simultáneas con dos lidars para caracterizar tanto el componente axial como las de la velocidad vertical. Para esta configuración, se analizaron solamente los puntos en que los dos rayos láser se cruzaron casi en ángulo recto. Las estadísticas se calcularon sobre el conjunto de muestras para ambas componentes de velocidad, y estas mostraron fuertes fluctuaciones de flujo en la región cercana a la altura de la punta de la turbina, con una intensidad de turbulencia de alrededor del 30%.

Sin embargo, la teoría del impulso del elemento de pala (BEM) resulta eficaz, y la primera estimación de la eficiencia de un aerogenerador se completa con el impulso Rankine-Froude o modelo de disco actuador. El ejemplo muestra las dificultades para determinar el comportamiento de la estela, mientras que en el túnel de viento se determinaría con bastante precisión las condiciones del recurso debido a la estela de los aerogeneradores.



Figura 9 :Sitio de la turbina eólica: (a) mapa y (b) vista de la calle.[18]

#### 3.2 Segundo Ejemplo: Medición en túnel de viento de las palas de una WT

Los resultados de las pruebas de viento realizadas en una turbina de eje horizontal a escala real con un diámetro de rotor de 1,2 m se presentan, analizan y comparan con los previstos por los códigos WT\_Perf y Qblade Blade Element Momentum (BEM) (figura 10) [15]. El rotor estudiado, tallado en madera, pertenece a una familia de aerogeneradores aptos para ser producidos por personas no cualificadas, utilizando únicamente herramientas de mano, las cuales se han producido más de mil turbinas. Los experimentos se llevaron a cabo en un túnel de viento de circuito cerrado de cámara de prueba abierta de 2 x 2 m a velocidades de viento de 3,0; 3,7; 4,4; 5,5; 7,2; 7,7 m/s y la potencia del eje con diferentes relaciones de velocidad punta ( $\lambda$ ) fue medido. Se encontró que el coeficiente de potencia máximo obtenido experimentalmente ( $C_p$ ) varía significativamente con la velocidad del viento, entre  $C_p^{1/4} 0,32$  para 3,0 m/s y  $C_p^{1/4} 0,40$  para 7,7 m/s. La relación de velocidad de la punta correspondiente al coeficiente de potencia pico se encontró que variaba inversamente

<sup>2</sup> Técnica de teledetección óptica que utiliza la luz de láser para obtener una muestra densa de la superficie de un fluido produciendo mediciones exactas de x, y y z.

con la velocidad del viento, de  $\lambda_{1/4}$  6,5 a 3,0 m/s a  $\lambda_{1/4}$  4,8 a 7,7 m/s. Comparación de los datos obtenidos en túnel de viento con los resultados proporcionado por los dos códigos BEM resultó ser aceptable en sus resultados.

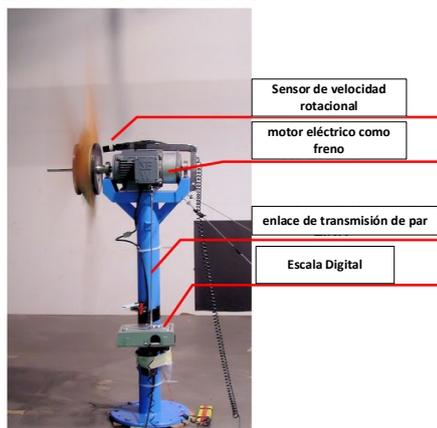


Figura 10a Vista detallada del banco de pruebas de aerogeneradores

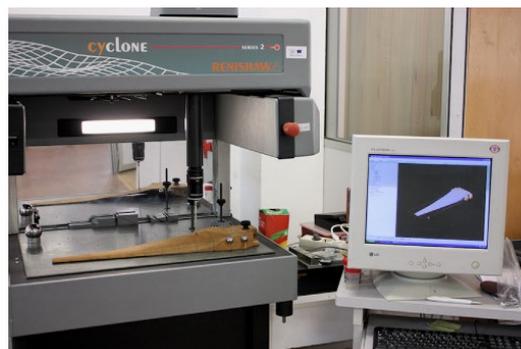


Figura 10b Escaneo de las palas de la turbina en plena realización

### 3.3 Tercer Ejemplo: Mediciones en túnel de viento analizando el número de Reynolds

Con respecto al número de Reynolds inigualable para pruebas de turbinas eólicas a escala reducida, un estudio experimental sobre un único aerogenerador y un arreglo con dos aerogeneradores se realizó bajo condiciones de flujo laminar y turbulento [19]. El flujo turbulento de entrada se creó utilizando un sistema de rejilla activo instalado entre la sección de contracción y prueba del túnel de viento; la máxima intensidad de turbulencia puede llegar al 20%. Los campos de velocidad aguas arriba y en la estela de la turbina se midieron utilizando un sistema 2D PIV.

En los experimentos con una sola turbina (figuras 11 y 12), se encontró que el coeficiente de potencia era fuertemente dependiente de la intensidad de la turbulencia de entrada, porque la turbulencia influyó en la separación del flujo en el lado de succión de la pala del aerogenerador. Esto fue confirmado por los resultados de PIV tomados bajo condiciones laminares y condiciones de entrada turbulenta. Para el caso del arreglo de turbinas eólicas, la eficiencia de ambas turbinas estaba altamente relacionada con la intensidad de la turbulencia en el flujo de entrada. Además, la intensidad de la turbulencia de entrada también influyó en la recuperación de la estela. El coeficiente de potencia de los aerogeneradores fue similar al valor de diseño bajo turbulencia de entrada controlada. En conclusión, a pesar del número de Reynolds inigualable, un flujo similar al campo se puede alcanzar utilizando el flujo de entrada turbulento creado por un sistema de red activo.



Figura 11 Túnel de viento de baja velocidad utilizado en el ensayo



Figura 12 (a) Sensor de par montado en la turbina eólica con el fin de medir la potencia recolectada, (b) Configuración para medir la velocidad angular de la turbina eólica.

### 3.4 Cuarto Ejemplo: Mediciones en túnel de viento

El autor, Nunes et al. [20] realizó la ampliación de escala de una turbina hidrocínética usando la prueba de túnel de viento con una pequeña turbina escalada (figura 13) [20].

Si analizamos la metodología de ampliación para escalar el coeficiente de potencia en función de la relación de velocidad de punta: curvas de,  $C_p = f(\lambda)$ , de un modelo a pequeña escala a uno a escala real de la turbina hidrocínética, veremos que el coeficiente de potencia adimensional,  $C_p$ , expresa la eficiencia de conversión de potencia, y la relación de velocidad de punta, o TSR, define la relación entre la velocidad tangencial de la punta de la pala y la velocidad de la corriente libre del viento. Ambos se calculan como de acuerdo a las ecuaciones (3) y (4).

Se realizaron experimentos con una turbina a pequeña escala y ampliado calculando las curvas características de una turbina hidrocínética a gran escala. Posteriormente, las simulaciones CFD de la turbina de tamaño completo se emplearon para confirmar el enfoque de ampliación a partir de resultados experimentales.

La turbina de referencia estudiada aquí es una de tres palas de 500 kW. máquina de eje horizontal, diseñada para la conversión de energía de los recursos hidrocínéticos aguas abajo de la energía plantas hidroeléctricas [15]. Es una turbina de 10 m de diámetro (Ver Figura) concepto para ser instalado en dispositivos flotantes, con 2,5 m/s de velocidad nominal de la corriente de agua. Esta máquina fue desarrollada en I+D Cooperación brasileña con la participación de la Universidad de Brasilia, Universidad Federal de Pará y Eletrobras Eletronorte S.A., que ha alcanzado una madurez tecnológica TRL3-4<sup>3</sup>

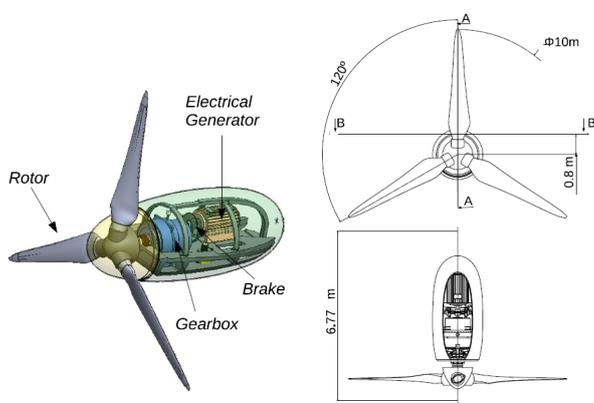


Figura 13 Referencia 500kW turbina hidrocínética. Sobre el izquierda, una vista en perspectiva que muestra algunos detalles de la conversión interna Componentes del sistema. Sobre la derecha, la vista superior y frontal mostrando las dimensiones principales de la máquina

El perfil hidrodinámico empleado para el diseño de la pala era un NACA65(3)618. Después de varios análisis de perfiles hidrodinámicos, se eligió este debido a sus características de curva polar (mayor sustentación y menor valores de arrastre) contribuyendo a la mejora de la eficiencia de la turbina de tamaño completo que aumenta el par producido.

El estudio experimental se llevó a cabo a pequeña escala en un modelo de turbina de 1/20 de las dimensiones reales para representar mejor el escenario dominante de los laboratorios del túnel de viento, en todo el mundo. Para el modelo, el mismo perfil ya definido se empleó para mantener la similitud geométrica entre ambas máquinas. Para  $Re = 7,6 \times 10^4$ , la característica curva del modelo a pequeña escala es diferente de la curva característica de la turbina de tamaño completo, predicha por simulaciones numéricas CFD, de esta manera el máximo  $C_p$  es menor en la pequeña escala.

Se supuso que las diferencias se deben a la relación entre el engrosamiento de la capa límite y la longitud de la cuerda local, que es mayor en el modelo de tamaño completo, en comparación con un modelo pequeño. Metódicamente, viola la condición de similitud cinemática, afectando la dinámica similitud de los resultados. Para superar este problema, la transición se instalaron tiras en las palas, favoreciendo un desprendimiento más temprano y, en consecuencia, favoreciendo la formación de capas límite más gruesas en el modelo. La Tabla 1 enumera los importantes parámetros de la turbina de tamaño completo y el modelo.

Tabla 1 Importantes parámetros de la turbina en su tamaño normal y el modelo

Descripción	Tamaño normal	Modelo
Tipo de turbina	hidrocínética	Eólica
Ejes	Horizontal	Horizontal
Fluido	Agua	Aire
Velocidad del fluido (m/s)	2.5	12
Diámetro (m)	10	0.5
Cuerda media (m)	0.828	0.041

<sup>3</sup> Los niveles de preparación tecnológica (TRL) son un método para definir el nivel de madurez de la tecnología en el sector industrial desarrollado en la NASA

Experimentos en túnel de viento son una alternativa a los experimentos en canales, que son más costoso y difícil de llevar a cabo. En la literatura, otros autores han empleado este enfoque satisfactoriamente como [19], por ejemplo.

Se utilizó un túnel de viento de circuito abierto del Laboratorio de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Brasilia (figura 14).



Figura 14 La turbina a escala 1:20 dentro de la sección de prueba del Túnel de viento del Laboratorio de Energía y Medio Ambiente, de la Universidad de Brasilia

*Descripción del dispositivo:* tiene una cruz de 1,2 m × 1,2 m tramo por tramo de ensayo de 2 m de longitud. El túnel de viento usa un ventilador en la salida. El ventilador es movido por un motor eléctrico de 10 kW y su velocidad de rotación es controlada por un convertidor de frecuencia. En la entrada, antes de la boquilla presenta una contracción (8:1) una capa de panal garantiza un flujo libre con una intensidad de turbulencia inferior al 1%. La velocidad del viento en la sección de ensayo varía hasta 15 m/s. Mediciones de caudal en el túnel de viento han indicado que las variaciones de velocidad en la sección de prueba son como máximo 0,3%. El espesor de la capa límite en la parte inferior de la sección de prueba es de 0,008 m.

Como conclusión final, los autores de ref [21] informan que el estudio proporciona un nuevo método para calcular la característica curva de potencia de una turbina a gran escala a través de datos de túnel de viento obtenidos de un modelo a pequeña escala.

Para escalar los resultados de turbinas pequeñas a grandes, se ha propuesto una ley de potencia empírica para corregir la falta de similitud dinámica en los resultados de  $C_p$  originada por la alta discrepancia entre los números de Reynolds.

La ley de potencia se obtuvo relacionando los coeficientes de potencia y los números de Reynolds para modelo y turbina escala completa mediante ecuaciones de la teoría BEM. un factor de potencia “n” se definió como un valor empírico para ajustarse a la ley entre el modelo y la turbina a escala real, y se calculó a través de simulaciones BEM<sup>4</sup>.

Los experimentos del túnel de viento llevados a cabo con un modelo de turbina relación 1:20 fueron una parte relevante de este estudio. Se tomó cuidado durante las pruebas del túnel de viento y con los datos. Se reconocieron correcciones de taponamiento para mitigar el viento en las paredes del túnel en los datos experimentales. Además, se colocaron tiras en las cuchillas para forzar la transición de la capa límite y genera una escala de turbulencia compatibles con el espesor de la capa límite para minimizar los efectos de escala, se disminuyó el número de Reynolds dentro del túnel de viento para el modelo de turbina. Se observó que usando las tiras de transición de las curvas características experimentales para las tres velocidades de flujo libre probadas colapsaron. Por lo tanto, se puede decir que las curvas  $C_p = f(\lambda)$  dentro del túnel de viento son prácticamente independiente del número de Reynolds.

Por otro lado, las simulaciones CFD, aplicando la metodología al modelo consolidado en la literatura, se realizaron para modelar la turbina de tamaño completo. Los resultados numéricos se compararon con las curvas experimentales y los resultados de la ley de escalamiento. Se pudo concluir que las diferentes metodologías utilizados en este trabajo para obtener las curvas características del modelo y la turbina de tamaño completo son consistentes y confiables ya que los resultados estuvieron de acuerdo.

Es importante resaltar que la ley de potencia podría ser para otras turbinas si se realizan los cambios necesarios.

El factor de potencia depende del caso de estudio y debe calcularse para cada turbina con simulaciones BEM. El valor del factor de potencia es específico para cada máquina y depende sobre las condiciones de funcionamiento.

---

<sup>4</sup> La suposición básica de la teoría BEM es que la fuerza de un elemento de pala es únicamente responsable del cambio de momento axial del aire que pasa a través del anillo barrido por el elemento. Por lo tanto, se supone que no hay interacción radial entre los flujos a través de anillos contiguos: una condición que es, estrictamente, sólo verdadera si los gradientes de presión que actúan axialmente sobre las líneas de corriente curvas se pueden despreciar si el flujo axial el factor de inducción de no varía radialmente.

#### 4. CONCLUSIONES.

El trabajo muestra un análisis previo dónde se especifica las razones por las que se requiere utilizar un túnel de viento con el fin de medir variables que permiten tomar decisiones en el diseño y ensayo de una turbina hidrocínética considerando desde la elección de perfiles de alabes, rendimiento, performance y optimización de los elementos constitutivos de la turbina.

Ulteriormente se aborda la dificultad de modelizar en pequeña escala un sistema de mayor tamaño y las soluciones al problema, exhibiendo a continuación el equipamiento que debe contar el túnel, sensores y métodos experimentales.

Posteriormente se incluyen cuatro ejemplos, dónde se analizan desde una experiencia directamente en el terreno (1er ejemplo), siendo entonces una referencia comparativa con sistema de medición en túneles y uso de modelos, dos ejemplos, uno para analizar el perfil alar y otro la problemática del número de Reynolds y su posible solución para posteriormente (último ejemplo) mostrar una guía de medición en túnel de viento de un modelo y las conclusiones de sus autores respecto al resultado. Como reflexión final, en el análisis de la aplicación del túnel de viento en ensayos no solo de aerogeneradores sino en turbinas hidrocínéticas (otro fluido), se puede deducir que si bien modelizar tiene sus dificultades y la simulación (CFD) nos auxilia en obtener resultados aplicables para responder a los requerimientos mencionados, la experiencia en el túnel de viento y simulaciones BEM da resultados excelentes y sus proyecciones al tamaño original son excelentes.

Este método puede ser llevado a cabo sin inconvenientes y sus resultados muestran que se acoplan perfectamente con los métodos teórico-matemáticos de simulación con resultados que dan seguridad a la hora de expandirlos a sistemas de escala normal.

Como se observa a lo largo del trabajo se describieron algunos túneles de viento y los tipos existentes, se exhibieron aspectos y metodologías de uso de los mismos, se llamó la atención sobre el escalado y se expusieron ensayos reales con sus conclusiones. Se reflexiona que para un proceso incipiente de investigación sobre la temática que es objetivo del trabajo, resulta adecuada en extensión y profundidad.

#### 4. REFERENCIAS.

- [1] Small Wind and Hydrokinetic Turbines Edited by Philip Clausen, Jonathan Whale and David Wood Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom The Institution of Engineering and Technology is registered as a Charity in England & Wales (no. 211014) and Scotland (no. SC038698). † The Institution of Engineering and Technology 2022 ISBN 978-1-83953-071-5 (Hardback) ISBN 978-1-83953-072-2 (PDF).
- [2] I. Bayati, M. Belloli, A. Facchinetti and S. Giappino «Wind Tunnel Tests on Floating Offshore Wind Turbines: A Proposal for Hardware-in-the-Loop Approach to Validate Numerical Codes” WIND ENGINEERING VOLUME 37, NO. 6, 2013 PP 557-568.
- [3] Battisti L., Benini E., Brighenti A., Persico G., and Paradiso B. A review based on evaluation experiences with ten-years activity in VAWT experimental wind tunnel testing. Green Energy and Technology – ISSN:1865- 3529, 2018..
- [4] Dossena V., Persico G., Paradiso B., et al. An experimental study of the aerodynamics and performance of a vertical axis wind turbine in a confined and unconfined environment. Journal of Energy Resources Technology.2015, 137:051207-1–051207-12
- [5] Ferreira C.S., Van Kuik G., Van Bussel G., and Scarano F. Visualization by PIV of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. Experiments in Fluids. 2009, 46:97–108.
- [6] Naumov I.V., Mikkelsen R.F., Okulov V.L., and Sørensen J.N. PIV and LDA measurements of the wake behind a wind turbine model. Journal of Physics: Conference Series. 2014, 524:012168
- [7] R.A. McAdam\*, G.T. Houlby, M.L.G. Oldfield Experimental measurements of the hydrodynamic performance and structural loading of the Transverse Horizontal Axis Water Turbine: Part 1-2 y 3 Renewable Energy 59 (2013) 105e114 y Part 2
- [8] Ricardo A. Bastanion “Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas” <http://Ricardo.Bastianon.googlepages.com/> 2008
- [9] Buckingham E. On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations. Physical Review. 1914, 4(4):345–376.
- [10] Ivanell S, Mikkelsen R, Sørensen J N, Henningson D 2010 Stability analysis of the tip vortices of a wind turbine Wind Energy 13 705–715
- [11] Naumov I V, Okulov V L, Meledin V G 2013 Method and devise of no contact optical-laser diagnostics of unsteady vortex flows Patent RU 2498319
- [12] Nikolaos D. Katopodes, Vibration Induced by Cross-Flow in Free-Surface Flow, 2019 Viscous Fluid Flow
- [13] 10th International Conference on Turbochargers and Turbocharging In 15–16 MAY 2012 SAVOY PLACE, LONDON Institution of mechanical engineers pag. 392
- [14] E. M. Greitzer C. S. Tan and M. B. Graf Internal Flow Concepts and Applications Cambridge University Press 2004

- [15] Monteiro JP, Silvestre MR, Piggott H, Andre JC (2013) Wind tunnel testing of a horizontal axis wind turbine rotor and comparison with simulations from two Blade Element Momentum codes. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 123:99–106. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.09.008>
- [16] Bai CJ, Wang WC (2016) Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines {HAWTs}. *Renew Sustain Energy Rev* 63:506–519. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.078>
- [17] Javaherchi T, Stelzenmuller N, Aliseda A (2017) Experimental and numerical analysis of the performance and wake of a scalemodel horizontal axis marine hydrokinetic turbine. *J Renew Sustain Energy* 9(4):44–54. <https://doi.org/10.1063/1.4999600>
- [18] Lungo GV, Wu YT, Porté-Agel F (2013) Field measurements of wind turbine wakes with lidars. *J Atmos Ocean Technol* 30(2):274–287. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-12-00051.1>
- [19] Talavera M, Shu F (2017) Experimental study of turbulence intensity influence on wind turbine performance and wake recovery in a low-speed wind tunnel. *Renew Energy* 109:363–371. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.034>
- [20] Marianela M. Macias<sup>1</sup> · Rafael C. F. Mendes<sup>1</sup> · Taygoara F. Oliveira<sup>1</sup> · Antonio C. P. Brasil Jr.<sup>1</sup> On the upscaling approach to wind tunnel experiments of horizontal axis hydrokinetic turbines *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* (2020) 42:539 <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02600-2>
- [21] Nunes MM, Mendes RCF, Oliveira TF, Junior ACPB (2019) An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines. *Renew Energy* 133:840–848. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.056>
- [22] Trevor M. Letcher Ed. *Comprehensive renewable energy second edition—ELSEVIER—2022* ISBN 978-0-12-819727-1
- [23] Tony Burton, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, David Sharpe, Michael Graham. *Wind Energy Handbook Third Edition* This third edition first published 2021 © 2021 John Wiley & Sons Ltd.
- [24] <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tuntype.html>
- [25] *Wind Tunnels uses and developments* Ed Zied Driss 2019 by Nova Science Publishers, Inc. ISBN 978-1-53615-899-1 (ebook)
- [26] W. Fister, J.B. Ries “Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments with a portable wind tunnel”

# Revisión del diseño de álabes para turbinas hidrocinéticas

Dr. Ing. di Prátula H.R.<sup>1</sup>–Lifschitz Ana Julia<sup>2</sup> Ing. Eduardo Malchiodi<sup>1</sup> Nestor Ricciuti<sup>1</sup>- Zanfagnini Eliana<sup>3</sup>- Oga Juan José<sup>4</sup>

1 Investigadores del GESE UTN FRBB

2 UTN FRRN-

3 Becarios UTN GESE

4 UNS Dpto. Ingeniería

hrdiprat@frbb.utn.edu.ar

## RESUMEN.

En principio debemos considerar que dos objetos sólidos interactúan en un proceso mecánico donde se transmiten fuerzas, pero, cuando la interacción es entre un objeto y un fluido, el fenómeno se complica porque este último modifica su forma. Si analizamos un cuerpo sólido sumergido en un fluido, el punto de contacto es en realidad la superficie del cuerpo, ya que el este fluye manteniendo la unión física en todos los puntos. O sea, que las fuerzas mecánicas estos, ocurre en todos los puntos de la superficie del cuerpo y la transmisión se produce a través de la presión del fluido.

En el diseño de cuerpos de sustentación, tales como hidroalas, alas o álabes, el objetivo es crear una fuerza importante, perpendicular al flujo de corriente libre, minimizando al mismo tiempo el arrastre. Luego el resultado es que la fuerza resulta del producto entre la presión y la superficie de sustentación ( $F = p A$ ) [38].

Inicialmente podemos analizar las fuerzas de sustentación y a través de la teoría BEM llegar a un desarrollo que permita calcular los álabes de un aerogenerador, pero cuando expandimos la teoría para hacer frente a las principales diferencias entre el funcionamiento del viento y el agua nos vemos en la necesidad de aplicar para el diseño, la teoría BEMT (Teoría del impulso del elemento de pala) (1-4-5-6). Por otro lado, BEMT (turbinas de eje horizontal) es una combinación del momento axial simple y la teoría del elemento de pala. Luego en la revisión se verán los aspectos salientes del diseño y las fuerzas actuantes (Parte 2).

Considerando las turbinas de eje vertical (VAWT) de rotor Savonius, que se basa en la fuerza de arrastre y el rotor Darrieus, que se basa en la fuerza de sustentación, veremos algunos aspectos de modelado en 2D. El rotor Savonius se modela comúnmente con métodos computacionales tradicionales, como por ejemplo el software de dinámica de fluidos (CFD), ya que la separación del flujo es crucial para su funcionamiento. En cambio, los modelos con capas límite resueltas, también se pueden aplicar al Darrieus, con modelos computacionalmente exigentes y simplificados, donde las palas son simuladas por modelos de fuerza [1 a 3].

El aporte de la revisión consiste en destacar aspectos esenciales relacionados al tema de diseño de álabes de turbinas hidrocinéticas, ejemplificando y exponiendo aspectos que deberán ser tomados en consideración para optimizar la pala.

**Palabras Claves:** Álabes, HAWT, HKT, VAWT, CFD

**Área Temática:** Energías renovables: fuentes de energía (hidrocinética)

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigadores, doctorandos y becarios

## 1. INTRODUCCIÓN

Un sencillo análisis, demuestra que las turbinas eólicas de eje horizontal (HAWT) que aprovechan la energía del viento y las turbinas hidrocinéticas de eje horizontal (HKT) utilizan los mismos principios básicos, aunque éstas últimas, en los ríos, y corrientes de marea o marinas.

Debemos analizar a lo largo del trabajo aspectos de aerodinámica los que mencionaremos para comprender conceptos que nos enfocan en la temática del trabajo. Las ref [1.a.6, 10, 15 y 30] colaboran con sus trabajos a ello, mientras que al mismo tiempo debemos mencionar métodos de trabajo como BEM ref [22,31], CFD ref [26,27,30 31, 34 y 35], GA y FEA ref [31]. Es difícil para nosotros desarrollar temas puntuales de los conceptos alcanzados sin la mención de estos aspectos y los tipos de turbinas existentes ref[1, 29].

Se posee un vasto conocimiento de las turbinas eólicas en lo referente a recursos, operación, montaje y elección de su ubicación, de tal modo que es muy útil el conocimiento en aerodinámica, métodos de trabajo y diseño, de forma similar los puntos de investigación para las turbinas hidrocinéticas, deberán ser, el análisis del recurso, elección de su ubicación, aspectos de diseño particulares la optimización de la captación de la energía cinética del agua y la conversión en energía eléctrica.

Sin embargo, una importante diferencia es la velocidad del fluido, ya que las turbinas hidrocinéticas trabajan con bajas velocidades (no más de 3-4 m/s aunque normalmente con una media de 2 m/s) mientras que las turbinas eólicas lo hacen con una velocidad mayor (6 a 17 m/s). También es diferente la densidad del fluido ya que, la densidad del agua es unas 830 veces mayor que la del aire (viento), por lo que incluso con velocidades mucho más bajas, las densidades de potencia en los aerogeneradores, son típicamente más altas.

Otro aspecto que debemos tomar en cuenta, es que a diferencia de las palas de turbinas eólicas, las velocidades de las palas de HKT están limitadas por el peligro de cavitación si el número de cavitación "σ" es inferior a 1 ( $\sigma = \frac{P_T - P_V}{(1/2 \rho V^2)}$ ) donde  $P_T$  es la presión a la profundidad de la turbina,  $P_V$  es la presión de vapor,  $\rho$  es la densidad del agua y  $V$  es la velocidad del líquido relativa al álabe (para la práctica esto significa que la velocidad de la punta de la pala debe mantenerse por debajo de los 12 m/s) [1..6].

En contraste, los HKT requieren mayores precisiones tanto en el estudio de los recursos como de su montaje. Sin embargo, no requieren grandes áreas inundadas o estructuras civiles y así se reduce el impacto ambiental en su utilización e instalación. Al utilizar la teoría del impulso del elemento de pala (BEMT) en el análisis y diseño de HAWT y HKT la teoría se amplía para hacer frente a la principal diferencia entre el funcionamiento del viento y el agua: la posibilidad de cavitación, a través del criterio del coeficiente de presión mínimo local que es generalmente expresado como un número de cavitación.

También puede citarse que hay que medir la velocidad del fluido y el sentido de propagación, donde notamos que el del agua es predecible inicialmente y no así el viento. Sin embargo, la precaución en la medición del recurso quedó exhibida cuando una turbina hidroeléctrica abierta de 1 MW falló en la Bahía de Fundy en 2009 debido a velocidades de corriente máximas mucho más altas que las esperadas [1]. Otro aspecto diferente entre ambos sistemas es que el flujo de las mareas, a diferencia del viento, es bidireccional en la mayoría de los sitios, pero no en todos.

Un aspecto a remarcar es que las turbinas eólicas operan en lo que efectivamente es un campo de flujo infinito, y según la ley de Betz, el límite superior de extracción de potencia para una turbina en flujo abierto es 16/27 o 59,3% del flujo de energía cinética en un área de flujo igual al área de barrido de la turbina, siendo el coeficiente de rendimiento de una turbina  $C_p$  (coeficiente de potencia que indica la capacidad de la hélice para captar la energía del fluido) el que relaciona la potencia disponible en con la transmitida al sistema mecánico [39].

Sin embargo, en algunos sitios (por ejemplo, un canal) pueden tener un área limitada por lo que un conjunto de turbinas hidroeléctricas puede bloquear una porción significativa del área de flujo. En estos casos los supuestos en que se basa la ley de Betz ya no se pueden aplicar e incluso se puede extraer más energía buscando un pequeño salto que provea de energía potencial adicional.

Para diseños de eje horizontal, el método BEMT es preciso y tiene la particularidad de incluir el efecto de un difusor que rodea el rotor. Esta modificación es atractiva e importante para las turbinas pequeñas. Avances en matemática, permiten realizar formulaciones para diseñar turbinas aumentadas por difusor (DAT), y considera el diseño BEMT para potencia máxima y optimización multidimensional (MDO) teniendo en cuenta que también se deben cumplir otros objetivos como el bajo nivel de ruido y la masa de la pala.

Al mismo tiempo las turbinas tanto eólicas e hidrocinéticas de eje vertical (VAWT) (siendo el enfoque más avanzado el modelo de cilindro actuador), el flujo estacionario es modelado a través de la ecuación de Euler, dando un campo de flujo más realista. Existen opciones para usar el modelo de línea de actuadores (ALM) o el método de vórtice, donde el primero generalmente se implementan dentro de CFD tradicional, mientras que el segundo a menudo se implementa como un método de Lagrange que utiliza la vorticidad como parámetro de discretización. Los modelos simplificados son principalmente útiles para turbinas con una relación de velocidad de punta alta, mientras que el bloqueo profundo que puede ocurrir a una velocidad de punta baja, frecuentemente, requiere soluciones basadas en CFD tradicionales que resuelvan las capas límites. Uno de los objetivos fundamentales del trabajo requiere conocimientos previos específicos, para luego aplicar desarrollos ampliados. Finalmente, listamos los posibles problemas de los HKT pequeños [1]:

1. *costo de capital y factor de capacidad;*
2. *baja densidad de potencia debido a la baja velocidad en los sitios donde se necesita energía;*
3. *aguas poco profundas donde el flujo es rápido;*
4. *lecho rocoso de un arroyo que reduce el espacio disponible para la turbina;*
5. *la necesidad de prever el paso de embarcaciones en algunos ríos;*
6. *escombros flotantes que obstruyen las turbinas;*
7. *daños por troncos flotantes;*
8. *carga inesperadamente alta de remolinos y crecidas repentinas;*
9. *dificultad para desplegar y recuperar turbinas.*

## 2. ANÁLISIS BÁSICO DE AERODINÁMICA Y VARIABLES DE DISEÑO

### 2.1 Análisis de fuerzas en las Palas

La potencia de los equipos (THC) en función de los parámetros geométricos de ésta (diámetro de captación, forma del conducto, diámetro de salida, etc.) y de los parámetros cinéticos del agua (velocidad de la corriente, potencia cinética del fluido, densidad, etc.), considerando que se mueve a la velocidad uniforme “v” a través de una sección de superficie A perpendicular a la corriente es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

#### 2.1.1 Numero de Reynolds

A su vez la velocidad crítica de interés práctico para el ingeniero es aquella velocidad por debajo de la cual toda turbulencia es amortiguada por la acción de la viscosidad del fluido. La experiencia demuestra que un límite superior para el régimen laminar, en tuberías, viene fijado por un valor del número de Reynolds alrededor de 2000, para la mayoría de los casos prácticos.

Por lo tanto, es importante definir el número de Reynolds como un número adimensional que caracteriza el movimiento de un fluido donde su valor revela si el flujo sigue un modelo laminar o turbulento. Su valor es función de [9,12,13] (ec 2 a 6):

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \quad (2)$$

Luego depende de:

$$Dh = 4 \left( \frac{\text{área}}{\text{perímetro mojado}} \right) \text{ (diámetro hidráulico en m)} \quad (3)$$

$$v = \left( \frac{\text{viscosidad dinámica}}{\text{densidad}} \right) = \left( \frac{\mu}{\rho} \right) \text{ (viscosidad cinemática (m}^2\text{/s))} \quad (4)$$

Siendo finalmente para una tubería de sección circular el Re es:

$$Re = \frac{u D}{v} = \frac{u \rho D}{\mu} \text{ (adimensional)} \quad (5)$$

Para el caso de una sección recta no circular será:

$$Re = \frac{u Dh}{v} \text{ (adimensional)} \quad (6)$$

Como vemos, es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos. Podemos observar que si es suficientemente alto expresaría que las fuerzas viscosas son pequeñas comparadas con las convectivas y por lo tanto pueden ignorarse. En conductos o tuberías si  $Re \leq 2300$  el flujo es laminar y si es  $\geq 4000$  el flujo será turbulento (fig 1)

#### 2.1.2 Capa límite

En un flujo fluido real, la velocidad disminuye en proximidad de la pared debido a la viscosidad que no permite el deslizamiento de las partículas sobre las fronteras rígidas, es decir, la velocidad del

fluido sobre la pared es cero [15]. Como resultado de este fenómeno los gradientes de velocidad y los esfuerzos tangenciales son máximos en esta zona que se denomina capa límite.

Luego, la velocidad sobre la pared es nula y se incrementa al alejarse de ésta, aproximándose en forma asintótica a la velocidad del flujo externo.

La capa límite, normalmente es muy delgada, pero cuando el flujo se mueve sobre un cuerpo, una mayor cantidad de partículas son retardadas por efecto del esfuerzo de corte y la capa límite aumenta su espesor progresivamente aguas abajo.

En el caso de superficies lisas, la capa límite es laminar, ya que las partículas de fluido se mueven en capas lisas. Pero al aumentar el espesor, ésta se vuelve inestable y se transforma en una capa límite turbulenta, donde las partículas de fluido se mueven en forma más o menos caótica alrededor de una velocidad media. (figura 1)

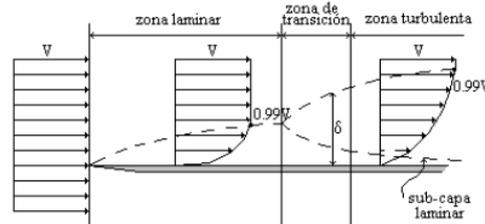


Figura 1 Zonas del número de  $Re$  (zona laminar  $Re \leq 2300$  – de transición  $2300 \leq Re \leq 4000$  y  $Re \geq 4000$

zona turbulenta)

### 2.1.3 Fuerzas actuantes en las palas

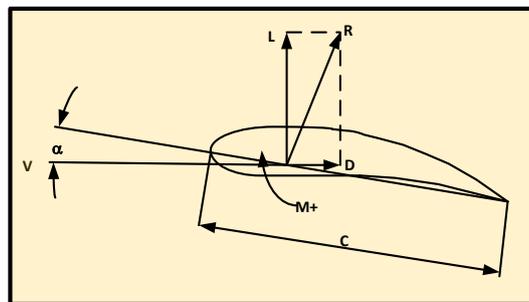


Figura 2 Fuerzas sobre el perfil alar, cuerda y ángulo de ataque

Las turbinas eólicas operan en la actualidad con un elevado rendimiento aerodinámico de su rotor que les permite captar más energía del viento [22,23]. Los progresos en el diseño de las actuales turbinas, se han debido principalmente a los avances realizados en el cálculo de la forma geométrica del perfil alar óptimo. Por esta razón, es importante desarrollar los conceptos básicos de la aerodinámica y analizar cómo se utilizan para el cálculo del mismo (fig 2).

Cuando un perfil enfrenta una corriente de aire, se desarrollan distintas velocidades a ambos lados del cuerpo. La velocidad es mayor sobre la cara superior del perfil y de acuerdo con la ecuación de Bernoulli, a mayor velocidad corresponde una menor presión. De esto, resulta que en la cara superior se genera una zona de baja presión que succiona al perfil hacia arriba (fig 3).

Correspondientemente, en la cara inferior, donde las partículas del aire se mueven a menor velocidad, se desarrolla una sobrepresión con respecto a la corriente libre que también empuja al perfil en forma ascendente.

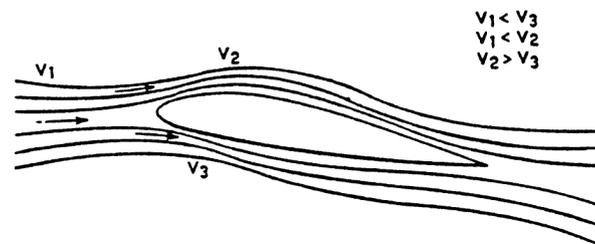


Figura 3 Fuerzas sobre el perfil alar

La integración de las presiones ejercidas sobre el perfil da como resultado una fuerza denominada fuerza de presión. Adicionalmente, el deslizamiento de las partículas del aire sobre la superficie del perfil, genera por razonamiento otra fuerza denominada de fricción, que se suma vectorialmente a la anterior.

Podemos ahora, definir, la resultante R de ambas fuerzas, que tiene la dirección que muestra la Figura 3. Esta resultante, puede separarse en sus componentes normal y paralela a la dirección de la velocidad V de la corriente libre. La primera de ellas, L (ec 7), se denomina sustentación, mientras que y la paralela D (ec 8), se designa como resistencia. La sustentación y la resistencia se expresan del siguiente modo:

$$L(\text{Sustentación}) = C_L q S \quad (7)$$

$$D(\text{Resistencia}) = C_D q S \quad (8)$$

Siendo q = presión dinámica ( $\frac{1}{2} \rho V^2$ ),  $\rho$  densidad del aire, V = velocidad relativa entre el perfil y el aire y S = C  $\Delta r$  superficie proyectada de la sección del perfil, C = cuerda o distancia entre el borde de ataque y el de fuga del perfil.  $\Delta r$  longitud de la sección perpendicular al gráfico.

Se supone que la forma del perfil se mantiene constante en la distancia  $\Delta r$ .

La sustentación y la resistencia actúan sobre el perfil y se consideran como aplicadas en un determinado punto. Sin embargo, para definir en forma completa la acción de las fuerzas sobre el perfil, es necesario, además, especificar el momento alrededor del mismo punto.

El ángulo " $\alpha$ " (de ataque) es el ángulo que existe entre la dirección de la corriente libre y la cuerda, mientras que M+ el momento denominado de cabeceos tendiente a modificar este ángulo. Este momento, es positivo ya que tiende a elevar la "nariz" del perfil y se expresa de la siguiente forma (fig 2):

$$M(\text{momento}) = C_M q S C \quad (9)$$

Para exaltar las características aerodinámicas de un perfil se pueden graficar los coeficientes  $C_L$ ,  $C_D$  y  $C_m$  (fig 4) en función del ángulo de ataque.

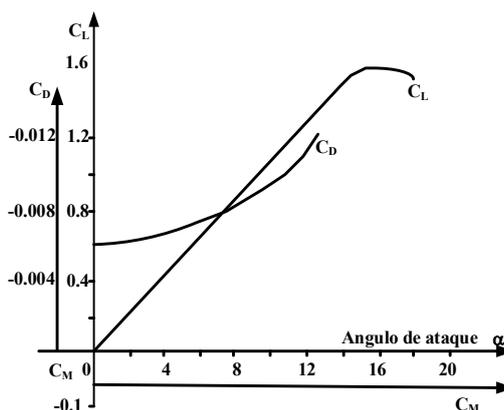


Figura 4 Coeficientes  $C_L$ ,  $C_D$  en función de  $C_M$  y el ángulo de ataque

El coeficiente de sustentación  $C_L$ , crece en forma aproximadamente lineal con el ángulo de ataque hasta un valor máximo, a partir del cual cae abruptamente. En esas condiciones, el perfil entra en pérdida dejando de sustentar. La pérdida se produce debido al desprendimiento de la capa límite en la cara superior del perfil, como consecuencia del gradiente de presión adverso existente más allá del punto de máximo espesor. Por esta razón, es importante que la forma de los perfiles aerodinámicos, tengan un gradiente de presión reducido. De este modo, el desprendimiento de la vena fluida ocurre en la parte posterior del perfil, próximo al borde de fuga, con lo cual la sustentación se mantiene elevada.

Las propiedades deseables de los perfiles son: **elevada sustentación y baja resistencia**. El parámetro usado para medir la calidad del perfil es L/D y en especial interesa el valor  $(L/D)_{\text{máx}}$  que puede alcanzar al variar el ángulo de ataque.

El coeficiente de resistencia  $C_D$ , por su parte, tiene un valor bajo para pequeños ángulos de " $\alpha$ " y aumenta en forma aproximadamente parabólica hasta que deja de sustentar (un avión entraría en pérdida). En la fig 5 se observa que la relación  $(C_L/C_D)_{\text{máx}}$  se obtiene con la pendiente de la recta tangente a la curva y que pasa por el origen [39].

Tomando en cuenta que el ala es finita se define la relación de aspecto<sup>1</sup>:  $Ar = b^2/Sa$  donde Sa es la superficie del ala proyectada en planta y "b" la envergadura de la misma. Si consideramos que el

<sup>1</sup> La relación de aspecto es importante por su influencia debido a los efectos producidos por la punta del ala

ala con un determinado ángulo “ $\alpha$ ” se coloca frente al viento, se produce una desviación del flujo hacia abajo y, dada la diferencia de presiones entre la cara inferior y superior se genera un flujo de abajo hacia arriba en la punta de las palas. Este flujo es arrastrado por la corriente, formándose el vórtice de punta de ala visible con frecuencia como una estela de vapor, producida por la condensación de la humedad atmosférica. La desviación del flujo hacia abajo y los vórtices que se generan y son arrastrados por la estela del ala, produciendo un aumento de la resistencia al avance, pues continuamente se está entregando energía a la corriente de aire.

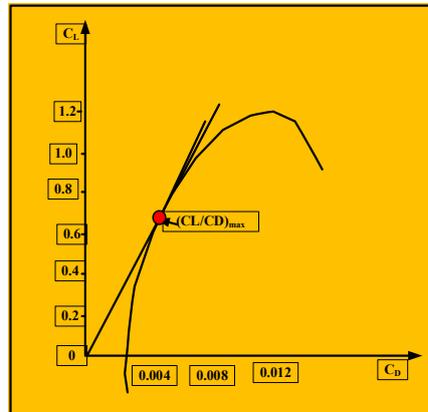


Figura 5  $(C_L/C_D)_{max}$

Esta fuerza adicional, conocida como resistencia inducida se suma a la resistencia de presión, dando como resultado la resistencia total.

### 2.1.4 Coeficiente de Momento

Este coeficiente depende del punto alrededor del cual es considerado. En los perfiles, normalmente existe un Centro Aerodinámico o Foco, alrededor del cual el momento se mantiene constante al variar el ángulo de ataque. Para esta consideración, la variación del ángulo de ataque debe mantenerse dentro de la zona lineal del coeficiente de sustentación. Para perfiles delgados y de poca curvatura el centro aerodinámico está ubicado al 25% de la cuerda a partir del borde de ataque.

También es importante definir el centro de presión de un perfil aerodinámico. Este punto es donde la resultante de las fuerzas aerodinámicas corta a la cuerda. De este modo, el centro de presión es casi coincidente con el punto de aplicación de las fuerzas aerodinámicas y como consecuencia, el momento aerodinámico con respecto al centro de presión es nulo.

En perfiles delgados y de poca curvatura, el centro de presión está detrás del 25% de la cuerda y al aumentar, el centro de presión, se aproxima gradualmente al 25% de la cuerda.

El número de Reynolds tiene influencia ya que los coeficientes aerodinámicos también dependen del mismo ( $Re = \rho C V / \mu$ ), siendo “ $\mu$ ” la viscosidad del aire que fluye alrededor del perfil.

Considerando que los ensayos experimentales se realizaron normalmente para aplicaciones aeronáuticas con elevado número de Reynolds y estos no se pueden aplicar a turbinas eólicas ya que la velocidad de rotación de las palas del aerogenerador es baja, generalmente se efectúa una extrapolación o ensayos aplicables a aeromodelismo.

Es conveniente que el perfil aerodinámico posea un elevado coeficiente de sustentación y simultáneamente un bajo coeficiente de resistencia. Esto indica que sería conveniente que posean altos valores de la relación  $C_L/C_D$  (sustentación sobre resistencia). Es importante, también, verificar el ángulo de ataque (en los aerogeneradores de gran porte existe el sistema de regulación del ángulo de ataque, generalmente a partir de una velocidad de viento) ya que varían los valores de  $C_L$  y  $C_D$  con el mismo.

Es conveniente que en el perfil alar del aerogenerador el coeficiente  $C_L$  alcance su valor máximo en forma suave (evitando picos agudos) en función del ángulo de ataque ya que la súbita caída de la sustentación produce vibraciones.

## 3. Criterios Metodológicos

Se analizaron en la introducción aspectos importantes acerca de fuerzas actuantes para el desarrollo de la teoría y ejemplos a incorporar para el cálculo y adopción de alabes destinados tanto a turbinas eólicas como hidrocinéticas. Examinaremos ahora las teorías de cálculo.

### 3.1 Teoría BEM

La teoría del impulso [22,31] usa el concepto del disco actuador a través del cual se desarrolla una caída de presión, que constituye la energía extraída por el rotor. En el disco actuador (rotor con

alabes) se representa como siendo barrido por una multiplicidad de palas aerodinámicas, cada una de ellas representada por un vórtice radial de fuerza constante  $\Delta\Gamma$ , que denota la circulación ligada alrededor de cada sección de la pala (la totalidad de la vorticidad a lo largo de la envergadura en las hojas de la superficie de la hoja) (fig 6). Generalmente se considera que cada una de estas líneas de vórtice se encuentra a lo largo de la línea de cuarto de cuerda de la pala, pero no puede terminar en el campo de flujo en la punta. Por lo tanto, cada vórtice se proyecta desde la punta de la pala y se convecta aguas abajo con velocidad del flujo local, formando un vórtice de estela en forma de hélice con fuerza  $\Delta\Gamma$ . El número de alabes,  $B$ , se supone que es muy grande, pero, la solidez del total, es finita y pequeña, ver figura 6:

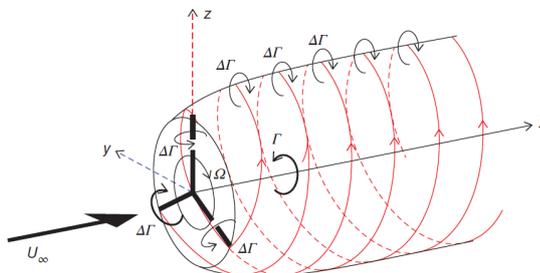


Figura 6 Estela de vórtice helicoidal arrojada por rotor con tres palas cada una con uniforme circulación  $\Delta\Gamma$

Desde la raíz de cada aspa, suponiendo que esta llega hasta el eje de rotación, parte un vórtice lineal de fuerza  $\Delta\Gamma$  y que se extiende aguas abajo a lo largo del eje de rotación, contribuyendo al vórtice raíz total de fuerza  $\Gamma(=B\Delta\Gamma)$ .

El tubo de corriente se expandirá en forma radial, a medida que el flujo de la estela se ralentiza dentro del tubo. Debido a que la convección axial de los vórtices de la punta, por lo tanto, se está desacelerando desde el rotor hasta la estela lejana, su espaciado disminuye y, por lo tanto, aumenta la densidad de vorticidad en la placa de tubos que representa los vórtices de la punta. La vorticidad es confinada a la superficie de este tubo, el vórtice raíz, y a la hoja de vórtice unida barrida por la multiplicidad de álabes para formar el disco del rotor; en el resto de las regiones y en la estela, el flujo es irrotacional.

La naturaleza de la expansión del tubo no se puede determinar por medio de la teoría del momento, pero se sabe a partir de simulaciones numéricas que suele ser bastante pequeño. Por lo tanto, como una aproximación, se considera que el tubo permanece cilíndrico, como se muestra en la Figura 7:

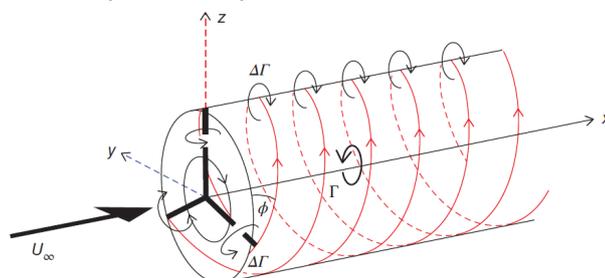


Figura 7 Estela de vórtice helicoidal simplificada ignorando la expansión de estela

La ley de Biot-Savart se usa para determinar la velocidad inducida en cualquier punto cercano del disco actuador. El modelo de vórtice cilíndrico permite determinar con precisión, el flujo, que es preciso dentro de las limitaciones de la estela cilíndrica que no se expande.

A pesar de la exclusión de la expansión de la estela, la teoría del vórtice produce resultados de acuerdo con la teoría del momento y aclara la comprensión del flujo a través de una extracción de energía del disco actuador. Sin embargo, la velocidad radial infinita predicha en el borde exterior del disco es una prueba más de que el disco actuador es físicamente irrealizable.

Se supone que las fuerzas sobre un elemento de pala se pueden calcular por medio de características bidimensionales (2-D) del perfil aerodinámico utilizando un ángulo de ataque determinado a partir de la velocidad resultante incidente en el plano de la sección transversal del elemento. Aplicando el principio de independencia se ignora la dirección de la componente de velocidad en el tramo. Los efectos tridimensionales (3-D) también se ignoran.

### 3.2 Teoría CFD (Dinámica de Fluidos Computacional)

La mecánica de fluidos se basa en el cálculo diferencial [26,27,30 31, 34 y 35]. Como, se observa, en la figura 1 existen, dos formas de flujo diferentes, laminares y turbulentos, y una región de transición. Las formas de flujo ocurren en distintos perfiles de velocidad. El flujo laminar es caracterizado por el hecho de que las partículas fluyen en caminos estratificados sin movimiento

transversal perceptible perpendicular a la dirección principal del flujo. El turbulento muestra estructuras de vórtice fuertemente fluctuantes (de forma estocástica) y, por lo tanto, un intercambio transversal creciente e inestable de todas las variables de transporte.

Las ecuaciones de conservación se pueden resolver directamente numéricamente (Direct Numerical Simulación; DNS). Sin embargo, en el caso de flujos turbulentos, se hace necesario contar con una resolución muy alta del flujo para poder capturar remolinos, incluso los más pequeños. Esto requiere una malla computacional extremadamente fina, lo que conduce a un sistema de cálculo de grandes prestaciones y mucho tiempo de proceso del sistema de cálculo. Si se selecciona una malla computacional gruesa, la solución numérica converge o no, o conduce a un resultado sin sentido.

#### 4. Tipos de Turbinas

La mayoría de los HKT [1] son de flujo axial, similares a las turbinas eólicas a escala reducida, o se basan en el principio de flujo cruzado de Darrieus (fig 8). Se construyen algunos HKT de rotor Savonius, algunas ruedas hidráulicas y algunos sistemas experimentales que utilizan desprendimiento de vórtices o aleteo de las palas, como se han demostrado a nivel de laboratorio. La Figura 8 muestra un Schottel HKT de flujo axial y un eje vertical de Nueva Energía Darrieus HKT, con el término 'área de barrido' ilustrada.

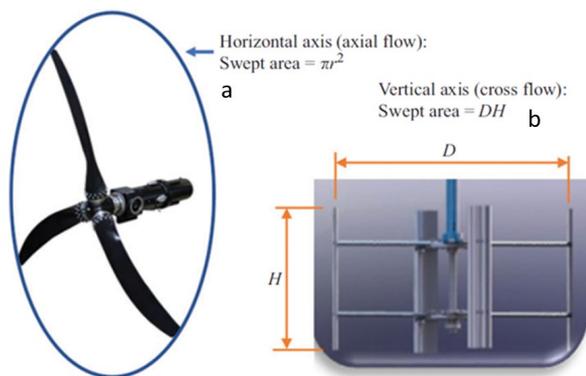


Figura 8 Un HKT de flujo axial de Schottel a) y un eje vertical HKT Darrieus de Nueva Energía b)

#### 4.2 Turbinas de flujo axial

La turbina de flujo axial [1] de tres palas en una estructura de soporte monopolar predomina en la tecnología de turbinas, y la tecnología HKT ha seguido su ejemplo hasta hace poco. Uno de los primeros HKT fue la turbina de eje inclinado Garman, que se muestra en la Figura 9.

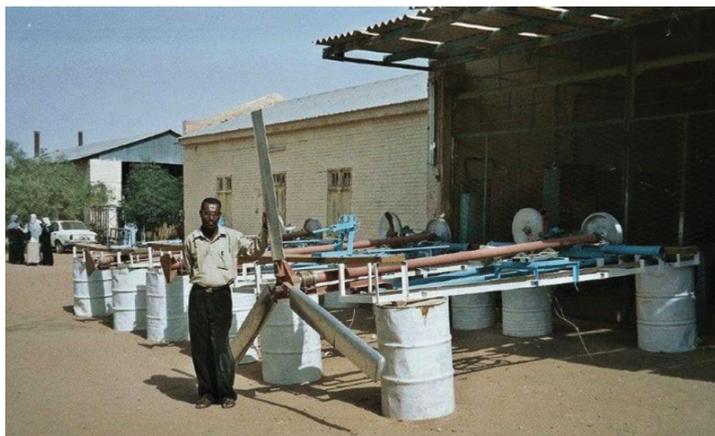


Figura 9 Un Garman HKT en Sudán (foto de Giles Stacey, proporcionada por cortesía Dr. B. Sexon, Thropton Energy Services) [1]

#### 4.3 Turbinas de flujo cruzado

Se puede ver en la figura 10 [1] un contraste entre turbina de flujo axial y de flujo cruzado. El de eje vertical puede ser instalado sobre el nivel del agua (ver fig 8b) por lo que es más sencillo el acceso

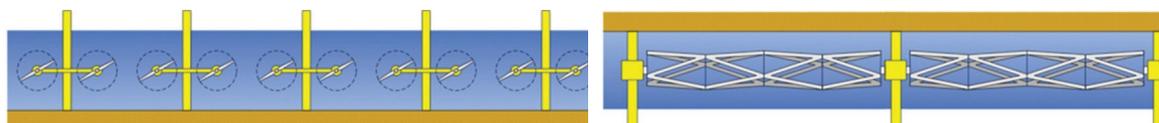


Figura 10 Múltiples turbinas de flujo axial contrastadas con turbinas de flujo cruzado [1]

al generador, además como es insensible a la dirección de la corriente no requiere mecanismo de giro por inversión del flujo de marea. En cuanto al área de barrido rectangular (fig 8b) les permite un montaje en arreglos compactos o como turbinas largas y de pequeño diámetro. El otro es una turbina de flujo axial con diseño de flujo cruzado de eje horizontal transversal (THAWT).

#### 4.4 Turbinas de flujo vertical

La figura 11 [24] muestra un modelo de 25 kW de la New Energy Corp [1]. Esta compañía desarrolló inicialmente las HKT en 2003, comenzando con un modelo de 5 kW y progresando a el modelo de 25 kW (fig 11), con el plan de fabricar tamaños más grandes (de hasta 250 kW), basadas en la misma configuración de eje vertical. A pesar de una intensa cantidad de pruebas, demostraciones y refinamiento del producto, ha habido pocas instalaciones reales, posiblemente debido a las barreras de los costos.



Figura 11 Un Darrieus HKT de eje vertical de New Energy Corp de 25 kW en Canadá, levantado del agua [1]

#### 5 Descripción y Metodologías de Cálculo para el diseño y optimización de Alabes

La historia del arte revela que los álabes de las turbinas se generan combinando de manera óptima uno o más tipos de secciones de palas [31]. Sin embargo no se pueden obviar aspectos que son vitales en el resultado previsto, por ejemplo: se deben analizar desde la contaminación [28,29], las diferencias fundamentales entre los álabes de aerogeneradores e hidrocínicos [1] los métodos de cálculo [28.a.31] y las diferencias entre turbinas de eje vertical y horizontal [23 a 25]. Esto es porque el rendimiento de las secciones de las palas es muy importante y afecta directamente al coeficiente de potencia del rotor

Dado que en la tecnología hidrocínética (nueva rama de la energía renovable), los alabes hasta ahora se habían analizado usando secciones optimizadas para turbinas eólicas o aplicaciones de aviación. Sin embargo, la hidrodinámica debe considerarse con mayor profundidad durante los procesos de diseño. De este modo, el objetivo principal es optimizar la hoja con secciones específicas para turbinas hidrocínicas, reguladas por calado considerando altas fuerzas hidrodinámicas, la cavitación, la contaminación y el comportamiento de pérdida ideal.

Por lo tanto, es importante analizar (ver ref [22,27 y 31]) la utilización de un algoritmo para el proceso de optimización, ya que deben perfeccionarse las diferentes hidroalas primarias y escalarse para varias regiones a lo largo de la hoja. También el desempeño de coeficiente de elevación, arrastre, transición y presión de secciones optimizadas deben ser analizados y comparadas con las secciones NACA, RISØ y NREL más usadas. Las hidroalas optimizadas ofrecen un rendimiento bastante exitoso para las turbinas hidrocínicas en función de los objetivos de diseño, las limitaciones, y comparadas con las secciones estándar.

El número de estudios de optimización en turbinas hidrocínicas reguladas por calado es muy limitado, y las obras disponibles tienen un rendimiento de parada insuficiente y sensibilidad indeseable a la contaminación de vanguardia (Han et al., 2018 [29]). Las secciones de las palas de los aerogeneradores están diseñadas para ser relativamente delgadas para maximizar la producción de energía.

El fluido (agua) es aproximadamente 830 veces más denso que el aire y las palas de la turbina hidrocínética están sujeta a fuerzas mayores (Niebuhr et al., 2019 [29]) (como se mencionó en la introducción) que los aerogeneradores de la misma escala, lo produce problemas de resistencia estructural. Por lo tanto, las secciones de los álabes de la turbina hidrocínética deben ser de mayor espesor que las de las turbinas eólicas (Goundar y Ahmed, [36]). La mayoría de los perfiles aerodinámicos NACA no son adecuados en turbinas hidrocínicas debido a sus pobres

características de pérdida, baja eficiencia estructural, rendimiento deteriorado a diferentes números de Reynolds, e indeseable resultados debido a la contaminación de vanguardia (Ahmed, 2012 [37]) (el desafío es diseñar un perfil con curvatura cercana al borde de ataque que contribuye más a la rotación ya que ocurre un deterioro en el rendimiento con la contaminación del borde de ataque). El diseño de las palas hidrocineéticas de turbina proporcionado por Kolekar y Banerjee (2013) [31] (análisis y método de optimización basado en Algoritmo Genético (GA)) emplea un solo tipo de sección de pala (SG6043) desde la raíz hasta la punta.

Los autores de la ref [31], analizan dos palas diferentes: una con cuerda constante, diseño de torsión cero y otra con cuerda variable, diseño torcido. La Figura 12, muestra un diagrama de flujo para el enfoque de diseño que han adoptado. Como punto de partida, se realizó un análisis hidrodinámico utilizando Teoría BEM para estudiar el efecto de varios parámetros operativos sobre las fuerzas y el par desarrollado en álabes de turbina para una turbina de cuerda constante. Durante el proceso de diseño preliminar cuando no se dispone de una solución de campo de flujo detallada, se calculan las tensiones en el álabe de la turbina basado en fuerzas obtenidas de BEM. El álabe de la turbina se modeló como una viga en voladizo fija en el centro; las tensiones se calcularon en función del área de la sección de la pala. La optimización hidroestructural se llevó a cabo para una turbina de álabes de cuerda constante utilizando GA en la optimización de los toolbox (caja de herramientas) de MATLAB®.

Se usó un conjunto de soluciones óptimas de Pareto obtenido de GA como entrada para el análisis FSI (fluid structure interaction). Para comprobar la fidelidad de BEM y el diseño optimizado, los resultados de orden inferior El modelo BEM para un diseño de hoja de cuerda constante se comparan con un modelo tridimensional detallado.

Autores de ref [40] realizaron una optimización hidroelástica de una hélice marina compuesta por una estela no uniforme utilizando CFD-FEM (dinámica de fluidos computacional – finite element method) para reducir la vibración y el estrés dinámico. El dominio CFD se acopla con el dominio estructural mediante un esquema Lagrangiano-Euleriano arbitrario y FEM para encontrar deflexiones y tensiones en los componentes de la turbina. Los resultados del análisis estructural se utilizan luego para modificar la turbina, en su geometría y espacio de diseño para la optimización hidroestructural, imponiendo límites a los parámetros operativos y tamaño además de mejorar la resistencia estructural de la pala de la turbina, una cuerda y la distribución de torsión se agrega a la pala de la turbina.

Una optimización multiobjetivo (hidro-estructural) se realizó para esta geometría de hoja torcida de cuerda variable para maximizar el rendimiento hidrodinámico y minimizar las tensiones estructurales en el álabe de la turbina. Velocidades de flujo más altas (>3,5 m/s) y la proximidad a la superficie del agua causaron cavitación en los álabes de la turbina. El análisis asume una velocidad de flujo de 2 m/s y que la turbina se sumergió lo suficiente en agua y lejos de la superficie del agua libre para proporcionar un entorno libre de cavitación para el funcionamiento de la turbina. El diseño de HKT presentado en este documento tiene tres palas hechas con forma de hidroala y conectado en el cubo de la turbina similar a una turbina eólica de eje horizontal típica.

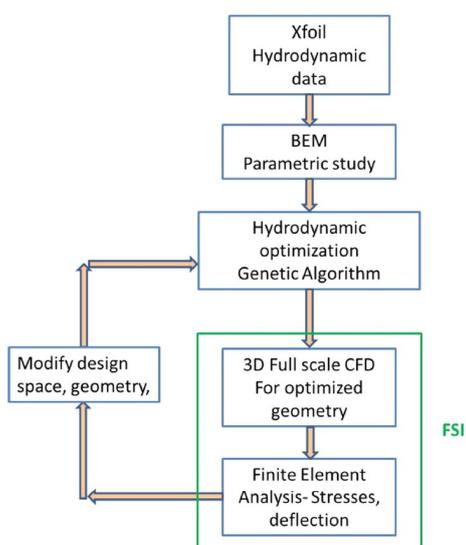


Figura 12a Optimización hidro-estructural y método de diseño para HKT [31]

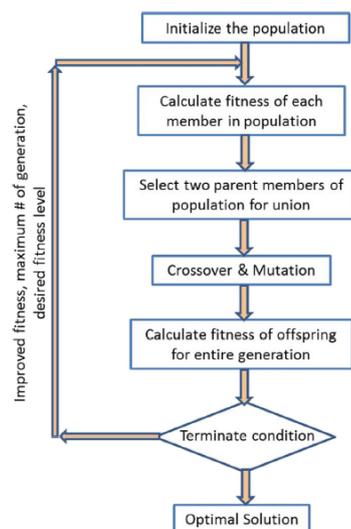


Figura 12b Optimización hidro-estructural y método de diseño para HKT [31]

Conociendo aspectos mencionados como densidad, número de Reynolds, etc., debe realizarse un análisis y validación de CFD para abordar el efecto del cambio del fluido de trabajo (viscosidad y

densidad) que afecta parámetros del flujo. El fluido de trabajo de mayor consistencia da como resultado una mayor densidad de potencia por unidad de área barrida que induce una mayor tensión en los álabes de la turbina. La investigación de este campo de estrés es uno de los principales objetivos del análisis de interacción fluido-estructural (figuras 12a y 12b).

### 5.1 Síntesis de conceptos importantes para optimizar la elección de álabes

Finalmente dado el objetivo del trabajo y como un aporte importante al diseño de la turbina y también a la elección de álabes mencionamos los siguientes aspectos:

- I. *El difusor tiene un gran efecto en la promoción del rendimiento hidráulico [33] (esto fue comprobado por otros autores de ref [18]) y corroborado por autores de ref [33] que ha verificado hasta un 3% de aumento en velocidad y también en aceleración incrementando la potencia del impulsor. Al mismo tiempo se verifica que el difusor mejora el campo de flujo.*
- II. *Los autores de ref [31] se enfocan en la optimización basado en Algoritmo Genético (GA), presentando un análisis para dos diseños diferentes: una cuerda constante, hoja de torsión cero, y una hoja torcida de cuerda variable. Utilizaron un enfoque híbrido que combina Momento del elemento de pala (BEM), GA, Dinámica de fluidos computacional (CFD), y técnicas de análisis de elementos finitos (FEA). Una síntesis de los resultados se exhibe a continuación:*
  - a. *Los valores más bajos de los ángulos de inclinación de las palas y las longitudes de las cuerdas maximizan el rendimiento hidrodinámico mientras que para la estabilidad estructural de la turbina, se requiere un ángulo de paso de pala de mayor valor y un TSR de menor valor.*
  - b. *Una optimización hidroestructural para una turbina de álabes de cuerda constante arrojó un  $C_p$  de 0,47 con esfuerzos de flexión por aleta de 210 MPa.*
  - c. *Para un diseño de hoja de cuerda constante, se observó un DP más alto en la sección de la hoja cerca de la punta en comparación con el resto del álabe, lo que conduce a una carga del álabe no uniforme y se considera perjudicial para la vida útil de la turbina. Esto también implica una mayor contribución de la parte cercana a la punta de la pala, hacia la carga de empuje y par.*
  - d. *Las geometrías de los álabes de turbina con cuerda variable y distribución de torsión a lo largo de la envergadura de los álabes dieron como resultado que toda la superficie de la pala contribuye uniformemente a la carga de empuje y torsión, mejorando así la hidroestructura y el rendimiento de la turbina.*
  - e. *La optimización hidroestructural con una turbina de palas alabeados de cuerda variable dio como resultado un  $C_p$  de 0,55 (una mejora del 17 % en comparación con un diseño de cordón constante) con tensiones de flexión en forma de aleta por debajo de 200 MPa.*

## 6. CONCLUSIONES.

Según el análisis final se observa que los parámetros (empuje y par totales) calculados a partir de BEM concuerdan bien con el análisis CFD. Las fuerzas de empuje totales obtenidas del análisis BEM fueron comparables al análisis FSI dentro del 7% de variación. Por lo tanto, el análisis BEM ofreció una herramienta rápida y confiable para la evaluación multiobjetivo de la optimización que habría sido virtualmente imposible con el análisis CFD debido a un mayor tiempo de computación involucrado. Aunque el análisis BEM pudo predecir el empuje y el par totales que carga una turbina, no pudo capturar la variación de estas fuerzas a lo largo de la envergadura de la pala debido a las simplificaciones inherentes de la teoría BEM. Por otro lado, el análisis CFD-FEM acoplado determinó con precisión esta distribución de fuerza a lo largo de la envergadura de la pala y también consideró el efecto del espesor de la raíz del álabe. Esto resultó en una mayor desviación (hasta un 30%) entre el estrés en comparación a las fuerzas calculadas a partir del análisis BEM y FSI.

Se analizó una turbina de aspas alabeadas de cuerda variable para mejorar el rendimiento estructural de la turbina sin comprometer ninguno de los aspectos de eficiencia hidrodinámicos. Se presentaron tres diseños de aspas diferentes para diferentes velocidades de rotación y se realizó la optimización para cuerda variable, diseño de pala alabeada para hidro-estructura lo cual mejora el rendimiento.

Los autores describen los hallazgos logrados, lo que resulta en una referencia para los desarrollos a realizar y ensayar en un túnel de viento.

Luego, nuestro aporte a través de la revisión efectuada, nos ha permitido exhibir fortalezas y debilidades del diseño de alabes para turbinas hidrocínicas, listar los aspectos esenciales de optimización para lograr un diseño razonable y aplicable, exponer con claridad los problemas de contaminación (afectan el perfil de la pala), turbulencia y dar los métodos de trabajo, así como la metodología experimental y mostrar diferentes tipos de turbinas lo que nos permite finalmente un proyecto óptimo de perfil alar para cada tipo de turbina y experimentar y/o simular su operación eficientemente. Finalmente podemos señalar que los métodos computacionales son eficientes pero

la teoría del impulso (BEM) muestra exactitud en el resultado y su aplicación es de gran utilidad ya que a través de un túnel de viento se puede evaluar un perfil alar escalado y la evolución en su diseño y/o cambios por contaminación.

## 7. REFERENCIAS.

- [1] Small Wind and Hydrokinetic Turbines Edited by Philip Clausen, Jonathan Whale and David Wood Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom The Institution of Engineering and Technology is registered as a Charity in England & Wales (no. 211014) and Scotland (no. SC038698). † The Institution of Engineering and Technology 2022 ISBN 978-1-83953-071-5 (Hardback) ISBN 978-1-83953-072-2 (PDF).
- [2] Wood D. Application of extended vortex theory for blade element analysis of horizontal-axis wind turbines. *Renewable Energy*. 2018;121:188–194.
- [3] Tony Burton, Nick Jenkins, Ervin Bossanyi, David Sharpe, Michael Graham. *Wind Energy Handbook Third Edition* This third edition first published 2021 © 2021 John Wiley & Sons Ltd.
- [4] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. *Wind Energy Handbook*. Wiley, Chichester; 2011.
- [5] Wood D. *Small Wind Turbines*. Springer, London; 2011.
- [6] Hansen MO. *Aerodynamics of Wind Turbines*. Routledge, Abingdon; 2015.
- [7] Williamson, C.H.K. and R. Govardhan, Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid mechanics*, 2004. 36(1): p. 413–455.
- [8] Sun, W., S. Jo, and J. Seok, Development of the optimal bluff body for wind energy harvesting using the synergetic effect of coupled vortex-induced vibration and galloping phenomena. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2019. 156: p. 435–445.
- [9] Vinod, A. and A. Banerjee, Surface protrusion based mechanisms of augmenting energy extraction from vibrating cylinders at Reynolds number  $3 \times 10^3 - 3 \times 10^4$ . *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 2014. 6(6): p. 063106.
- [10] Zdravkovich, M.M., Review and classification of various aerodynamic and hydrodynamic means for suppressing vortex shedding. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981. 7: p. 145–189.
- [11] Bernitsas, M.M., K. Raghavan, Y. Ben-Simon, and E.M.H. Garcia, VIVACE (vortex-induced vibration aquatic clean energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2008. 130(4).
- [12] Lee, J.H. and M.M. Bernitsas, High-damping, high-Reynolds VIV tests for energy harnessing using the VIVACE converter. *Ocean Engineering*, 2011. 38(16): p. 1697–1712
- [13] Raghavan, K. and M.M. Bernitsas, Experimental investigation of Reynolds number effect on vortex-induced vibration of rigid circular cylinder on elastic supports. *Ocean Engineering*, 2011. 38(5–6): p. 719–731.
- [14] Hamlehdar, M., A. Kasaeian, and M.R. Safaei, Energy harvesting from fluid flow using piezoelectrics: A critical review. *Renewable Energy*, 2019. 143: p. 1826–1838
- [15] Zdravkovich, M.M., Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular-cylinders. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1990. 33: p. 53–62.
- [16] Mesquita ALA, Mesquita ALA, Palheta FC, et al. A methodology for the transient behavior of horizontal axis hydrokinetic turbines. *Energy Conversion and Management*. 2014;87:1261–1268.
- [17] Vaz JR, Wood DH, Bhattacharjee D, et al. Drivetrain resistance and starting performance of a small wind turbine. *Renewable Energy*. 2018;117:509–519.
- [18] Evans S, Kesby J, Bradley J, et al. Commercialization of a diffuser augmented wind turbine for distributed generation. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1452:012014.
- [19] Fauzi Shahab, S.M. "Rural Power Supply Strategy," Townhall National Blue Ocean Strategy, Sarawak, 2017. [Online]. Available: [http://pmsarawak.treasury.gov.my/wp-content/uploads/Townhall NBOS/Rural Power Supply Strategy.pdf](http://pmsarawak.treasury.gov.my/wp-content/uploads/Townhall%20NBOS/Rural%20Power%20Supply%20Strategy.pdf) Accessed 7 February 2021.
- [20] Lazauskas, L and Kirke, B.K. Modeling passive variable pitch cross flow hydrokinetic turbines to maximize performance and smooth operation. *Renewable Energy* 45 (2012) 41–50
- [21] McAdam, R.A., Houlby, G.T., and Oldfield, M.L.G. Experimental measurements of the hydrodynamic performance and structural loading of the Transverse Horizontal Axis Water Turbine: Part 1, Part 2 y Part 3 *ELSEVIER Renewable Energy* 59 (2013) 105e114 - *Renewable Energy* 59 (2013) 141e149 - *Renewable Energy* 59 (2013) 82e91
- [22] Fu-wei Zhu, Lan Ding b, Bin Huang,\* , Ming Bao, Jin-Tao Liu "Blade design and optimization of a horizontal axis tidal turbine" *ELSEVIER Ocean Engineering* 195 (2020) 106652
- [23] Jun-Hua Chen, Xian-Cheng Wang, Hao Li,\* , Chu-Hua Jiang and Ling-Jie Bao "Design of the Blade under Low Flow Velocity for Horizontal Axis Tidal Current Turbine" *Journal of Marine Science and Engineering* 4 December 2020

- [24] R Hantoro, I K A P Utama, I S Arief, A Ismail and S W Manggala “Innovation in Vertical Axis Hydrokinetic Turbine – Straight Blade Cascaded (VAHT-SBC) design and testing for low current speed power generation” doi :10.1088/1742-6596/1022/1/012023 Journal of Physics: Conference Series IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1022 (2018) 012023
- [25] Marina Barbaric’ and Zvonimir Guzovic’ “Investigation of the Possibilities to Improve Hydrodynamic Performances of Micro-Hydrokinetic Turbines” Energies 2020, 13, 4560; doi:10.3390/en13174560
- [26] Zaid Hammoudi, Ikram El Abbassi, Rafik Absi,\*, A.-Moumen Darcherif “CFD based analysis of flow-driven vertical axis hydrokinetic turbines: blade hydrofoil and interactions effects” E3S Web of Conferences 170, 01016 (2020) EVF’2019 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017001016>
- [27] Abdullah Muratoglu , Ramazan Tekin, “Omer Faruk Ertugrul “Hydrodynamic optimization of high-performance blade sections for stall regulated hydrokinetic turbines using Differential Evolution Algorithm” <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108389> ELSEVIER Volumen 220, 15 enero 2021 , 108389
- [28] Han, W., Kim, J., Kim, B., 2018. Effects of contamination and erosion at the leading edge of blade tip airfoils on the annual energy production of wind turbines. Renew. Energy 115, 817–823. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.09.002>. Johnson, J., Pride, D., 2010. River, tidal, and ocean current hydrokinetic energy technologies: status and future opportunities in Alaska.
- [29] Niebuhr, C.M., van Dijk, M., Neary, V.S., Bhagwan, J.N., 2019. A review of hydrokinetic turbines and enhancement techniques for canal installations: technology, Applicability and potential. Renew. Sustain. Energy Rev. 113, 109240. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2019.06.047>.
- [30] Francisco Toja-Silva, Takaaki Kono, Carlos Peralta, Oscar Lopez-Garcia, Jia Chen “A review of computational fluid dynamics (CFD) simulations of the wind flow around buildings for urban wind energy exploitation” doi: 10.1016/j.jweia.2018.07.010 INDAER 3675 Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 14 July 2018
- [31] Kolekar, N., Banerjee, A., 2013. A coupled hydro-structural design optimization for hydrokinetic turbines. J. Renew. Sustain. Energy 5. <https://doi.org/10.1063/1.4826882>.
- [32] Esteban Ferrer • Adeline Montlaur Editors “Recent Advances in CFD for Wind and Tidal Offshore Turbines” Springer - Universidad Politécnica de Madrid ISBN 978-3-030-11887-7 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11887-7>
- [33] H Chen , D Zhou “Hydrodynamic numerical simulation of diffuser for horizontal axis marine current turbine based on CFD” 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems (IAHR 2014) IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 22 (2014) 062001 doi:10.1088/1755-1315/22/6/062001
- [34] Jang-Oh MO and Young-Ho LEE “CFD Investigation on the aerodynamic characteristics of a small-sized wind turbine of NREL PHASE VI operating with a stall-regulated method” Springer Journal of Mechanical Science and Technology 26 (1) (2012) 81~92 [www.springerlink.com/content/1738-494x](http://www.springerlink.com/content/1738-494x) DOI 10.1007/s12206-011-1014-7
- [35] Karim Ghaib Zwingenberg, Germany “Introduction to Computational Fluid Dynamics” Springer ISBN 978-3-658-37619-2 (eBook) <https://doi.org/10.1007/978-3-658-37619-2> 2023
- [36] Jai N. Goundar, M. Rafiuddin Ahmed, Young-Ho Lee “Numerical and Experimental Studies on Hydrofoils for Marine Current Turbines” ELSEVIER Renewable Energy 42 (2012) 173 - 179
- [37] Ahmed, M.R., 2012. Blade sections for wind turbine and tidal current turbine applications-current status and future challenges. Int. J. Energy Res. 36, 829–844. <https://doi.org/10.1002/er.2912>.
- [38] <https://www1.grc.nasa.gov/beginners-guide-to-aeronautics/aerodynamic-forces/>
- [39] Ricardo A. Bastianon “Cálculo y diseño de la hélice óptima para turbinas eólicas” <http://Ricardo.Bastianon.googlepages.com/> 2008
- [40] X. D. He, Y. Hong, and R. G. Wang, “Hydroelastic optimisation of a composite marine propeller in a non-uniform wake,” Ocean Eng. 39, 14–23 (2012).

# Revisión: Medición de recursos eólicos e hídricos y dispositivos de conversión mecánico eléctrico

Dr. Ing. di Prátula H.R.<sup>1</sup> — Eduardo Guillermo<sup>1</sup> Marcelo Antón<sup>1</sup> Carlos Pistonesi<sup>1</sup>  
1 Investigadores del GESE UTN FRBB

hrdiprat@frbb.utn.edu.ar

## RESUMEN.

El presente trabajo tiene como objetivo enfocar la atención del lector sobre dos aspectos importantes en los proyectos de energía eólica o hidrocínética:

1. la medición de recursos eólicos e hídricos y
2. el generador (convertor mecánico eléctrico).

Ambos son determinantes; el primero, como paso previo para la ubicación, elección del dispositivo y proyecto de obra y el segundo, porque la conversión define aspectos esenciales del intercambio de energía entre turbina y red eléctrica [1].

Medir el recurso en cualquier sistema de energía renovable es de trascendental importancia, ya que los resultados de la medición y posterior análisis determinan la zona de instalación, el tipo de turbina, la forma de operación, etc.

La correcta determinación del recurso, que es objeto de revisión en este trabajo es fundamental ya que tanto en el caso de energía eólica como en hidrocínética se puede observar la significativa influencia en la determinación de la potencia de generación [2]

$$(P = k \eta C_p \rho A V^3) \quad (1)$$

Dónde  $k = (1/2)$  -  $\eta$  = rendimiento general -  $C_p$  = potencia adimensional convertida por el rotor -  $\rho$  = densidad del fluido -  $A$  = área barrida por los álabes y  $V$  = velocidad del viento

En la ec. (1) vemos que la influencia de la medición define ubicación ( $\rho$ ,  $V$ ), duración, tipo de turbina ( $\eta$ ,  $C_p$ ,  $A$ ), rendimiento y costos de inversión inicial, así como las técnicas y tecnología de los equipos de medición también quedan relacionados a la precisión requerida.

El objetivo es lograr resultados óptimos aún en zonas de difícil medición (complejas). Por ejemplo, en zona Urbana (energía eólica) [3] [ y en ríos tumultuosos [9] o en el mar (hidrocínética) [14].

Transformar la energía eólica e hidrocínética en eléctrica es un desafío para la Ingeniería eléctrica y los dispositivos adecuados son los generadores que deben adaptarse al sistema mecánico impulsor y a la red eléctrica obrando como convertidores mecánico-eléctrico. Su aporte y contribución al diseño de la turbina no debe pasar desapercibida ya que la adaptación entre sistema impulsor y red eléctrica se debe a la máquina eléctrica generadora y su conexión y tecnología acompaña al dispositivo captador.

**Palabras Claves:** veleta – anemómetro – correntógrafo – generador – ondulator – engranaje – generador eléctrico

**Área Temática:** Energías renovables: fuentes de energía

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

La primera fase de cualquier proyecto eólico e hidrocínético comprende el análisis de prefactibilidad y prospección, esto implica visitar el sitio de aquellas regiones que satisfacen los requisitos de prefactibilidad para recopilar datos adicionales sobre el terreno, vegetación, propiedad de la tierra y otros factores. El resultado de la prospección es la preselección de áreas con mayor potencial y ubicaciones para la medición del viento o de la velocidad del agua si ese fuera el emprendimiento. La evaluación del recurso (segunda fase) que en nuestro caso es el combustible con que se producirá la fuerza mecánica que será convertida en energía eléctrica, es fundamental.

La Evaluación del recurso eólico (WRA Wind resource assessment) preliminar se inicia en la fase anterior. Luego, WRA es la cuantificación de los recursos eólicos para calcular parámetros como la velocidad media del viento, la densidad media de la energía eólica y la producción de energía anual promedio (AEP) de una planta de energía eólica propuesta. La mayoría de las actividades de esta fase incluyen la medición del viento (del agua en el caso de hidrocínética) y la estimación de AEP basada en modelos de flujo de viento (la evaluación del recurso para las HKT (hydrokinetic turbine) en el mar, río o canal es de mayor complejidad).

Actualmente se está avanzando en un WRA (estándar específico internacional). El alcance de la norma IEC61400-15 es definir un marco para evaluación e informes del recurso eólico, el rendimiento energético y la idoneidad del sitio, condiciones de entrada para plantas de energía eólica terrestres y marinas. Es probable que el estándar se dividirá en dos partes con IEC61400-15-1 cubriendo el Paso 1 (figura 1): Cinco pasos del proceso WRA e IEC61400-15-2 que cubren los pasos 2 a 5 en la figura 1, incluidos los cálculos de incertidumbre [4].



Figura 1 Etapas del proceso WRA para energía eólica

El desarrollador comienza con un mapa de recursos eólicos, este mapa se denomina “Sistema de información Geográfico (SIG)” (en nuestro País: mapa eólico Nacional).

Estos mapas deben usarse como una herramienta para identificar regiones con buen recurso eólico, y no por la viabilidad seria de un proyecto eólico. Generalmente, los mapas o servicios pagados a menudo pueden proporcionar una resolución más alta y más flexibilidad con zoom, orientación y características adicionales (aspectos mencionados como primera fase). Sin embargo, no podemos dejar de mencionar la complejidad de realizar mediciones en zona Urbana por la presencia de obstáculos y vientos en diferentes direcciones incluidos verticales.

En el caso de un sistema hidrocínético, los HKT aprovechan la energía cinética de ríos, estructuras de agua artificial, mareas y corrientes oceánicas. Luego, los HKT se pueden instalar en diversas ubicaciones y sistemas de curso de agua. Los parámetros básicos para el despliegue de HKT son la velocidad local y el ancho y profundidad del canal de circulación. Los dos últimos determinan la posición de máxima velocidad que maximiza la potencia y también dará lugar a posibles efectos de bloqueo de la circulación, si el flujo no es grande en comparación con el área de barrido de las palas. Vemos entonces que la determinación del recurso, presenta diferencias importantes entre el eólico e hidrocínético [4].

Respecto de los convertidores mecánico-eléctricos (generadores) podemos decir que en la actualidad la tendencia se define alrededor de dos sistemas: DFIG (máquina de inducción doble bobinado) y PSMG (máquina sincrónica de imanes permanentes) siendo una representación común la figura 2 que nos muestra dos configuraciones [4]

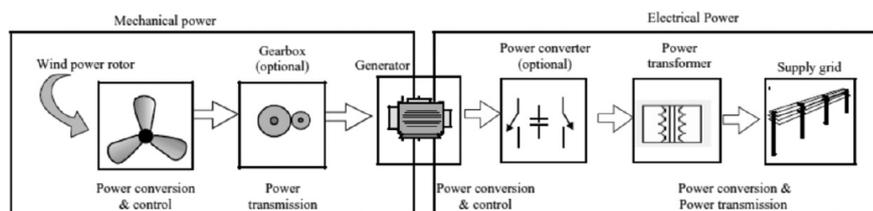


Figura 2a Esta figura nos muestra una opción (con gearbox) siendo justamente el generador quien define el tipo de conexión mecánica: a través de caja de engranaje

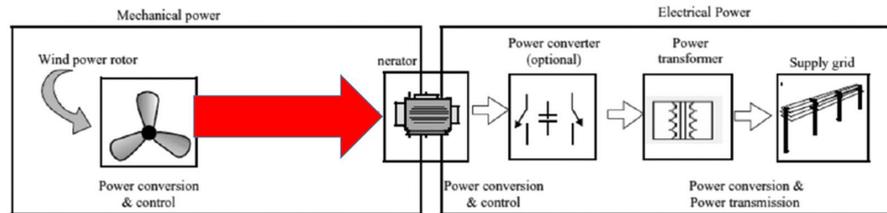


Figura 2b Esta figura nos muestra una opción (sin gearbox) siendo justamente el generador quien define el tipo de conexión mecánica: directo

Ambas configuraciones presentan características muy diferentes, el primero (con caja de engranajes) habitualmente tiene un generador DFIG con una góndola y una máquina eléctrica de menor tamaño (a mayor velocidad menor tamaño) y conexión a red eléctrica directa (fig 2a). En tanto la segunda configuración (sin caja de engranaje) habitualmente usa un generador PSMG, con góndola y máquina eléctrica de gran porte y conexión a la red eléctrica mediante full-converter back to back (fig 2b).

## 2.Aspectos esenciales de la medición de Recursos

### 2.1 Medición de recursos eólicos

Para el proyecto eólico general, con el fin de evitar sesgos estacionales, la medición del viento en el sitio se efectúa durante un año o más en el área del proyecto. Hay dos tipos de Mediciones de viento in situ: **in situ** y **teledetección**. Las mediciones in situ son realizado con torres meteorológicas. La teledetección tiene dos opciones de medición: detección y alcance sónicos, que se basa en ondas de sonido y detección de luz y rango (sodar y lidar).

Ambos tipos de medición proporcionan velocidad del viento, dirección del viento, temperatura, presión barométrica, y algunas otras condiciones atmosféricas. Generalmente, la teledetección no se utiliza para proyectos SWT (small wind turbine) [4], ya que en estos casos los sistemas de medición son de baja altura y con turbulencia (generalmente medición en sitio complejo).

Se utilizan tres tipos de anemómetros (Figura 3) para la medición de velocidad del viento horizontal. De estos, el anemómetro de copa es el más común debido a su bajo costo y precisión relativamente buena. En entornos particulares, sin embargo, se usan tanto anemómetros de hélice como sónicos (especialmente en sistemas SWT (small WT) pueden utilizarse).

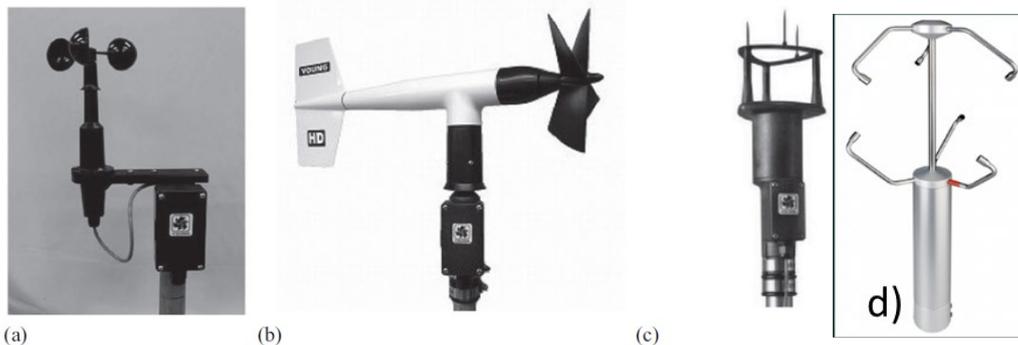


Figura 3 anemómetros – a) de copa b) de hélice con veleta c) sónico Climac Inc [4] d) ultrasonic anemometer 3D Adolf Thies GmbH & Co KG [17]

No se incluye una descripción de los dispositivos considerando que los mismos son de amplio conocimiento. Sin embargo, se describirá el sónico ya que el mismo es de concepción moderna.

Este instrumento, que no tiene partes móviles, mide la velocidad del viento usando el ultrasonido transmitido entre puntos fijos utilizando pares de transductores. Algunos anemómetros sónicos miden el viento en dos dimensiones [4], mientras que otros miden en tres [17]. Como no tienen inercia rotacional, los anemómetros son más sensibles a los cambios rápidos de la velocidad del viento y la dirección del viento que los anemómetros de copa o de hélice. Los ultrasónicos son particularmente útiles en medir flujos 3D, donde pueden muestrear datos a altas velocidades para capturar el comportamiento de la turbulencia. Sin embargo, son más caros que otros tipos de anemómetros y consumen más energía. Para completar las mediciones se debe medir temperatura, presión y humedad.

#### 2.1.1 Extrapolación espacial de datos medidos

En el caso de un aerogenerador solo se requiere un equipo de medición en la misma ubicación de la turbina. Si no es posible, el resultado de las mediciones debe extrapolarse a la ubicación prevista del aerogenerador. Por lo general, para la extrapolación espacial se utilizan modelos informáticos,

que son preparados con datos de velocidad del viento medidos en el sitio. Para terreno ligeramente cambiante, la estabilidad térmica y el terreno, en el que la aspereza alrededor de los sitios medidos es similar a la rugosidad alrededor de los sitios de la turbina, se utilizan modelos de flujo de viento lineal para la extrapolación espacial y el cálculo de AEP. Si las suposiciones para los modelos lineales de flujo de viento no son válidas, se puede usar el modelado mediante CFD (dinámica de fluidos computacional).

Los modelos de flujo lineal se basan las ecuaciones de linealización de Navier-Stokes, que fue introducido originalmente por Jackson-Hunt. Este método se utiliza de forma fiable en condiciones atmosféricas neutras sobre terreno con pendientes suaves adecuadas para garantizar condiciones de flujo totalmente adheridas [9].

Entre los modelos de flujo lineal, se ha usado el Programa de Análisis y Aplicación del Atlas Eólico (WAsP), un modelo de Jackson-Hunt desarrollado por el Laboratorio Nacional de Risø de Dinamarca,

El “método WAsP” se desarrolla en dos etapas. Primero, el viento observado en un anemómetro en una torre meteorológica se usa para derivar el campo de viento de fondo, que representa el recurso eólico independiente del sitio que existe en ausencia de terreno. En segundo lugar, el proceso se invierte posteriormente, utilizando el viento de fondo como entrada para predecir el perfil del viento en otros lugares. Además, para implementar el enfoque básico de Jackson-Hunt, WAsP tiene varios módulos que abordan varias necesidades en el modelado de flujo de viento, incluida la capacidad de incorporar los efectos de cambios en la rugosidad de la superficie y obstáculos.

La diferencia significativa entre los modelos de flujo lineal y CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) es que los modelos resuelven una forma más completa de las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, los modelos CFD requieren considerablemente más recursos computacionales que los modelos de flujo lineal.

En comparación con los modelos de flujo lineal, los modelos CFD pueden predecir el desprendimiento del flujo y reinserciones en la zona de separación en la mayoría de los casos. Para obtener resultados razonablemente precisos en esta región, de grandes remolinos, deberían usarse modelos de turbulencia de tipo simulación, que son mucho más costosos desde el punto de vista computacional. Los Modelos CFD típicos para aplicaciones de simulación de flujo atmosférico y seguir el enfoque de dirección de viento único que representa un sector de la Rosa de los vientos discretizada. Simulaciones de flujo para cada sector, considerando los efectos de la orografía y aspereza, resultan en factores de aceleración (IEC TR 61400-12-4) [9].

### **2.1.2 Extrapolación temporal de los datos medidos**

Debido a la variabilidad interanual de la velocidad del viento, diversos estudios han indicado que los datos de viento medidos durante unos pocos años son insuficientes para reflejar el promedio en las condiciones presentes durante la vida útil de un proyecto eólico (típicamente 20 años) [9].

El proceso conocido como medida-correlación-predicción (MCP) se utiliza normalmente para relacionar y ajustar las mediciones in situ con una referencia a largo plazo. El MCP tiene los siguientes pasos [17]:

1. Se efectúa la medición de la velocidad del viento en el sitio durante un año o más y una referencia a datos de largo plazo de 20 o más años. Se recomienda obtener tantos conjuntos de datos como sea posible a largo plazo.
2. Correlacionar los datos de medición del sitio con conjuntos de datos de referencia a largo plazo para un periodo de tiempo. Si la correlación es aceptable, estos conjuntos de datos de referencia se seleccionan para el siguiente paso.
3. Con base en los factores de correlación derivados del paso 2, se estima la velocidad del viento en la ubicación de medición en el sitio para el período histórico, que cubre la duración de la serie temporal de referencia. Este es el paso retrospectivo.
4. Convertir el pronóstico retrospectivo en un pronóstico, si es necesario, o usar el pronóstico retrospectivo para el Cálculos de AEP.

En la mayoría de las aplicaciones prácticas, los pasos de correlación y predicción se llevan a cabo iterativamente con varias fuentes de conjuntos de datos de referencia a largo plazo. Aunque en la mayoría de los casos, es muy difícil obtener mediciones confiables. En tal caso, una alternativa factible son los datos de re-análisis, o sea, datos de NCEP/NCAR de NCEP (National Center para la Predicción Ambiental) y NCAR (Centro Nacional de Predicción Atmosférica Investigación). Estos institutos llevan a cabo continuamente un nuevo análisis global de datos del tiempo.

### **2.1.3 WRA sobre el techo de un edificio**

Las condiciones del viento sobre el techo de un edificio pueden cambiar drásticamente tanto horizontal como verticalmente en una distancia corta debido a la presencia de un flujo de aire separado de los bordes del techo [9,18]. Además, las condiciones del viento sobre el techo de un edificio se ven significativamente afectadas por la forma del techo, la forma horizontal del edificio, los edificios circundantes y otros factores. Por lo tanto, para estimar la AEP de un SWT en el techo de un edificio con un nivel razonable de precisión, es necesario llevar a cabo una medición del viento

en el sitio mediante la colocación de un anemómetro en o cerca de la posición candidata del rotor SWT. En cuanto a las buenas prácticas en la realización de campañas de monitoreo de viento en azoteas, estimaciones conservadoras de turbulencia en el entorno complejo de la azotea de un almacén en un parque industrial podría lograrse utilizando una tasa de muestreo de 10 Hz y un promedio período de 10 min [10].

Aunque todavía no es común realizar simulaciones CFD con el fin de estimar el AEP de un SWT en la azotea, las simulaciones CFD se han utilizado en muchos estudios sobre las condiciones del viento sobre el techo de un edificio. El conocimiento de las características en las condiciones del viento sobre el techo de un edificio de forma simple puede ser útil para seleccionar las posiciones de los rotores SWT.

### 2.1.4 Componente vertical de la velocidad del viento

Tabrizi et al. [10] reportó alta fluctuación de la velocidad del viento en dirección vertical. Sin embargo, la mayor parte del tiempo de la campaña de medición de cuatro meses y medio, la velocidad del viento longitudinal fue menos de  $5,0 \text{ ms}^{-1}$  y la velocidad del viento vertical menos de  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  tanto en el positivo y direcciones negativas, como se muestra en los histogramas de la figura "a" y "b" insertada en la figura 2.

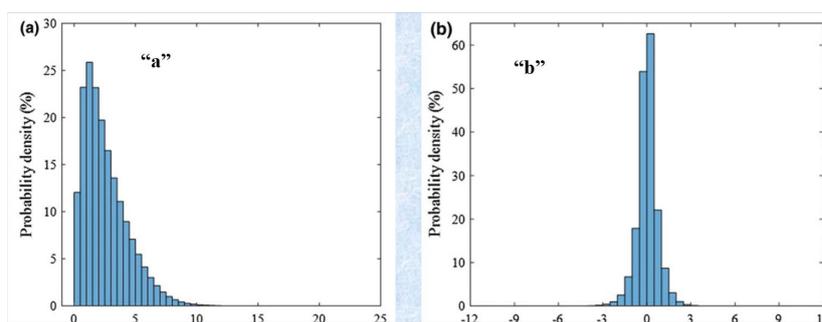


Figura 2 histogramas [11]

Alrededor del 25% del tiempo la velocidad del viento en dirección longitudinal fue mayor que la velocidad de arranque de la turbina  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  y la velocidad media del viento longitudinal fue de  $2,5 \text{ ms}^{-1}$  (fig "a"). Durante la campaña de medición, se encontró que menos del 1 % de la velocidad del viento en dirección vertical era superior a  $3,5 \text{ ms}^{-1}$  en dirección positiva o negativa (Fig "b").

En muchos casos, se encontró que el valor de la velocidad vertical del viento se alcanzó  $12 \text{ ms}^{-1}$  en ambas dirección positiva y negativa. Sin embargo, los datos de viento adquiridos contienen (menos de 1%) velocidad del viento vertical significativamente alta ( $8\text{--}12 \text{ ms}^{-1}$ ) y debe considerarse como causó una gran fluctuación de la velocidad del viento o ráfagas en la dirección vertical, lo que estándar no se ha tenido en cuenta en su totalidad [11].

La desviación estándar de la velocidad del viento vertical se graficó frente a los 10 min velocidad vertical promedio del viento como se muestra en la Figura muestra una serie de eventos extremos

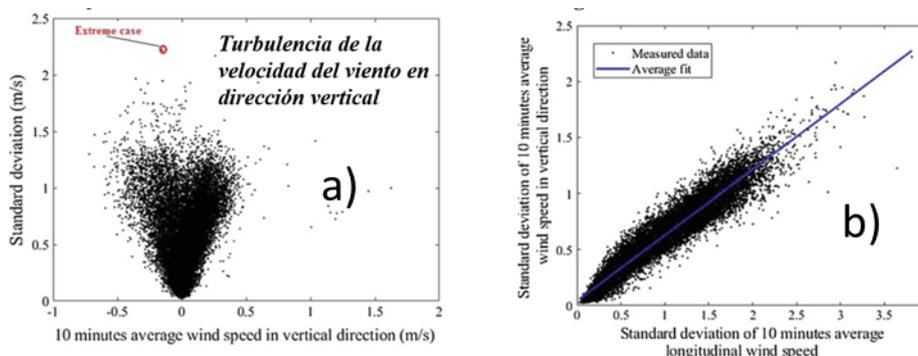


Figura 3 Relación entre la desviación estándar de la velocidad del viento vertical promedio de 10 min y velocidad del viento longitudinal [11]

con una gran desviación estándar ( $\sigma > 2 \text{ ms}^{-1}$ ) que puede haber llevado a una alta fluctuación de la velocidad del viento en la dirección vertical, también implica que este aerogenerador ubicado en un entorno urbano construido en ese sitio, es altamente turbulento. En la norma IEC, las densidades espectrales de potencia que describen la velocidad del viento en sus componentes (ejes x, y, z) se mencionan como parámetros espectrales de turbulencia para el modelo espectral de Kaimal<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Se define el término turbulencia como la agitación mecánica del aire causada por la rugosidad superficial. Luego, se aprecia en la capa atmosférica más cercana a la superficie terrestre (capa límite atmosférica). Von Karman (1956) define la turbulencia como fluctuaciones irregulares de la velocidad del viento, gobernadas por un equilibrio estadístico

La desviación estándar de la velocidad del viento en la vertical se define como  $0.5\sigma_1$  en el estándar IEC (Tabla 1).

Tabla 1 : Parámetros espectrales de turbulencia para modelo de Kaimal			
Índice de componente de velocidad (k)			
	1	2	3
Desviación estándar $\sigma_k$	$\sigma_1$	$0,8 \sigma_1$	$0,5 \sigma_1$

Sin embargo, la figura b) muestra la desviación estándar en la dirección vertical de la velocidad del viento medida en el sitio de Callaghan sea  $0.6\sigma_1$  (pendiente de la línea presentada en la Fig. mencionada que muestra que el IEC estándar subestimó la turbulencia del viento en la dirección vertical. Los aerogeneradores son máquinas críticas a la fatiga y son similares en este aspecto a otras máquinas rotativas. Investigar la alta velocidad del viento en dirección vertical podría producir implicaciones importantes para un diseño seguro de aerogeneradores.

Los efectos tanto el rendimiento aerodinámico y estructural de un aerogenerador son desconocidos y necesitan explorarse en detalle. *No obstante, el modelo de perfil de viento normal utilizado en la IEC estándar no le da la importancia adecuada a la velocidad del viento en dirección vertical, y deben incluirse ya que se espera un número creciente de aerogeneradores pequeños para ser instalados en el entorno construido (generación distribuida).*

La evaluación del viento se llevó a cabo utilizando tres anemómetros ultrasónicos instalados a 15 m sobre el suelo y 3 m por debajo de la altura del buje de un aerogenerador de eje horizontal de 5 kW [11]



Figura 4 Descripción general de la turbina Aerogenesis de 5 kW [11]

## 2.2 Medición de recursos hídricos

Como se expresó en la Introducción, las características generales del recurso HKT también dependen de la forma del canal del río, y esta forma depende de la cantidad de agua que haya estado fluyendo en él durante cuánto tiempo. Hay dos aspectos importantes de las características de flujo: (1) la "descarga" o caudal volumétrico de agua, (Q) en (m<sup>3</sup>/s), que suele ser el único dato disponible para muchos ríos. Q es aproximadamente constante a lo largo del año para algunos ríos y sus afluentes, pero otros los ríos muestran una fuerte variación estacional en Q; (2) la velocidad (V) en (m/s). En la práctica, V generalmente se promedia durante un período de tiempo, T, que denotamos como  $\bar{V}_T$  (valor promedio) si se conoce T, y a menudo sobre la sección transversal del río. La relación entre Q y  $\bar{V}_T$  y el valor promedio de  $\bar{V}_T$  viene a través de la sección transversal aérea, A, del río que se modifica claramente a lo largo del río y puede variar diariamente o estacionalmente. La velocidad promedio en cualquier sección transversal es simplemente:

$$\bar{V}_T = \frac{Q_T}{A} \quad (1)$$

El flujo de agua en un río o canal es un flujo de canal abierto donde la superficie libre está sujeta a la presión atmosférica. Los efectos de superficie libre están asociados con el número de Froude, Fr, que es la relación entre las fuerzas inercial y gravitatoria y definido por:

$$Fr = \frac{\langle \bar{V} \rangle}{\sqrt{gd}} \quad (2)$$

donde  $g$  es la gravedad y  $d$  es la profundidad del río.  $Fr$  se utiliza para caracterizar el flujo como  $Fr$  crítico = 1,  $Fr$  subcrítico  $< 1$  y  $Fr$  supercrítico  $> 1$ . Para la instalación de HKT, es usual evitar  $Fr$  sea mayor o igual a 1 ya que las ondas de gravedad pueden producirse por un cambio en la profundidad de flujo que aumentará la carga estructural e hidrodinámica en los HKT.

También, la velocidad en una sección transversal existente en un instante de tiempo dado varía debido al aumento de la presión con la profundidad, el esfuerzo cortante, particularmente en el fondo y los lados del río o canal, y la condición de contorno antideslizante en los mismos lugares. A la variación genérica se ilustra en la Figura 5 y las medidas detalladas de la ref.[13]

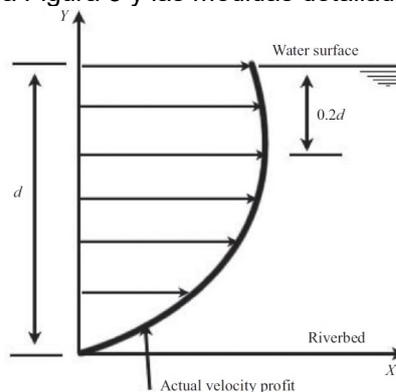


Figura 5 Perfil de velocidad del agua [13]

La velocidad media tiene tres componentes, es decir,  $V_x$ ,  $V_y$  y  $V_z$ , donde  $x$  e  $y$  se muestran en la Figura 5, y  $z$  es normal a la hoja. Las velocidades de las corrientes transversales,  $V_y$  y  $V_z$ , suelen ser pequeñas y se pueden despreciar dejando la velocidad en la dirección del flujo,  $V_x$ , como la importante para evaluación de recursos. El despliegue de HKT generalmente requiere encontrar la ubicación de la velocidad máxima. Observando la Figura 5, generalmente este punto está ubicado a  $0.2d$  de la superficie libre.

Maximizar la producción de energía de un HKT requiere colocarlo en la ubicación de máximo  $V$ . Sin embargo,  $V=0$  en los límites sólidos y por lo general alcanza un máximo a lo largo de la sección transversal de un plano medio. Para HKT cuya área de barrido es mucho menor que el ancho o la profundidad de la sección transversal del río, se debe conocer la variación espacial de  $\bar{V}_T$  para encontrar la PD (densidad de potencia) máxima posible (figura 6). Como ejemplo (figura 6), se incluyen medidas en ocho ubicaciones espaciadas en una sección transversal típica. Las mediciones de  $V$  se tomaron en  $0.2d$ , donde  $d$  se mide desde la parte superior del agua el nivel de la superficie hasta el lecho del río, y los círculos sólidos indican la posición de medición. Se tomó otra medición a  $0.8d$  a través de la sección del plano medio (círculo abierto) para mostrar la variación de  $V$  en la dirección vertical [13].

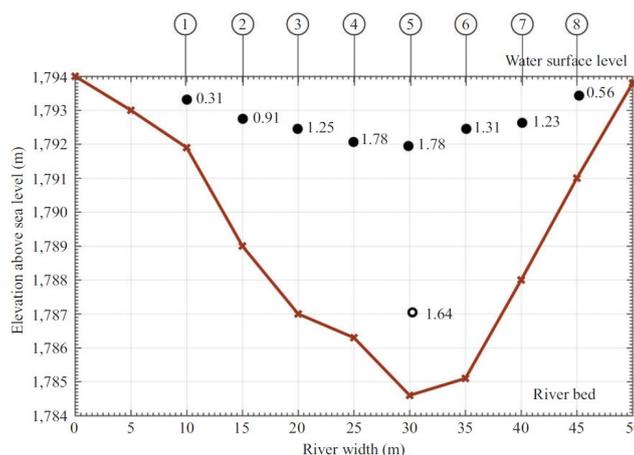


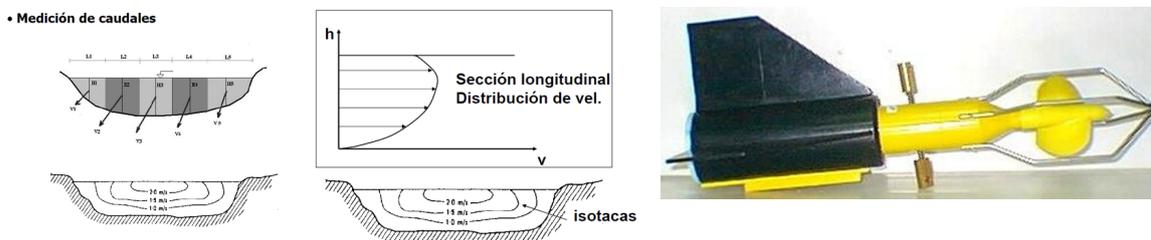
Figura 6 Variación del área de la sección transversal de la velocidad del agua (en m/s)

Claramente, la figura demuestra una variación significativa en PD en la sección transversal área cómo cambia esa variación con el tiempo y cómo afecta el rendimiento de HKT cuando el área de barrido es comparable al área de la sección transversal del río son cuestiones que sólo han comenzado a ser abordados.

Finalmente, sintetizando vemos que el rendimiento de un HKT en un sitio en particular depende de su curva de potencia no lineal en combinación con el PDF (función de distribución de probabilidad) de la velocidad del agua. Dado que sólo es el caso más simple de una sola turbina que es pequeña en comparación con la dimensión típica de la sección transversal del río. En otras palabras, no se consideró grandes y/o múltiples turbinas que podrían interactuar entre sí. Incluso en el caso más

simple, hay dos principales obstáculos para la predicción precisa de la potencia de salida: la incierta y no estándar metodología de determinación de la curva de potencia y la escasez de datos sobre la distribución de probabilidad de la velocidad del agua. Los dos obstáculos interactúan cuando el tiempo utilizado para promediar la velocidad del agua es grande en comparación con el tiempo utilizado para agrupar los datos de la curva de potencia. Es evidente que el tema está aún en investigación y los avances se efectúan tanto teóricamente como experimentalmente. También es evidente que en lugares de aguas abiertas tendremos una buena variedad de valores al medir por lo que el proceso experimental debe aplicarse a cada cauce de fluido.

### 2.2.1 Procedimientos y Dispositivos de Medición de recursos hídricos



**Medición directa:** aforos con molinetes, método volumétrico y varios.  
 Figura 7 Procedimientos de medición de caudales y correntógrafo [19]<sup>2</sup>

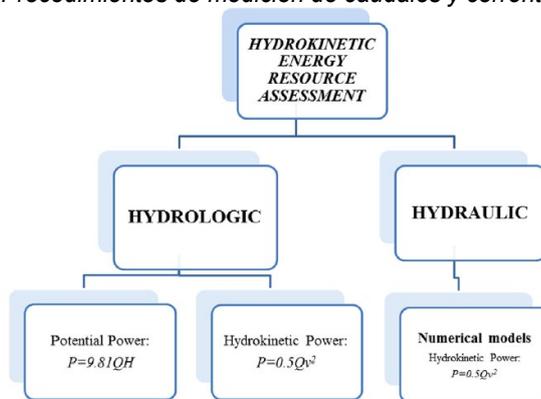


Figura 8 [15] Principales métodos para la evaluación del recurso energético hidrocinético fluvial<sup>3</sup>.

Los enfoques directos se definen como evaluaciones del potencial de HK utilizando velocidades del fluido, mientras que, el método hidrológico es simple y robusto, pero es problemático integrar este método a lo largo del tiempo, para toda la longitud de un río y determinar la potencia HK en función de la velocidad en secciones discretas. Considerando que los aspectos esenciales de la fase inicial propuesto como objetivo del trabajo, abordamos los dispositivos generadores.

### 2.3 Dispositivos de conversión mecánico eléctrico (tipos de generadores)

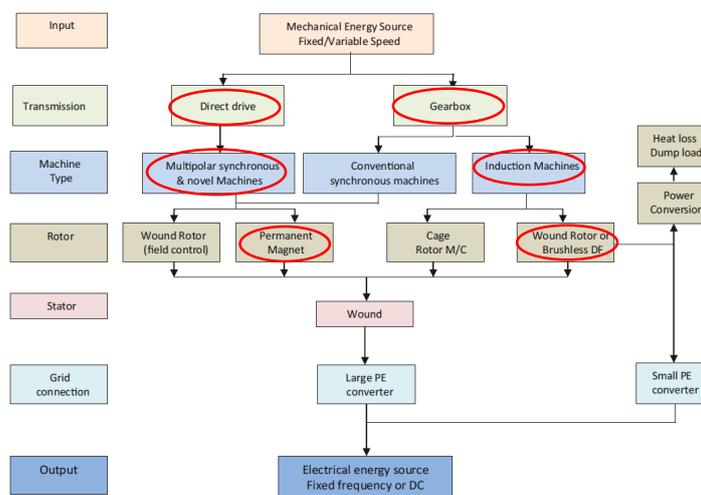


Figura 10 Tipos de generadores eólicos

<sup>2</sup> (molinete) dispositivo autónomo mide sumergido. Mide caudal y velocidad del fluido

<sup>3</sup> P es la potencia teórica, kW; Q es el caudal, m<sup>3</sup>/s; H es la cabeza hidráulica (m) o la pendiente de la superficie del agua (m/m); y v es la velocidad actual, m/s.

La figura 10 exhibe todos los generadores y resalta los de mayor uso en la actualidad: DFIG (máquina de inducción con rotor bobinado con gearbox) y generador síncrono multipolo imanes permanentes conexión directa. En tanto los hidrocinéticos usan generadores multipolo con imanes permanentes, aunque se adiciona una caja de engranajes para reducir el tamaño. La fig 11 muestra el caso de un sistema propio de generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía cinética del agua sería:

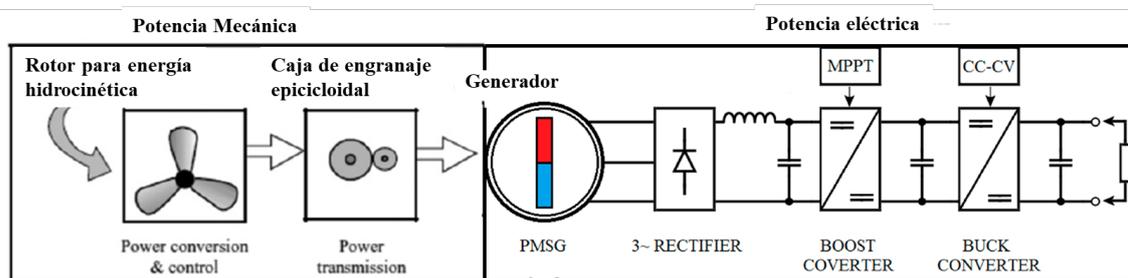


Figura 11 Desarrollo del equipo de investigadores del GESE FRBB UTN de una turbina hidrocinética con generador de imanes permanentes, caja de engranaje epicicloide y sistema de conexión a red eléctrica.

En el océano, la densidad de potencia  $P_u$  y la potencia disponible  $P$  o flujo de energía hidrocinética a través de un área de sección transversal "A" dentro de la corriente puede estimarse usando las siguientes ecuaciones de ref [14] (puede observarse una similitud con las ecuaciones para determinar la densidad de potencia en un sistema eólico):

$$P = \iint_A P_u dA$$

$$P_u(y,z,t) \cong \frac{1}{2} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) \Rightarrow \quad (2)$$

Siendo  $\rho$  la densidad,  $U$  es la velocidad,  $n$  es el versor unitario normal al área,  $A$  es el área a través del cual fluye el fluido, donde podemos despreciar las corrientes transversales:

$$P_u(y,z,1) \cong \frac{1}{2} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n})^3 \quad (3)$$

Lógicamente debemos incorporar el rendimiento ( $< 1$ ) en el proceso de extracción de datos.

$$P_E = \eta P \quad (4)$$

De este modo, en océanos abiertos, el valor máximo del  $\eta$  se estima típicamente utilizando el modelo ideal incompresible, estable y sin fricción de flujo debido a Betz donde el rotor de la turbina está representado por un disco actuador de área  $A_D$ . Si consideramos la velocidad axial aguas arriba, en el rotor y aguas abajo del rotor para ser  $U_1$ ,  $U_D$  y  $U_2 = \alpha U_1$  ( $\alpha < 1$ ) respectivamente, siendo cada uno uniforme a través de la sección apropiada dentro del tubo de corriente.

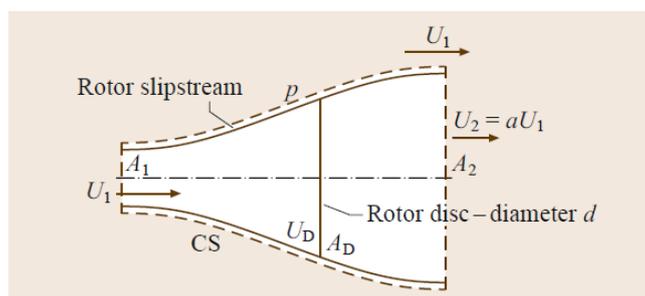


Figura 12 Esquema del modelo de disco actuador [14]

La conservación de masa requiere [14]:

$$\iint_{CS} \rho (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dA = 0 \quad (5)$$

para el fluido encerrado por la superficie de control CS, mostrado por la línea discontinua en la Fig.12 vemos que el vector normal  $\mathbf{n}$  apunta fuera del volumen encerrado por CS. Como  $\{(\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) = 0\}$  a lo largo de las secciones curvas de CS, tenemos la ec (6) (ref[14]):

$$U_1 A_1 = U_2 A_2 = U_D A_D \quad (6)$$

Dónde  $A_1$  y  $A_2$  son las áreas aguas arriba y aguas debajo de la sección CS. Así que aplicando la ecuación de energía al volumen de control entre las secciones 1 y 2 tendremos:

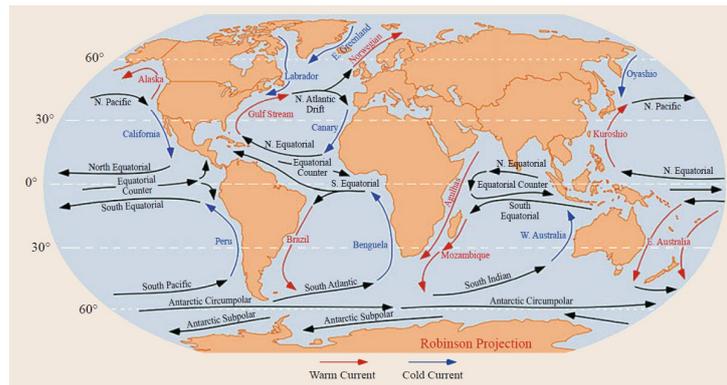


Figura 12 *Giros subtropicales y corrientes oceánicas medias*

$$-W = \iint_{CS} \left( \frac{1}{2} \rho U^2 + p + \rho gz \right) (\mathbf{U} \cdot \mathbf{n}) dA \quad (7)$$

Siendo  $W = P_E$  la potencia extraída o el trabajo realizado por el fluido en el sistema encerrado por CS y  $p$  es la presión. Si continuamos desarrollando a partir de la figura 12, las ecuaciones exhibidas podemos determinar el valor máximo de la potencia que puede extraerse (ec 8) (tomando el límite de Betz obtendremos un resultado final):

$$P_{E_{\max}} = \frac{1}{2} \rho U_1^3 A_D \quad \max \Rightarrow P_{E_{\max}} = \frac{\frac{1}{2} \rho U_1^3 A_D \eta_{\max}}{\left(1 - \frac{A_D}{A_C}\right)^2} \quad (8)$$

Destacamos que, Garrett y Cummins [20], sobre la base de un análisis del flujo de marea en un canal restringido de sección transversal variable que conecta dos grandes masas de agua, mostró que si el gradiente de presión en el canal es equilibrado principalmente por fuerzas de fricción, la potencia media extraíble (promediada durante un ciclo de marea) viene dada por:

$$P_E = 0.556 \rho g a Q_m \left[ 1 - \left( \frac{Q_m}{Q_{Om}} \right)^2 \right] \quad (9)$$

Dónde  $Q_m$  y  $Q_{Om}$  son respectivamente los caudales volumétricos máximos a través del canal en presencia de y en ausencia de extracción de energía, y "a" es la amplitud de una marea sinusoidal  $\cos(2\pi t/T)$  del periodo T entre los dos extremos del canal. Se considera que la tasa de flujo del volumen es  $Q = Q_m \left[ \cos(2\pi t/T) \right]^{1/2}$  como vemos en la Fig 13.

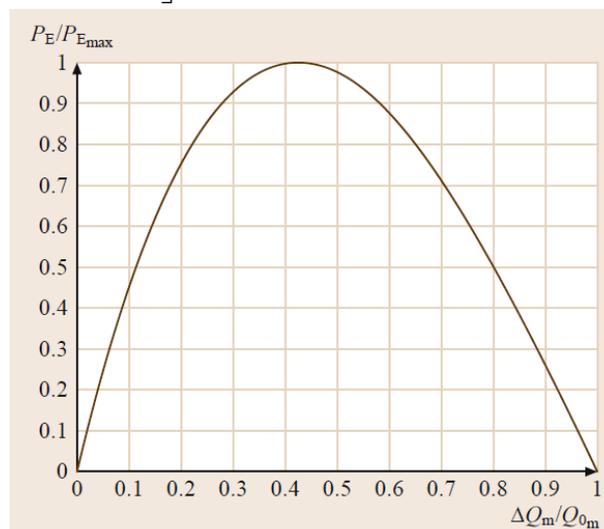


Figura 13 *Potencia extraída vs reducción de caudal,  $\Delta Q_m = Q_{Om} - Q_m$ , en el canal [14]*

Si consideramos que la reducción  $\Delta Q_m = Q_{Om} - Q_m$  aumenta hasta  $\Delta Q_m = \left[1 - \frac{1}{\sqrt{3}}\right] Q_{Om} = 0.42 Q_{Om}$

que marca la condición bajo la cual se puede extraer la máxima potencia media del canal:

$$P_{E_{\max}} = 0.21 \rho g a Q_{Om} \quad (10)$$

Considerando que sea posible una reducción del 5% en el caudal del canal debido al impacto ambiental resultante entonces la extracción de sólo el 23% del máximo de energía que puede permitirse de las mareas en el canal. Es decir,  $P_{E_{\text{permitido}}} = 0.23 P_{E_{\max}}$ .

En la práctica, la extracción de energía significativa de los canales en las mareas requerirá arreglos que involucren muchas turbinas. Este análisis nos lleva a razonar que, si en un río, es dificultosa la colocación de solo tres turbinas por la incidencia de la estela, en el mar ese arreglo será sumamente complejo.

### 3. CONCLUSIONES.

En la primera parte del desarrollo se mostraron dispositivos y métodos de medición de recursos eólicos e hidrocineéticos. Se observa que el desarrollo muestra un avance a partir de los métodos tradicionales con la incorporación de los dispositivos como: anemómetros ultrasónicos (2D y 3D) en los casos de medición compleja, especialmente en la zona urbana, ya que en zona abierta donde la influencia del viento vertical es mínima se obtiene mejor perfil vertical con un equipo esodar o lidar. En cuanto a la medición de velocidad del agua tanto en ríos, canales, cañerías o mar, pueden usarse aforos para medir con varios métodos donde se destaca el uso del correntógrafo o molinetes como mejor dispositivo. En el océano pueden utilizarse mediciones locales (correntógrafo) así como también analizar el flujo medio en las cuencas oceánicas, separadas por masas de tierra, ya que se compone de grandes giros subtropicales o circulación de corrientes superficiales que se establecen por la acción persistente de vientos predominantes (fig 12), típicamente por los vientos alisios cerca del ecuador y por los vientos del oeste a latitudes de mayor altura.

En este último caso quedó demostrado que se requieren una gran cantidad de dispositivos hidrocineéticos en un arreglo para lograr un resultado interesante.

Respecto de los dispositivos generadores queda evidenciado que la tendencia nos orienta hacia dos tipos de generadores: DFIG, con caja de engranaje y conexión directa a red eléctrica y el PMSG sin caja de engranaje y conexión a través de convertidor a la red eléctrica.

En relación a la hidrocineética, el uso de generadores de imanes permanentes parece adecuado pero la adición de la caja de engranaje reduce el tamaño y la conexión a red deberá efectuarse mediante convertidor.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] Trevor M. Letcher Ed. Comprehensive renewable energy second edition—ELSEVIER—2022 ISBN 978-0-12-819727-1
- [2] Ricardo A. Bastianon “Energía del viento y diseño de turbinas eólicas” Tiempo de cultura ediciones ISBN 950-9135-\*29-1 2da Edición – año 1994
- [3] Wind Regimes in Urban Environments: Experimental Comparison with the IEC 61400.2-2013 Open Terrain Wind Model Muhammad Iftekharul Rakib, Shaun Nay, Samuel Evans and Philip Clausen
- [4] Simulation of Wind Speed in the Problems of Wind Power - Sergey N. Udalov and Natalya V. Zubova Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies 2 (2013 6) 150-165
- [5] C. Gavriluta, S. Spataru, I. Mosincat, C. Citro, I. Candela, P. Rodriguez Complete methodology on generating realistic wind speed profiles based on measurements - International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12) Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012
- [6] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi. Wind energy handbook. John Wiley & Sons, 2001.
- [7] Fernando Porté-Agel · Majid Bastankhah1 · Sina Shamsoddin "Wind-Turbine and Wind-Farm Flows: A Review" Boundary-Layer Meteorology (2020) 174:1–59 <https://doi.org/10.1007/s10546-019-00473-0> 2020
- [8] Neary VS, Gunawan B, and Sale DC. Turbulent inflow characteristics for hydrokinetic energy conversion in rivers. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013;26:437–445.
- [9] Small Wind and Hydrokinetic Turbines Edited by Philip Clausen, Jonathan Whale and David Wood Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom The Institution of Engineering and Technology is registered as a Charity in England & Wales (no. 211014) and Scotland (no. SC038698). † The Institution of

- [10] Tabrizi A, Whale J, Lyons T and Urmee T. Rooftop wind monitoring campaigns for small wind turbine applications: Effect of sampling rate and averaging period. *Renewable Energy*, 77. pp. 320–330, 2015
- [11] *Wind Regimes in Urban Environments: Experimental Comparison with the IEC 61400.2-2013 Open Terrain Wind Model* Muhammad Iftekharul Rakib, Shaun Nay, Samuel Evans and Philip Clausen
- [12] Neary VS, Gunawan B, and Sale DC. Turbulent inflow characteristics for hydrokinetic energy conversion in rivers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013;26:437–445.
- [13] Tigabu MT, Wood DH, and Admasu BT. Resource assessment for hydrokinetic turbines in Ethiopian rivers and irrigation canals. *Energy for Sustainable Development*. 2020;58:209–224. Available from: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082620302866](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082620302866).
- [14] Manhar R. Dhanak, Alana E.S. Duerr, James H. VanZwieten Marine hydrokinetic energy resource Assessment 2016
- [15] P.Punys, I.Adamonyte, A.Kvaraciejus, E.Martinaitis, G.Vyciene, E.Kasiulis Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania *ELSEVIER Renewable and Sustainable Energy Reviews* 50(2015)643–652
- [16] EPRI. Assessment and mapping of the riverine hydrokinetic resource in the continental United States. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute; 2012. Report No.: 1026880.
- [17] Carta JA, Velazquez S and Cabrera P. A review of measure-correlate predict (MCP) methods used to estimate long-term wind characteristics at a target site. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27. pp. 362–400, 2013.
- [18] Takaaki Kono\*, Tetsuya Kogaki and Takahiro Kiwata Numerical Investigation of Wind Conditions for Roof-Mounted Wind Turbines: Effects of Wind Direction and Horizontal Aspect Ratio of a High-Rise Cuboid Building *energies* 2016, 9, 907; doi:10.3390/en9110907
- [19] Manual técnico CORRENTOGRAFO DIRECCIONAL TS 1020 Tecmes inteligencia ambiental – Rep Argentina
- [20] C. Garrett, P. Cummins: The efficiency of a turbine in a tidal channel, *J. Fluid Mech.* 588, 243–251 (2007)

## Propuesta superadora para potenciar la disponibilidad de energía eólica usando el hidrogeno como vector energético

di Prátula H.R.<sup>1</sup> - Petris Diego<sup>1</sup> – Martin DiPietro - Eduardo Guillermo<sup>1</sup> – Carlos Pistonesi<sup>1</sup> Delbianco Horacio<sup>1</sup> – Andrea Rossi<sup>1</sup>

1 Investigadores del GESE UTN FRBB  
hrdiprat@frbb.utn.edu.ar

### RESUMEN.

Acumular energía es un problema derivado de los sistemas de generación renovable ya que no se puede regular potencia ni el instante de ocurrencia. Este problema determina que su despacho sea en tiempo real y con el aporte de la energía según la meteorología. Para que la energía esté disponible bajo demanda se requiere resolver este inconveniente.

La publicación de ref [1] exploró el potencial de producción de hidrógeno a partir de energía eólica en tres escenarios distintos de excedente de energía, y la cantidad de generación eléctrica para Brasil y sus regiones. Para un escenario de 6 h de exceso de energía, el potencial de producción de hidrógeno a partir de la energía eólica era igual a  $1,48 E^{07} \text{ Nm}^3.\text{d}^{-1}$ . Los estados de Rio Grande do Sul alcanzaron un potencial de  $1,1 E^{06} \text{ MWh.mes}^{-1}$  de generación eléctrica utilizando  $\text{H}_2$ . teniendo en cuenta un tiempo de recuperación de la inversión de 3,5 años, el costo de producción de hidrógeno fue  $0.402 \text{ US}\$. \text{kWh}^{-1}$ .

El hidrógeno garantiza una mayor seguridad energética en tiempos de escasez de energía a través de almacenamiento de biocombustibles. El objetivo principal fue mostrar las posibilidades de diversificación de la red eléctrica nacional. matriz y el aporte del recurso eólico a la Economía Circular y  $\text{H}_2$  en el país.

En nuestra zona se han instalado parques eólicos que confluyen con su energía al nodo Bahía Blanca, los parques eólicos zonales tienen una producción anual (datos de Cammesa 2021 <https://cammesa.com/> )  $2458.57564 \text{ Gwh}$  cubriendo un porcentaje de la demanda total del País de  $1,836 \%$  siendo la cobertura total de la energía eólica del País del  $9.647 \%$  siendo el total aportado por las energías renovables del  $13\%$ . Esto significa que el *aporte zonal de energía renovable por generación eólica* es el  $19\%$  del total y el aporte de la energía eólica a nivel País el  $74.2\%$  del total aportado por todas las energías renovables.

El trabajo asume que es posible un aumento de la eficiencia al extender el conocido sistema agregando un ahorrador de energía, se proponen posibles formas de disponer de la energía eólica para producir H. Se analizan modos de utilización de la energía producida por los parques existentes y los futuros frente al actual sistema de contrato de generación con intercambio con la red con prioridad de despacho full time.

Normalmente, un aerogenerador funciona a un determinado nivel de energía, definido por la demanda de potencia de la red eléctrica. Sin tener en cuenta la energía eólica, la máquina se controla para cumplir con esta demanda. Esto significa que la energía eólica será inyectada en la red sin determinar aspectos relacionados con las variaciones de costos tarifarios por banda horaria ni días feriados ni fin de semana. La demanda siempre excede la energía producida, pudiendo direccionarse parte de la misma para producir H, contemplando diferentes opciones.

Este trabajo describe la idea general del sistema, presenta aspectos de generación y demanda a nivel País y modos probables de utilización de la energía eólica zonal o general para producir H, buscando optimizar el uso de la energía generada por medios renovables, especialmente el eólico que queda demostrado que es el mayor aporte al sistema interconectado nacional por las energías renovables.

**Palabras Claves:** H, energía eólica, hidrogeno verde

**Área Temática:** Energías renovables: fuentes de energía (hidrocinética)

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigadores, doctorandos y becarios

## 1. INTRODUCCIÓN

Se inicia el análisis temático verificando la energía generada por los parques eólicos conectados al nodo Bahía Blanca, sistema eólico concentrado en la zona sur de la Provincia de Bs.As.

Se comprueba mediante estadísticas la generación de los últimos 3 años incluidos los 8 meses iniciales del año 2022 del siguiente listado de parques eólicos:

Tabla 1 Parques eólicos Nodo Bahía Blanca – Producción Energética periodo 2020-2022

Denominación	año 2020	año 2021	año 2022
EÓLICO VILLALONGA GENNEIA	252,274903	231,482494	165,185956
P.E. Corti	408,938511	367,19279	260,120789
P.E. La Castellana	437,245621	416,077157	278,166538
P.EOLICO GARCIA DEL RIO	50,072681	46,636338	29,853984
P.EOLICO LA ENERGETICA Renov2	301,117291	346,268616	237,677762
P.EOLICO LA GENOVEVA I REN2	108,062507	375,085521	257,752277
PE. VIENTOS DEL SECANO	39,901023	199,450444	143,520768
EÓLICO VILLALONGA II GENNEIA	16,597855	15,193322	10,919106
P.EOLICO LA GENOVEVA II MATER	190,409894	178,914312	127,43561
P.EOLICO PAMPA ENERGIA	207,051641	214,616994	158,170909
Parque Eólico La Castellana II	73,547429	67,657652	40,809036

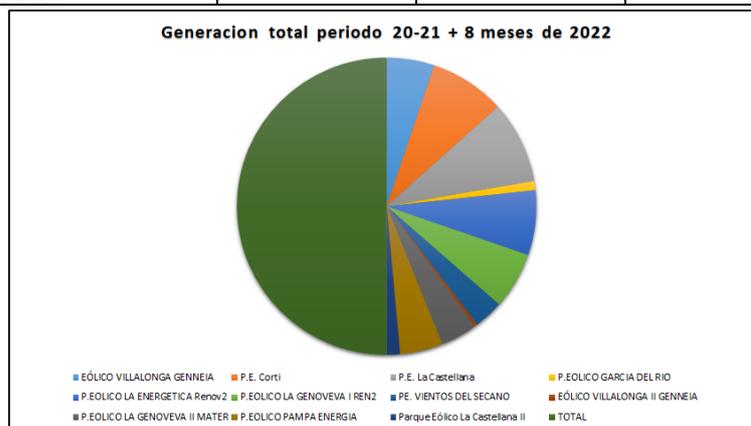


Figura 1 Generación periodo 20-221-22 – se debe tomar en cuenta que no todos ingresaron en servicio en el 2020

Considerando que algunos parques eólicos no habían comenzado a generar en el año 2020 y del año 2022 solo han transcurrido 8 meses, se adopta como base (referencia) de cálculo el año 2021 donde todos los parques generaron los 12 meses.

A partir de este análisis se investigan aspectos estratégicos relacionados con aspectos técnicos que nos llevarán a determinar aproximadamente el excedente que podría generar hidrógeno optimizando así, la generación eólica. Se requiere conocer algunos temas que se consideran importantes con el fin de lograr un análisis del tema propuesto.

## 2 Sistema de Electrolizador y Estrategia de Control

### 2.1 Electrólisis

El sistema a implementar no se diferencia del funcionamiento actual salvo la producción adicional de hidrógeno. El electrolizador, que utiliza energía eléctrica para dividir el agua en sus componentes H<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> usa corriente continua para realizar la conversión química. Considerando que el sistema es de CA trifásica se utiliza un convertidor CA/CC para convertir la energía eléctrica de la red y del aerogenerador en corriente continua, eligiendo el mismo de acuerdo a los parámetros del electrolizador.

Para el análisis de la eficiencia, es interesante saber cuánto Hidrógeno puede producir un electrolizador. Esto depende de su tamaño y parámetros de potencia. La producción de hidrógeno depende directamente de la corriente de entrada. La siguiente fórmula presenta la relación entre la corriente y el flujo másico de hidrógeno.

$$\dot{m} = i \left[ \frac{C}{s} \right] \cdot \frac{1}{96.485.33} \left[ \frac{mol}{C} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot 2.0158 \left[ \frac{g}{mol} \right] \cdot 3.6 \left[ \frac{s}{h} \right] \cdot 0.001 \left[ \frac{kg}{g} \right] \quad (1)$$

En esta ecuación, el número "96.485.33" es la constante de Faraday (A partir de la redefinición de las unidades del SI del año 2019, la carga eléctrica elemental y la constante de Avogadro fueron definidos como valores exactos, por lo cual la constante de Faraday es también un valor exacto: 96485,3321233100184 C/mol.),

$$F = e N_A \quad (2)$$

Siendo:

Tabla 2 constantes físicas

Símbolo	Nombre	Valor	Unidad
F	Constante de Faraday	96485.33212	C/mol
e	Carga eléctrica elemental	$1.602176634 \times 10^{-19}$	C
N <sub>A</sub>	Constante de Avogadro	$6.02214076 \times 10^{23}$	Mol <sup>-1</sup>

Como una molécula de hidrógeno consta de 2 equivalentes, por lo tanto, se pre multiplica por ½. El mol de Hidrógeno tiene el peso de 2.0158 gramos, luego para un caudal másico en kg/hora se multiplican los últimos términos. El parámetro diferente es la corriente. Cierta electrolizador funciona con una corriente específica y puede producir la cantidad calculada de hidrógeno. Esta ecuación es para una conversión ideal, generalmente se debe hacer una corrección, dependiendo de la calidad del electrolizador.

Se puede lograr una mejora útil de la producción de energía existente (Tabla 1) mediante un principio de control lógico. La entrada para este control es la demanda de energía de la red. Esta demanda rige la activación y desactivación de la producción de hidrógeno. En nuestro caso la propuesta sería producir hidrógeno utilizando diferentes estrategias de control.

## 2.2 Estrategia de Control

Las turbinas producen energía cuando el viento supera los mínimos determinados por la tecnología constructiva elegidos, de modo que están siempre disponibles para la provisión de energía a la red eléctrica. Puede ser que durante periodos la generación supere la demanda zonal y en otras ocasiones la red abastezca el faltante de energía a la zona. Lógicamente que en varios periodos superará la demanda local y la energía será distribuida por la red. Debe considerarse que la prioridad de despacho obedece al hecho de que no se regula la producción de energía salvo emergencia. Así que, podemos disponer que, en esos periodos, se utilice la energía que excede la demanda para la producción de hidrógeno o solamente lo hacemos en el horario prefijado (hora valle) ya que la demanda tanto zonal (nodo de conexión) como de la red eléctrica disminuyen. Siempre debemos considerar que dada la prioridad de despacho el costo de la energía eólica es monómico (el monto abonado por el sistema está dado en un valor único por MWh producido). En este sentido podemos considerar que el sistema puede funcionar generalmente en cinco modos.

Modo 1: La energía eléctrica excedente producida por cada aerogenerador se deriva directamente a la producción de H. La demanda de energía de la red es mayor o igual a la energía eléctrica producida por el aerogenerador (figura 2).

Modo 2: El aerogenerador proporciona más energía eléctrica de la que demanda la red. La energía sobrante se utiliza para producir hidrógeno (figura 2).

Modo 3: El aerogenerador produce hidrógeno solamente en el horario nocturno, aprovechando la energía total producida o solo la sobrante de la consumida por la zona dependiente del nodo (figura 3).

Modo 4: Un porcentaje de aerogeneradores del parque se dispone para la producción de hidrógeno (figura 4)

Modo 5: Se genera en un periodo determinado (días u horas) hidrógeno y el resto del tiempo se provee energía a la red (figura 5).

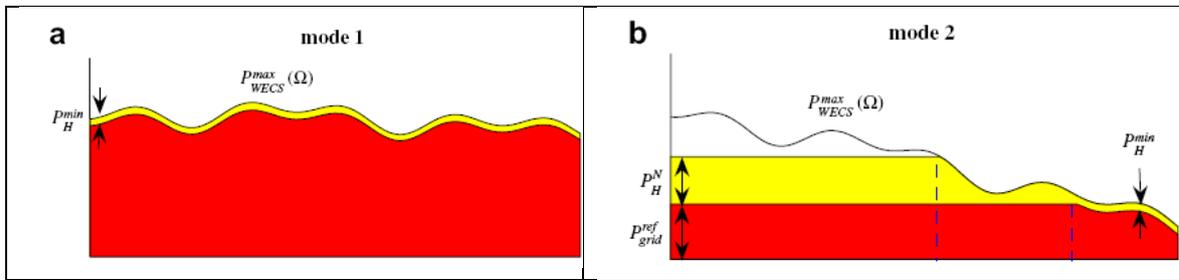


Figura 2 Modos de trabajo del aerogenerador (Fuente: Generador de viento libre de producción de hidrógeno)

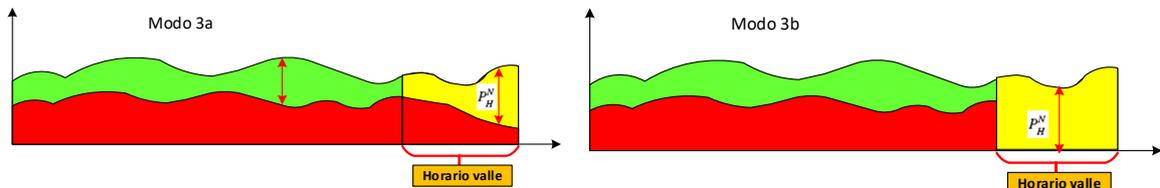


Figura 3 Modos de trabajo del aerogenerador producción nocturna con aporte zonal (3a) y sin aporte a red (3b)

También podría disponerse un Modo 4, derivando energía parcialmente de uno o más de un parque eólico para generar hidrógeno.

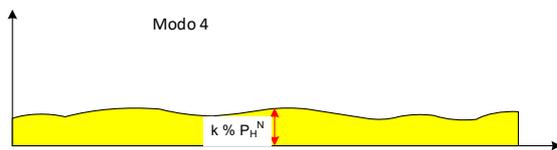


Figura 4 un porcentaje (k%) de cada parque, de uno o un parque total de todos los parques



Figura 5 Generación de H durante los fines de semana y/o fechas especiales

Todas las propuestas están subordinadas al contrato de prioridad de despacho y de conveniencia del comprador y el vendedor de energía eólica. Luego, la propuesta no puede exclusivamente basarse en aspectos técnicos, sino que debe considerarse la factibilidad económica de intercambio, tomando en cuenta la inversión tanto en el parque eólico como en la planta de producción de H, almacenamiento y transporte del mismo y la conveniencia de establecer un sistema de despacho con aspectos que beneficien a ambas partes del sistema.

También será importante determinar la demanda y el tipo de demanda en franjas horarias ya que es beneficioso para el País tanto la producción de energía eólica como la producción de H, siendo que ambos impactarán en el medio ambiente y también en la economía por uso óptimo y racional de la energía renovable generada.

La contribución eólica a nivel de Demanda País es aún muy baja en porcentual. En la Tabla 3 vemos la generación de energía por medios renovables, la demanda de energía y el porcentaje generado por las energías renovables en total:

Tabla 3 Demanda de Energía en Argentina según CAMMESA – Energía generada por medios renovables y % de aporte de las Energías Renovables

ENERGÍA GENERADA [GWH]											
FUENTE DE ENERGÍA	AÑO 2020	AÑO 2021	ene-22	feb-22	mar-22	abr-22	may-22	jun-22	jul-22	ago-22	AÑO 2022
BIODIESEL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
BIOMASA	420,964375	749,613752	59,352206	54,050763	50,210838	55,531277	57,223251	65,046396	75,896246	77,763876	495,074853
EOLICO	9416,33849	12915,8264	1191,75088	1053,97838	1267,659	1217,43223	1136,15277	1093,81677	1224,98996	1176,82372	9362,60372
HIDRO <=50MW	1256,55991	1185,50954	114,605126	91,970839	116,54012	78,348616	50,519534	49,783629	49,787377	66,228121	617,783362
SOLAR	1344,31909	2195,55512	256,557053	245,453859	263,549489	229,317663	182,670408	158,58001	176,728074	230,660912	1743,51747
BIOGAS	304,086062	377,717441	35,360886	33,418019	37,435354	33,738126	36,785184	33,757532	36,157439	36,096804	282,749344
<b>Total GWh</b>	<b>12742,2679</b>	<b>17424,2222</b>	<b>1657,62616</b>	<b>1478,87186</b>	<b>1735,39481</b>	<b>1614,36791</b>	<b>1463,35115</b>	<b>1400,98434</b>	<b>1563,5591</b>	<b>1587,57344</b>	<b>12501,7287</b>
DEMANDA ENERGÍA [Gwh]											
FUENTE DE ENERGÍA	AÑO 2020	AÑO 2021	44562	44593	44621	44652	44682	44713	44743	44774	AÑO 2022
Demanda MEM	128044,042	133881,718	13066,58	10567,3145	10881,258	10146,8548	11727,7557	13073,8809	12638,935	11781,4254	93884,0043
<b>Ren MEM / Dem MEM</b>	<b>10,0%</b>	<b>13,0%</b>	<b>12,7%</b>	<b>14,0%</b>	<b>15,9%</b>	<b>15,9%</b>	<b>12,5%</b>	<b>10,7%</b>	<b>12,4%</b>	<b>13,5%</b>	<b>13,3%</b>

De esta Tabla y la Tabla 1 puede extraerse el porcentual de contribución de la energía eólica a nivel País (fig 5<sup>a</sup>) y de la energía eólica a nivel zonal (fig 5b)

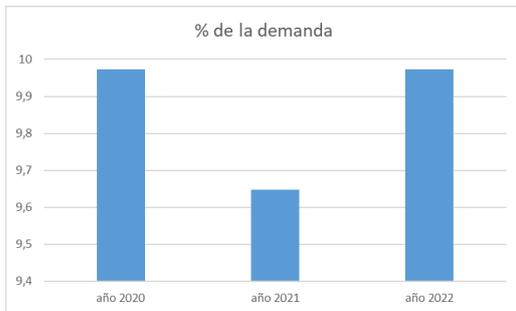


Figura 5a Generacion % de la demanda total producida por energía eólica en el País

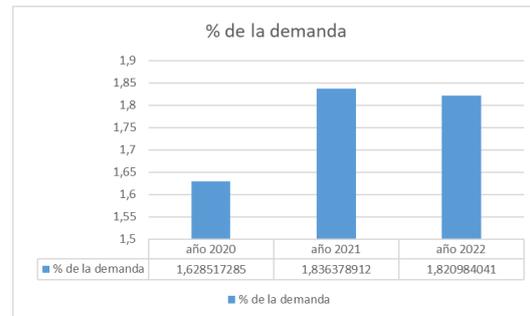


Figura 5b Generacion % de la demanda total producida por energía eólica de la zona

Considerando la demanda de energía a nivel del País el aporte de la energía eólica total alcanza valores casi de 10% de la misma (Fig 5a) mientras que la zonal no alcanza a superar el 2% (Fig 5b).

### 3. Posibles acciones estratégicas en el mercado de la Energía.

El planteo muestra las alternativas que podrían jugar en la decisión de los actores del mercado de la energía.

Debemos considerar que el generador eólico no puede regular la generación en horarios y días dada la aleatoriedad del recurso renovable. En la opción actual el generador vende a CAMMESA con un contrato de prioridad de despacho y tarifa contratada (monómica entre 50-60 U\$/Mwh). También puede vender en condiciones establecidas en forma privada a compradores que lo requieran.

En el caso de la venta a CAMMESA no puede esperarse, sino que los precios sigan bajando ya que a su vez CAMMESA la comercializa en la distribución energética Nacional y los contratos nuevos en el mundo se reducen a la vez que la tecnología lo permite.

Una opción alternativa sería que utilizando la Energía eólica se produzca H, lo almacene (el almacenamiento es de mucha complejidad y alto costo) y lo venda por contrato entre privados y/o a CAMMESA de la siguiente forma:

1. Turbinado como energía eléctrica en horarios de pico o mejor precio o contrato específicos de mejor rentabilidad.
2. Vender el H almacenado a compradores locales o Internacionales.
3. Vender ambos productos según las conveniencias de Mercado que surjan (el H puede utilizarse en el transporte).

La particularidad que presenta la opción 1 es que, adaptando técnicamente las instalaciones de turbinas para que funcionen tanto a gas, fuel oil, gas pobre (biogas) a Hidrógeno, incorporamos un sistema que potencia el atractivo ya que le permitirá al emprendedor reducir su inversión y ampliar opciones de combustibles, convirtiendo la energía eólica en una energía regulada y que puede comercializarse en condiciones más atractivas.

En este planteo se busca que el escenario futuro para desarrollar el enorme potencial eólico existente, se realice mediante una evolución que aproveche la infraestructura disponible de generación e incorpore nuevos parques eólicos, sabiendo que los mismos pueden derivar esa energía generada en forma aleatoria de manera regulada, y además con factibilidad de almacenamiento para su comercialización en el mercado interno o internacional.

Bajo el planteo expuesto anteriormente, las plantas de producción de H y su almacenamiento tendrían que estar en cercanías de las turbinas generadoras de energía eléctrica, usando el transporte eléctrico desde los parques eólicos hacia estas plantas evitando el transporte de H y la inversión en dicho fin (fig 6).

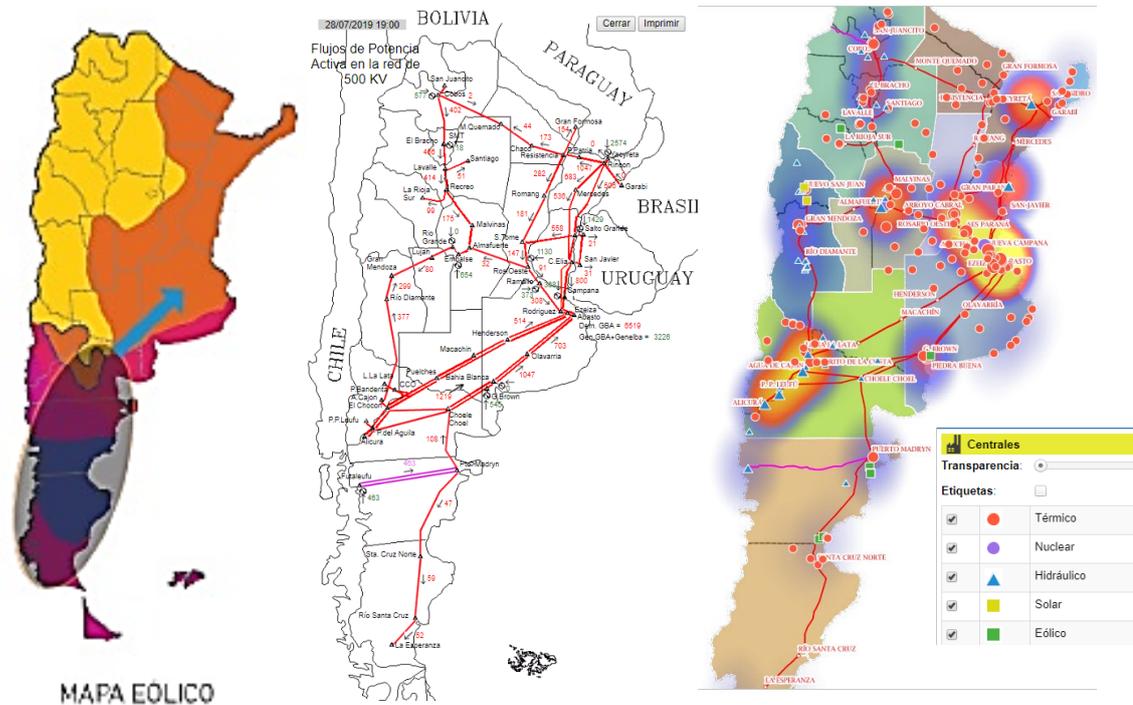


Figura 6 Se incluye en la figura, tanto las zonas de recursos eólicos importantes, líneas de transporte y zonas de concentración de plantas generadoras.

Las zonas prevalentes de instalación de Centrales quedan determinadas por la existencia de plantas generadoras, que además estén en cercanía de líneas de transporte (AT) eléctrica interconectadas con parques eólicos.

Nuestra zona posee ambas posibilidades, ya que los parques eólicos mencionados anteriormente en la introducción, se conectan al nodo Bahía Blanca y ésta posee dos centrales de Generación y además un Puerto de Aguas profundas que le permitirían la exportación de H utilizando una infraestructura existente.

Analizando las variables en juego, dejando para otro trabajo un estudio profundo de costos e inversiones, podríamos suponer que en el futuro la producción eléctrica (térmica) utilizando H como combustible podría (al regular una energía abundante aleatoria) disminuir su costo y abastecer convenientemente a consumidores tanto residenciales como industriales. Además, debemos conceptualizar que el H no solo podrá ser utilizado en el turbinado, sino que puede usarse en el transporte tanto liviano como pesado.

En una etapa posterior para aumentar el aprovechamiento del H, la propuesta sería que se factibilice la ejecución de un sistema de transporte (ducto de hidrogeno) que una las primeras zonas y al mismo tiempo permita el almacenamiento del H en el ducto. O sea que el ducto podría operar como transporte y almacenamiento. En ref [5] hace mención (Fig 7) a los aspectos que proponemos y además muestra la factibilidad de utilizar ductos para el transporte de H.

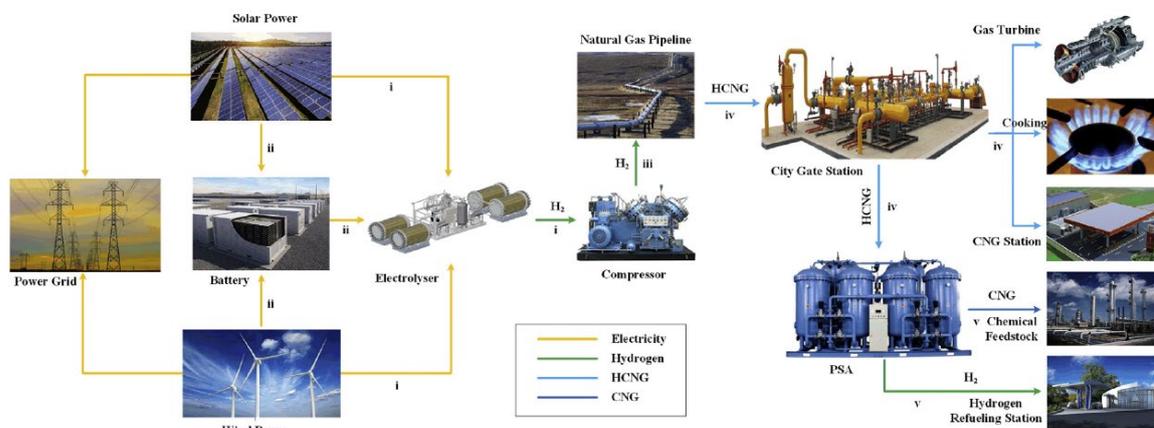


Figura 7 Esquema de la aplicación de hidrógeno renovable a gran escala utilizando excedentes de electricidad generada por energía eólica y solar y Transporte por tubería de GN de HCNG.

Estos ductos facilitarían la radicación de empresas que realicen la inversión para instalar tanto Parques eólicos, productoras de hidrógeno y generadoras de energía eléctrica, en cercanías de los

mismos transformando al ducto en un factor de localización, ya que estos permitirían tanto la provisión de H para las empresas, o de derivación del H sobrante sin necesidad de almacenamiento propio. Esto evitaría la inversión en almacenamiento.

La propuesta puede potenciarse incorporando otros medios de generación renovable, como la energía solar (Fig 8) [6], ya que transforma la energía renovable aleatoria en regulada.

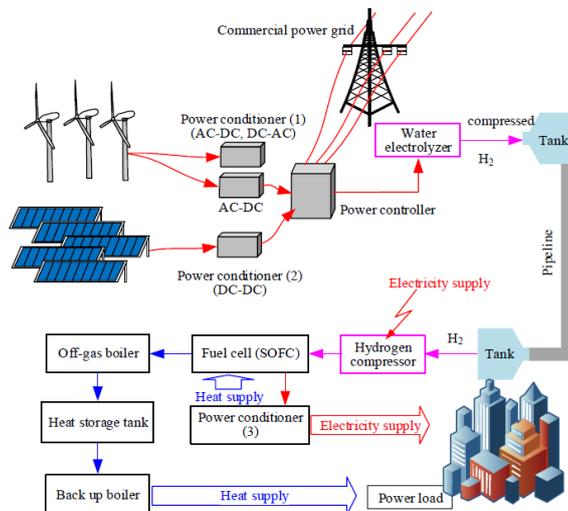


Figura 8 Cadena de suministro de hidrógeno [6]

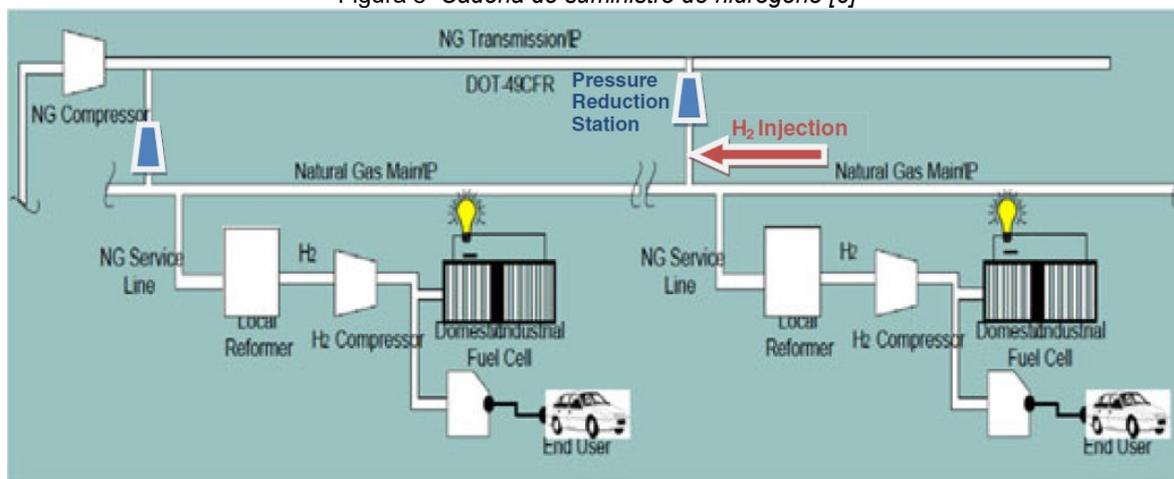


Figura 9 Ilustración del transporte de H2 a través de gasoductos de gas natural en la red de distribución (baja presión) [8] [9]

La figura 9 nos mostraría la factibilidad de que el ducto, al mismo tiempo, pudiera proveer H a los consumidores a través de estaciones de servicio distribuidas a tal fin.

#### 4. CONCLUSIONES.

El análisis inicial muestra la energía generada a nivel zonal (significativo aporte de dicha energía renovable al sistema Nacional) dando pie a su inclusión como zona de importancia dentro de la propuesta.

Se analizan posibles métodos de uso de la energía eólica para la producción de H, desde el excedente referido a un consumo determinado o el uso de horarios o fechas determinadas, además la inclusión del dato de la generación renovable a nivel nacional y su importancia en la matriz energética, demuestran la posibilidad de utilizar otros medios renovables sumándolos a la energía eólica para el mismo fin.

En el ítem 3 se proponen acciones estratégicas a nivel Nacional contemplando el uso de las zonas eléctricas del País, las redes eléctricas y las centrales de generación que permitirán descentralizar la producción de H de los puntos de instalación de los sistemas de Energías Renovables e incorporar los mismos a lugares de generación de energía utilizando el ducto como dispositivo de almacenamiento del H.

Sintetizando la propuesta:

1. La energía eléctrica procedente de las energías renovable se transmite por redes eléctricas existentes

2. Los puntos de producción de H son dispuestos en sectores de Generación de energía eléctrica por lo que las redes de interconexión actuales sirven de transporte.
3. Se propone el aprovechamiento integral de un ducto – de hidrógeno cuya existencia es posible (ver ref [6], [7], [8] y [9]) con una utilidad de transporte y almacenamiento de energía simultáneamente.
4. Se requiere la creación de un plan director que permita a los actores que quieran participar de este proyecto tomen decisiones.
  - a. Éste deberá contener:
    - i. Políticas vinculadas al desarrollo y protección de inversiones y facilitación del acceso a las localizaciones
    - ii. Plazos
    - iii. Condiciones de operación y acceso a los sistemas eléctricos y a los ductos de transporte y acumulación de H.
    - iv. El desarrollo de las operadoras existentes para la conversión de los sistemas de generación existentes al uso de H como combustible.
    - v. Desarrollo de los puertos para la exportación de H.

En síntesis, si bien el hidrógeno es una posible solución a algunos de los problemas energéticos actuales, y, la presente propuesta tiende a lograr un avance en almacenamiento y uso con menor costo del mismo, en procesos industriales y al mismo tiempo en transporte, no es posible descartar avances actuales en generación de energía a gran escala por ejemplo en fusión nuclear [10]

Por lo tanto, las investigaciones futuras tendrán como objetivo los siguientes aspectos:

1. Planificar un sistema dónde se consideren las factibilidades técnicas, comerciales y financieras de un complejo a gran escala, para el desarrollo energético de perfil sustentable del país, que implique tener energía abundante y de bajo costo para el mercado interno y con alta capacidad de saldo exportable.

Esto implica un plan director de dos pasos:

- a. Paso 1: armado de infraestructura inicial y desarrollo de tecnologías y mercados
  - i. Conversión y adaptación de sistemas de centrales de energía existentes que estén en cercanías de zonas portuarias para que estas puedan
    1. Generar y almacenar hidrógeno, y generar con hidrógeno
    2. Tener saldo exportable y puertos preparados para la exportación de saldos.
  - ii. Desarrollo de mercados de exportación
  - iii. Definición y desarrollo tecnologías, empresas, sistemas de seguridad y capacidades de recursos humanos para este nuevo campo de hidrógeno
  - iv. Ampliación de la generación de energía eólica para que pueda abastecer la generación de hidrógeno “pari-passu” con las conversiones de centrales y oportunidades de exportación
  - v. Desarrollo de tecnología de conducción y almacenamiento distribuido del hidrógeno, conducción y almacenamiento bajo la formas “todo en uno”); bajo formas no convencionales y tecnologías innovadoras, y con los aportes de empresas y recursos humanos nacionales, es decir: desarrollo de tecnología propias, basados en nuestra creatividad y talento y aportes y riesgos de empresas argentinas
  - vi. Validación, pruebas, elección y certificación de la/las tecnología/s desarrolladas en el punto anterior
  - vii. Definición de cronograma del escalamiento del sistema de transporte-almacenamiento del hidrógeno y localización del mismo
- b. Paso 2: desarrollo en gran escala
  - i. Construcción modular de sistema de transporte y almacenamiento, pari-passu con el desarrollo de unidades distribuidas y compactas de generación eólica-producción de hidrógeno, que no deberán tener almacenamiento propio, sino que usarán el sistema que se vaya construyendo como lugar de almacenamiento
  - ii. Ampliación de puertos y construcción-ampliación-conversión de generadoras de energía eléctrica basadas en hidrógeno
2. Desarrollo de proyectos de inversión para cada paso y definición de aspectos legales, impositivos y organismos descentralizados que instrumenten la puesta en marcha, los cronogramas y tecnologías del proyecto

## 5. REFERENCIAS.

- [1] Willian Cezar Nadaleti\*, Gabriel Borges dos Santos, Vitor Alves Lourenco “Integration of renewable energies using the surplus capacity of wind farms to generate H2 and electricity in Brazil and in the Rio Grande do Sul state: energy planning and avoided emissions within a circular economy” international journal of hydrogen energy 45 ( 2020 ) 24190 e 24202 ELSEVIER
- [2] A A Gibadullin, M I Sadridinov, Z M Kurbonova, Yu N Shedko and V V Shamraeva “Assessment of factors ensuring sustainable development of the electric power industry in the context of transition to renewable energy sources of the national economy” IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 421 (2020) 032051 doi:10.1088/1755-1315/421/3/032051 2019
- [3] De Vrieze J, Verbeeck K, Pikaar I, Boere J, Van Wijk A, Rabaey K, Verstraete W, The hydrogen gas bio-based economy and the production of renewable building block chemicals, food and energy, New BIOTECHNOLOGY (2019), doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2019.09.004>
- [4] Sven Fuerstenau, TU Berlin Dr. di Prátula H.R. “Hydrogen production using wind energy” Sin publicar
- [5] Bo Liu a,b,c, Shixue Liu a, Shusheng Guo a, Shuxing Zhang Economic study of a large-scale renewable hydrogen application utilizing surplus renewable energy and natural gas pipeline transportation in China 2019 ELSEVIER Journal of Hydrogen energy
- [6] Jiaren Li Shin’ya Obara Study on an energy supply system assuming a pipeline transportation of compressed hydrogen for distributed fuel cell in China 978-1-7281-2455-1/19/ ©2019 IEEE
- [7] Andrzej WITKOWSKI, Andrzej RUSIN\*, Mirosław MAJKUT, Katarzyna STOLECKA Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects doi: 10.1016/j.energy.2017.05.141 EGY 10949 2017
- [8] Irfan Ahmad Gondal\*, † and Mukhtar Hussain Sahir Prospects of natural gas pipeline infrastructure in hydrogen transportation - International journal of energy research Int. J. Energy Res. (2011) Published online in Wiley Online Library ([wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)). DOI: 10.1002/er.1915
- [9] Research, Development, Demonstration, & Deployment Roadmap for Hydrogen Vehicles & Infrastructure to Support a Transition to a Hydrogen Economy, US Department of Transportation, October 2005
- [10] <https://www.infobae.com/america/wapo/2022/12/13/expectativa-por-el-anuncio-de-estados-unidos-sobre-un-historico-avance-cientifico-en-energia-de-fusion-nuclear/>

# Diseño preliminar de un reactor de pirólisis para reciclado avanzado de plásticos de desecho

Aagaard, Tomas F.<sup>a</sup>, Urrestarazu, Adrian M.<sup>a</sup>, Mendez, Claudio M.<sup>a,b</sup>, Casoni Andres I.<sup>a,b</sup>, Rodriguez Garido, Gabriel.<sup>c</sup> y Volpe María A.<sup>b</sup>

a Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Av. Alem 1253, 8000 Bahía Blanca,  
b Planta Piloto de Ingeniería Química, Camino Carrindanga Km 7, 8000 Bahía Blanca,  
c Instituto Petroquímico Argentino, Av. Córdoba, INFAP-CONICET, Universidad Nacional de San Luis, Av. Ejército de los Andes 950, San Luis, 5700, Argentina.  
tomas.aagaard@uns.edu.ar

## RESUMEN

Se plantea el diseño conceptual de una planta de pirólisis para llevar a cabo el reciclado químico de plásticos de desecho que llega a un basurero municipal. Para el desarrollo, se lleva a cabo una pirólisis rápida a escala banco a 500°C en un reactor horizontal bajo flujo de nitrógeno. En base a esos resultados se obtienen las características más relevantes que permitirán el desarrollo del reactor para la planta. Se produce un licor, un gas y un sólido carbonoso. Las propiedades fisicoquímicas de los productos se determinan con diferentes técnicas (determinación de los puntos calientes, viscosidad SSU a diferentes temperaturas, Índice de viscosidad, poder calorífico superior e inferior, DRX, GC/MS, análisis de PHAs). Los rendimientos logrados son de 45% de licor, 32% de gas, y un 23% de sólidos carbonosos. Mediante análisis fisicoquímicos se concluyó sobre usos factibles de los productos. El licor es apto para formar blends con combustibles líquidos, mientras que el sólido densifica altamente el residuo y su disposición en suelos es segura. El gas presenta propiedades energéticas. La planta propuesta produciría un licor y un gas de características similares a cortes petroquímicos, productos que se postulan para la generación de energía eléctrica y térmica. Al mismo tiempo se solucionaría la disposición final de residuos que en la actualidad se llevan a basureros a cielo abierto o rellenos sanitarios.

**Palabras Claves:** Residuos plásticos, Reciclado químico, Economía Circular, PHAs, Licor de pirólisis.

**Área Temática:** Energía y Medio Ambiente. Desafíos para las ciudades.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

En nuestro país apenas un porcentaje menor al 10% de los plásticos usados se reciclan mediante métodos convencionales [1]. Por el contrario, un gran volumen de residuos plásticos no puede ser reciclado y se dispone en vertederos o se incinera sin recupero de energía, con grandes consecuencias negativas para el medio ambiente.



*Figura 1. Basural en Río Gallegos [2]*

La presente propuesta tiene como objetivo diseñar conceptualmente una planta de reciclado avanzado para la conversión de plásticos que se destinan a vertederos. Mediante este reciclado, basado en pirólisis, los desechos se convierten en licor y gas apropiados para ser usados en la generación de energía o fabricación de nuevos productos. Si bien existen gran cantidad de plantas comerciales operando en el mundo, este tipo de tecnología no se encuentra difundida en nuestro país.

Las características del plástico de desecho que se va a estudiar, tanto en cuanto a volumen como en su composición, corresponden a un relevamiento realizado por los autores en municipios en la provincia de Santa Cruz. Para determinar los parámetros más importantes en el desarrollo del diseño conceptual de la planta de reciclado químico, se realizaron inicialmente ensayos a escala banco. En dichos ensayos experimentales se empleó un dispositivo basado en un reactor de pirólisis a escala de laboratorio para convertir residuos plásticos un gas, licor y sólido carbonoso. Las propiedades fisicoquímicas de estos tres productos se determinan principalmente a partir de análisis cromatográficos, medidas de viscosidad y poder calorífico para el licor, y determinación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el sólido. Basándose en dicha caracterización se postulan aplicaciones factibles para cada producto. Se concluye sobre los impactos medioambientales, sociales y económicos que se asociarían al desarrollo de la planta de pirólisis propuesta.

### 1.1. Proceso de pirólisis

La pirólisis es un caso especial de termólisis. La pirólisis es la descomposición química de materia causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno (y de cualquier halógeno) [3]. La misma involucra cambios simultáneos de composición química y estado físico, los cuales son irreversibles.

La pirólisis permite producir un sólido carbonoso, un licor y un gas. Comienza a un nivel de temperatura relativamente bajo (a partir de 350 °C) y continúa hasta unos 1.000 °C. Según la temperatura, entre otras variables, la proporción de los tres productos resultantes es diferente [4].

El proceso de pirólisis planteado tipo batch cuenta con varias etapas, las cuales se podrán observar en el diagrama de flujo planteado en la Fig. 3. El mismo se desarrollará en unas 4/6 horas para comenzar al día siguiente.

### 1.1.1 Etapas del proceso del reactor piloto.

El proceso comienza con la carga de los residuos plásticos separados y densificados mediante chipeo, hasta completar las capacidad del reactor (280 litros). Se cierra la brida de carga y se enciende el quemador.

La temperatura es monitoreada dentro del reactor durante todo el proceso, y debe permanecer en un rango de entre 500°C y 550°C, por lo que dependiendo de la misma varía la entrega de potencia del quemador. El objetivo de permanecer en ese rango es maximizar el rendimiento del licor frente a los gases y sólidos [2]. Al llegar a los 350°C aproximadamente el plástico comienza el proceso de pirólisis, acelerándose conforme crece la temperatura. Los vapores de pirólisis generados escapan del reactor por la presión generada, y se dirigen hacia el separador. En este punto, los vapores de pirólisis más densos permanecen en la zona inferior del separador, mientras que los gases más livianos escapan por la parte superior hacia el condensador. Los vapores más densos corresponden a las cadenas de hidrocarburos más largas (mayores a C16), que comienzan a condensar a una temperatura mayor a 300°C, y a temperatura ambiente presentan una viscosidad muy alta. Debido a esto, se lo separa, ya que, a pesar de que se genera una fracción muy baja de los mismos, se puede producir el taponamiento del condensador.

Los vapores que pasan hacia el condensador son enfriados a temperatura ambiente, produciendo un líquido liviano (cadenas C5 a C16), al cual llamamos licor de pirólisis, y gases no condensables (C1 a C4). Tanto el licor como el gas se dirigen al depósito transitorio, en donde se acumula el licor generado durante un número limitado de batches. Mientras que el líquido permanece en el depósito, el gas es expulsado por la misma presión del proceso para ser combustionado en un proceso que aproveche su energía, o bien en el mismo quemador.

Una vez finalizado el proceso, quedará dentro del reactor un sólido carbonoso, el cuál se deja enfriar a temperatura ambiente para luego abrir la brida descarga y retirarlo, permitiendo volver a cargar el reactor con plásticos para comenzar un nuevo proceso (ver Fig. 2).

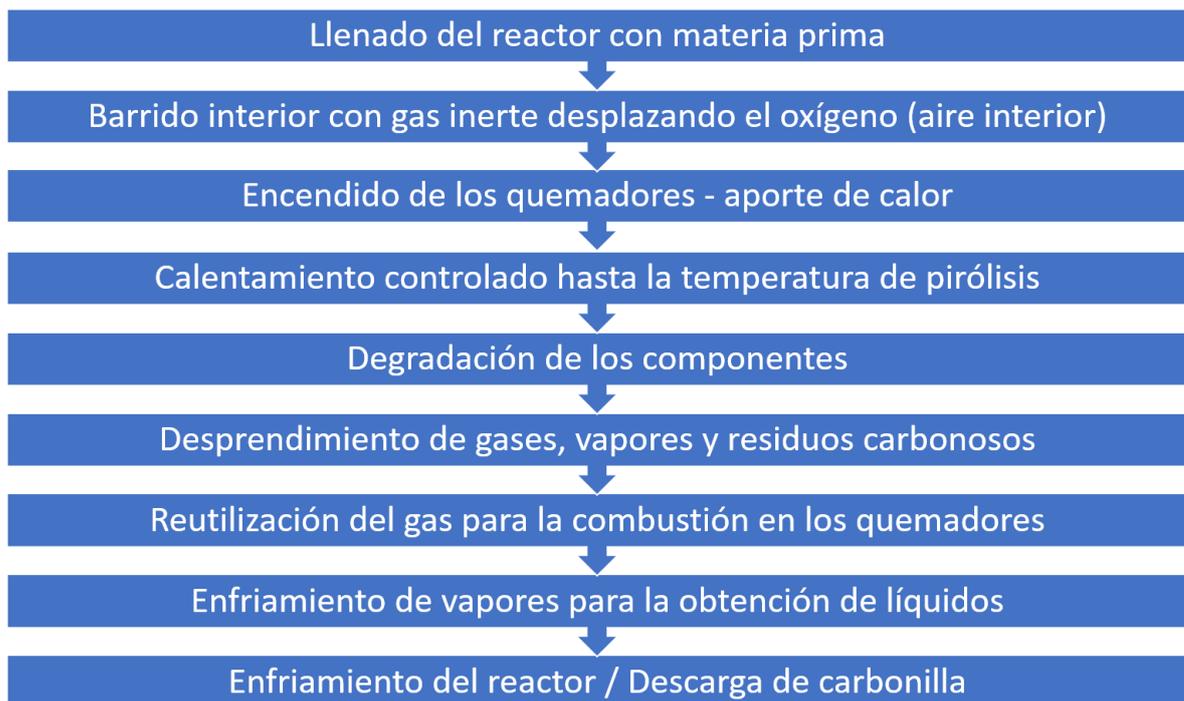


Figura 2. Etapas del proceso

### 1.1.2 Diagrama de flujo y equipos.

Como se describió anteriormente, los equipos más relevantes para el diseño del proceso son los siguientes (ver Fig. 3):

- Reactor y sistema de quemador/es
- Separador
- Condensador y sistema de enfriamiento
- Depósito transitorio

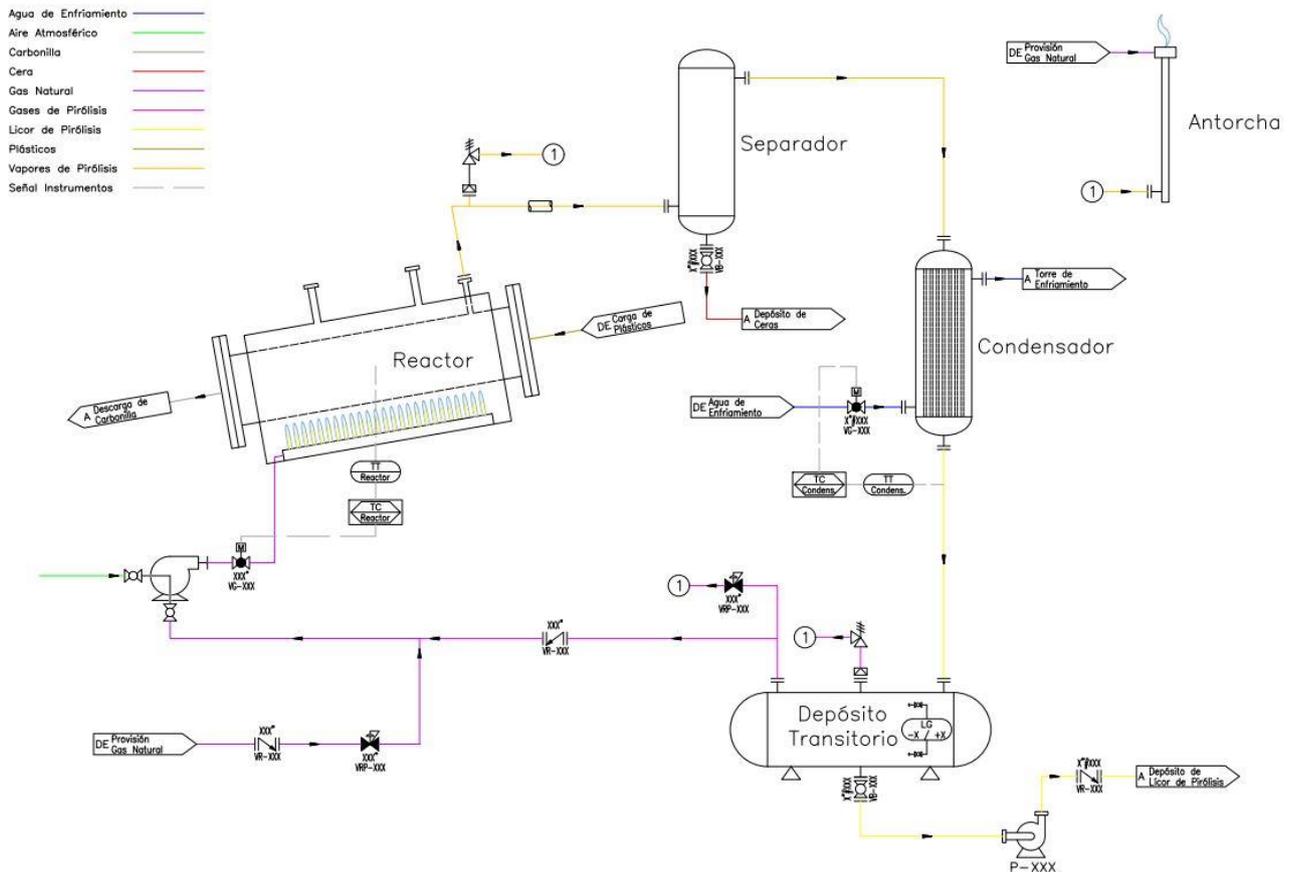


Figura 3. Diagrama de flujo y equipos

### 1.1.3 Variables importantes para el diseño del proceso

En el proceso de pirólisis, la proporción en las cuales se obtienen fracciones de gas, líquido y sólido estará determinada por varios factores y pueden afectar notoriamente el rendimiento alcanzado por el reactor [5].

#### 1.1.3.1 Temperatura de la reacción

Es una de las variables más importantes en el proceso de pirólisis. A mayor sea ésta, mayor será el craqueo producido, por lo tanto, se favorecerán los productos volátiles frente al resto de compuestos generados. Desde este punto de vista, pueden distinguirse tres zonas de temperatura de pirólisis en función de los fenómenos térmicos que ocurren y del predominio de las distintas fracciones que se generan durante dicho proceso [5, 6,7]:

- Entre 250 y 330 °C: en este rango de temperaturas el material se funde y prácticamente no hay formación de productos.
- Entre 330 y 450 °C: en esta zona, la fracción líquida alcanza rendimientos significativos, mientras que los compuestos gaseosos se generan en menor medida.
- Temperaturas superiores a 500 °C: se produce un mayor craqueo del material pirolizado y por tanto se obtiene un mayor rendimiento de la fracción gas.

Además de la variación en los rendimientos alcanzados por las distintas fracciones generadas, la temperatura de degradación presenta una influencia significativa en la composición de dichas fracciones.

#### 1.1.3.2 Velocidad de calentamiento

La velocidad de calentamiento [°C/min], relacionada con el aporte de calor por unidad de tiempo [kJ/min], también determina las fracciones líquidas, sólidas y gaseosas del proceso.

- Si los residuos se calientan con valores menores o iguales a 30 °C/min, ayudan a la formación mayoritariamente de carbón y fracción gaseosa (el tiempo necesario para calentar el combustible a la temperatura del proceso de pirólisis es muy superior al tiempo de reacción de la pirólisis) [8].
- Si los residuos se calientan con valores superiores a 150 °C/min, el vapor de pirólisis resultante se elimina muy rápido de la zona de reacción, promoviendo la obtención de una fracción líquida en mayor porcentaje [8].

### **1.1.3.3 Tiempo de residencia**

A tiempos de residencia más largos se favorecerá mayoritariamente la obtención de coque, alquitrán y también productos que son estables térmicamente.

Por otra parte, si el tiempo de residencia es menor, la cantidad de volátiles obtenidos será mayor. El tiempo de residencia puede afectar en el rendimiento y la distribución de los productos generados [9].

### **1.1.3.4 Cantidad de muestra y tamaño**

El tamaño de las partículas afecta la transmisión de calor. Las partículas pequeñas se calientan rápidamente a diferencia de las grandes. Existen varios trabajos donde se evalúa el tamaño y su influencia en los productos [7, 10, 11]

### **1.1.3.5 Densidad**

La densidad de la muestra es un factor clave para la elección del volumen del reactor. El volumen del reactor influye en la transmisión de calor. Los reactores chicos logran temperaturas más homogéneas (relación volumen/área).

### **1.1.3.6 Humedad de la muestra**

Parte del calor aportado en el reactor será utilizada para secar la muestra. La humedad influye en la formación de la fracción sólida y líquida, dado que disminuye la temperatura de descomposición.

### **1.1.3.7 Catalizador**

El catalizador tiene un efecto en los productos finales obtenidos [12, 13]

### **1.1.3.8 Presión de funcionamiento**

Es un parámetro primordial para el diseño mecánico del reactor, ya que a través de este parámetro se calculará el espesor del recipiente a presión.

### **1.1.3.9 Tipo de reactor**

Existe una gran variedad de trabajos en los cuales se utilizan diferentes diseños de reactores. El reactor es el determinante en el control de los parámetros antes mencionados. Del diseño dependen los productos obtenidos. [6]

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Relevamiento desechos**

En base al relevamiento realizado en municipios de la provincia de Santa Cruz y en Río Gallegos, se observó que se genera un volumen de 4 toneladas diarias de plásticos que no son factibles de reciclar mecánicamente y que serían aptos para llevar a cabo un reciclado químico por pirólisis. Dado que un proceso continuo de conversión de este volumen requiere de un abastecimiento constante de insumo y de un horario muy extendido de operarios, se planteó un proceso discontinuo (batch) con un tiempo de operación de 4 a 6 horas.

### **2.2 Ensayo escala banco**

Se llevó a cabo la pirólisis a escala banco (ver equipo en Fig. 4) de muestras de plásticos de desecho provistos por el basurero de Río Gallegos.

#### **2.2.1 Muestra PY80**

La composición aproximada del residuo fue de un 20 % de polietileno de baja y alta densidad (PE), 20 % de polipropileno (PP), 10 % de poliestireno (PS), 10 % de polietilentereftalato (PET), completándose la mezcla con restos orgánicos (papel, telas, restos de comida, vegetales). Este residuo presenta una baja densidad, de aproximadamente 0,14 kg/L.

#### **2.2.2 Muestra PY10**

La muestra PY10 cuenta con mayor porcentaje de materia orgánica y una proporción muy pequeña de plásticos. Esta muestra se utilizó para conocer algunas propiedades térmicas del licor obtenido sin separación previa, determinando así los parámetros mínimos obtenidos en una deficiente separación.

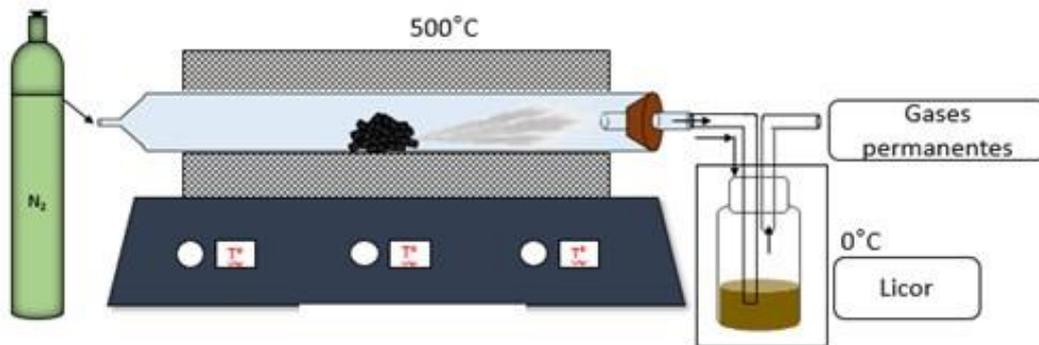


Figura 4. Equipo de pirólisis de plásticos de desecho.

En el reactor horizontal se pirolizó aproximadamente 1 kg de cada mezcla a 500 °C durante media hora. La entrada del reactor se conectó a un flujo de nitrógeno de 5 ml/min, para evitar la presencia de aire en el sistema. La salida del reactor se conecta con un condensador a 0°C para colectar los vapores condensables que se producen en la pirólisis de plástico. Los gases permanentes también producidos en la pirólisis se liberan al exterior. En la Fig. 4 se presenta un esquema de dicho reactor. Luego de la pirólisis se pesaron los productos sólido y líquido que fueron restados a la masa inicial, calculándose por diferencia la cantidad de gases generados. Así, se calcularon los rendimientos a los tres productos.

### 2.3 Licor de pirólisis

#### 2.3.1 Análisis cromatográfico

El licor de pirólisis de las muestras PY80 y PY10 fue analizado por cromatografía gaseosa en un equipo Perkin Elmer Claurus, provisto con una columna Eyclite y de un detector FID acoplado a detección por masas (GC/MS).

#### 2.3.2 Propiedades térmicas

Los puntos calientes (inflamación y combustión) fueron medidos por el método de Vaso Abierto o Cleveland según normas IRAM – IAP A6555, ASTM D92-12. La viscosidad fue determinada mediante un viscosímetro Saybolt Universal [SSU] a 100 y 210°F según normas IRAM 6544, ASTM D88-38. El poder calorífico superior PCS e inferior PCI se midió mediante el método adiabático con una bomba calorimétrica de Gallenkamp.

### 2.4 Sólido carbonoso

El sólido carbonoso de la muestra PY80 fue caracterizado mediante difracción de rayos X en un equipo Malvern-Panalytical-Empyrean III. Además, se determinó la posible existencia de Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos, PAHs, por su por su significación medioambiental. Los PAHs fueron medidos según el método EPA 8270C – para compuestos orgánicos semivolátiles por cromatografía gaseosa acoplada a masas (GC-MS).

### 2.5 Ingeniería conceptual de planta pirólisis piloto

#### 2.5.1 Dimensiones del reactor

Al ser un reactor piloto, se impuso como condición inicial un volumen aproximado de 280 litros, con el objetivo de ensayar la viabilidad de un proyecto de mayor escala que permita el tratamiento de la totalidad de residuos plásticos.

La disposición horizontal con una leve inclinación se plantea para aumentar la superficie de contacto de los gases del quemador con el reactor, y facilitar la carga y descarga del reactor (ver Fig. 5 y 6).

La forma cilíndrica del reactor maximiza la relación entre el área de transferencia de calor respecto al volumen contenido. Bajo la misma premisa se busca la mayor relación largo/diámetro para lograr el volumen buscado sin comprometer estructuralmente el reactor.



Figura 5. Maqueta del reactor y componentes de la planta de pirolisis piloto

### 2.5.2 Material y espesor del reactor

El cálculo y diseño se realizó bajo la Norma ASME VIII División 1. Por la condición de temperatura de trabajo se selecciona para la construcción del reactor placas ASTM A-240 gr. 304. Este material presenta a su vez una muy buena resistencia a la corrosión por temperatura, y frente a los ácidos que pueden ser generados por la presencia de material orgánico en el plástico de residuo. El espesor se calcula bajo la misma norma, con una presión máxima de trabajo de 1 Bar. Dicha presión se alcanzaría sólo en el caso de taponamiento del condensador, por lo que se protege al equipo con una válvula de alivio, la cual en condiciones normales se encuentra aislada del fluido por un disco de ruptura.

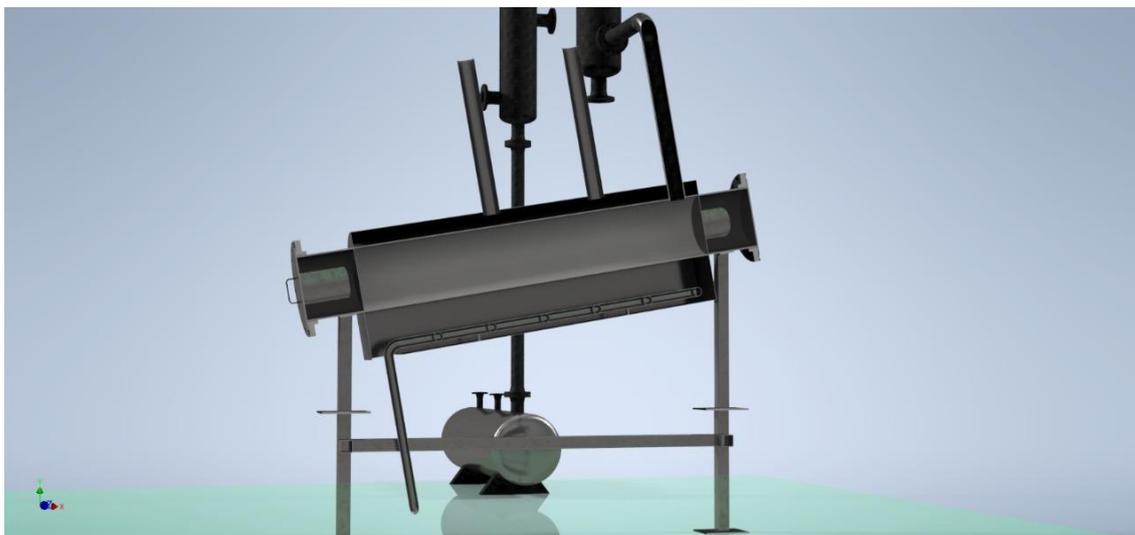


Figura 6. Corte del reactor de pirolisis piloto

### 2.5.3 Consumo energético

Para determinar el calor consumido por el proceso es necesario establecer la masa de plásticos dentro del reactor. La misma dependerá de la densidad de chipeado que se logre previo a la carga. En ensayos previos con polietileno de alta densidad (HDPE) se logró una densidad máxima de 0,6 kg/litro. Para una capacidad del reactor de 280 litros la capacidad máxima sería de 168 kilogramos. Utilizando las propiedades térmicas del HDPE, el calor necesario para alcanzar la temperatura de reacción y fundirlo es de 1,046 MJ/kg [14]. A esto se le suma el calor necesario para que se produzca la reacción endotérmica de pirólisis. Se determinó mediante ensayos de laboratorio para HDPE que el calor necesario para llevar la muestra a temperatura de reacción, fundirla, y que se produzca la reacción, es de 3 MJ/kg.

### 2.5.4 Transferencia de calor - Tamaño quemador

Parte de la dificultad de realizar pirólisis de plásticos a gran escala es la baja conductividad térmica de los mismos. Es por eso que el diseño se plantea bajo la premisa de maximizar la superficie de transferencia de calor. Con las dimensiones planteadas, y según las propiedades térmicas del polietileno de alta densidad (HDPE) [14], se determina que el tiempo de calentamiento para lograr una temperatura homogénea de 500°C es de aproximadamente 3 horas. Este cálculo está basado en la transferencia de calor por conductividad del HDPE de una cierta densidad, por lo que no se tiene en cuenta la mejora de transferencia que sucede cuando comienza la pirólisis debido a la liberación de vapores y el consecuente movimiento dentro del reactor. Es por esto que se está trabajando en un reactor escala banco que permita trazar las curvas temperatura-tiempo-distancia durante todo el proceso. Con el consumo energético y el tiempo estimado del proceso es que se selecciona el quemador.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los rendimientos obtenidos de la muestra PY80 a licor, gas y sólido carbonoso fueron de 45, 32 y 23% en peso respectivamente. El rendimiento a carbón es relativamente elevado, por comparación de los resultados obtenidos en otras experiencias realizadas por el grupo con residuos de polietileno de alta densidad (HDPE) o resultados obtenidos en la literatura para mezclas de plásticos. Este hecho se debe a que la mezcla pirolizada contiene residuos orgánicos (papel, restos de vegetales) que conducen a un mayor rendimiento a la fase sólida a diferencia de las mezclas que contienen sólo plásticos.

### 3.1 Análisis de las fracciones obtenidas

#### 3.1.1 Licor de pirólisis

La caracterización del licor de la muestra PY80 realizada por CG indicó la presencia de algunos compuestos, identificándose varios hidrocarburos C5 a C8, estireno, tolueno, junto con compuestos oxigenados, como por ejemplo furfural e hidroxiacetonas, entre otros. En la Fig. 8 se observa un cromatograma correspondiente a licor de pirólisis, donde se aprecia la gran cantidad de compuestos formados. En forma muy general podría decirse que los hidrocarburos provienen de la pirólisis de los diferentes plásticos, ya que estos mismos compuestos son detectados en los licores provenientes de pirólisis de plásticos [15]. Por otra parte, los compuestos oxigenados se originan en la pirólisis de los restos orgánicos. Se determinó que esté licor es miscible en fuel-oil (específicamente en el que se emplea en la empresa termoeléctrica de la región de Bahía Blanca) hasta en un 10 % en volumen. Para el caso del licor PY10 (ver cromatograma en Fig. 10), los compuestos provenientes de los residuos orgánicos presentan mayor concentración que los que provienen de los plásticos.



Figura 7. Líquido de pirólisis muestra PY80

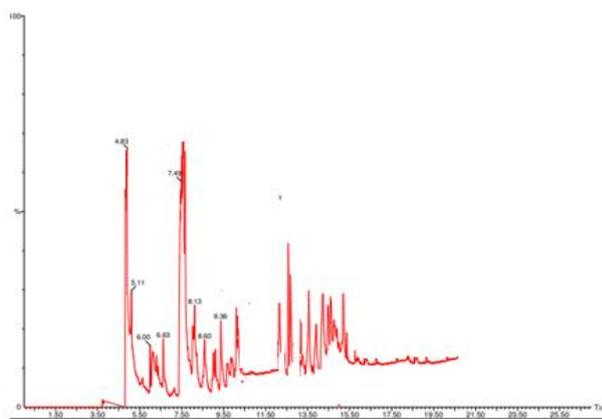


Figura 8. Cromatograma del licor de pirólisis de residuos plásticos con separación (PY80)



Figura 9. Líquido de pirólisis muestra PY10

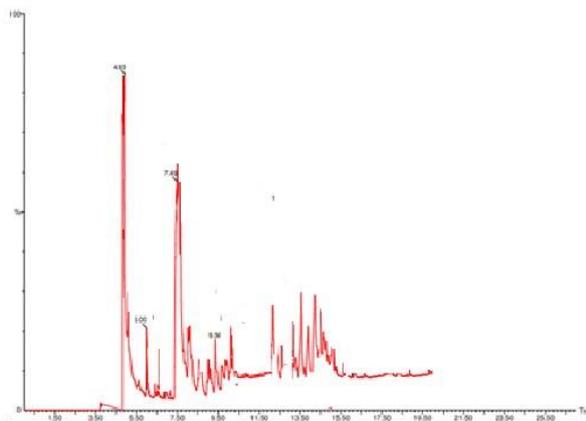


Figura 10. Cromatograma del licor de pirólisis de residuos sin separación (Py10)

### Muestra PY10

#### Viscosidad Saybolt Universal [SSU]

Viscosidad 100 °F (37,7 °C) [segundos]	60,7
Viscosidad 210 °F (98,8 °C) [segundos]	34,8

#### Puntos calientes método de vaso abierto o Cleveland

Temperatura Inflamación (°C)	92
Temperatura Combustión (°C)	114

#### Poder calorífico superior e inferior (Gallenkamp)

PCS (Kcal/kg)	5336
PCI (Kcal/kg)	5075

Tabla 1. Viscosidad, Puntos calientes y Poderes caloríficos de la muestra PY10

### Muestra PY80

#### Viscosidad Saybolt Universal [SSU]

Viscosidad 100 °F (37,7 °C) [segundos]	43,2
Viscosidad 210 °F (98,8 °C) [segundos]	31,8

#### Puntos calientes método de vaso abierto o Cleveland

Temperatura Inflamación (°C)	54
Temperatura Combustión (°C)	66

#### Poder calorífico superior e inferior (Gallenkamp)

PCS (Kcal/kg)	6550
PCI (Kcal/kg)	6214

Tabla 2. Viscosidad, Puntos calientes y Poderes caloríficos de la muestra PY80

Los valores de viscosidad de ambos licores al igual que los valores de poder calorífico son relativamente bajos con respecto a combustibles líquidos tipo fuel oil medio o pesado. Probablemente la presencia de otros materiales diferentes al plástico la mezcla a pirolizar sea el origen de los valores bajos. Por esta razón los líquidos PY80 y PY10 se proponen para formar

blends con combustibles líquidos y no podrían aplicarse puros para reemplazar combustibles fósiles.

### 3.1.2 Sólido carbonoso

El carbón producido (ver Fig. 11) presenta una densidad de 2,1 Kg/L. Se observan junto con un sólido finamente dividido de color oscuro, pequeñas láminas de aluminio que provendría los envases tetrabrick. Se llevó a cabo una análisis por XRD del material carbonoso y el espectro mostró la presencia de especies de carbono amorfas y picos correspondientes a compuestos de calcio y magnesio (ver Fig. 12). La presencia de PHAs fue descartada mediante el análisis por cromatografía gaseosa del sólido carbonoso. Es importante señalar que dichos compuestos son altamente tóxicos y su presencia en el carbón tornaría el empleo o disposición de material peligrosa.



Figura 11. Imagen del carbón de pirólisis

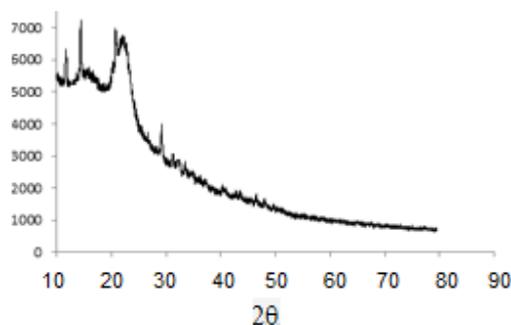


Figura 12. Espectro DRX del carbón

### 3.1.3 Gas

El gas generado no fue analizado, aunque su composición química puede estimarse a partir del análisis del licor. El gas presentaría, al igual que el licor compuesto, oxigenados e hidrocarburos de bajo peso molecular. De esta forma su poder calorífico podría asimilarse al de un gas pobre.

### 3.2 Análisis energético

Asumiendo conservadoramente que el gas generado tiene un 20% del poder calorífico inferior del gas natural en Argentina (53950 kJ/kg [16]), de la fracción de gas obtenida (32%) se podrían obtener 3,45 MJ por cada kg de residuo pirolizado. Este valor excede el necesario para completar el proceso, por lo que se estima que el aporte de energía externo será necesario sólo para iniciar la reacción, y a partir de este punto el proceso se vuelve autosustentable.

## 4. CONCLUSIONES.

Basándose en los resultados comentados en cuanto a la caracterización de los productos del reciclado químico de plásticos no reciclables se concluye:

(i) el licor presenta propiedades que permiten que sea empleado como un combustible líquido. Además, podría conformar blends con fuel-oil. (ii) el gas podría emplearse para generación de energía térmica, dado que presenta un poder calorífico aprovechable (iii) el carbón es un material a disponer en rellenos sanitarios o en basureros, destacándose que se logra una elevada densificación del residuo plástico y por lo tanto se contribuye a bajar la carga del vaciadero.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] <https://ecoplas.org.ar/indice-de-reciclado/>.
- [2] <https://elmediadortv.com.ar/contenido/861/vergonzoso-asi-esta-el-basural-de-la-capital-santacruzana-por-dentro#&gid=1&pid=1>
- [3] McNaught, A. D., & Wilkinson, A. (1997). Compendium of Chemical Terminology, International Union of Pure and Applied Chemistry. *Zürich*.
- [4] Obeid, F., & Janajreh, I. (2014). High density polyethylene pyrolysis: review and progress. *ICREGA'14-Renewable Energy: Generation and Applications*, 585-595.
- [5] Balseca-Sampedro, O. F., Aquino-Arroba, S. M., Chela-Hinojosa, S. W., & Figueroa-Moreno, J. D. (2021). Diseño de un prototipo de reactor de pirólisis térmica para la descomposición

y aprovechamiento de residuos plásticos fabricados a partir de: PP, PE, Y PS. Polo del Conocimiento, 6(5), 394-425.

[6] Férrez, M. D. R. H. (2007). Evaluación de la pirólisis térmica y catalítica de polietileno en lecho fluidizado como técnica de reciclado. Influencia de las variables sobre los productos generados (Doctoral dissertation, Universitat d'Alacant-Universidad de Alicante).

[7]. A. Karaduman, E. H. Simsek, B. Çiçek, A. Y. Bilgesü, (2001). "Flash pyrolysis of polystyrene wastes in a free-fall reactor under vacuum", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 60, 179-186

[8] Brown, L. J., Collard, F. X., & Görgens, J. (2019). Fast pyrolysis of fibre waste contaminated with plastic for use as fuel products. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 138, 261-269.

[9]. C-G. Lee, Y-J. Cho, P-S. Song, Y. Kang, J-S. Kim, M-J. Choi, (2003). "Effect of temperature distribution on the catalytic pyrolysis of polystyrene waste in a fluidized-bed reactor", Catalysis Today, 79-80, 453-464

[10]. Y. San You, J-H Kim, G. Seo, (2000). "Liquid-phase catalytic degradation of polyethylene wax over MFI zeolites with different particles sizes", Polymer Degradation and Stability, 70, 365-371.

[11]. Y. San You, J-H Kim, G. Seo, (2001). "Liquid-phase catalytic degradation of polyethylene wax over silica-modified zeolite catalysts", Polymer Degradation and Stability, 72, 329-336.

[12]. J. M. Arandes, J. Ereña, M. J. Azkoiti, M. Olazar, J. Bilbao, (2003). "Thermal recycling of polystyrene and polystyrene-butadiene dissolved in a light cycle oil", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 70, 747-760.

[13]. Y. Sakata, Md. Azhar Uddin, A. Muto, (1999). "Degradation of polyethylene and polypropylene into fuel oil by using solid acid and non-acid catalysts", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 51, 135-155.

[14] Woo, M. W., Wong, P., Tang, Y., Triacca, V., Gloor, P. E., Hrymak, A. N., & Hamielec, A. E. (1995). Melting behavior and thermal properties of high density polyethylene. Polymer Engineering & Science, 35(2), 151-156.

[15] Angyal, A., Bartha, L, Valkai, I. (2009) Fuels by pyrolysis of waste plastics from agricultural and packaging sectors in a pilot scale reactor. Fuel Processing Technology 90, 1032–1040.

[16] [http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion\\_del\\_mercado/publicaciones/energia\\_en\\_gral/balances\\_2016/documento-metodologico-balance-energetico-nacional-final-2015.pdf](http://www.energia.gob.ar/contenidos/archivos/Reorganizacion/informacion_del_mercado/publicaciones/energia_en_gral/balances_2016/documento-metodologico-balance-energetico-nacional-final-2015.pdf)

### **Agradecimientos**

Agradecer al profesor Ing. Julio Donati y el equipo técnico del Laboratorio de Máquinas Primarias (departamento de ingeniería - UNS) Walter Thögersen y Nicolas García por la ayuda en la determinación de los puntos calientes, poder calorífico y viscosidad. También a la Tec. Celeste Ortiz del Municipio de Río Gallegos que aportó datos sobre los desechos y el vertedero.

## Mejoras en la eficiencia energética de una vivienda modular

Herlein, Cristian<sup>a</sup>, Ratazzi, Alejandro<sup>b</sup>, Moro, Juan M.<sup>b</sup>, Romina Meneses<sup>b</sup>, Serralunga, Martín<sup>c</sup>.

<sup>a</sup> Alumno Ingeniería Civil. Universidad Nacional del Sur, 8000, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>b</sup> Instituto de Ingeniería, Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, 8000, Bahía Blanca, Argentina.

<sup>c</sup> Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, 8000, Bahía Blanca, Argentina.

[juan.moro@uns.edu.ar](mailto:juan.moro@uns.edu.ar)

### RESUMEN.

En este estudio de caso se analizó un proyecto de construcciones modulares con muros de hormigón, realizadas mediante encofrados metálicos, desarrollado en la ciudad de Adolfo Gonzales Chaves. Se buscó optimizar la relación costo / beneficio de la aislación de la envolvente para este tipo particular de construcciones. En el análisis de diseño de edificios sustentables es fundamental el uso de herramientas de simulación energética, por ello, el estudio se realizó mediante el uso de los softwares EnergyPlus y OpenStudio, con metodologías muy similares.

Se simularon las distintas alternativas de la vivienda, con creciente grado de aislación en su envolvente y cada una fue comparada con el proyecto original y con su predecesora, para así, ponderar la viabilidad de las mismas en relación con su relación costo beneficio.

Los resultados muestran que incluso la adición de un bajo grado de aislación en la envolvente edilicia implicaría importantes ahorros en los consumos energéticos de acondicionamiento de la vivienda, siguiendo de este modo los lineamientos de las políticas de ahorro energético implementadas en el país durante los últimos años.

**Palabras Claves:** Eficiencia Energética, Simulación Energética, Envolvente edilicia.

**Área Temática:** Aspectos económicos y ambientales

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores

## INTRODUCCIÓN

El sector residencial, comercial y público en la Argentina consume el 26% de la energía primaria del país (Figura 1), principalmente en forma de gas y electricidad. Del consumo de gas, más de la mitad es destinado a la calefacción en épocas frías [1]. Además, la industria de la construcción, a lo largo de la historia, ha tenido una evolución lenta, pero en los últimos años la velocidad de cambio ha sido mucho mayor, incorporándose requerimientos ambientales. Por todo esto, es importante considerar la utilización de modelos de simulación energética para optimizar el consumo energético y de materiales en las construcciones.

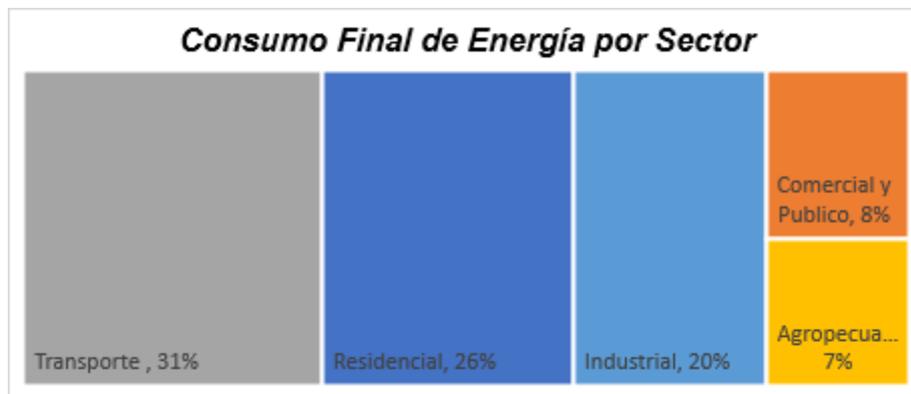


Figura 1: consumo final de energía por fuentes y sectores, Balance energético Nacional 2017, Secretaría de Gobierno de energía.

Además, en el plan de ahorro sectorial y por medidas de eficiencia energética (Figura 2), planteado para los años venideros hasta el 2030, se propone que el 50% de las mejoras para el ahorro energético del país debería producirse en el sector residencial y público. La envolvente edilicia es uno de los tres factores de ahorro predominantes en este sector.

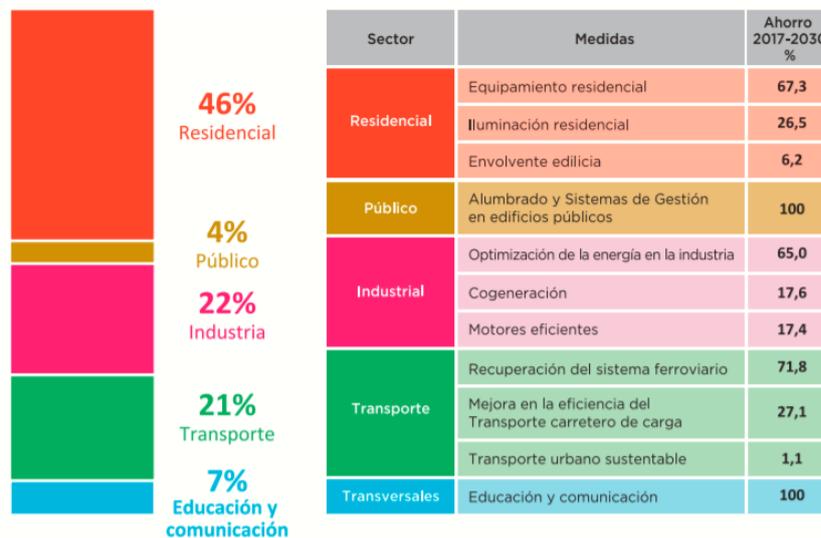


Figura 2: Ahorro sectorial y por medidas de eficiencia energética. Años 2018-2030

El proyecto analizado es una construcción modular de hormigón armado (Figura 3), confeccionada mediante un encofrado metálico, formando un muro de 7 cm de espesor. Además, la construcción se completa con una cubierta de chapa montada sobre los muros y con una carga materializada con placas cementicias para terminar el cerramiento vertical necesario de forma tal de cubrir la pendiente de la cubierta. Bajo la cubierta, al nivel que finalizan los muros de hormigón cuenta con un cielorraso independiente de placas de yeso. Cada módulo cuenta con una superficie de 32 m<sup>2</sup> y en este caso se estudiaron dos módulos colocados en forma contigua, generando una superficie cubierta total de 64 m<sup>2</sup>.

Sobre esta construcción base se agregaron paulatinamente mayores niveles de aislación en la envolvente, realizando simulaciones en cada instancia, para así poder comparar los resultados con los costos derivados del mayor grado de aislación.

Las herramientas computacionales de simulación energética facilitan y mejoran el análisis del comportamiento térmico y energético de los edificios. La ejecución de modelos computacionales

confiables, implica la necesidad de que el modelo esté correctamente calibrado [2]. Uno de los programas más confiables es EnergyPlus [3], desarrollado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, el cual fue utilizado en numerosas investigaciones relacionadas con esta temática [4-6].

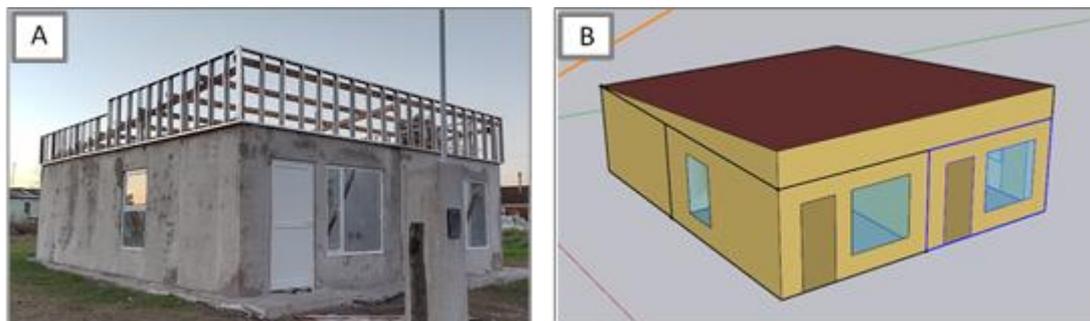


Figura 3: A) Vivienda real en construcción; B) Vivienda modelada en SketchUp – Energy Plus.

## 1. METODOLOGÍA.

Para el análisis de la eficiencia energética de la construcción en estudio, se optó por un modelado matemático por medio del software EnergyPlus y la utilización de otros dos softwares secundarios que cumplen la función de interfaz gráfica del mismo (SketchUp y OpenStudio). Estos programas son de código abierto, es decir libres de cualquier licencia.

El EnergyPlus es un motor de cálculo que no tiene interfaz amigable con el usuario. Sus entradas y salidas son de texto simple y su objetivo es hacer de núcleo de cálculo a una interfaz secundaria, de modo de independizarse de la parte gráfica y concentrar los recursos en la mejora de los algoritmos para mantenerse a la altura de la demanda del mercado y de los profesionales.

Como interfaz secundaria se optó por un plugin de OpenStudio para SketchUp y la misma aplicación OpenStudio. Por su parte, SketchUp permite modelar la geometría 3D de la envolvente de la construcción a simular y, con ayuda del plugin, se definen los distintos espacios y superficies. En concreto, la aplicación OpenStudio permite ingresar todos los datos de entrada necesarios para la descripción del edificio, y con ellos crear el archivo IDF (Input Data File) utilizado por EnergyPlus para el cálculo. Estos datos son: climáticos, materiales y cerramientos, acristalamiento, horarios, cargas internas, consignas, ventilación, iluminación e instalaciones. Estos valores típicos pueden modificarse o cambiarse, para así adaptar el modelo a las condiciones reales de la construcción.

### 1.1. Características y datos: OpenStudio

Esta aplicación permite definir para cada construcción un tipo de espacio, de manera que asigna a dicho espacio valores típicos definidos. A continuación destacamos los datos asignados a la construcción analizada.

#### 1.1.1. Archivo climático y días de diseño

Se debe cargar un archivo climático en formato EPW (Energy Plus Weather) que contenga la información de un año meteorológico tipo, es decir, temperatura de bulbo seco y húmedo, humedad, velocidad y dirección del viento, radiación solar, nubosidad, etc., para cada hora de un año tipo.

Esta información se descargó del sitio web “<http://climate.onebuilding.org>”, la misma consiste en datos en formato TMY (Typical Meteorological Year) transformados a formato EPW (Energy Plus Weather). Se utilizaron datos de las ciudades más cercanas disponibles en el sitio web: en este caso (Adolfo Gonzales Chaves) se tomaron datos de Tres Arroyos. Los archivos recopilan información meteorológica con frecuencia horaria entre los años 2018 y 2021.

#### 1.1.2. Calendarios

En esta sección es necesario definir los perfiles ocupacionales del edificio, para cada tipo de espacio, a modo de calcular cargas derivadas del uso y definir las temperaturas interiores del termostato. En el modelo se consideraron temperaturas de termostato mínimas de 21°C y máximas de 24°C durante el periodo estudiado.

### 1.1.3. Materiales y construcciones.

En la sección “materiales” se definen en realidad las capas que luego compondrán las construcciones de la envolvente como muros, pisos, techos, etc. Cada capa queda definida por su espesor en metros y las características del material que la componen: conductividad [W/m\*K], densidad [kg/m<sup>3</sup>], calor específico [J/kg\*K] y absorptancias térmica, solar y visible [adimensionales] Las características de los materiales fueron obtenidas de la Tabla 1 de Conductividades, Transmitancias y Resistencias Térmicas de la norma IRAM 11601 [7].

Tabla 1: Listado de materiales utilizados y sus distintas propiedades

Material	Conductividad	Densidad	Calor específico
Revoque interior	0.93	1900	1000
Revoque exterior	1.16	1900	1000
Polietileno expandido	0.035	20	1200
Alisado concreto 1.5cm	1.4	2200	1000
Hormigón Armado	2.3	2400	1000
Carpeta concreto	1.3	1800	1000
Chapa	58	7800	500
Madera machimbrada 3/4	0.11	600	700

Las construcciones se definen agrupando uno o más materiales (capas) de manera de formar los distintos paquetes que componen la envolvente edilicia.

### 1.1.4. Aberturas: *Frame and divider*

Los marcos de las ventanas no se cargan como una construcción, sino en una sección aparte denominada “frame and divider”. De este modo, se tiene en cuenta el puente térmico del marco y se resta, a la superficie vidriada, la superficie de este y de los divisores verticales y horizontales de los cristales. Las características de estos se obtuvieron de fichas técnicas de proveedores o de librerías online incluidas en el software.

### 1.1.5. Cargas

En este apartado deben definirse las cargas térmicas interiores, derivadas del uso y actividades desarrolladas en el espacio, para cada uno de los distintos espacios. Las más usuales y por lo tanto contempladas en el modelo son las derivadas de la iluminación, del uso de equipos eléctricos, debido a infiltraciones de aire desde el exterior y el calor emitido por los ocupantes del recinto. Para todos ellos se tomaron valores por defecto contemplados por el Instituto Nacional Estadounidense de Estándares (ANSI) para cada tipo de recinto.

### 1.1.6. Superficies y Subsuperficies

Para cada superficie y subsuperficie se debe indicar su “construcción”, tipo de superficie, condición de borde exterior y si está o no expuesta al viento y al sol.

Con respecto a esto, es importante resaltar que la condición de borde del suelo es la temperatura a la que se encuentra el terreno natural. Dicho cálculo se debe realizar a partir de iteraciones, ya que se ve afectado por la temperatura de la construcción con la cual está en contacto. Además, es necesario utilizar algún tipo de software auxiliar que soporte cálculos de transmisiones de calor en tres dimensiones (por la geometría de pisos, muros y cubiertas, el software EnergyPlus simplifica el problema y utiliza algoritmos de cálculo en una dimensión, que presentarían errores significativos en el cálculo de las temperaturas del terreno por la geometría de este) [8].

Dicho cálculo se realizó mediante la herramienta auxiliar de EnergyPlus denominada Slab. En este software se ingresan las propiedades físicas del suelo, las temperaturas medias mensuales interiores sobre la losa, las propiedades físicas de la platea, penetración de la platea en el suelo y si cuenta o no con aislación y las características de ésta.

Para el cálculo, el software convierte la superficie de la platea en una platea cuadrada equivalente mediante la relación Área / perímetro de ésta. Además, propone un prisma de suelo de dimensiones fijadas por el usuario con condición de borde adiabática en el cual se encuentra inmersa la losa.

### 1.1.7. Zona térmica

En este ítem se define el tipo de equipo utilizado para el acondicionamiento de los ambientes o zonas térmicas, siendo las características de éste dimensionadas por el programa. Dichos equipos no son el interés de este estudio. Por ello, se simuló en modo Ideal Loads, de manera que el

software lleva los distintos habitáculos a las temperaturas deseadas por el termostato y calcula las cargas de refrigeración y calefacción necesarias para ello.

## 2. MODELOS DE CÁLCULO.

En primer lugar, se modeló la construcción tal cual fue proyectada para, mediante un estudio de la misma, proponer distintas soluciones que puedan mejorar su eficiencia térmica, sin provocar grandes modificaciones ni excesivos gastos adicionales. En base a esto, se modelaron alternativas con distinto grado de aislación en sus envolventes para medir su impacto respecto al modelo original y determinar así si eran o no viables.

- a) Modelo base: el proyecto original, muros de 7,5cm de hormigón armado y cubierta de chapa con una aislación de 1cm de espesor sobre machimbrado de 2cm. Cielorraso independiente de placa de yeso. Aberturas de aluminio con ruptura de puente térmico y acristalamiento simple de vidrio flotado de 5mm.
- b) 2cm EPS en muros: se simuló la colocación de una placa de 2cm de EPS revocada en el exterior de los muros.
- c) 5cm EPS en muros: ídem anterior.
- d) 2cm EPS en muros + 5cm celulosa en desván: además de la los 2cm de EPS en los muros se sumó una aislación de 5cm de espesor de celulosa suelta en el desván sobre el cielorraso.
- e) 5cm EPS en muros + 5cm celulosa en desván: ídem anterior
- f) 5cm EPS en muros + 10cm celulosa en desván: ídem anterior
- g) DVH: además de los 5cm de EPS y los 10cm de celulosa, en la simulación se reemplazó el acristalamiento simple por doble cristales flotados de 5mm de espesor con una cámara de aire de 12mm entre ellos.
- h) Aberturas en PVC: en adición a las modificaciones anteriores, se reemplazaron las aberturas de aluminio por aberturas de PVC.
- i) Parasoles: en el modelo se incorporaron parasoles horizontales sobre las ventanas orientadas al noreste/noroeste y parasoles verticales sobre las ventanas orientadas al sureste/suroeste, sumado a las medidas de aislación anteriores.

## 3. RESULTADOS.

Analizando la simulación del modelo base, se puede observar que el consumo debido al acondicionamiento representa el 76,5% del consumo energético total del edificio (20.383kWh), de los cuáles el 78% corresponden a calefacción y el 22% restante a refrigeración (Figura 4).

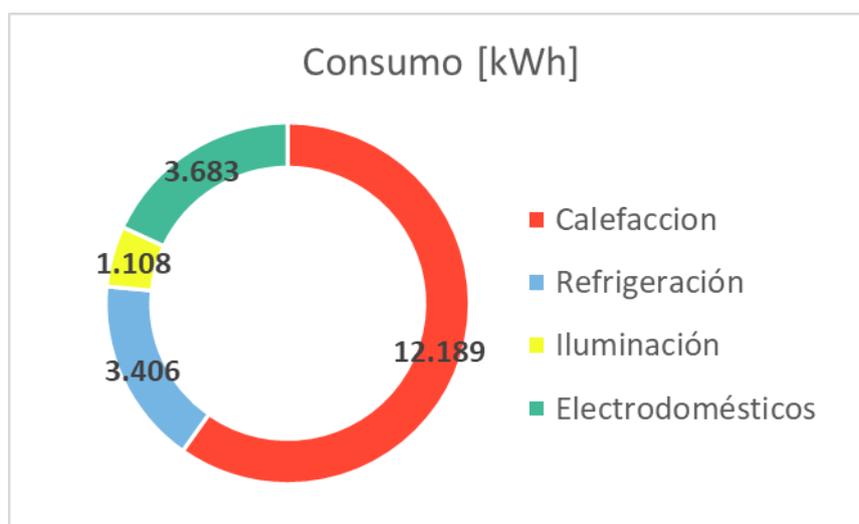


Figura 4: consumo energético del modelo base

En la Figura 5 se comparan los resultados de las alternativas planteadas con respecto al consumo del proyecto original. En la Figura 6 se compara la variación en el consumo energético de los modelos respecto a cada una de sus alternativas anteriores.

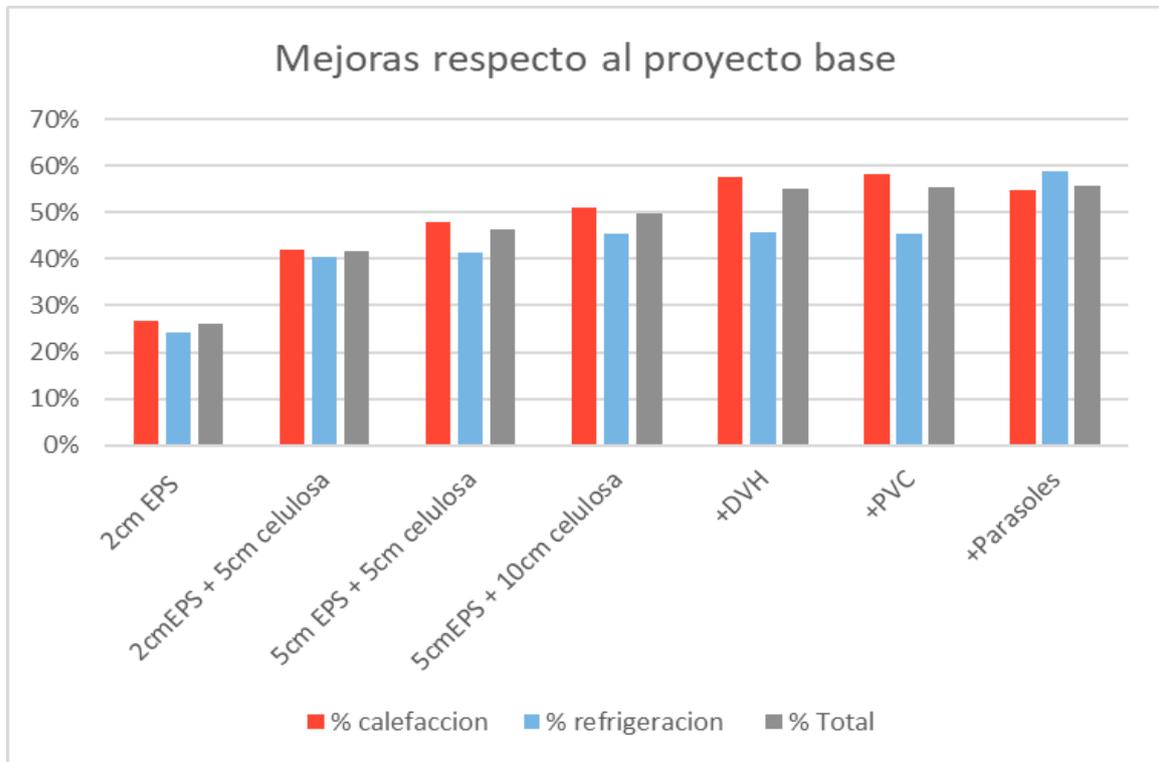


Figura 5: Ahorro de las distintas alternativas propuestas, respecto al proyecto original

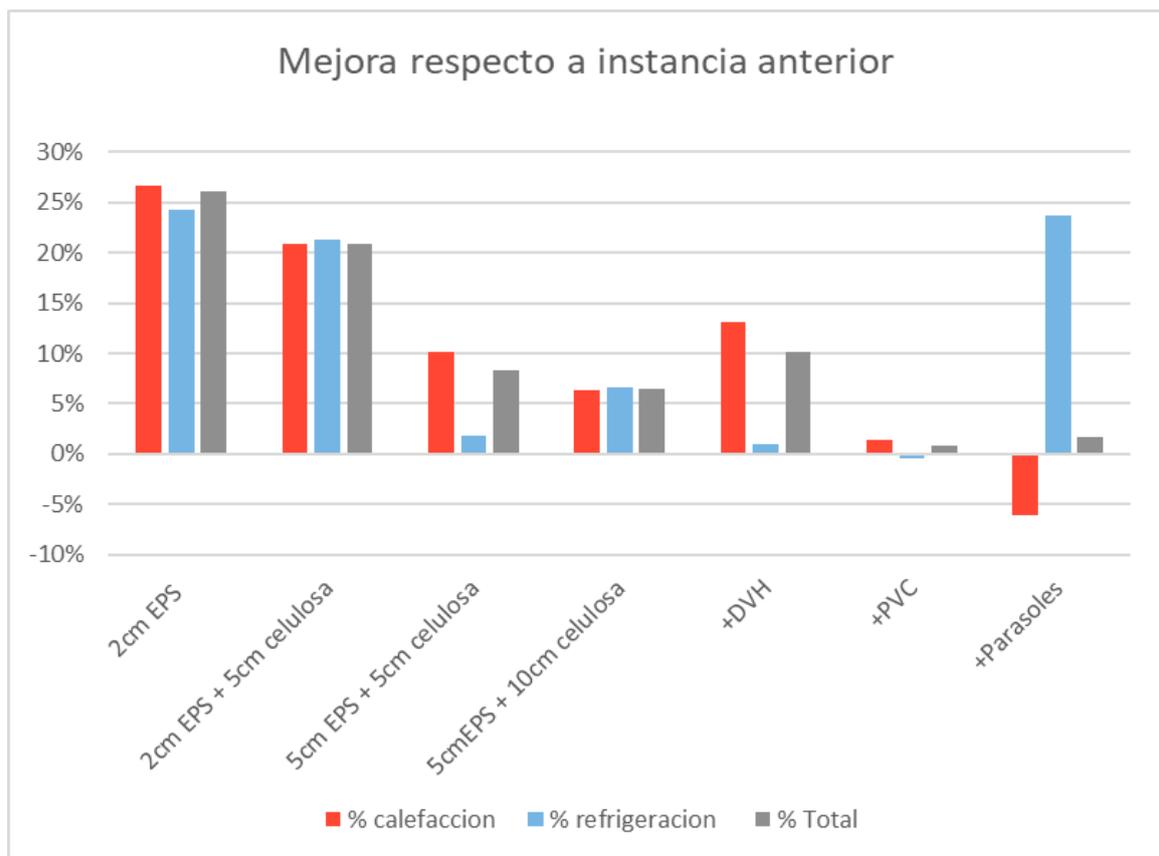


Figura 6: Variación de consumo respecto al modelo anterior

En ellas se puede observar que el ahorro energético no aumenta linealmente con el grado de aislación, si no que decrece a medida que se alcanzan mayores niveles de aislación. En el modelo “2cm EPS + 5cm celulosa” se observa un ahorro de un 40% mientras que en el modelo “5cm EPS + 10cm celulosa” con más del doble de aislación el ahorro es de un 50% respecto al original. De las figuras 8 y 9 también se puede observar que, una vez alcanzado un grado de aislación moderado (2cm de EPS en los muros), el sucesivo aumento de aislación en los mismos no tiene un impacto tan importante en las cargas de refrigeración. Esto no se observa en la aislación de la cubierta, que tiene impactos similares en el consumo por refrigeración y calefacción. Esto podría

deberse al mayor aporte de inercia térmica de la celulosa frente al EPS, al doble acristalamiento o al reemplazo de marcos de aluminio por marcos de PVC y a la mayor incidencia de la energía solar sobre la cubierta respecto a los muros laterales.

El uso de parasoles sobre las ventanas tiene un impacto positivo significativo sobre las cargas de refrigeración (+24%), pero un impacto moderadamente negativo sobre las cargas de calefacción (-6%). Sin embargo, como en el caso de estudio las cargas de calefacción son las predominantes, el efecto total es solo ligeramente positivo (+2%). A pesar del bajo impacto en las cargas totales, podría tener otros beneficios, como un mayor confort o la disminución de los picos de carga en días de intenso calor y consecuentemente la utilización de equipos de acondicionamiento de menor capacidad.

Por último, es destacable el impacto de la utilización vidrios herméticos dobles en el consumo por calefacción. Los mismos permiten contrarrestar el efecto de puente térmico en los acristalamientos, efecto que es más notable una vez alcanzado un buen grado de aislación en el resto de la envolvente. Por otra parte, reemplazar los marcos de aluminio con ruptura de puente térmico por marcos de PVC no tuvo un impacto significativo en la simulación.

Resumiendo, con la adición de niveles de aislación bajos a moderados (2 centímetros de EPS en muros y 5cm de celulosa en desván) se podrían lograr ahorros energéticos de un 42% en las cargas necesarias para aclimatar la vivienda modular de hormigón armado estudiada. Con todas las mejoras modeladas, el nivel de ahorro aumenta a un 56% a expensas de un mayor costo/beneficio.

Sin embargo, estos porcentajes no son completamente representativos: surgen de unidades de energía calórica a suministrar o sustraer a la vivienda para mantener una temperatura de confort. Esto no refleja la energía que en realidad deberán consumir los equipos de aclimatación. Por ejemplo, cargas de refrigeración materializadas con un equipo de aire acondicionado que funciona con electricidad no son comparables a cargas de calefacción, aportadas por equipos a gas, ya sean calefactores, calderas, etc.

Para analizar esto en mayor profundidad se adoptan un enfoque ambiental, utilizado por Energy Star para ranquear la eficiencia de edificios en sus certificaciones, llamado Site to source conversion factor. El mismo busca, mediante la utilización de un coeficiente de conversión, traducir la energía utilizada en el edificio (site energy) en energía primaria (source energy), utilizada para la generación de ésta. Así, este sistema tiene en cuenta las pérdidas ocasionadas en la producción y distribución de los distintos tipos de energía. Por ejemplo, para generar 1kWh de energía eléctrica se deben utilizar más de 2kWh de combustibles fósiles, debido a la baja eficiencia (alrededor de un 40%) de dicho sistema.

Además, más allá del enfoque utilizado, se deben tener en cuenta los rendimientos de los equipos. Esto tiene mayor importancia a la hora de analizar los aires acondicionados que pueden alcanzar rendimientos de alrededor del 300% [9]. Estos equipos conocidos como Heat Pump que pueden extraer 3kWh de calor de un ambiente, utilizando solo 1kWh de energía eléctrica [10].

### **3.1. Fuentes de energía y consumo de energía.**

#### **3.1.1. Cálculo del factor de conversión de la energía eléctrica**

En el año 2020, en Argentina el CEM fue de 1918 kCal/kWh (se consumieron 1918 kCal de combustible por cada kWh de energía eléctrica generado) [11]. Teniendo en cuenta que 1kWh equivale a 860,4 kCal, se consumieron 2,23 kWh por cada kWh generado. Si a esto sumamos pérdidas por transporte y distribución, estimadas en un 7% de la generación [12], obtenemos un factor de conversión de energía fuente en energía eléctrica de 2,39.

Cabe destacar que no se tomaron como referencia los datos de CEM de los años posteriores al 2019, por considerarse años atípicos de consumo energético, productos de las condiciones de pandemia (Covid19).

#### **3.1.2. Cálculo del factor de conversión de cada equipo**

Para obtener la energía primaria consumida por el equipo se debe tener en cuenta no solo la fuente de energía de este, sino también sus rendimientos. Con estos valores, se pueden transformar las cargas ideales obtenidas en el cálculo en cargas reales consumidas por los equipos de aclimatación y, con ellas, hallarse la energía primaria consumida (Tabla 2 y Tabla 3).

Por ejemplo, consideremos condiciones típicas en el país de calefacción mediante gas natural y refrigeración por aire acondicionado. En dicho caso, las mejoras propuestas para el proyecto modeladas supondrían un ahorro del 43% y 56%, para grados de aislación bajos y elevados

respectivamente, en el consumo de energías primaria como gas, carbón, derivados del petróleo, etc.

Tabla 2: coeficientes de conversión de energía consumida en el edificio en energía primaria

Aclimatación	Energía	Site to source	Equipo	Rendimiento equipo	Factor de conversión
Calefacción	Gas Natural	1,05 <sup>11</sup>	Sistema centralizado	90%	<b>1,17</b>
Refrigeración	Electricidad	2,39	Aire acondicionado	300%	<b>0,8</b>

Tabla 3: consumos de energía primaria

Modelo	Aclimatación	Cargas ideales [kWh]	Factor de conversión	Energía primaria [kWh]	Energía primaria total [kWh]	Ahorro [kWh]
Proyecto original	Calefacción	12190	1,17	14260	16980	-
	Refrigeración	3400	0,8	2720		
2cm EPS + 5cm celulosa	Calefacción	7080	1,17	8280	9600	43%
	Refrigeración	2030	0,8	1620		
5cm EPS + 10cm celulosa DVH+PVC + Parasoles	Calefacción	5490	1,17	6420	7540	56%
	Refrigeración	1400	0,8	1120		

#### 4. CONCLUSIONES.

El ahorro energético total de una vivienda no aumenta linealmente con el aumento de la aislación de los muros, debido a que el consumo energético depende también del resto de los componentes de la construcción, por lo tanto, una vez alcanzado cierto grado de aislación de los muros, las mejoras en la aislación no generan ahorros sustanciales.

La aislación en los muros no tiene un impacto tan importante en las cargas de refrigeración para los casos estudiados, mientras que la aislación de la cubierta tiene impactos similares en el consumo por refrigeración y calefacción. Esta particularidad está relacionada con la inercia térmica de los materiales de aislación empleados y de la incidencia de la energía solar sobre las distintas superficies.

El uso de parasoles sobre las ventanas tiene un impacto positivo significativo sobre las cargas de refrigeración pero un impacto moderadamente negativo sobre las cargas de calefacción, esto podría no ser así en el caso que los mismos puedan rebatirse en las estaciones más frías con el consecuente aprovechamiento de la energía solar.

A pesar del bajo impacto en las cargas totales de la utilización de parasoles, podría tener otros beneficios, como un mayor confort o la disminución de los picos de carga en días de intenso calor y consecuentemente la utilización de equipos de acondicionamiento de menor capacidad.

La utilización vidrios herméticos dobles tiene un gran impacto en el consumo por calefacción. Los mismos permiten contrarrestar el efecto de puente térmico en los acristalamientos, efecto que es más notable una vez alcanzado un buen grado de aislación en el resto de la envolvente.

El reemplazo de los marcos de aluminio con ruptura de puente térmico por marcos de PVC no tuvo un impacto significativo en la simulación.

Estudiar la eficiencia energética de un edificio es un trabajo complejo debida a que es inherente a cada caso particular, como es el de las casas modulares de este estudio. En estas condiciones, los softwares de análisis energéticos tienen un rol importante, al permitir modelar en poco tiempo y con pocos recursos las distintas soluciones para determinar la viabilidad de las mismas.

## REFERENCIAS.

- [1] Dirección Nacional de Eficiencia energética. (2019). Informe de Gestión 2016-2019. [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe\\_gestion\\_sector\\_publico.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe_gestion_sector_publico.pdf).
- [2] Chen, Yujiao; Tonga, Zheming y Malkawia (2017), Ali. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. Building and Environment, vol. 122, pp. 386-396.
- [3] U.S. Department of Energy's (DOE) Building Technologies Office (BTO). (27 de septiembre de 2019). EnergyPlus. Obtenido de <https://energyplus.net>.
- [4] Feng, Fan, et al. (2022) Enhancement of phase change material hysteresis model: a case study of modeling building envelope in EnergyPlus. Energy and Buildings: 112511.
- [5] Arenghi, Alberto, Camilla Perra, and Marco Caffi (2021). Simulating and comparing different vertical greenery systems grouped into categories using energyplus. Applied Sciences 11.11: 4802.
- [6] Y Erdem, Sima, and Tanay Sıdkı Uyar. "Design And Analysis of Passive Buildings Using the Software Energy Plus and Open Studio." Tanay Sıdkı Uyar (2021): 144.
- [7] Norma Argentina IRAM 11601:2002. Aislamiento térmico de edificios - Métodos de cálculo. Anexo A, Página 13.
- [8] Silvana F. Larsen. (2011). Modelización de la transferencia de calor al suelo en los programas de simulación térmica de edificios EnergyPlus y SEMEDIF. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 15, Argentina.
- [9] Philip Fairey et al. (2004). Climate Impacts on Heating Seasonal Performance Factor (HSPF) and Seasonal Energy Efficiency Ratio (SEER) for Air Source Heat Pumps. ASHRAE Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning.
- [10] Energy Star Portfolio manager. (Agosto 2019). Technical refence: source energy. Obtenido de <https://portfoliomanager.energystar.gov/pdf/reference/Source%20Energy.pdf>.
- [11] Cammesa, Gerencia de Análisis y Control Global. (2019). Principales variables MEM, Resultado Anual 2018. Obtenido de <http://ageera.com.ar/wp-content/uploads/2019/07/informe-anual-CAMMESA-2018.pdf>.
- [12] Paul Donohoo-Vallet. (Octubre 2016). Accounting Methodology for Source Energy of Non-Combustible Renewable Energy Generation. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Strategic Priorities and Impact Analysis.

## Agradecimientos

Se expresa un especial agradecimiento al Departamento de Ingeniería de la Universidad Nacional del Sur y a la memoria del Dr. Ing. Néstor Ortega, quién fue un impulsor del estudio de estas temáticas.

# CELDA DE COMBUSTIBLE MICROBIANA PARA EL APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE DIGERIDOS

Gatti, Marcela Noemí; Quiñones, Facundo; Cesano, Margarita; Tissier, Jaqueline; Fuentealba, Jael; Díaz, Valeria;

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue. Buenos 1400.  
Neuquén.  
marcela.gatti@fain.uncoma.edu.ar.

## RESUMEN.

La celda de combustible microbiana (CCM) es un dispositivo que permite generar energía eléctrica a partir de la oxidación biológica de residuos carbonosos. En este trabajo se estudia una CCM de una cámara en el cual se emplea un electrodo anódico a base de tela de carbono y un cátodo fabricado a partir de fluoruro de polivinilideno, carbón activado y grafito, empleando un proceso de inversión de fases. La CCM se puso en marcha y operó empleando un alimento sintético y posteriormente un alimento natural, obtenido del efluente de un digestor anaeróbico. Se obtuvo la máxima densidad de potencia de la CCM para el sustrato sintético, la cual fue de  $55 \text{ mW/m}^2$  cuando se empleó una resistencia externa de  $552 \Omega$ . Se impusieron cambios en escalón de la resistencia externa entre un valor alto y bajo de resistencia. El valor alto siempre fue el mismo ( $40000 \Omega$ ), mientras que el bajo y el tiempo de alternancia entre resistencias se sometió a variación. Se observó que la carga liberada por la CCM fue mayor al utilizar bajas resistencias, y cuando se conectó la CCM por largos períodos de tiempo a dicha resistencia. Esto no se pudo observar en el caso de utilizar el digerido. Sin embargo, se observó que la alternancia entre una resistencia elevada y una baja permitió aumentar el porcentaje de eliminación de la demanda química de oxígeno.

**Palabras Claves:** Celda de combustible microbiana, Energía, Depuración, Densidad de potencia, Bacterias electroactivas.

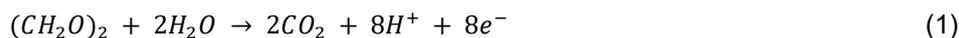
**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigación

## 1. INTRODUCCIÓN

Las Celdas de Combustible Microbianas (CCMs) constituyen una tecnología que permiten generar energía eléctrica a partir de una amplia gama de sustratos solubles orgánicos, como los presentes en aguas residuales con alto y bajo contenido de materia orgánica [1]. De esta manera es posible brindar una solución sustentable a la demanda energética mientras que al mismo tiempo se contribuye en la depuración de aguas residuales.

Las CCMs utilizan bacterias electroactivas como biocatalizadores para generar electricidad a partir de compuestos orgánicos biodegradables. La CCM está formada por dos electrodos conductores inmersos en un medio líquido. El electrodo negativo es el ánodo en el cual las bacterias responsables del proceso crecen formando una biopelícula. El ánodo se encuentra inmerso en una solución a una determinada concentración de sustrato, por ejemplo, acetato de sodio. Las bacterias electroactivas oxidan la materia orgánica y generan protones y electrones, de acuerdo a la siguiente reacción en la cual el sustrato es acético:



Las bacterias transfieren al ánodo los electrones generados y posteriormente estos alcanzan el cátodo a través de un circuito externo. Los protones circulan por el medio líquido para reaccionar en la superficie del cátodo en la reducción del oxígeno [2] como se describe en la siguiente reacción:



Las reacciones (1) y (2) ocurren en la superficie del electrodo anódico y catódico, respectivamente.

Las CCMs pueden resultar de utilidad en el tratamiento del efluente de un digestor anaeróbico (DA), el cual contiene alto contenido de materia orgánica. Existen antecedentes del tratamiento de estas corrientes en una CCM como en [3], y [4] que estudiaron la eliminación de niveles inhibidores de ácidos grasos volátiles proveniente de un digestor anaeróbico mediante oxidación biológica en el ánodo. En [5], el efluente de un fermentador de hidrógeno conectado en serie con un digestor anaeróbico se introdujo en una CCM tubular de cuatro módulos. En este trabajo se estudió un sustrato real formado por pellets de trigo húmedo con alto contenido de demanda química de oxígeno (DQO), alcanzando un porcentaje de eficiencia coulombica de 60% y un porcentaje de eliminación de DQO soluble de 35%, lo cual muestra las ventajas de una implementación conjunta de CCM y DA [6] a partir de un sustrato complejo.

En base a lo expuesto, el objetivo de este trabajo es determinar la densidad de potencia liberada por una CCM, la carga liberada por esta celda cuando se utiliza un alimento sintético y cuando se emplea una corriente digerida, y finalmente determinar la capacidad de eliminación de materia orgánica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. Construcción de las CCMs

En este trabajo se estudió una CCM de una cámara en la cual los electrodos anódico y catódico se encuentran en posición horizontal. La celda es de material plástico con un volumen de cámara de 0,094 L. El ánodo es de tela de carbono de Fuel Cell Store, mientras que el cátodo se fabricó siguiendo un procedimiento de inversión de fases [1]. Para esto se preparó una solución de fluoruro de polivinilideno (PVDF) (534000 Da; SigmaAldrich) al 10% (w/v) a partir de disolver PVDF en polvo en N,N-dimethylacetamide (DMAc). A un volumen de 1,4 mL de solución de PVDF se agregó 420 mg de carbón activado (AC) y 42 mg de grafito. Se mezcló gentilmente y se dispersó dicha mezcla con espátula sobre una malla de acero inoxidable de sección circular de 3,5 cm de diámetro, con un tamaño de hueco de malla de 0,5 mm. Una vez dispersada toda la mezcla se colocó en forma invertida en un recipiente conteniendo agua destilada durante 15 min. Luego se secó a temperatura ambiente durante 8 h. El ánodo se ensambló en un marco de teflón espumado sobre el cual se montó un alambre de cobre para recolectar los electrones liberados por las bacterias electroactivas. La superficie del ánodo fue de 0,0012 m<sup>2</sup> y la del cátodo de 0,0015 m<sup>2</sup>. Ambos electrodos se mantuvieron en forma horizontal, el ánodo en el fondo de la cámara y el cátodo soportado en una malla plástica. Este último se aireó en forma pasiva dado que el polímero PVDF es permeable al oxígeno. La CCM se mantuvo a temperatura de 25 ± 0,5 °C.

En la Figura 1 se muestran los elementos utilizados, en la 1-a se muestra el ánodo de tela carbono, 1-b el cátodo, 1-c el montaje del cátodo en la CCM y en la 1-c la CCM con el medio sintético.

## 2.2. Alimento sintético

El sustrato sintético consistió en una solución de acetato de sodio de 1 g/L disuelta en 50 mM de buffer fosfato ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ , 4,58 g/L;  $\text{Na}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  2,45 g/L;  $\text{NH}_4\text{Cl}$  0,31 g/L;  $\text{KCl}$  0,13 g/L; minerales traza y vitaminas) a  $\text{pH} = 7 \pm 0,5$ .

## 2.3. Digerido

El digestor anaeróbico (DA) produce dos corrientes, una corriente gaseosa rica en metano y dióxido de carbono, y una corriente líquida denominada digerido caracterizada por contener elevado contenido de materia orgánica. El digerido utilizado en este trabajo se muestreó de un DA alimentado con una mezcla de purines de cerdo y orujos de manzana. Se operó en modalidad discontinua durante 45 días y se mantuvo en condiciones mesofílicas ( $35 \pm 0,5$  °C).

## 2.4. Etapas de operación de la CCM

La celda tuvo tres etapas de operación. La primera fue la puesta en marcha en la cual se alimentó la celda con sustrato sintético, cuya fuente principal de carbono fue acetato de sodio. Una vez que alcanzó el estado estacionario se dio inicio a la segunda etapa en la cual se mantuvo el mismo alimento sintético y finalmente se continuó con la tercera etapa en la cual se cambió el alimento sintético por digerido. Todas las etapas se operaron bajo una modalidad de alimentación discontinua, es decir, con un recambio completo del líquido de la cámara. Siempre se operó a una temperatura de  $25 \pm 0,5$  °C.

En la primera etapa, se sembró la CCM con sedimento anaerobio de la orilla del río Negro (Patagonia-Argentina) obtenido de una profundidad de 20 cm. La CCM se operó cíclicamente. En el primer ciclo se agregó residuo anaerobio y sustrato sintético en relación 1:1. En el segundo ciclo y los siguientes se agregó solamente alimento sintético. En cada ciclo se midió el voltaje de circuito abierto (VCA), aproximadamente durante 5 min, y el resto del ciclo se conectó la celda a una resistencia externa ( $R_e$ ) de 1000  $\Omega$ . Cada ciclo se consideró finalizado cuando el voltaje entre los bornes fue menor a 10 mV, dado que al disminuir el voltaje está indicando que el contenido de materia orgánica se ha reducido y es necesario renovar el líquido de la cámara. El recambio del alimento se llevó a cabo al finalizar el ciclo. Se consideró que la celda alcanzó el estado estacionario cuando se obtuvieron valores similares del VCA. En estado estacionario, la duración del ciclo tuvo un valor promedio de 3 d. La primera etapa se extendió por 90 d, para asegurar alcanzar el estado estacionario, y se llevaron a cabo 30 ciclos, dado que la duración del ciclo fue de 3 d, aproximadamente.

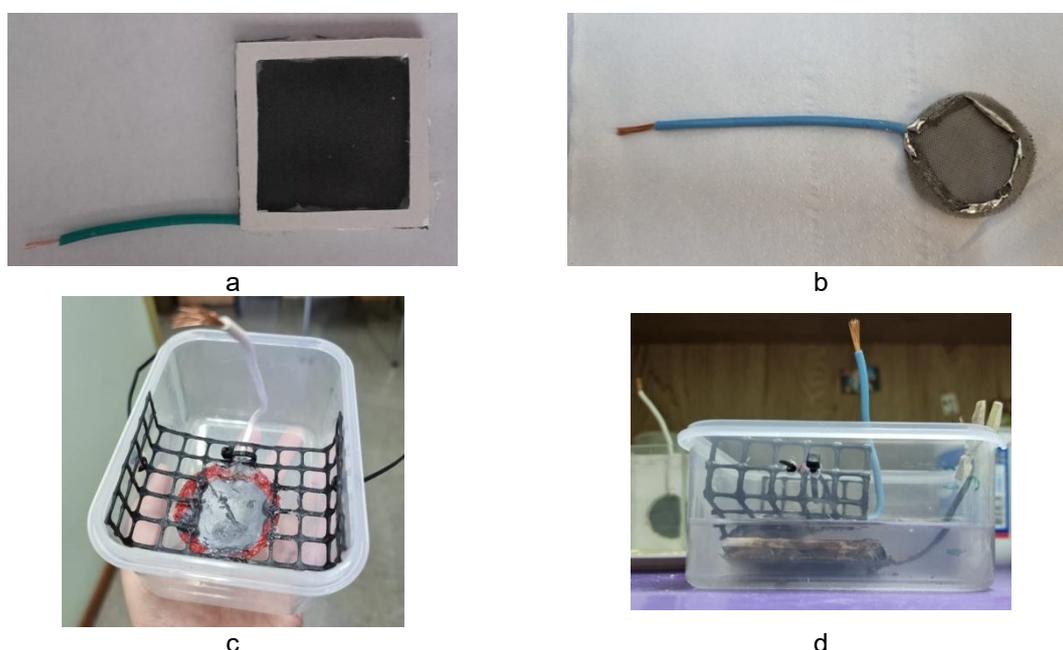


Figura 1 a) Ánodo de tela de carbono, b) cátodo, c) montaje del cátodo en la CCM y d) la CCM con el medio sintético.

En la segunda etapa, se continuó alimentando la CCM con sustrato sintético en modalidad de ciclos. En esta etapa se llevaron a cabo varios experimentos: i) se determinó la curva de densidad de potencia versus densidad de corriente para diferentes resistencias externas, ii) se estudió la capacidad de eliminación de DQO para diferentes tiempos de permanencia del alimento sintético en la cámara considerando el tiempo inicial el momento de recambio de líquido de la cámara y iii) se determinó la carga liberada por la CCM para diferentes resistencias externas. La duración total de la segunda etapa fue de 120 d, y se llevaron a cabo 40 ciclos, aproximadamente.

En la tercera etapa, se empleó como alimento el digerido, manteniendo una modalidad de operación discontinua. En esta etapa se estudió la capacidad de eliminación de DQO y la carga liberada por la CCM cuando se implementan cambios de resistencia entre la aplicada por la placa de medición (40000  $\Omega$ ) y una resistencia baja (173  $\Omega$ ). La duración total de la tercera etapa fue de 120 d y se llevaron a cabo 24 ciclos. El digerido utilizado presentó una mayor concentración de materia orgánica respecto al sustrato sintético, por esta razón cada ciclo tuvo una duración promedio de 5 d. En la Tabla 1 se muestra el detalle de las etapas y los ciclos de cada una. Tener en cuenta que el ciclo se inicia cuando se cambia el líquido de la CCM y se termina cuando el voltaje entre los bornes es inferior a 10 mV, lo que da lugar a un cambio de líquido.

Tabla 1: Duración de las etapas y número de ciclos.

Etapas	Duración (d)	Nº Ciclos	Duración del ciclo (d)	Alimento
Primera	90	30	3	Acetato de Sodio (1 g/L)
Segunda	120	40	3	Acetato de Sodio (1 g/L)
Tercera	120	24	5	Digerido

## 2.5. Curva de densidad de potencia versus densidad de corriente

Esta caracterización se llevó a cabo en la segunda etapa de operación de la CCM, es decir cuando el alimento utilizado fue el sintético. Para caracterizar la CCM se obtuvo la curva de potencia, la cual consiste en graficar la potencia versus la corriente, ambas normalizadas respecto al área del ánodo. De esta curva se obtuvo la máxima densidad de potencia. Para lo cual se siguió el procedimiento que se explica a continuación [2].

- I) se midió el voltaje de circuito abierto (VCA),
- II) se conectó el circuito a una  $R_e$ . Se impusieron cambios de tipo escalón en la  $R_e$  empleando valores en el intervalo 40000 a 138 $\Omega$ . Las resistencias utilizadas en este estudio se dan a continuación: 138, 143, 161, 166, 173, 180, 210, 220, 372, 404, 594, 680, 824, 1000 y 4700  $\Omega$ . Estas resistencias al conectarse quedaron en paralelo con la resistencia de la placa de adquisición la cual es de 40000  $\Omega$ . El voltaje  $V$  entre los bornes se registró cada 10 seg con una plaqueta de adquisición de datos RS232/485 microAXIAL conectada a una computadora. Cada experimento duró aproximadamente 3 h, es decir al inicio del ciclo, dado que este tuvo una duración promedio de 3 d. Para cada resistencia externa utilizada se tomó el dato promedio de voltaje en la zona donde no se observa variación del mismo (extinguídos los transitorios),
- III) con los datos de voltaje obtenidos para cada resistencia se calculó la densidad de corriente como:

$$J = \frac{1000 V}{R_e A_r}, \quad \left( \frac{mA}{m^2} \right) \quad (3)$$

y la densidad de potencia:

$$P = \frac{1000 V^2}{R_e A_r}, \quad \left( \frac{mW}{m^2} \right) \quad (4)$$

$V$  (V),  $R_e$  ( $\Omega$ ),  $A_r$  es el área del electrodo anódico ( $m^2$ ). Se graficó  $P$  versus  $J$ , y de la curva se determinó la densidad de potencia máxima. Del teorema de máxima potencia, cuando la celda libera su máxima potencia, la resistencia externa utilizada es la misma que la resistencia interna ( $R_i$ ).

## 2.6. Carga liberada por la CCM

Para determinar la carga se obtuvo la integral de la corriente mediante la siguiente ecuación:

$$C = \int_0^{t_{final}} I dt, \quad (\text{Coulomb}) \quad (5)$$

En la segunda etapa se determinó la carga liberada por la CCM cuando se alterna la resistencia externa aplicada entre un valor alto (40000  $\Omega$ ) y un valor bajo ( $R_b$ ). Los valores de  $R_b$  fueron: 335, 594, 1000 y 4700  $\Omega$  y los tiempos de alternancia entre las resistencias fueron: 0, 5, 10 y 15 min. Un tiempo nulo indica que la resistencia  $R_b$  se aplicó durante las 3 h que duró el registro.

En la tercera etapa se llevó a cabo un estudio similar empleando como valor bajo  $R_b=173 \Omega$  y los tiempos de alternancia entre las resistencias fueron: 6, 8, 14 y 20 min. En este caso, el registro duró un tiempo promedio de 30 h, dado que en la tercera etapa se utiliza como alimento el digerido que se caracteriza por tener un alto contenido en DQO y una elevada proporción de materia orgánica lentamente biodegradable. El tiempo promedio se refiere a que no se consiguió registrar el mismo tiempo en todos los experimentos, siendo el tiempo mínimo de 20 h y el máximo de 40 h.

## 2.7. Determinaciones analíticas

Se determinó la eliminación de materia orgánica al finalizar cada experimento por el método de la demanda química de oxígeno (DQO) [7]. La determinación se realizó por triplicado.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Puesta en marcha y operación

En esta sección se muestran los resultados obtenidos en la puesta en marcha. Se aprecian en la Figura 2 los datos de VCA recogidos en este período. Aproximadamente, a partir de los 30 d la CCM entró en una fase de comportamiento estable. Luego de medir el voltaje de circuito abierto se cuantificó la corriente que circula a través de una resistencia externa de 1000  $\Omega$ . Se apreció una evolución similar a la observada en los datos de VCA.

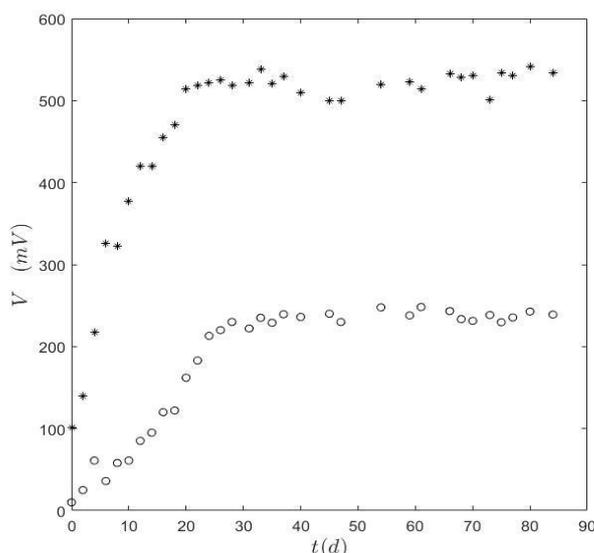


Figura 2: Puesta en marcha de la CCM. (\*) Voltaje de circuito abierto (VCA), (o) Voltaje para una resistencia externa de 1000  $\Omega$ .

### 3.2. Curva de densidad de potencia versus densidad de corriente

En este apartado se presentan los resultados de caracterizar las CCM. Para llevar a cabo este estudio se aplicaron diferentes resistencias externas, las cuales se impusieron por un período de 3 h para asegurar el estado estable en la medida de voltaje (extinguido el transitorio). El valor obtenido en esta condición para cada resistencia impuesta permitió evaluar la densidad de corriente y la densidad de potencia mediante las ecuaciones 3 y 4, respectivamente. En la Figura 3 se aprecia la gráfica obtenida. La máxima densidad de potencia en esta celda fue de 55 mW/m<sup>2</sup>, la cual se obtuvo empleando una resistencia externa de 552  $\Omega$ .

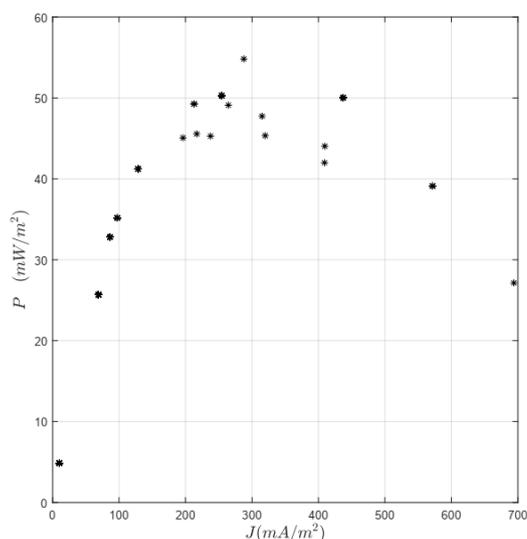


Figura 3: Densidad de potencia versus densidad de corriente.

La curva obtenida en la Figura 3 corresponde al alimento sintético, el cual es de fácil consumo por parte de las bacterias electroactivas. A partir de la determinación de la DQO, al inicio y al final de cada experimento, el cual duró 3 h, se determinó que en esta condición los microorganismos son capaces de eliminar 4% de la DQO inicial (1000 mg O/L). Es decir, durante el período registrado para determinar la curva de la Figura 3, la variación del sustrato en el seno de la solución es baja. En la segunda etapa se determinó la eliminación de DQO luego de un período de 70 h, desde el recambio de líquido, empleando una resistencia externa de 1000  $\Omega$ . En este caso se obtuvo un porcentaje de eliminación de DQO = 61%.

### 3.3. Carga liberada por la CCM

En la segunda etapa se estudió la carga liberada, calculada de acuerdo a la Ecuación 5, empleando un arreglo particular de resistencias. Se alternó entre dos valores de resistencias, una elevada que permite relajar el proceso, y una pequeña ( $R_b$ ) que fuerza a liberar una corriente elevada. La duración total del registro fue de 3 h. En la Figura 4 se muestra un registro de voltaje de la CCM para  $R_b = 594 \Omega$  con una alternancia entre resistencias de 10 min. Se aprecia que las alternancias entre un valor alto ( $R=40000 \Omega$ ) y un valor bajo ( $R_b = 594 \Omega$ ) permite que la CCM recupere el valor de corriente cuando la CCM se conecta a un valor bajo de resistencia.

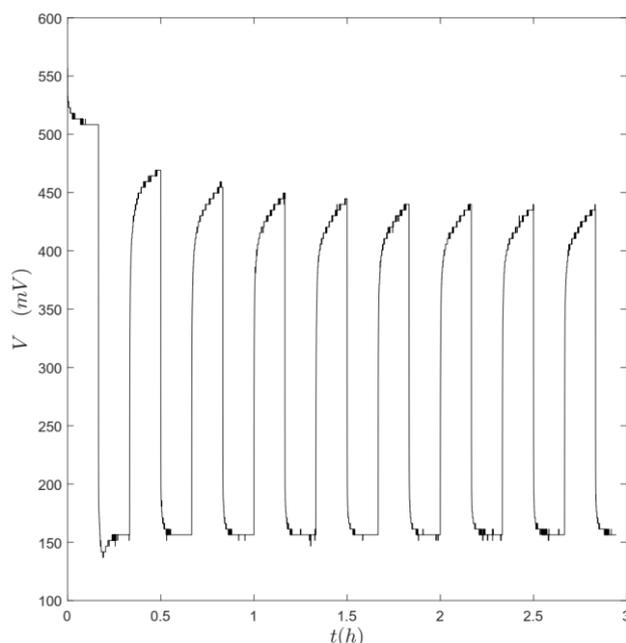


Figura 4: Registro de Voltaje versus tiempo de la CCM en la segunda etapa,  $R_b=594 \Omega$  y 10 min de tiempo de cada resistencia.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos en relación a la carga para la alternancia entre ( $R=40000 \Omega$ ) y  $R_b$  para diferentes tiempos. A partir de los datos obtenidos se aprecia que la carga aumenta al disminuir el tiempo de alternancia entre resistencias y al disminuir la resistencia externa. La mayor carga se libera para un tiempo continuo conectado a una  $R_b=335 \Omega$ . En este caso se determinó un porcentaje de eliminación de DQO del 4% en promedio. No se observó una tendencia en función de los tiempos de alternancia ni respecto a la resistencia utilizada.

Tabla 2: Valores de carga (Coulomb) obtenidos en la segunda etapa de operación de la CCM.

		T (min)			
		0	5	10	15
$R_b \Omega$	335	1,4223	1,3885	1,2033	1,1315
	594	1,1541		0,5142	0,5471
	1000	0,8550	0,4924	0,9970	0,4209
	4700		0,1983	0,1797	0,1806

A partir de los resultados obtenidos con la CCM en la segunda etapa, se realizó un estudio similar de cuantificación de la carga liberada cuando se emplea un alimento notablemente más cargado como es el digerido. En este caso se utilizó  $R_b=173 \Omega$  para los tiempos 6, 8, 14 y 20 min. En la Figura 5 se aprecia un registro de voltaje para tiempo de alternancia de 20 min. Se observa como el voltaje obtenido al conectar la resistencia de 40000  $\Omega$  va aumentando paulatinamente a

medida que avanza el experimento dado que los microorganismos deben hidrolizar la materia orgánica del digerido para poder degradarla. Además, se aprecia cómo se mantiene constante el voltaje obtenido al conectar en forma alternada el  $R_b$ .

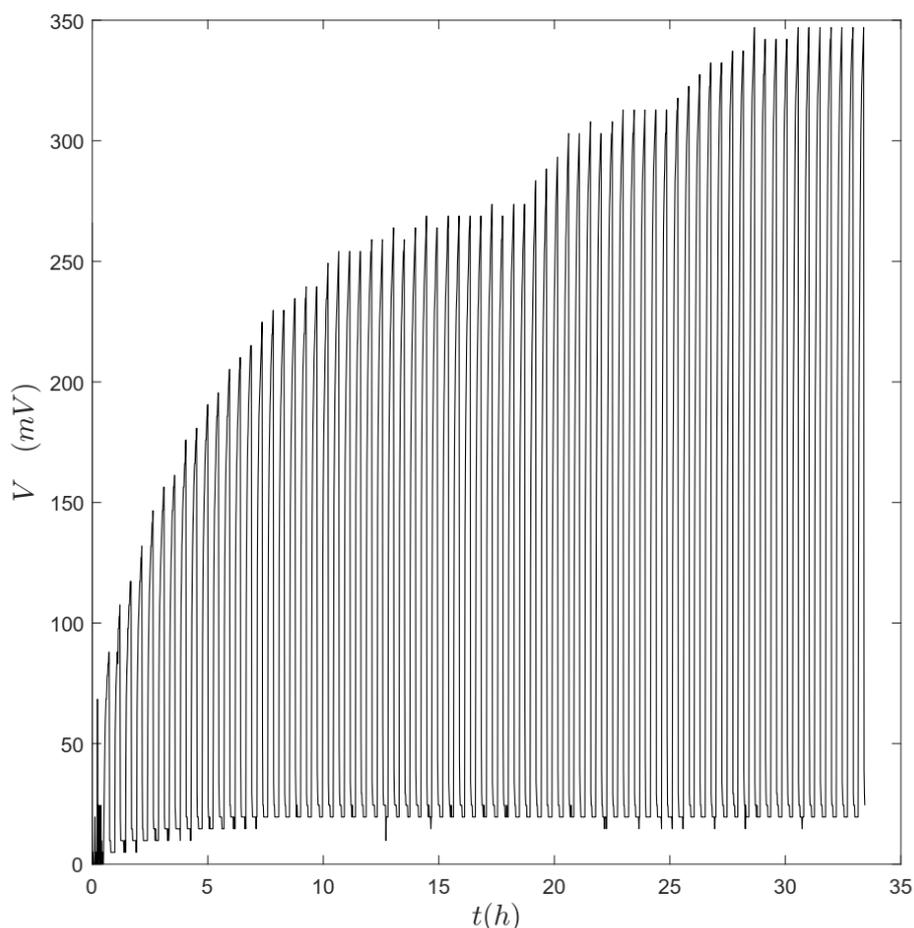


Figura 5: Registro de Voltaje versus tiempo de la CCM en la tercera etapa,  $R_b=173 \Omega$  y 14 min de tiempo de cada resistencia.

En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos de la carga liberada para cada tiempo de alternancia entre resistencias y se incluyen los porcentajes de eliminación de DQO. De los resultados obtenidos con los experimentos no se detecta una tendencia de la carga liberada respecto a los tiempos de alternancia utilizados. En cambio, sí se observó una clara tendencia a incrementar el porcentaje de eliminación de DQO cuando se disminuye el tiempo que se mantienen conectadas las resistencias, siendo el tiempo de 6 min el que conduce a una mayor eliminación de DQO en el mismo tiempo de registro.

Tabla 3: Valores de carga (Coulomb) obtenidos en la tercera etapa de operación de la CCM y porcentajes de eliminación de DQO.

T de conexión de las resistencias (min)	C (Coulomb)	%Eliminación DQO
6	70,98	65,41
8	32,32	58,12
8	5,68	55,82
14	17,63	54,34
20	52,65	47,15

#### 4. CONCLUSIONES.

Los resultados obtenidos en este trabajo alientan a aprovechar residuos carbonosos presentes en la corriente líquida de un digestor anaeróbico. Estos residuos aún tienen contenido orgánico que se puede transformar en energía eléctrica que puede almacenarse en baterías o destinarse a usos que requieran bajas corrientes. El sustrato tiene una carga de materia orgánica muy alta

que es plausible de ser utilizada por grandes períodos de tiempo sin la necesidad de un recambio de líquido en la cámara.

Se observó una tendencia a disminuir la carga liberada por la CCM cuando se acortan los tiempos de alternancia entre una resistencia elevada y una baja, en el caso de utilizar un alimento sintético. Sin embargo, al emplear un alimento natural como el digerido no se apreció dicho comportamiento. En cambio, al utilizar el digerido puede apreciarse un aumento en el porcentaje de eliminación de DQO al disminuir el tiempo de alternancia entre resistencias. Se considera que esto puede ocurrir porque al alternar entre dos resistencias tan diferentes se somete a la bacteria a un estrés significativo, forzando la utilización de sustrato para cubrir los procesos de mantenimiento, de impulso de electrones en la transferencia de los mismos y en las reacciones biológicas que se están forzando (cuando se impone una baja resistencia) y frenando (cuando se impone una resistencia elevada), alternadamente. Si bien es necesario ampliar el estudio aplicando otros valores de resistencias bajas, los resultados obtenidos alientan a utilizar la CCM como dispositivo de recuperación de energía eléctrica y degradación de materia orgánica.

## 5. REFERENCIAS.

- [1] Logan, B. (2008). *Microbial Fuel Cells*. New Jersey. 1era edición. John Wiley&Sons.
- [2] Oliveira V; Simões M.; Melo L.; Pinto A. (2013) "A 1d mathematical model for a microbial fuel cell". *Energy*. 61 463-471. Amsterdam.
- [3] Cerrillo, M. Viñas, M. and Bonmatí, A. (2016) 'Bioresource Technology Removal of volatile fatty acids and ammonia recovery from unstable anaerobic digesters with a microbial electrolysis cell', vol. 219, pp. 348–356.
- [4] Cerrillo, M. Viñas, M. and Bonmatí, A. (2017) 'Microbial fuel cells for polishing effluents of anaerobic digesters under inhibition, due to organic and nitrogen overloads', *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 92, no. 12, pp. 2912–2920.
- [5] Fradler K. R., (2014) 'Operation of a bioelectrochemical system as a polishing stage for the effluent from a two-stage biohydrogen and biomethane production process', *Biochem. Eng. J.*, vol. 85, pp. 125–131.
- [6] De Vrieze, J. Arends, J. B. A. Verbeeck, K. Gildemyn, S. and Rabaey, K. (2018) 'Interfacing anaerobic digestion with (bio)electrochemical systems: Potentials and challenges', *Water Res.*, vol. 146, pp. 244–255.
- [7] APHA-AWWA-WEF. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 21st edn. American Public Health Association, Washington DC.

## Agradecimientos

Este trabajo se realizó con financiación de proyectos de la Universidad Nacional del Comahue.

# ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES TERMOFÍSICAS DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Y DE SU CONTRIBUCIÓN A LA MODERACIÓN DEL EFECTO ICU

Cabrera, Pablo<sup>1</sup>, Botasso, Gerardo<sup>1</sup>, Castro Luna, Ana<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>LEMaC Centro de Investigaciones Viales UTN FRLP – CIC PBA

<sup>2</sup>EnAITecS, CODAPLI UTN FRLP

\*castrolu@gmail.com

## RESUMEN.

En las últimas décadas ha existido un desplazamiento continuo de la población rural hacia centros urbanos, los cuales se han modificado por la construcción de numerosas viviendas y vías de acceso, provocando cambios medioambientales importantes. Uno de los factores responsables de estas modificaciones fue la sustitución creciente del suelo natural por otro de mezclas asfálticas. En la ciudad, los pavimentos de las calles impiden la infiltración del agua de lluvia y en verano se calientan por la incidencia de radiación solar, cuando parte de ese calor es devuelto al ambiente. Consecuentemente, la temperatura del aire se eleva en la ciudad con respecto a la región rural circundante, provocando el efecto Isla de Calor Urbano, ICU.

Cuando la radiación solar incide en el pavimento, una porción de la misma se refleja al ambiente, mientras que el resto es absorbido por el pavimento, la relación de la radiación reflejada a la radiación solar incidente se denomina albedo, mientras mayor es la cantidad de radiación reflejada, menos energía solar absorbe el material. Por su color oscuro, el pavimento de mezcla asfáltica absorbe gran parte de la radiación solar incidente y la almacena como calor. El pavimento caliente emite radiación como cuerpo negro al medio ambiente en la región del infrarrojo del espectro electromagnético. El calor absorbido se transfiere al interior del pavimento por conducción térmica. Existe también un flujo de calor por convección desde la superficie de la muestra caliente al aire circundante.

Usar materiales para pavimentos que tengan mayor albedo y altos valores de emisividad, contribuye a enfriarlo moderando la ICU con reducción de la convección y mejoras en la calidad del medioambiente urbano.

Se realizaron experiencias en el laboratorio usando luz artificial y analizado el comportamiento térmico de muestras de pavimento asfáltico drenante y denso, éste sin y con recubrimiento superficial.

**Palabras Claves:** Pavimentos Modificados, Isla de Calor Urbano, Albedo, Energía Solar

**Área Temática:** ASPECTOS ECONÓMICOS Y AMBIENTALES: Edificación sustentable; Economía de las energías sustentables; Energía y medio ambiente; Desafíos para las ciudades.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El desplazamiento de la población rural a centros urbanos en las últimas décadas, así como la necesidad de viviendas y vías de acceso, han provocado sobre todo en las ciudades, cambios medioambientales importantes por la sustitución creciente del suelo natural por otros de mezcla asfáltica. En la ciudad, los pavimentos de las calles impiden la infiltración del agua de lluvia y especialmente en verano, se calientan por la incidencia de radiación solar y entregan al ambiente parte del calor absorbido. En consecuencia, la temperatura medioambiental, que en la ciudad es más elevada que en la región rural circundante da lugar a lo que se denomina el efecto Isla de Calor Urbano, ICU, Figura 1 [1]. Existen estudios científicos que señalan que en el verano, las temperaturas en la ciudad son varios grados más altas que en el área rural circundante [1, 2]. Los resultados de estas investigaciones muestran que la modificación de los materiales del pavimento y la reducción de la temperatura en la superficie del mismo son esenciales para lograr un balance térmico urbano que ayude a resolver el efecto de la ICU. Este efecto tiene varias consecuencias asociadas tales como: mayor uso de energía de enfriamiento y costos asociados a los aumentos notables en la demanda máxima de energía, existe también, un riesgo creciente para la salud humana, por la formación de grandes cantidades de “smog” y otros contaminantes del aire, que degradan su calidad. Hay un mayor estrés térmico en los residentes y un fuerte impacto en los ecosistemas urbanos. En pocas palabras, los efectos de la ICU derivan en un entorno degradado para el desarrollo de la vida. Además, cuando el pavimento asfáltico convencional incrementa su temperatura se producen fenómenos como el envejecimiento del mismo y su deformación permanente debida a cargas cíclicas [3]. Los pavimentos convencionales de mezcla asfáltica densa son ampliamente utilizados por su buen desempeño vial, bajos costos de mantenimiento y reducción del ruido.

La radiación solar se compone de luz visible (43%), luz IR (52%) y luz ultravioleta (5%). Cuando la radiación solar incide en el pavimento, una porción de la misma se refleja al ambiente, y el resto es absorbida por el pavimento. La relación entre la radiación reflejada y la radiación solar incidente se denomina albedo con un valor que varía entre 0 y 1, según las características de la superficie. Cuanto mayor es su valor, lo que ocurre en superficies claras, menos energía solar absorbe el material. Las superficies de los pavimentos asfálticos son oscuras, con un valor de albedo pequeño, por lo que éstas absorben una porción significativa de la radiación solar incidente. Un pavimento de asfalto convencional tiene una conductividad térmica moderada, por lo que puede transferir calor a su interior, almacenándolo durante las horas de sol, para luego liberarlo al aire durante la noche [4].

En general, la transferencia de calor se puede realizar de tres formas: conducción en sólidos, convección en fluidos y radiación. La transferencia de calor por convección hacia y desde la superficie del pavimento es una función de la diferencia de temperatura entre el aire ambiente y la superficie del pavimento, depende de la velocidad del viento así como del coeficiente de convección de calor. El balance térmico en el pavimento debe tomar en cuenta la cantidad de radiación solar que incide en la superficie, la cantidad de calor que absorbe y transmite a su interior el pavimento, la cantidad de calor que emite por la temperatura que alcanza, y el calor que transfiere al aire. Para moderar la ICU, se ha propuesto, entre otras posibles soluciones, utilizar materiales para pavimento con mayor albedo y menos rugosidad, o modificados para generar estructuras retentivas de humedad, para minimizar la absorción de calor solar por los mismos y lograr un equilibrio térmico urbano aceptable.

En consecuencia, las recomendaciones más interesantes para enfriar los pavimentos se enfocan en modificar los materiales para i) aumentar el albedo, y la emisividad ii) posibilitar el enfriamiento por evaporación.

El albedo es importante para reducir la temperatura de un material durante el día y junto con la emisividad de la superficie caliente influyen en la transferencia de calor por radiación entre el pavimento y el entorno circundante.

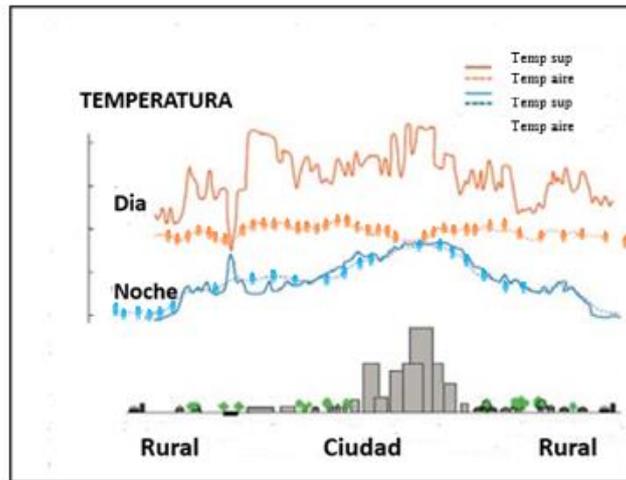


Figura 1 Variación diurna y nocturna de la temperatura superficial del pavimento y la temperatura del aire en la ciudad y las áreas rurales vecinas [5].

En principio, para lograr un pavimento más frío, deberían modificarse parámetros como por ejemplo, el color superficial. Un pavimento más claro por composición o por tratamiento superficial para que parezca de color más claro, tiene mayor albedo. La comparación más común entre el pavimento convencional de asfalto y el de hormigón demuestra que este último tiene una superficie más fría por su color más claro [6]. Hay varias estrategias relacionadas al color, muchas de las cuales simplemente consisten en modificar con materiales de colores más claros las tecnologías de pavimentación existentes. El albedo del hormigón convencional (cemento gris), se puede mejorar aún más mediante el uso de agregados de colores más claros, cemento blanco, aditivos para hormigón, óxido de titanio, etc.

Posibilitar el enfriamiento por evaporación se logra con el uso de pavimentos porosos, o adoquines con vegetación porque así se facilita la evotranspiración que consume calor en el cambio de fase líquido/vapor, que transforma así el agua retenida en vapor. Los pavimentos permeables pueden no ser una opción apropiada en climas secos, donde la disponibilidad de agua es escasa.

Para reducir la conductividad térmica del pavimento se pueden incorporar materiales poco conductores térmicos a la mezcla de material de pavimento así como incrementar su porosidad.

Finalmente, otra opción para aliviar las altas temperaturas del ambiente urbano es plantar a lo largo del camino pavimentado árboles que den sombra [5]. El uso de pavimentos o materiales fríos además del aumento de espacios verdes es una alternativa viable y de bajo costo que se puede implementar en las áreas urbanas como estrategia para reducir los efectos nocivos de las islas de calor.

Todas estas acciones son apropiadas para disipar el calor superficial de un pavimento urbano y del aire medioambiental en la ciudad. Si el pavimento no se calienta, se logra ahorrar energía, así como también mejorar la calidad del aire.

Una de las limitaciones de los materiales reflectantes es el envejecimiento y la suciedad de la superficie, que provocan una disminución del rendimiento como pavimento frío, ya que la acumulación de suciedad, presencia de hongos y degradación del material inducido por la luz, el calor y la humedad, disminuyen el albedo inicial de la superficie bajo estudio. Se han desarrollado métodos de estudio de envejecimiento acelerado para determinar esta evolución antes de la aplicación real [7].

En este trabajo, utilizando luz solar artificial se ha estudiado en el laboratorio la respuesta térmica de muestras de pavimento asfáltico drenante y denso, este último sin y con modificación de color en su superficie. Se han registrado durante tiempo prolongado las temperaturas de las muestras a diferentes profundidades de la probeta usando termocuplas y adquisidores de datos. Se ha medido la emisividad de las muestras y se ha analizado la influencia de diferentes coberturas superficiales en su comportamiento térmico.

## 2. EXPERIMENTAL

Se examina el comportamiento térmico de probetas realizadas con una mezcla asfáltica densa denominada CAC D R 12 AM-3 (Concreto Asfáltico en Caliente; Denso; Rodamiento; tamaño

máximo nominal 12 mm; Asfalto Modificado con polímero tipo 3) sin y con recubrimiento superficial. El recubrimiento superficial de la probeta es una pintura blanca base acuosa con un gran poder de cubrimiento. Al momento de ser utilizada aumenta el albedo del pavimento aproximadamente a 0,7 y posee un efecto aislante en el sentido de que dificulta la salida del calor que el pavimento acumuló mientras fue irradiado. También se analiza una probeta realizada con una mezcla asfáltica drenante denominada CAD 12 AM-3 (Concreto Asfáltico Drenante en Caliente; Rodamiento tamaño máximo nominal 12 mm; Asfalto Modificado con polímero tipo-3) con un porcentaje de poros de 23%.

En las Tablas 1 y 2 se muestra la densidad y dosificación de cada mezcla asfáltica.

Tabla 1 Composición de la Mezcla Asfáltica Densa

CAC D R 12 AM-3	
Densidad	2,290 kg/m <sup>3</sup>
Materiales	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	38
Cal hidráulica hidratada	2
Arena de trituración granítica 0:6	55,2
Asfalto AM-3	4,8
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

Tabla 2 Composición de la Mezcla Asfáltica Drenante

CAD 12 AM-3	
Densidad	1,900 kg/m <sup>3</sup>
Materiales	Dosificación (%)
Agregado grueso granítico 6:12	75
Cal hidráulica hidratada	3
Arena de trituración granítica 0:6	17
Asfalto AM-3	5
<b>TOTAL</b>	<b>100</b>

La irradiación de las muestras se realiza utilizando lámparas UltraVitalux® cuyo espectro de emisión asemeja el de la radiación solar. La potencia que se obtiene utilizando cuatro lámparas es 1200 W. La disposición de las lámparas en cuanto a la distancia que las separa de la superficie de la probeta de mezcla asfáltica utilizada se fija en 0.3 m, que corresponde a una irradiancia de 513 W/m<sup>2</sup> coincidiendo con el valor de irradiancia solar media en la ciudad de La Plata durante un día del mes de enero del año meteorológico típico para la ciudad de La Plata.

La Plata se caracteriza por veranos relativamente calurosos con temperaturas medias comprendidas entre 20-26°C y máximas mayores que 30°C, inviernos no muy fríos con temperaturas medias entre 8-12°C y mínimas que excepcionalmente son inferiores a 0°C. Sus amplitudes térmicas son menores a 14°C a lo largo de todo el año [8]. Bre et al. definen el año meteorológico típico como el que resulta de seleccionar cada mes del calendario típico por separado, y luego concatenar los 12 meses típicos para construir el año típico.

Durante los períodos de calentamiento y enfriamiento de las probetas, se mide en diferentes puntos del interior de la misma, la temperatura de la muestra en función del tiempo, utilizando termocuplas tipo K y almacenadores de datos. Para determinar la emisividad de cada muestra de pavimento, se utiliza una cámara termográfica Testo 865 con una resolución de infrarrojos de 320 x 240 píxeles y una visualización de diferencias en la temperatura de 0.1 °C.

### 3. RESULTADOS.

#### 3.1. Comportamiento térmico de las mezclas asfálticas

La variación de la temperatura con el tiempo a diferentes profundidades se muestra usando una probeta CAC D R 12 AM-3, densa, Fig. 2 - a y una probeta CAD 12 AM-3, drenante, Fig. 2 - b. Las probetas son tipo Marshall, con dimensiones de un prisma cilíndrico de 10 cm de diámetro y 6 cm de alto. Se observa en ambas muestras que las curvas de variación de la temperatura con el tiempo son crecientes en las primeras horas de calentamiento y que a tiempos largos, la temperatura alcanza un valor casi constante.

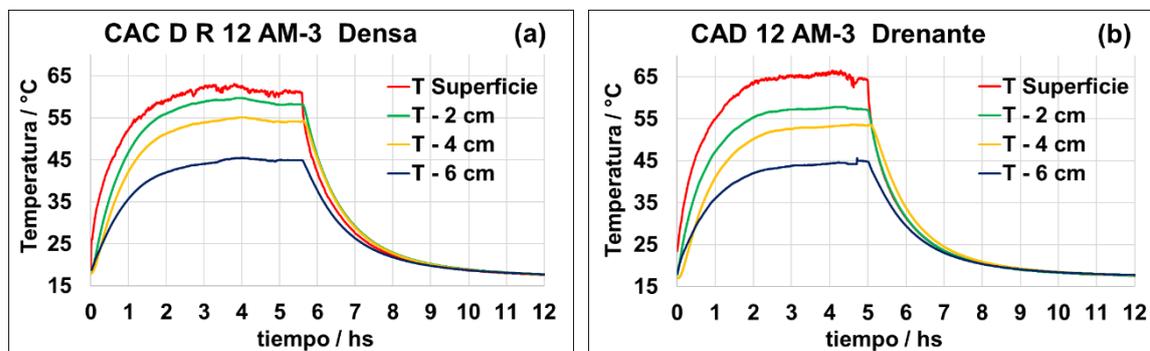


Figura 2 Curvas de variación de temperatura en (a) la mezcla asfáltica CAC D R 12 AM-3, densa y en (b) la mezcla asfáltica CAD 12 AM-3, drenante durante el calentamiento y el enfriado de las mismas.

Se observa que la muestra drenante, CAD 12 AM-3, alcanza una temperatura superficial final mayor que la alcanzada por la muestra densa, CAC D R 12 AM-3. Si además se comparan los valores de temperatura alcanzada en el interior de la muestra, se aprecia que los valores de temperatura alcanzados a 2 y 4 cm de profundidad en la probeta drenante son inferiores a los alcanzados en la probeta densa. De acuerdo a los parámetros indicados en las Tablas 1 y 2, la muestra densa y la muestra drenante tienen también diferente densidad y porosidad. El calentamiento de la muestra densa hacia el interior muestra un comportamiento típico para pavimentos con buena conductividad e inercia térmica [9,10]. Las propiedades térmicas del pavimento tales como: conductividad térmica, capacidad calorífica, difusividad térmica, influyen en la transferencia de calor por conducción dentro de la estructura del pavimento. La mayor conductividad térmica de la superficie del pavimento ayuda a la rápida transmisión del calor del pavimento al suelo y viceversa. El comportamiento térmico descrito en la Fig. 2 b es coincidente con el de materiales de conductividad térmica baja como es el caso de la muestra drenante analizada [9]. Además, una magnificación de las curvas de enfriamiento permite observar un descenso menos abrupto de la temperatura con el tiempo en la probeta densa, denotando la mayor inercia térmica de la misma que puede relacionarse con la mayor lentitud con que el cuerpo caliente entrega ese calor al medio ambiente.

### 3.2 Influencia de recubrimiento superficial en la muestra de mezcla asfáltica densa

En la Fig.3 se exhibe el comportamiento térmico de la muestra CAC D R 12 AM-3 densa sin y con recubrimiento superficial claro, se han utilizado probetas de forma prisma cuadrangular con dimensiones de 30cm x 30cm x 3cm. La muestra densa sin recubrimiento exhibe la mayor temperatura superficial durante el calentamiento y alcanza un valor constante cuando se calienta por tiempo prolongado, en el enfriamiento exhibe también la mayor temperatura superficial en referencia a las muestras con recubrimiento claro. Las muestras densas con un recubrimiento claro muestran una notable disminución de la temperatura superficial máxima alcanzada durante el calentamiento lo que se atribuye a un mayor albedo y una menor absorción de energía solar al interior de la muestra.

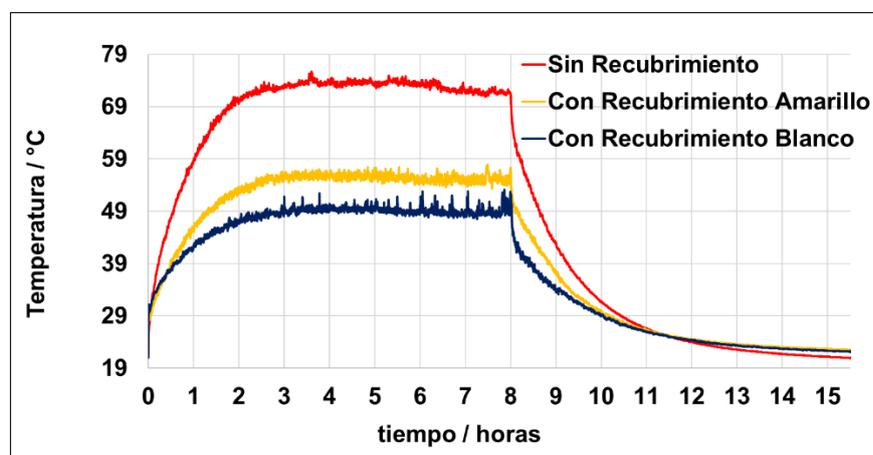


Figura 3 Variación de temperatura superficial de probetas CAC D R 12 AM-3 densas sin recubrimiento (roja) y con recubrimiento (amarillo) y (blanco), durante el calentamiento y el enfriamiento.

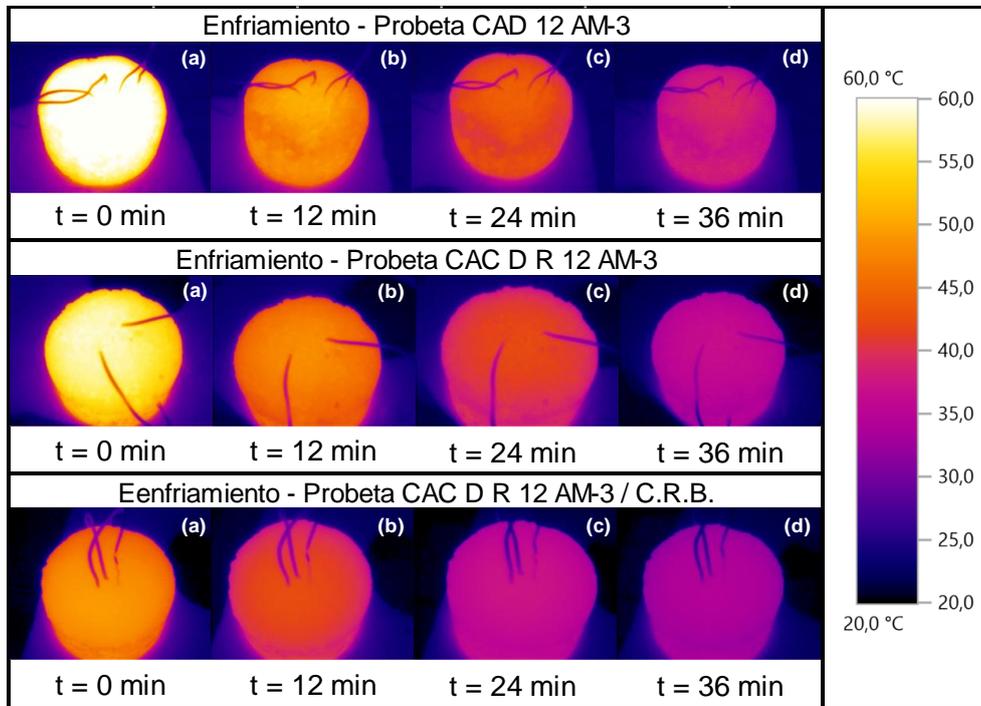


Figura 4 Imágenes termográficas durante la etapa de enfriamiento de las muestras estudiadas a tiempos de enfriamiento iguales.

En la Fig. 4, se muestran imágenes termográfica del descenso de la temperatura de la probeta drenante CAD 12 AM-3, y de las probetas CAC D R 12 AM-3 densas, sin y con recubrimiento blanco durante la etapa de enfriamiento. Es interesante observar la coloración de las probetas durante esa etapa al inicio la muestra drenante tiene en la superficie el color más claro de la escala, evidencia de una mayor temperatura superficial, a medida que transcurre el tiempo las muestras se van oscureciendo virando el color del naranja al violeta.

Con el objetivo de observar la influencia de la probeta prisma cuadrangular caliente en el comportamiento del aire sobre la superficie de las muestras, durante el enfriamiento de las mismas en la etapa de apagado, se muestra en la Figura 5, la variación de la temperatura del aire a 5 cm sobre la superficie que se enfría.

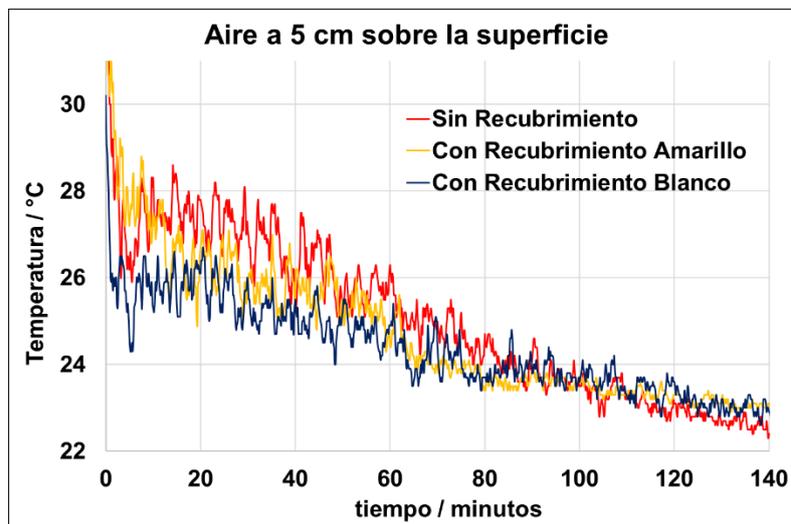


Figura 5 Variación de la temperatura del aire durante el enfriamiento de la probeta sin y con recubrimiento de color a 5 cm de la superficie.

Se observa de acuerdo a la variación de la temperatura del aire, que la liberación de calor al ambiente es menor en las muestra con recubrimiento claro, coincidente con la menor cantidad de calor acumulada durante el calentamiento de las probetas.

### 3.3 Cálculo de la emisividad

La emisividad ( $\epsilon$ ) mide la capacidad de la superficie de un material para liberar como radiación infrarroja el calor absorbido. Este parámetro especifica qué tan bien la superficie analizada emite radiación térmica en comparación con un cuerpo negro que opere a la misma temperatura.

La emisividad ( $\epsilon$ ) tiene un valor variable entre 0 y 1. Se han realizado varios estudios para demostrar el efecto de la emisión sobre el comportamiento térmico de los materiales utilizados en el entorno urbano. [11,12]. Existe una correlación acentuada entre la temperatura superficial nocturna promedio y el tipo de material usado en pavimentos [5].

Para determinar la emisividad de cada una de las muestras que se analizan, se utiliza la cámara termográfica Testo con ajuste de emisividad, y una termocupla tipo K de Níquel Cromo – Níquel. Se registra simultáneamente la temperatura superficial de la muestra bajo estudio con la termocupla tipo K, mientras que con la cámara termográfica se ajusta la emisividad hasta que la temperatura indicada por ella coincide con la registrada por la termocupla.

En la Tabla 3 se muestran las temperaturas superficiales y los valores de emisividad de las muestras densas CAC D R 12 AM-3 sin y con recubrimiento, luego de ser irradiadas por tiempo prolongado.

Tabla 3 Valores de emisividad de las probetas densas, CAC D R 12 AM-3, sin y con recubrimiento.

CAC D R 12 AM-3		CAC D R 12 AM-3 Amarilla		CAC D R 12 AM-3 Blanca	
Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )	Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )	Temperatura	Emisividad ( $\epsilon$ )
64,4 °C	0,91	52 °C	1	44 °C	1

La emisividad medida para las muestras, que se exhiben en la Tabla 3, demuestra que las probetas con recubrimiento claro, emiten la radiación infrarroja de modo más eficiente ya que su comportamiento es el de un cuerpo negro.

#### 4. CONCLUSIONES.

1 – Cuando se calienta con luz solar artificial una probeta de pavimento asfáltico CAC D R 12 AM-3 densa y una probeta de pavimento asfáltico CAD 12 AM-3, drenante, se alcanza una mayor temperatura en la probeta con pavimento drenante. Una muestra drenante con una porosidad mayor es menos conductora térmica, acumula calor en superficie, dificulta la transferencia de calor al interior y tiene una inercia térmica más baja que la muestra densa.

2 – Una probeta de mezcla asfáltica densa CAC D R 12 AM-3 con recubrimiento superficial claro y mayor albedo, alcanza al calentarla por tiempos prolongados, menores temperaturas superficiales que al realizar la misma acción en la muestra descubierta tanto en la superficie como en su interior. Se logra un pavimento más frío en comparación con uno sin recubrimiento claro.

3 – La emisividad de las muestras es determinante para lograr pavimentos más fríos como surge al analizar probetas con recubrimiento superficial claro. De acuerdo a los valores de  $\epsilon$  la muestra con recubrimiento claro, mostrado en la Tabla 3, su comportamiento es muy próximo al de un cuerpo negro a esa temperatura por lo que emite radiación IR con mayor eficiencia.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240.
- [2] Qin, Y. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 445-459.
- [3] Gago, E. J., J. Roldan, R. Pacheco-Torres, and J. Ordonez. (2013) The City and Urban Heat Islands: Review of Strategies to Mitigate Adverse Effects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 25, , pp. 749–758.
- [4] Yinghong Q. (2015). A review on the development of cool pavements to mitigate urban heat island effect. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 445-450.
- [5] Akbari, H.; Bell, R.; Brazel, T.; Cole, D.; Estes, M.; Heisler, G.; Hitchcock, D.; Johnson, B.; Lewis, M.; Mcpherson, G.; et al. *Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies*; EPA: Washington, DC, USA, 2008.

- [6] Santamouris, M., Synnefa, A., Karlessi, T. (2011). Using advanced cool materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions. *Solar Energy* 84, 3085-3102.
- [7] Alchapar, N., Correa, E., & Cantón, M. (2013). Solar reflectance index of pedestrian pavements and their response to aging. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1 (4), 281-285.
- [8] Bre F, García Santa Cruz M; Fachinotti V (2017) Generación del año meteorológico típico para la ciudad de La Plata, Argentina XIV ENCAC Encontro Nacional do Conforto no Ambiente, X ELACAC Encontro Latinoamericano do Conforto no Ambiente, Balneario Camboriu Brasil 17 septiembre.
- [9] Hassn A., Chiarelli A., Dawson A., Garcia A. (2015). Thermal properties of asphalt pavements under dry and wet conditions. *Materials Design*. doi: 10.1016/j.matdes.2015.11.116.
- [10] Xie, N., Wang, H., & Feng, D. (2015). Coating materials to increase pavement Surface reflectance. *Eco-Efficient Materials for Mitigating Building Cooling Needs (13-35)*. Woodhead Publishing
- [11] Abbas Mohajerani , Jason Bakaric, Tristan Jeffrey-Bailey (2017) The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete *Journal of Environmental Management* 197, 522-538
- [11] Synnefa, A.; Santamouris, M.; Livada, I. (2006). A study of the thermal performance of reflective coatings for the urban environment. *Solar Energy* 80, 968-981.

### **Agradecimientos**

PC agradece la beca doctoral otorgada por CONICET, AMCL es investigadora científica de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, CICIPBA. Los autores agradecen el soporte financiero de UTN-FRLP y de CICIPBA.

## CAPACITACIÓN EN INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS

Salvatierra, Santiago<sup>(a)</sup>, Drunday Jonathan<sup>(a)</sup>, Garcés Leandro<sup>(a)</sup>, Berola, Julián<sup>(a)</sup>

(a)Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional  
[Salvatierrasantiago15@gmail.com](mailto:Salvatierrasantiago15@gmail.com)

### RESUMEN.

La reglamentación y aplicación de la legislación para la conexión de fuentes de energías renovables a la red eléctrica en los hogares de la provincia de Buenos Aires es inminente. Además, existe el interés de muchos usuarios en implementar sistemas de energía limpia y segura para ahorrar en la tarifa eléctrica. Actualmente existen una gran variedad de configuraciones para implementar instalaciones solares fotovoltaicas en las viviendas. Los sistemas conectados a la red, los sistemas totalmente independientes de la red con almacenamiento y los que constituyen combinaciones de ambos denominados híbridos. Esta variedad de opciones que se ofrecen comercialmente puede generar dudas en los usuarios al momento de planificar una instalación. Asimismo, cuando el sistema se vaya a conectar a la red, la empresa distribuidora exigirá el cumplimiento de las especificaciones técnicas normalizadas de los componentes que se utilizarán en la instalación. Consecuentemente, se necesitará contar con personal idóneo para realizar y mantener las instalaciones. La longevidad y el buen desempeño de la instalación no solo depende de la calidad de los componentes, sino también de su configuración, mantenimiento y monitoreo. En este trabajo se describe un módulo diseñado y construido en Facultad Regional Bahía Blanca para capacitar a los estudiantes en el manejo de tres sistemas fotovoltaicos diferentes y obtener conclusiones sobre sus funciones didácticas.

**Palabras Claves:** Instalaciones fotovoltaicas, Capacitación, Energía distribuida

**Área Temática:** Educación, formación y capacitación en energías renovables y uso racional de la energía.

**Categoría del Trabajo:** Trabajos de estudiantes de grado

## 1. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad son muchas las alternativas que se implementan para abastecer de electricidad utilizando fuentes de energías limpias a los sectores residencial, industrial y comercial. Dentro de estas alternativas, se diferencian dos formas principales de energía distribuida. Una de ellas es el esquema con conexión a la red eléctrica denominado “on-grid” y la otra es el esquema autónomo o desconectado de la red eléctrica, denominado “off-grid”. Bajo estos esquemas, se emplean distintas opciones de fuentes de energías renovables que utilizan aerogeneradores, paneles solares y biomasa entre otros. Una de las opciones más utilizadas en aquellos lugares donde se dispone del recurso solar necesario, es el abastecimiento de electricidad con paneles fotovoltaicos. Se han realizado trabajos científicos relacionados con las instalaciones fotovoltaicas residenciales en varias regiones de la Argentina. En [1], se realiza un estudio microeconómico de factibilidad para la ciudad de Buenos Aires. En [2], se describen los cálculos para la puesta en marcha de un sistema domiciliario en la ciudad de Córdoba. En [3] se presenta un análisis de capacidad de equipos para una instalación en la provincia de San Juan. En [4] se describe un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema solar fotovoltaico como solución alternativa a la falta de cobertura del servicio de energía eléctrica en las zonas no interconectadas (ZNI) en la vereda El Blanquecino, La Argentina (Huila).

Debido a los avances evidenciados en la cantidad y variedad de instalaciones de energía distribuida utilizando el recurso solar y con el fin de formar a los alumnos en la operación, mantenimiento y monitorización de sistemas fotovoltaicos, en el año 2018 se diseñó y puso en marcha una instalación solar fotovoltaica para dotar de iluminación al Laboratorio de Ingeniería eléctrica de la Facultad Regional Bahía Blanca. La figura 1, muestra el sector del laboratorio de Ingeniería Eléctrica abastecido.



Figura 1. Iluminación del Laboratorio de Ingeniería eléctrica.

Esta instalación era del tipo “off-grid” y constaba de tres paneles fotovoltaicos, un regulador/cargador, cuatro baterías y un inversor. Permitía alimentar la iluminación durante una jornada y poseía un monitoreo remoto a través de la red de computadoras del laboratorio. En las Figuras 2 y 3 se muestran los componentes de la instalación fotovoltaica.



Figura 2. Baterías, cargador e inversor del sistema fotovoltaico.



Figura 3. Juego de paneles encargados de la Iluminación del Laboratorio.

Con la incorporación de cursos en el área de Extensión Universitaria de la Facultad y el interés de las autoridades del Departamento de Ingeniería Eléctrica por la capacitación sobre instalaciones solares fotovoltaicas, en el año 2022 se diseñó y construyó un módulo didáctico, el cual se montó en un contenedor de obra reciclado, Figura 4. El mismo se destaca por tener todos sus componentes accesibles, facilitando así las tareas de medición, configuración y monitoreo. Este módulo incorpora tres sistemas diferentes, uno de los cuales es un sistema desconectado de la red denominado “Off-Grid Lab”, el cual reemplaza al sistema que alimenta la iluminación del Laboratorio. Otro sistema desconectado de la red alimenta las cargas del contenedor y se denomina “Off-Grid Cont”. Por último, el tercer sistema, con conexión a la red, también alimenta al contenedor y se denomina “On-Grid Cont”. Solo uno de los sistemas que alimentan la misma carga pueden funcionar a la vez. Con la elección de uno de ellos, se alimentan todos los consumos del recinto donde se aloja el módulo.



Figura 4. Módulo didáctico con la instalación de tres sistemas fotovoltaicos

Los sistemas incorporan componentes de última generación, de manera tal que su instalación, operación y mantenimiento sirven como ejemplos reales de sistemas comerciales modernos para el ámbito residencial.

Los tres sistemas pueden funcionar utilizando cualquiera de los dos conjuntos de paneles solares que se ubican en el patio aledaño, Figura 5. Un conjunto está compuesto por tres paneles de 260 Wp cada uno y el otro conjunto por dos paneles de 500 Wp cada uno.



Figura 5. Los dos conjuntos de paneles solares

En el punto 2 de este trabajo se describe la conexión de los tres sistemas incluyendo sus monitoreos y finalmente en 3 se obtienen las conclusiones sobre su función didáctica.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Descripción del sistema “Off-Grid Lab”

Este sistema consta de un equipo cargador/inversor, con una unidad de almacenamiento de energía con batería de litio, el cual alimenta las cargas de iluminación del laboratorio. Por medio de la programación del inversor puede seleccionarse la prioridad de la fuente de alimentación para abastecer la carga de iluminación, desde el sol, la batería o desde la red. Según el modo elegido, cuando el recurso solar es insuficiente o la batería llega a su máxima profundidad de descarga el sistema realiza un “bypass” para alimentar la iluminación desde la red. Igualmente puede seleccionarse la fuente para la carga de la batería desde el sol, desde la red o de ambas. La autonomía media está calculada para un día de funcionamiento. La batería consta de un puerto de comunicación BMS para controlar la carga y descarga. Incorpora una antena de WiFi para el monitoreo via internet mediante un dashboard propietario que permite analizar los parámetros de generación de energía además de obtener estadísticas. En la Figura 6, se detalla el circuito eléctrico esquemático.

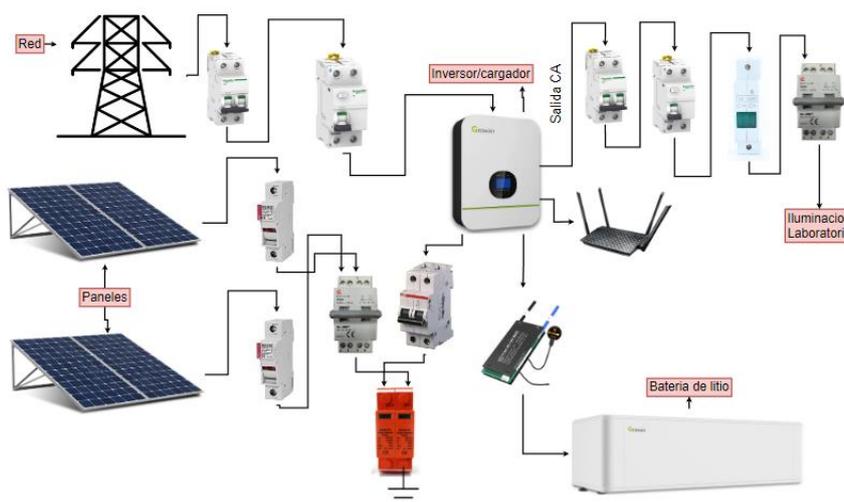


Figura 6: Esquema eléctrico del sistema “Off-Grid Lab”.

La Figura 7 muestra una fotografía del área del módulo donde se encuentran los componentes del sistema “Off-Grid Lab” que alimenta al Laboratorio y en la Tabla 1 se muestra el listado de los componentes que lo integran.



Figura 7. Foto del sistema “Off-Grid Lab”

Tabla 1. Descripción de los componentes del sistema “Off-Grid Lab”

Denominación	Característica/Capacidad	Observaciones
Inversor/cargador	Híbrido off-grid, 3 kVA [5]	Apto para baterías de litio
Batería	Litio, 48V, 2.500 Wh	Un módulo comunicado con BMS incorporado
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Entrada de CA al inversor
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Salida de CA
Interruptor diferencial	25 A, 30 mA	Protección diferencial
Llave termomagnética de CC	32 A, 500 V	Entrada de paneles
Lámpara indicadora Led	220 V de CA	Sistema encendido
Llave conmutadora I-O-II	32 A	Selección de paneles
Descargador de sobretensiones de CC	500 V/20 kA	Protección de CC/FV
Antena WiFi		Monitoreo remoto

## 2.2 Descripción de sistema “On-Grid Cont”

Este sistema consta de un equipo inversor, del tipo conectado a la red, el cual permite alimentar las cargas del contenedor a partir de la energía disponible de los paneles solares y, en caso de no ser suficiente, lo complementa con la red eléctrica. Cuando la energía generada es superior a la carga demandada, el sistema limita la exportación de energía a la red, método conocido como inyección cero. Esto se realiza a través de la comunicación proveniente de un medidor de energía bidireccional. El equipo también tiene monitoreo remoto junto con almacenamiento y representación de los parámetros de funcionamiento. En la Figura 8, se detalla el circuito eléctrico esquemático.

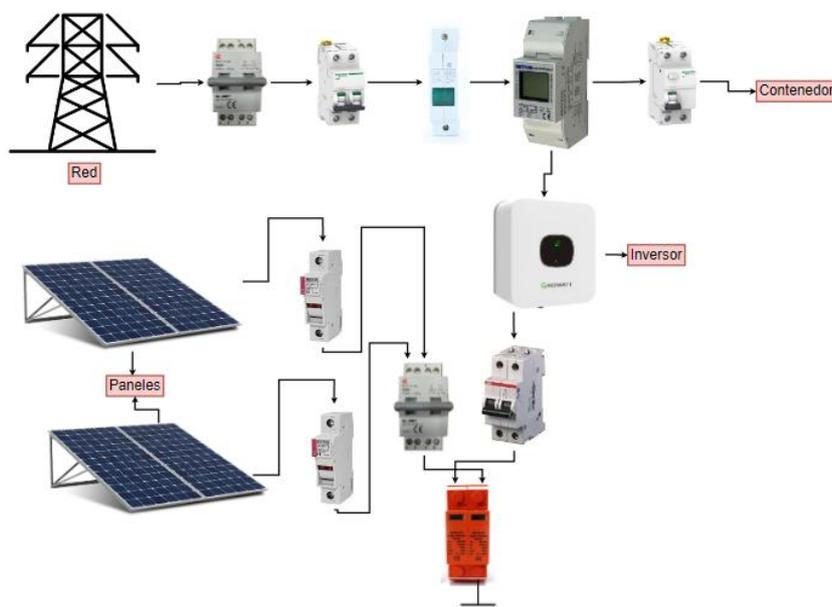


Figura 8: Esquema eléctrico sistema “On Grid-Cont”

La Figura 9 muestra una fotografía del área del módulo donde se encuentran los componentes del sistema “On-Grid Cont” que alimenta al contenedor. La Tabla 2 muestra el listado de los componentes que lo integran.

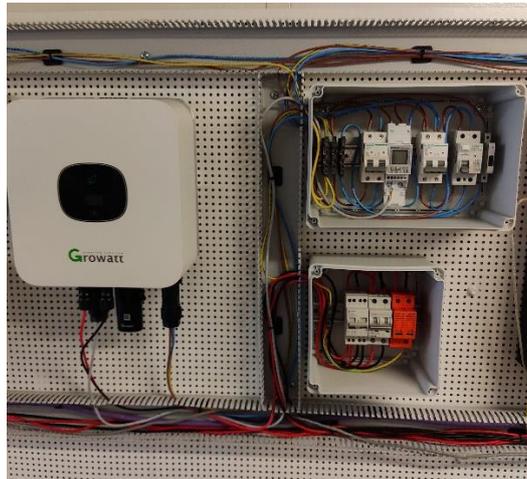


Figura 9. Foto del sistema "On-Grid Cont".

Tabla 1. Descripción de los componentes del sistema "On-Grid Cont"

Denominación	Característica/Capacidad	Observaciones
Inversor	on grid 1,5 kVA [6]	
Medidor de energía	Bidireccional	Limitador de inyección
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Entrada de CA al inversor
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Salida de CA
Interruptor diferencial	25 A, 30 mA	Protección diferencial
Llave conmutadora I-O-II	32 A	Selección de paneles
Descargador de sobretensiones de CC	500 V/20 kA	Protección de CC/FV
Antena WiFi		Monitoreo remoto

### 2.3 Descripción del sistema "Off-Grid Cont"

Este sistema está constituido por un cargador/inversor, con almacenamiento de energía mediante dos baterías de gel y alimenta las cargas del contenedor. Sus modos de funcionamiento pueden programarse de manera similar al cargador/inversor del sistema "Off-Grid Lab". El equipo posee monitoreo junto con almacenamiento y representación de los parámetros de funcionamiento. En la Figura 10 se detalla el circuito eléctrico esquemático.

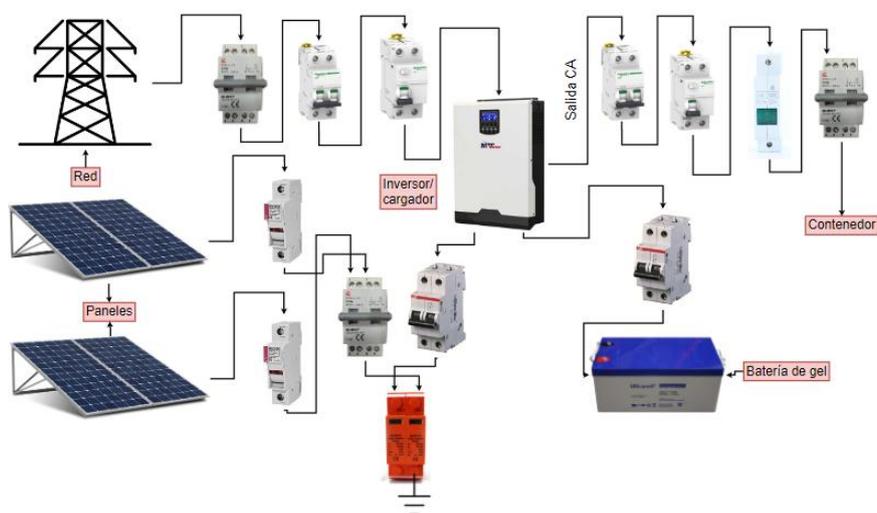


Figura 10: Esquema eléctrico sistema "Off Grid Cont".

La Figura 11 muestra una fotografía del área del módulo donde se encuentran los componentes del sistema "Off-Grid Cont" que alimenta al contenedor y la Tabla 3 muestra el listado de los componentes que lo integran.



Figura 11. Foto del sistema "Off-Grid Cont".

Tabla 1. Descripción de los componentes del sistema "Off-Grid Cont"

Denominación	Característica/Capacidad	Observaciones
Inversor/cargador	Híbrido off-grid, 3 kVA [7]	Apto para baterías de plomo-ácido
Batería	GEL, 12V 100 Ah	Dos baterías conectadas en serie
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Entrada de CA al inversor
Llave termomagnética de CA	220 V, 16 A	Salida de CA
Interruptor diferencial	25 A, 30 mA	Protección diferencial
Llave termomagnética de CC	32 A, 500 V	Entrada de paneles
Lámpara indicadora Led	220 V de CA	Sistema encendido
Llave conmutadora I-O-II	32 A	Selección de paneles
Descargador de sobretensiones de CC	500 V/20kA	Protección de CC/FV

## 2.4 Monitoreo de los sistemas

Como se mencionó anteriormente, los tres sistemas permiten el monitoreo local y remoto. Debido a la utilización de tableros abiertos es posible realizar mediciones de los parámetros eléctricos, respetando las reglas del trabajo con tensión. La Figura 12 muestra a un alumno realizando la medición de la corriente de carga/descarga de la batería y programando las funciones del inversor.



Figura 12. Alumno realizando las mediciones

En la Figura 13, se muestra un gráfico obtenido con el monitoreo remoto del comportamiento del sistema “Off-Grid Lab” que alimenta la iluminación del laboratorio. En dicho gráfico se describe la producción solar en color azul y el consumo de la carga en color rojo para un día del mes de agosto. Puede observarse en la curva que representa la carga que alrededor de las 20 horas se desconectaron algunas luminarias para luego volver a encenderlas unos minutos después.

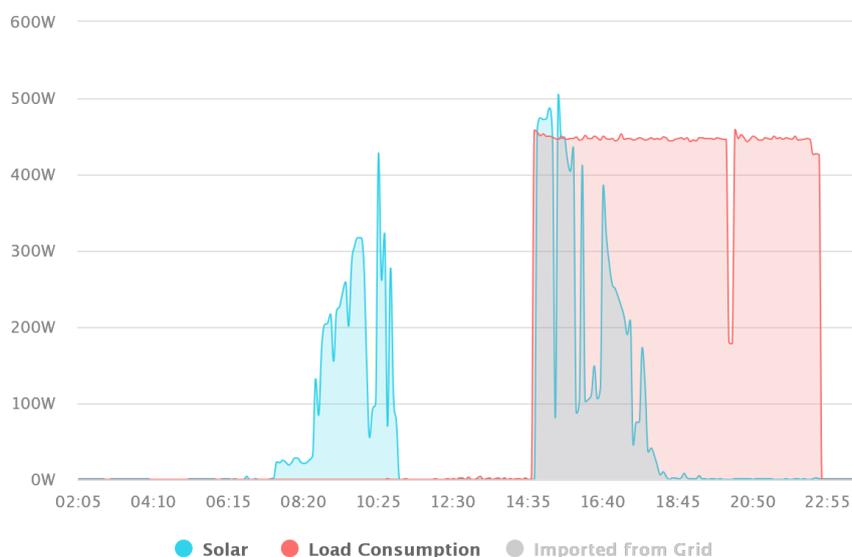


Figura 13. Monitoreo del Sistema “Off-Grid Lab”.

### 3. CONCLUSIONES.

El módulo presenta equipos y protecciones que se comercializan en la actualidad en el mercado relacionado con las instalaciones solares fotovoltaicas. Las características constructivas de diseño del módulo permiten tener acceso a todos los componentes de los sistemas como así también a la medición y configuración de los parámetros de funcionamiento. De la opinión de los estudiantes que lo han utilizado se desprende que el módulo resulta ser una ayuda didáctica fundamental para adquirir las competencias de varias asignaturas relacionadas con la energía eléctrica distribuida y la configuración, mantenimiento y monitoreo de instalaciones fotovoltaicas. Por lo tanto, se concluye que el módulo didáctico realizado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería Eléctrica facilita efectivamente que los estudiantes se capaciten en casos reales de sistemas fotovoltaicos domiciliarios en un ambiente seguro, bajo la guía y supervisión de los profesores.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] Martínez, C., & Poladian, A. (2020). El uso de energía fotovoltaica en viviendas de Buenos Aires: Estudio microeconómico de factibilidad. *Economía Coyuntural*, 5(2), 33-58.
- [2] Roitman, M., Mestrallet, A., Aramburu, M., & Rossi, R. (2015). Dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica para una vivienda familiar de la Ciudad de Córdoba. *Revista de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 2(2), 37-43.
- [3] Morán, F. A., Facchini, M. L., Pontoriero, D. H., & Doña, V. M. (2009). Inserción de generación distribuida a través de instalaciones fotovoltaicas domiciliarias ajustadas a las curvas típicas de demanda residencial. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13.
- [4] Ortiz Quintero, T. A. (2019). Factibilidad de la implementación de un sistema solar fotovoltaico en la vereda de El Blanquecino, La Argentina (Huila).
- [5] Growatt, (2022). Off Grid Solar Inverter 2 kVA-5 kVA. User Manual.
- [6] Growatt (2022). MIC 1500 TL-X. Installation & Operation Manual.
- [7] MPPSolar (2022). 1 kVA-5 kVA Inverter/Charger. User Manual

# PRODUCCIÓN Y APROVECHAMIENTO DE HIDRÓGENO OBTENIDO A PARTIR DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

Gonnet, Adrián; Mainetti, Carlos; Guillermo, Eduardo; Borja, Fernando

Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional  
gonnet@frbb.utn.edu.ar

## RESUMEN.

El cumplimiento del compromiso asumido por varias naciones para contribuir a descarbonizar el planeta enfrenta desafíos dentro del campo de la energía. En ese contexto, los sistemas de generación eléctrica distribuida con producción de hidrógeno a partir de fuentes de energías renovables representan un camino posible. Si el hidrógeno se utiliza para abastecer celdas de combustible se contribuiría a alcanzar las metas establecidas en la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> al ambiente. Este trabajo presenta los resultados en el abastecimiento de electricidad, obtenidos con un sistema que combina paneles solares con la producción de hidrógeno y celda de combustible. El sistema propuesto aprovecha el exceso de producción de energía solar para producir hidrógeno en las horas de máxima radiación. De esta forma es posible reemplazar el almacenamiento en baterías de una instalación fotovoltaica desconectada de la red. La carga utilizada es la iluminación del área de laboratorio destinada a la realización de prácticas de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad Regional Bahía Blanca. El proceso de simulación se realizó con el programa Homer Pro, teniendo en cuenta el consumo diario promedio. Los resultados demuestran que es posible cubrir la demanda anual de electricidad, con un sistema autónomo sin red eléctrica, reemplazando el almacenamiento en baterías por un sistema de generación de hidrógeno que abastece a una celda de combustible funcionando junto con los paneles solares formando una microrred.

**Palabras claves:** Fotovoltaico, Hidrógeno, Celdas de combustible, Generación distribuida.

**Área temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas.

**Categoría del trabajo:** Trabajos de Docentes-Investigadores-Profesionales

## **1. INTRODUCCIÓN**

Son muchas las alternativas que se analizan para lograr soluciones de abastecimiento eléctrico con energías renovables. Se pretende así el reemplazo del empleo de combustibles fósiles para cubrir la creciente demanda en los sectores, residencial, industrial y comercial. Con este propósito se analizan fuentes que utilizan aerogeneradores, paneles solares, biomasa entre otros. Uno de los sistemas más utilizados en aquellos lugares donde se dispone del recurso solar necesario, es el abastecimiento de electricidad con paneles fotovoltaicos.

Sin embargo, la generación a partir de la energía fotovoltaica muestra características impredecibles incluso durante las horas de presencia de sol, especialmente en días nublados, que producen fluctuaciones en la producción de electricidad, provocando un funcionamiento inestable, con períodos de exceso de producción y otros en los que no es posible cubrir la demanda de la carga. Esto conduce a la necesidad de empleo de formas de almacenamiento. Existen varias tecnologías disponibles para almacenar energía, entre ellas las baterías en sus diversos tipos, son las más utilizadas en los sistemas autónomos o desconectados de la red. Un sistema diseñado con baterías puede resultar insuficiente para cubrir la demanda ante un cambio imprevisto en el comportamiento de la carga o en una cantidad de días nublados mayor a la contemplada. Una alternativa para solucionar los inconvenientes ocasionados con las baterías es el empleo de celdas de combustible alimentadas con hidrógeno para generar electricidad y mejorar el rendimiento global del sistema. Se puede utilizar la energía solar excedente en las horas de sol pico para generar hidrógeno por electrólisis del agua, el cual puede almacenarse para ser utilizado en una celda de combustible en las horas donde la producción desde el sol no es suficiente para abastecer la carga. El hidrógeno puede permanecer almacenado durante largos períodos de tiempo en contrapartida al almacenamiento en baterías. La producción de electricidad a partir de hidrógeno con celdas de combustible se logra a una eficiencia muy alta y sin la emisión de gases de efecto invernadero. Además, si todo el sistema funciona en el mismo punto de consumo se reducen los gastos y las pérdidas en el transporte.

Varios trabajos se encuentran en la literatura sobre el funcionamiento de sistemas que combinan fuentes de energía renovables con celdas de combustible. En [1,2] se analizan varios ejemplos de aplicación de tecnologías que emplean paneles solares y producción de hidrógeno. En [3] se estudia la capacidad óptima de paneles y celdas de combustible para alimentar una residencia ubicada en Diyala Governorate, Iraq con conexión a la red. En [4] se realiza un análisis técnico económico de un sistema de paneles solares y celdas de combustible en el noreste de India. El modelado y simulación de un sistema desconectado de la red de paneles solares, celda de combustible, baterías y generador que alimenta a un edificio comercial se presenta en [5]. Los resultados de la simulación de un sistema híbrido solar y celda de combustible para abastecer a un edificio educativo es presentado en [6]. En [7] se realiza un análisis económico de un sistema de paneles solares, aerogenerador, celda de combustible y electrolizador para aplicación residencial. La eficiencia de un sistema híbrido desconectado a la red, compuesto de paneles solares, celda de combustible y generador Diesel para alimentar a un edificio universitario se estudia en [8]. Un estudio de funcionamiento de un sistema híbrido de paneles solares celda de combustible y baterías para abastecer de electricidad y calor a un edificio educativo se presenta en [9].

En este trabajo se presenta el diseño de un sistema desconectado de la red, compuesto de paneles solares, producción de hidrógeno por electrólisis y celdas de combustible que no utilizan baterías. El sistema se propone en reemplazo de una instalación fotovoltaica existente en un edificio educativo. El artículo está organizado con las siguientes secciones numeradas, en 2 los materiales y métodos, en 3 los resultados, en 4 las conclusiones y por último en 5 las referencias.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS.**

### **2.1. Descripción del sistema actual**

La energía eléctrica necesaria para la iluminación del área de actividades prácticas del laboratorio de Ingeniería Eléctrica de la facultad Regional Bahía Blanca es generada en la actualidad con un sistema solar fotovoltaico desconectado de la red. Tres paneles solares de 260 Wp cada uno, un inversor híbrido de 3 kVA y una batería de litio de 2.500 Wh, constituyen el sistema fotovoltaico. Una fotografía del sistema se muestra en la Figura 1.



Figura 1. Fotografía del sistema fotovoltaico

La carga máxima adquiere un valor de potencia de 500 W. En la Figura 2 se muestra el área cuya iluminación es abastecida por la instalación fotovoltaica. El horario habitual de utilización de la iluminación es 17 horas a 23 horas.



Figura 2. Área del laboratorio de Ingeniería Eléctrica

La imagen de La Figura 3, obtenida desde el programa de monitoreo de la instalación, muestra el desempeño del sistema en un día despejado de nubes del mes de septiembre. En color azul se muestra la producción de los paneles y en color rojo el consumo de la carga.

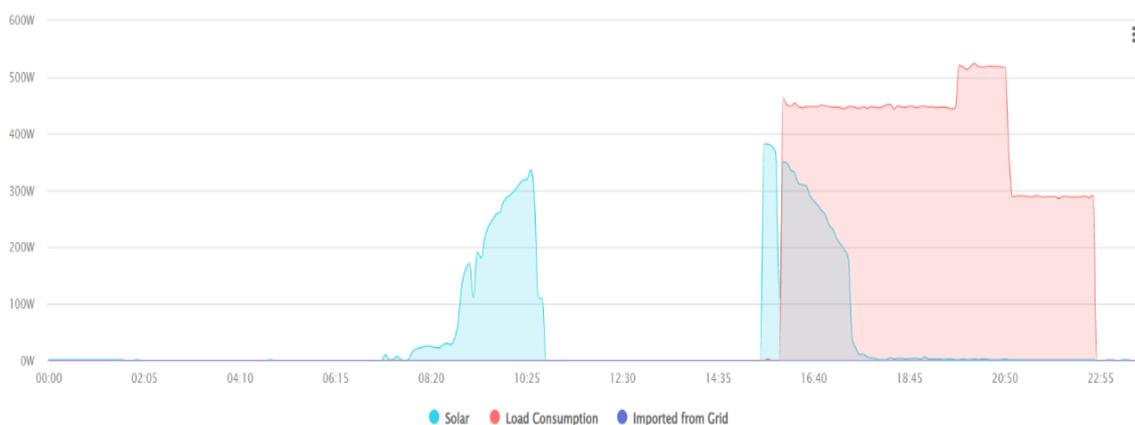


Figura 3. Datos de la producción solar y del consumo de la carga diarios.

Para realizar un análisis del comportamiento de la instalación se obtuvieron, en forma separada, la variación del estado de la carga de la batería en la Figura 4 y en la Figura 5 la variación en la

producción solar. Evidentemente existe una franja donde los paneles podrían producir más electricidad, sin embargo, debido al estado de carga de la batería y a la ausencia de consumo, esa producción se ve limitada por el inversor. Esto ocurre para este día en particular en la franja horaria comprendida entre las 10:30 horas y las 15 horas.

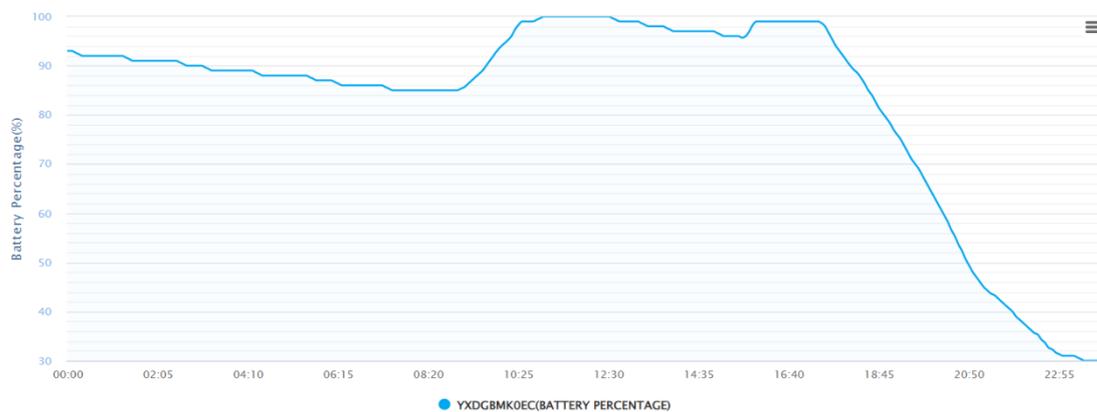


Figura 4. Variación del estado de la carga de la batería

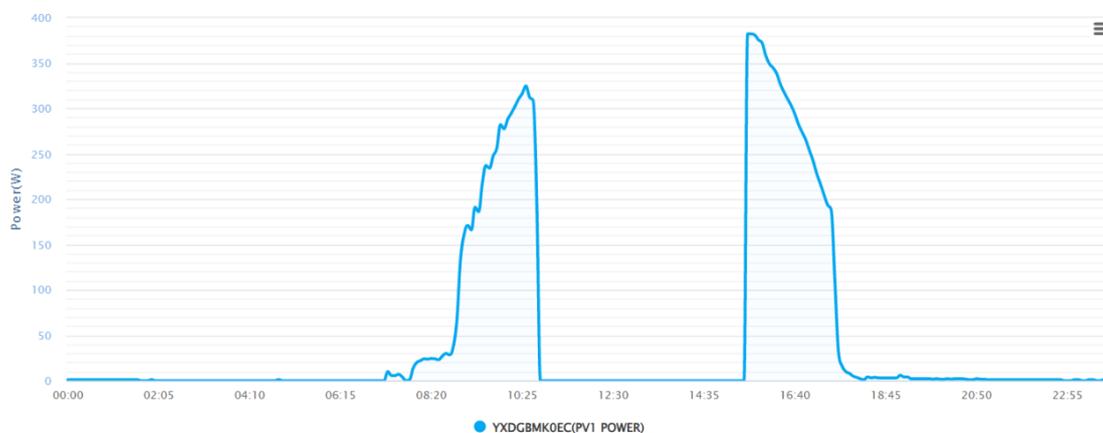


Figura 5. Variación de la producción solar

Por otro lado, en algunos días donde recurso solar es menor, la carga de la batería llega al límite prefijado de su profundidad de descarga antes que terminen las actividades del laboratorio. En este caso el sistema realiza un baiapás para alimentar los consumos y comenzar el proceso de carga de la batería utilizando la red eléctrica. Esto se ve reflejado en el gráfico de la Figura 6.



Figura 6. Consumo de energía importada de la red

Esta última situación podría evitarse configurando el inversor para que no utilice la red para la carga de la batería. Pero esto traería cierta incertidumbre si al día siguiente no se dan las condiciones climáticas adecuadas para que la batería se recargue antes del encendido de la iluminación.

## 2.2. Descripción del sistema propuesto

Se plantea un sistema fotovoltaico desconectado de la red, sin almacenamiento en baterías que pueda aprovechar toda la capacidad de generación fotovoltaica. Se compone de paneles solares, un electrolizador, un reformador de gas natural, un tanque de almacenamiento de hidrógeno y una celda de combustible. La Figura 7 muestra el esquema construido con el programa Homer Pro para la simulación del funcionamiento del sistema. El excedente de la producción solar se utiliza para electrolizar agua, produciendo hidrógeno verde que se almacena en un tanque. La celda de combustible produce electricidad y calor a partir del hidrógeno generado. Dado que la cantidad de hidrógeno entregado por el electrolizador no resulta suficiente para cubrir la electricidad necesaria, se suma al sistema un equipo reformador de gas natural para la producción del hidrógeno faltante. De esta manera el sistema no utiliza la red eléctrica, pero necesita del abastecimiento de gas natural para cubrir la cantidad necesaria de combustible.

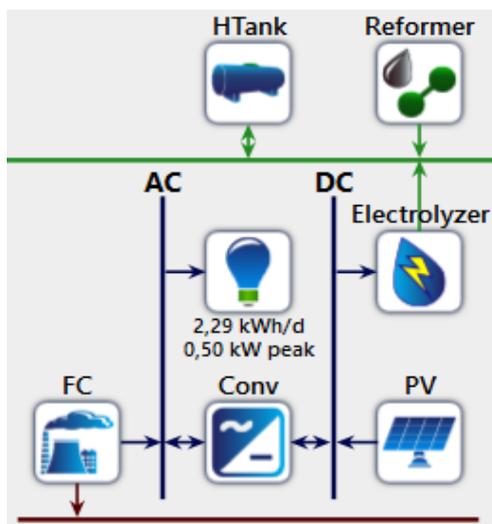


Figura 7. Componentes del sistema propuesto

## 3. RESULTADOS.

Para cubrir la demanda de energía durante todo el año, se obtuvieron las siguientes capacidades óptimas de los equipos: un electrolizador de 2 kW, un reformador de 1 kg/h y un tanque de almacenamiento de 5 kg de hidrógeno.

La Figura 8 muestra el resultado de la simulación respecto a la producción de electricidad mensual promedio durante el año. Se observa en color verde la porción de electricidad producida por la celda de combustible y en color marrón lo aportado por los paneles solares. Además, se obtiene una producción de 1.199 kWh por parte de los paneles y 780 kWh es la producción de electricidad de la celda de combustible. Con la producción de ambas fuentes se cubre el 100 % de los 835 kWh que requiere la carga.

Production	kWh/yr	%	Consumption	kWh/yr	%	Quantity	kWh/yr	%
Generic flat plate PV	1.199	60,6	AC Primary Load	835	42,3	Excess Electricity	0	0
Generic Fuel Cell (size-your-own)	780	39,4	DC Primary Load	0	0	Unmet Electric Load	0	0
<b>Total</b>	<b>1.979</b>	<b>100</b>	<b>Total</b>	<b>1.976</b>	<b>100</b>	Capacity Shortage	0	0

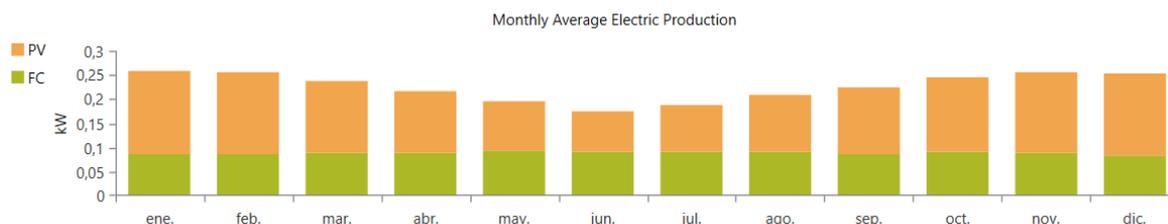


Figura 8. Producción de electricidad del sistema propuesto

La producción anual de kilogramos de hidrógeno se muestra en la Figura 9. Lo producido por el electrolizador se observa en color verde y en color marrón la producción del reformador. Expresado en valores anuales la cantidad de hidrógeno generada por electrólisis es de 24,6 kg y la cantidad aportada por el reformador es de 61,3 kg.

Production	kg/yr	%
Electrolyzer	24,6	28,6
Reformer	61,3	71,4
Total	85,9	100

Consumption	kg/yr	%
Generic Fuel Cell (size-your-own)	85,8	100
Hydrogen load	0	0
Total	85,8	100

Quantity	kg/yr	%
Excess hydrogen	0	0

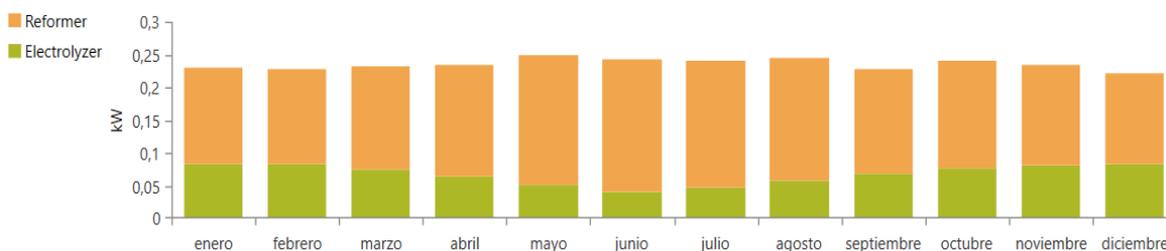


Figura 9. Producción anual de hidrógeno

#### 4. CONCLUSIONES.

En este trabajo se planteó como objetivo demostrar que es posible alimentar los consumos de iluminación de un edificio educativo utilizando paneles fotovoltaicos, prescindiendo de la red eléctrica y del almacenamiento de energía en baterías. Para ello se proyectó aprovechar el exceso de generación fotovoltaica para generar hidrógeno por electrólisis del agua. La utilización de hidrógeno como vector energético se considera trascendental y avanzar en investigaciones en este campo favorecería el desarrollo de una economía basada en este combustible, en reemplazo de los combustibles fósiles. En ese contexto, se consideraron a los equipos electrolizadores, reformadores de gas natural y celdas de combustible elementos fundamentales para el diseño de estas instalaciones.

Los resultados obtenidos al simular el sistema propuesto permiten arribar a las siguientes conclusiones:

- La cantidad de hidrógeno producido por electrólisis utilizando el excedente solar, no es suficiente para cubrir la demanda anual promedio de la carga.
- Si se agrega un equipo reformador de gas natural, es posible obtener la cantidad de hidrógeno faltante.
- Formando una microrred de paneles solares, equipos de producción de hidrógeno y celda de combustible es posible independizarse de la red eléctrica.
- El funcionamiento es totalmente autónomo desconectado de la red eléctrica y requiere de la utilización de gas natural.
- Lo más conveniente desde el punto de vista medioambiental es producir hidrógeno utilizando energías renovables. Sin embargo, la utilización de gas natural para producir electricidad en forma local con una celda de combustible implica una mejora en la eficiencia y reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto se establece al compararlo con la utilización de gas natural para producir electricidad en una central eléctrica. Recordar que en nuestro país alrededor del 60% de la matriz energética proviene de centrales que utilizan gas natural.
- Si bien no fue considerado en este trabajo, existe la posibilidad de aprovechar el calor generado por cogeneración en la celda de combustible para calentar el agua sanitaria o para calefacción, aumentando aún más la eficiencia global teniendo en cuenta la electricidad y calor producido.
- La tecnología involucrada para producir y almacenar hidrógeno está en desarrollo, lo cual significa que desde el punto de vista de costos no resulta conveniente plantear instalaciones de este tipo. La mirada deberá estar puesta en la contribución que estos estudios puedan aportar para desarrollar un futuro sin combustibles fósiles y con menos emisiones de CO<sub>2</sub>. Esto significaría contar con redes de distribución de hidrógeno o, como paso intermedio, la distribución de gas natural mezclado con hidrógeno.
- Si para el caso planteado se pretendiera prescindir del gas natural y cubrir toda la producción de hidrógeno mediante la electrólisis del agua utilizando paneles fotovoltaicos, se requeriría un área demasiado extensa y, además, aumentaría la complejidad para almacenar más cantidades de hidrógeno.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Pagliaro, M., Konstandopoulos, A. G., Ciriminna, R., & Palmisano, G. (2010). Solar hydrogen: fuel of the near future. *Energy & Environmental Science*, 3(3), 279-287.
- [2] Yilanci, A., Dincer, I., & Ozturk, H. K. (2009). A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications. *Progress in energy and combustion science*, 35(3), 231-244.
- [3] Hassan, Q. (2020). Optimisation of solar-hydrogen power system for household applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(58), 33111-33127
- [4] Pal, P., & Mukherjee, V. (2021). Off-grid solar photovoltaic/hydrogen fuel cell system for renewable energy generation: An investigation based on techno-economic feasibility assessment for the application of end-user load demand in North-East India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111421.
- [5] Ghenai, C., & Bettayeb, M. (2017, November). Optimized design and control of an off grid solar PV/hydrogen fuel cell power system for green buildings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 93, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.
- [6] Ghenai, C., & Bettayeb, M. (2019). Grid-tied solar PV/fuel cell hybrid power system for university building. *Energy Procedia*, 159, 96-103.
- [7] Ghenai, C., & Bettayeb, M. (2017, November). Optimized design and control of an off grid solar PV/hydrogen fuel cell power system for green buildings. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 93, No. 1, p. 012073). IOP Publishing.
- [8] Ghenai, C., & Bettayeb, M. (2019). Modelling and performance analysis of a stand-alone hybrid solar PV/Fuel Cell/Diesel Generator power system for university building. *Energy*, 171, 180-189.
- [9] Gonnet, A., Anton, M., Mainetti, C., Guillermo, E., Borja, F., & Bournod, L. (2021). Sistemas de microgeneración que integran paneles fotovoltaicos con generadores de electricidad y calor combinados (CHP) y almacenamiento en batería. *Ingenio Tecnológico*, 3, e023-e023.

# DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA DE UN APLICADOR DE RADIOFRECUENCIA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL

Corach, Julián <sup>(ab)</sup>, Fernández Galván, Eriel<sup>(a)</sup>, Sorichetti, Patricio Aníbal<sup>(a)</sup>

a Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires

b CONICET

jcorach@fi.uba.ar

## RESUMEN

En los últimos años, se han investigado métodos alternativos para obtener mejoras en la producción de biodiesel. En particular, muchos trabajos apuntaron a la aplicación de microondas durante la transesterificación. Sin embargo, el uso de radiofrecuencias presenta una importante ventaja: como la frecuencia es menor, la longitud de onda y la profundidad de penetración son mayores, permitiendo un calentamiento más uniforme y la posibilidad de procesar volúmenes mayores.

En este contexto, este trabajo presenta el diseño, la construcción y la caracterización eléctrica de un aplicador electromagnético para un sistema de producción de biodiesel con calentamiento por radiofrecuencia a 13.56 MHz y 27.12 MHz. En el trabajo se describe el aplicador, se presentan nociones para su dimensionamiento eléctrico y mecánico, y se discute la selección de materiales. En cuanto a la caracterización eléctrica, se presentan resultados experimentales entre 1 MHz y 30 MHz y se desarrolla el modelo circuital del aplicador.

**Palabras Claves:** Biodiesel, Radiofrecuencia, Transesterificación, Propiedades eléctricas, Calentamiento.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

El biodiesel es un biocombustible líquido ampliamente utilizado a nivel mundial en motores Diesel, mezclado con gasoil. Se lo obtiene a partir de una reacción denominada transesterificación, en la cual reacciona un aceite vegetal o una grasa animal con un alcohol de cadena corta, y se obtiene una mezcla de metilésteres y glicerol [1]. Para que la reacción sea eficiente, debe llevarse a cabo con agitación continua, calentamiento, y en la presencia de un catalizador. En Argentina, la producción industrial de biodiesel se basa en la utilización de aceite de soja, metanol e hidróxido de sodio (este último utilizado como catalizador) [1,2].

Durante la producción de biodiesel debe calentarse y agitarse en forma continua la mezcla de aceite de soja con el metóxido de sodio (mezcla de metanol e hidróxido de sodio). El calentamiento se lleva a cabo en general con calderas o generadores de vapor convencionales [4]. Resulta interesante reducir el consumo de energía necesario para ese fin, tanto desde el punto de vista del productor como para el cuidado del medioambiente. En procesos industriales tales como secado, esterilización, cocción, desinsectación, etc. [5] se utilizan técnicas de calentamiento volumétrico por radiofrecuencia y microondas; cabe destacar que, por razones regulatorias, las bandas de frecuencia permitidas (bandas ISM, "industrial, scientific, medical") para estos usos están reguladas internacionalmente por la UIT ("Unión Internacional de Telecomunicaciones") y corresponden a algunas frecuencias comprendidas entre 6,765 MHz y 244 GHz. En particular, la banda de 2,45 GHz se utiliza en los hornos de microondas de uso doméstico, y por lo tanto se encuentra ampliamente difundido en los hogares.

En los últimos años, numerosos trabajos científicos (más de 200 desde 2009) apuntan a la utilización de calentamiento con radiación de microondas durante la transesterificación para mejorar la eficiencia de la reacción. En los trabajos científicos publicados, la aplicación de microondas suele llevarse a cabo utilizando hornos domésticos modificados, por lo que la frecuencia de operación es de 2,45GHz. En general, en estos trabajos se reportan rendimientos muy superiores a escala de laboratorio, en comparación con el método estándar de calentamiento [6]. Ahora bien, la utilización de microondas en grandes volúmenes (propios de la escala industrial) presenta limitaciones: la profundidad de penetración de las ondas a 2,5GHz es del orden de 10 centímetros, por lo que la energía se absorbe principalmente en las capas externas de los reactores [5]. En consecuencia, el calentamiento no resulta uniforme y pueden producirse puntos calientes ("hot spot") que aceleran la reacción de forma descontrolada [5]. Por otro lado, en general, los reportes no presentan análisis previos electromagnéticos; en particular, no se realizan mediciones previas de las propiedades eléctricas de la mezcla aceite vegetal/metóxido de sodio ni de sus componentes. Así, la fuente de microondas no está debidamente dimensionada, por lo que, en términos electromagnéticos, no está "adaptada" a la carga. En consecuencia, la eficiencia del calentamiento no es óptima [5]. Además, a escala industrial, la implementación de sistemas de calentamiento por microondas de grandes potencias reviste algunas dificultades técnicas y es costosa. Por el contrario, el calentamiento por radiofrecuencia (bandas ISM de 13,56MHz, 27,12MHz y 40,68MHz) presenta ventajas comparativas: es más adecuada para el calentamiento de grandes volúmenes de líquidos ya que, al tener menor frecuencia, la profundidad de penetración es mayor, permitiendo un calentamiento más uniforme [4,5,7,8]; además, la generación de radiofrecuencia de alta potencia es más eficiente que la de microondas. En cuanto a su aplicabilidad, ya existen equipos comerciales de secado y calentamiento por radiofrecuencia de potencias en el orden de decenas de kW [9] muy utilizados en secado, tratamiento de materiales, desinsectación, cocción de alimentos, etc. [10,11].

A grandes rasgos, los sistemas de calentamiento por radiofrecuencia consisten en un generador de radiofrecuencia, un sistema de transmisión de energía, un sistema de adaptación de impedancias y el reactor donde tiene lugar la transesterificación, usualmente denominado aplicador. Las distintas partes del sistema están esquematizadas en la Figura 1. En este trabajo se describe el diseño, la construcción y la caracterización eléctrica de un aplicador electromagnético de laboratorio para la producción de biodiesel para operar a 13.56 MHz y 27.12 MHz.

## 2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

La Figura 1 muestra un esquema simplificado de un sistema de calentamiento por radiofrecuencia. El generador de señales trabaja en bajas potencias (mW), por lo cual se utiliza un amplificador de radiofrecuencia que lleva la señal a decenas de W. Para evitar reflexiones de energía, y con ello el daño los equipos aguas arriba (generador y amplificador), todas las partes del sistema deben estar adaptadas a  $50 \Omega$  (la impedancia característica del sistema). La adaptación de impedancias puede realizarse con equipos comerciales automáticos, o bien con combinaciones de inductores y capacitores variables. El aplicador se conecta a la salida del sistema de medición y adaptación de impedancias, y es la parte del sistema donde tiene lugar

el calentamiento. Cabe señalar que algunos equipos comerciales tienen incorporada más de una etapa del diagrama de bloques, y que una misma etapa usualmente requiere de más de un equipo. Por otro lado, algunos dispositivos no están indicados en el diagrama (como el bloque de amplificación, que requiere de una fuente de corriente continua de potencia).

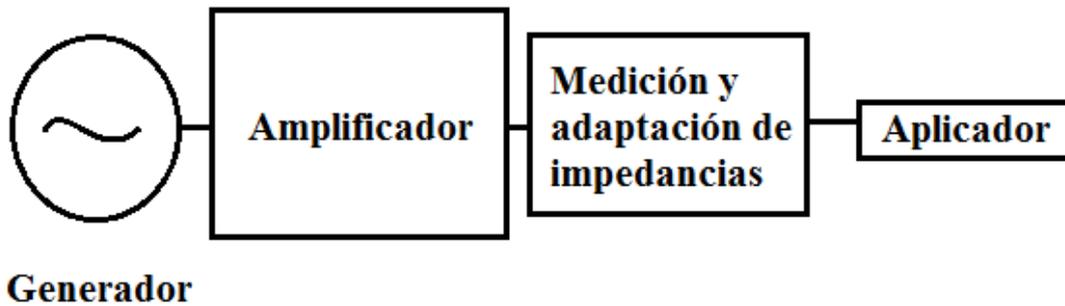


Figura 1 – Diagrama de bloques de un sistema de calentamiento por radiofrecuencia.

En la Figura 2 se muestran fotografías del interior del aplicador, de la tapa y del electrodo activo y del aplicador ensamblado.

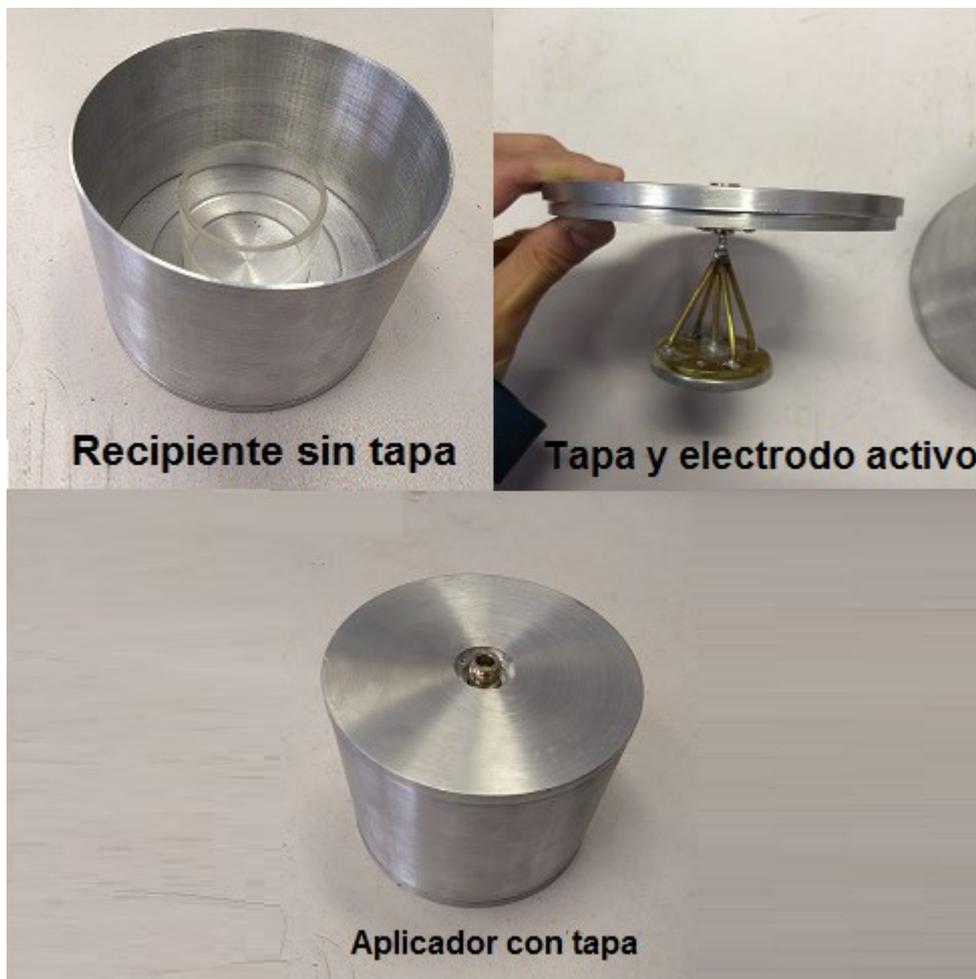


Figura 2 – Fotografías de las partes principales del aplicador.

Cuando la tapa se coloca en el recipiente, el electrodo activo y la base del aplicador forman un capacitor plano paralelo. La base del recipiente consiste en un cilindro macizo al cual se le practica una caladura en el borde, de modo tal que el cuerpo cilíndrico del recipiente pueda ser clavado a la base. La tapa del recipiente también tiene un rebaje en el borde, que permite que la misma pueda ser colocada y retirada, presentando a la vez buen contacto eléctrico.

El electrodo superior (electrodo activo) está abulonado a un disco de bronce, en el cual están clavadas y soldadas cuatro varillas del mismo material. A su vez, las varillas están soldadas por su parte superior al pin central de un conector tipo chasis de radiofrecuencia modelo 82-97-RFX marca Amphenol. Este conector es de muy bajas pérdidas, y está atornillado a la tapa del recipiente metálico. De esta manera, la base, la tapa del cuerpo cilíndrico y la parte exterior conector están en conectadas eléctricamente.

Los materiales a utilizar para las partes metálicas deben satisfacer los requerimientos impuestos por la compatibilidad de materiales. Para evitar que los metales sean atacados durante la transesterificación, puede utilizarse acero inoxidable o aluminio en todas las partes que estén en contacto con las sustancias a procesar. Por razones de costo, peso, y facilidad de mecanizado, se optó por la utilización de aluminio. Sin embargo, en futuros diseños, se prevé la utilización de acero inoxidable dada su mayor durabilidad.

El fondo del recipiente tiene dos caladuras circulares de distintos diámetros, que permiten la inserción de cilindros poliméricos que son utilizados como recipientes para el líquido a tratar. En ambos casos, se verificó satisfactoriamente que no hubiera fugas de líquido hacia el interior del recipiente. Los diámetros internos de los cilindros poliméricos son de 6,5 cm y 9,5 cm, y, naturalmente, el hecho de contar con dos caladuras trabajar con dos volúmenes distintos de tratamiento (0.1 L y 0.2 L, aproximadamente, dependiendo de la altura a la que llegue el líquido).

Como se indica anteriormente, la mezcla de aceite vegetal, alcohol y catalizador debe agitarse durante la transesterificación. Para esto, se coloca el aplicador sobre un agitador magnético y se introduce un buzo en la parte interior del cilindro polimérico. En este sentido, es importante destacar que el metal utilizado para la base del aplicador debe ser paramagnético (como el aluminio), a fin de que las líneas de campo magnético la atraviesen y el buzo rote con una velocidad adecuada.

La parte activa del aplicador, es decir, el volumen en el cual se coloca el líquido a tratar, está formada por el espacio entre el electrodo activo y la base del recipiente. Es importante notar que, para que el campo eléctrico se concentre entre el electrodo activo y la base, la distancia entre el electrodo activo y la tapa debe ser mayor que aquella entre electrodo activo y la base. De esa manera, se reduce la capacitancia formada entre el electrodo activo y la tapa. El volumen de líquido sometido al campo eléctrico, queda entonces determinado por la distancia entre el electrodo activo y la tapa, y por el cilindro polimérico utilizado.

Despreciando efectos parásitos, la capacitancia  $C_0$  de la parte activa queda determinada, por el área del electrodo activo  $A$ , y la distancia entre el mismo y la base del aplicador,  $d$ :

$$C_0 = \epsilon_0 A / d \quad (1)$$

donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del vacío y vale  $8.8541 \times 10^{-12}$  F/m,  $A$  es el área efectiva del sistema de electrodos y  $d$  es la distancia entre los electrodos.

Es importante destacar que la capacidad total del aplicador incluirá también las capacitancias parásitas entre distintas partes metálicas, y la capacitancia del conector.

### 3. CARACTERIZACIÓN ELÉCTRICA

Para determinar experimentalmente el valor de  $C_0$ , se llevaron a cabo mediciones del sistema “cable + aplicador” utilizando el sistema de medición esquematizado en la Figura 2.

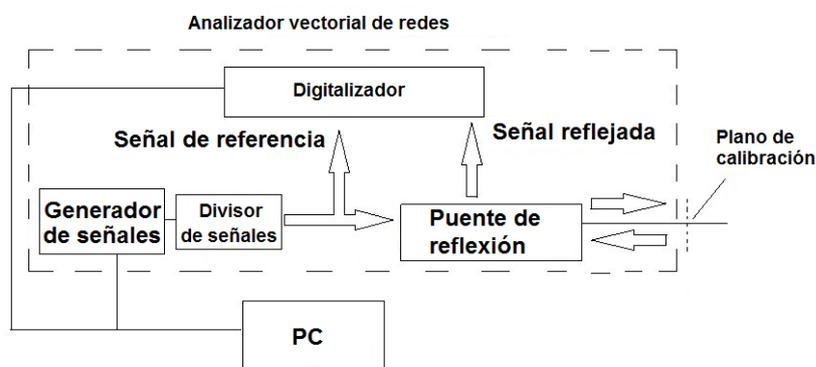


Figura 3 – Esquema del sistema de medición.

Este sistema permite determinar el coeficiente reflexión,  $\rho(\omega)$ , en módulo y fase en función de la frecuencia entre 500 kHz y 1 GHz, conectando cargas en el plano de calibración (ver Figura 3). El funcionamiento del sistema de medición está descrito en detalle en [12].

En la Figura 4 se muestra el módulo del coeficiente de reflexión del aplicador en aire y con ciclohexano.

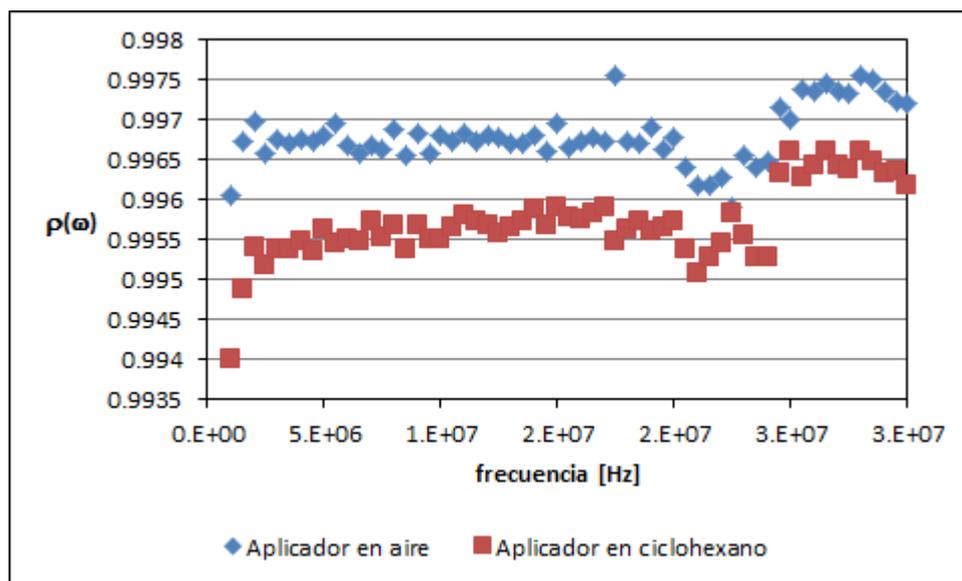


Figura 4 – Módulo del coeficiente de reflexión.

En la Figura 4 puede apreciarse que las pérdidas del aplicador son muy bajas (el módulo de  $\rho(\omega)$  es muy cercano a 1) y que no dependen de la frecuencia. Asimismo, se aprecia que al agregar ciclohexano aumentan levemente las pérdidas (el módulo de  $\rho(\omega)$  disminuye). A partir de las mediciones del coeficiente de reflexión, es posible calcular la admitancia equivalente,  $Y(\omega)$ :

$$Y(\omega) = 1/Z_0(1 - \rho(\omega))/(1 + \rho(\omega)) \quad (2)$$

donde  $Z_0$  es la impedancia característica del sistema (en este caso 50 Ohm). Para determinar la admitancia equivalente del aplicador, el mismo se conecta al sistema de medición con un cable coaxial de 50 Ohm y de bajas pérdidas, con conectores tipo N de marca Amphenol, también de bajas pérdidas. En consecuencia, las mediciones de la admitancia equivalente,  $Y(\omega)$ , incluyen la admitancia equivalente del cable de conexión y de los conectores, y debe ser descontada durante el análisis.

En la Figura 5 se muestra el módulo de  $Y(\omega)$  del aplicador en aire y en ciclohexano.

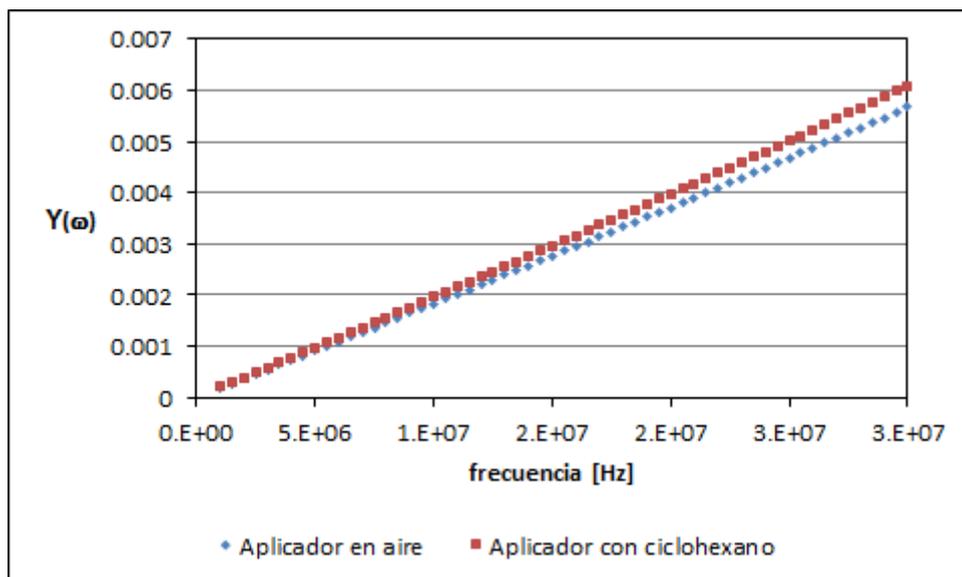


Figura 5 – Módulo de la admitancia equivalente.

A partir de los resultados de la Figura 5, se observa que el comportamiento global del aplicador es similar al de un capacitor con elementos inductivos en serie (hay un leve apartamiento de una línea recta). Se observa también que, al agregar ciclohexano, el módulo de la admitancia

equivalente aumenta a todas las frecuencias. En base a estas observaciones, se planteó el circuito mostrado en la Figura 6 para modelar el sistema.

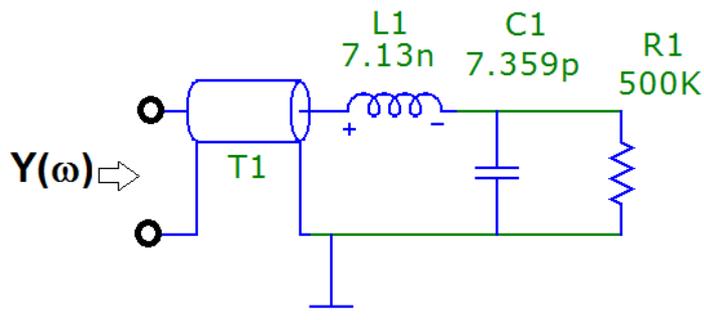


Figura 6 – Circuito equivalente del aplicador.

El cable es modelado mediante una línea de transmisión de bajas pérdidas (T1) y el aplicador mediante elementos circuitales concentrados (L1, C1 y R1). La inductancia L1 está dada principalmente por las barras de conexión del electrodo activo, C1 incluye todas las capacitancias (conector del aplicador, capacitancias parásitas y capacitancia de la parte activa), y R1 representa las pérdidas del aplicador. La línea de transmisión de bajas pérdidas es caracterizada por su impedancia intrínseca y su tiempo de vuelo, siendo sus valores de 55.75  $\Omega$  y 1.213 ns, respectivamente.

La determinación del valor de cada parámetro (indicado en la Figura 7) se llevó a cabo con software gratuito especializado (Microcap12), realizando ajustes a las admitancias complejas determinadas con la Ecuación (2). En particular, para determinar el valor de  $C_0$  se realizó una medición con el aplicador en aire, y luego en ciclohexano. Al llenar con ciclohexano el espacio entre el electrodo activo y la base, se observa un aumento de la capacitancia,  $\Delta C$ , dado por la Ecuación 3:

$$\Delta C = C_0(\epsilon_r - 1) \quad (3)$$

donde  $\epsilon_r$  es la permitividad del ciclohexano y está determinada con gran precisión [Gregory] en un amplio rango de frecuencias.

La Figura 7 muestra el circuito utilizado para realizar el ajuste del aplicador con ciclohexano. Como se observa, el valor de L1 y C1 no varía respecto al que tenían en aire. En cambio, el valor de R1 disminuye (debido a que las pérdidas del ciclohexano son mayores a las del aire).

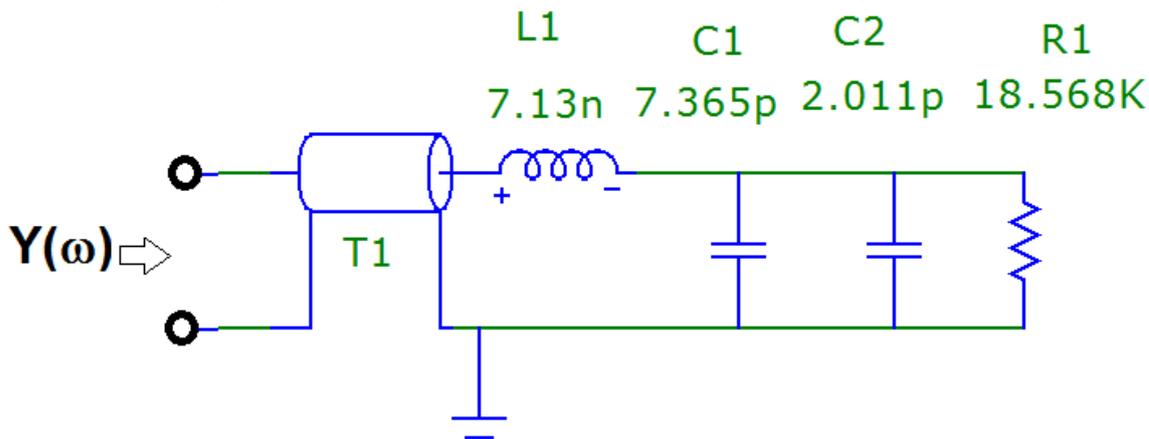


Figura 7– Circuito equivalente del aplicador con ciclohexano.

La capacitancia C2 representa el incremento  $\Delta C$  dado por la Ecuación 3, y como la permitividad relativa del ciclohexano,  $\epsilon_r$ , tiene un valor de 2.02, prácticamente coincide con  $C_0$ , el cual es un parámetro fundamental de diseño.

Para la producción de biodiesel se mezcla un aceite vegetal (con valores de permitividad relativa del orden de 3) con un metanol (permitividad relativa del orden de 33). Se espera entonces que la permitividad de la mezclas de aceite con metanol tengan un valor intermedio entre 3 y 33. Incluso si utilizara metanol puro, el valor de capacitancia total sería menor a 100 pF. Cabe señalar que el agregado de catalizadores como NaOH tenderá a aumentar las pérdidas eléctricas, debido al incremento de la densidad de portadores libres de cargas.

### 3. CONCLUSIONES.

En este trabajo se describe el diseño, la construcción y la caracterización eléctrica de un aplicador electromagnético para la producción de biodiesel con calentamiento por radiofrecuencia. Se presentan resultados experimentales del coeficiente de reflexión entre 1 MHz y 30 MHz, y, a partir de los mismos, se determina la impedancia equivalente del aplicador. Asimismo, se desarrolla un modelo circuital del aplicador, y se determinan los parámetros del mismo.

A partir de los resultados experimentales se verifica que el aplicador tiene bajas pérdidas en el rango de frecuencias de interés, lo cual es fundamental para que el calentamiento sea eficiente. La caracterización eléctrica del aplicador es un requisito fundamental para la correcta selección del sistema de adaptación de impedancias.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] Knothe G, Krahl J, Van Gerpen J. *The Biodiesel Handbook*. 2nd ed. Urbana: AOCS Press; 2010.
- [2] Romano SD, Sorichetti PA. *Dielectric relaxation spectroscopy in biodiesel production and characterization*. London: Springer Verlag; 2011.
- [3] Informe Secretaría de Energía de la Nación. [https://www.agroindustria.gov.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/\\_archivos//000003\\_Informes%20Biocombustibles%202019/190400\\_Informe%20biocombustibles%20\(Abril%202019\).pdf](https://www.agroindustria.gov.ar/sitio/areas/bioenergia/informes/_archivos//000003_Informes%20Biocombustibles%202019/190400_Informe%20biocombustibles%20(Abril%202019).pdf)
- [4] Tabatabaei M, Aghbashlo M, Dehghani M, Panahi HKS, Mollahosseini A, Hosseini M, Soufiyan MM. Reactor technologies for biodiesel production and processing: A review. *Progress in Energy and Combustion Science* 2019;74:239-303.
- [5] Awuah GB, Ramaswamy HS, Tang J. *Radio-Frequency Heating in Food Processing*. London: CRC Press; 2015.
- [6] Lin JJ, Chen YW. Production of biodiesel by transesterification of Jatropha oil with microwave heating. *J Taiwan Inst Chem Eng* 2017;75:43–50.
- [7] Liu S, Wang Y, McDonald T, Taylor SE. Efficient production of biodiesel using radio frequency heating. *Energy & Fuels* 2008;22: 2116-2120.
- [8] Liu S, Wang Y, O J., Herring JL. Fast biodiesel production from beef tallow with radio frequency heating. *Renewable Energy* 2011;36:1003-1007.
- [9] <https://radiofrequency.com/general-industry/>
- [10] Wang S, Tang J. Radio frequency and microwave alternative treatments for insect control in nuts: a review. *Int Agric Eng J* 2001;10:105–20.
- [11] Lagunas-Solar MC, Cullor JS, Zeng NX, Truong TD, Essert TK, Smith WL, et al. Disinfection of dairy and animal farm wastewater with radiofrequency power. *J Dairy Sci* 2005;88(11):4120–31.
- [12] Corach, Julián, Galván Fernández, Eriel, Sorichetti, Patricio Aníbal, S. D. Romano. Broadband permittivity sensor for biodiesel and blends. *Fuel* 254 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115679>

### Agradecimientos

Este trabajo fue realizado con fondos de los proyectos FONCyT PICT 2019 N° 1076, de la Agencia Nacional de Promoción de la Investigación, el Desarrollo Tecnológico y la Innovación, y UBACyT 20020190100275BA, de la Universidad de Buenos Aires.

# CO-DIGESTIÓN DE ORUJO DE UVA CON MACROALGAS DE AGUA DULCE

**Cesano, Margarita**<sup>1</sup>; Alcazar, Constanza<sup>2</sup>; Azua, Facundo<sup>2</sup>; Gatti, Marcela<sup>1,2,3</sup> y Camacho, Alberto<sup>2,3</sup>

1 Centro de Investigaciones en Toxicología y Agrobiotecnología Ambiental (CITAAC-UNCO)  
Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, Neuquén, Argentina.  
margarita.cesano@gmail.com.ar

2 Universidad Nacional del Comahue - Facultad de Ingeniería, Neuquén, Argentina.

3 Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Neuquén, Neuquén, Argentina.

## RESUMEN

El objetivo del trabajo consistió en identificar la proporción de macroalgas que conduce a la obtención de mayores rendimientos de metano en la co-digestión anaeróbica del orujo de uva. Se caracterizaron ambos sustratos en su contenido de sólidos totales, sólidos volátiles, % Humedad, pH, conductividad eléctrica, densidad, carbono orgánico total y carbono oxidable, demanda química de oxígeno, nitrógeno total kjeldahl, fibra detergente ácida y lignina. El valor de pH considerablemente ácido del orujo de uva (3,56) y las macroalgas (5,15) indica la necesidad de implementación de estrategias de alcalinización que permitan su correcta digestión. El valor de SV (96 y 82 % BS, respectivamente) indica una alta proporción de materia orgánica factible de ser transformada en biogás; sin embargo, la determinación de lignina reporta altos valores para el orujo (44%), indicando limitaciones en su biodegradabilidad.

Se determinó el potencial bioquímico metanogénico del orujo de uva solo y combinado con tres proporciones de macroalga: 10%, 20% y 30%. En ensayo se llevó a cabo a  $35 \pm 2$  °C y la relación inóculo/sustrato seleccionada fue de 2. Se incluyó un control positivo con celulosa microcristalina y un control negativo con el inóculo. Cada tratamiento fue estudiado por triplicado y el ensayo tuvo una duración de 33 días. El potencial bioquímico metanogénico para el tratamiento de orujo de uva con 20% de macroalga fue el mayor obtenido (410 Nml CH<sub>4</sub>/g SV), seguido por el orujo de uva 10% (379 Nml CH<sub>4</sub>/g SV), el orujo de uva 30% (354 Nml CH<sub>4</sub>/g SV). En los tres casos el rendimiento es mayor al obtenido con orujo uva como monosustrato (317 Nml CH<sub>4</sub>/g SV), indicando que la co-digestión constituye una alternativa viable para la valorización energética de ambos recursos.

**Palabras Claves:** Orujo de uva, BMP, Co-digestión, Macroalgas de agua dulce, Valorización energética.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN.

La digestión anaeróbica (DA) es una alternativa tecnológica que combina el tratamiento de residuos y la producción de energía. En el proceso, un consorcio microbiano transforma la materia orgánica en biogás a través de una serie de reacciones (hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) que tienen lugar en ausencia de oxígeno.

En las últimas décadas, el uso de biomasa algal como fuente de biocombustibles ha despertado significativo interés, principalmente debido a sus altos rendimientos de producción y a que no compete con los cultivos terrestres por los recursos [1]. Las microalgas son organismos unicelulares microscópicos que cumplen un importante rol en el tratamiento de efluentes, debido a su capacidad de oxigenación y su alta eficiencia en la remoción de nitrógeno y fósforo. Sin embargo, las dificultades de cosecha (pequeño tamaño celular, dilución de la suspensión en el medio, dispersión por la carga superficial negativa) [2] desalientan su utilización como cultivo energético. Las macroalgas, por su parte, son organismos pluricelulares cuyo crecimiento se da tanto en agua salada como dulce, y cuya recolección no presenta mayores dificultades técnicas. Debido al alto contenido de humedad de esta biomasa, la digestión anaeróbica representa una alternativa viable para su valorización.

Un gran número de investigaciones reportan la utilización de macroalgas como sustratos de la DA. Entre las especies de agua salada citadas para la producción de bioenergía pueden mencionarse *Laminaria hyperborea* [1], *Euclima spp.*, *Laminaria japónica*, *Porphyra spp.*, *Gracilaria spp.* y *Undaria pinnatifida* [2], *Laminaria digitata* y *Saccharina latissima* [3], y *Ulva sp.* [4]; y entre las especies de agua dulce pueden mencionarse *Cladophora glomerata* y *Chara fragilis* [5], *Oedogonium* [6], *Spirogyra neglecta* y *Spirogyra elliospora*. La DA como monosustrato reporta valores en bibliografía, pero su utilización como co-sustrato no se encuentra difundida. Es en tal punto donde se pretenden profundizar los estudios. En la norpatagonia, la macroalga *Spirogyra sp* ha sido estudiada en la co-digestión de purines de cerdo, reportando una mejora significativa en los rendimientos de metano obtenidos [7].

Los procesos de co-digestión anaeróbica admiten residuos de diversos orígenes, permitiendo la complementación de características fisicoquímicas que en general conducen a mejores rendimientos. En tal sentido, los residuos del proceso de elaboración de vinos constituyen un sustrato poco explorado en procesos de co-digestión.

La vitivinicultura en Neuquén es una actividad productiva de desarrollo reciente y altamente tecnificada. En 2019 la provincia contaba con 1.766 hectáreas destinadas a la producción de vides, el 47,2% de la superficie plantada de vid en la Patagonia y el 0,8% del total nacional. En la provincia existen diez bodegas que elaboran más de ochenta mil hectolitros de vino y alrededor de setecientos hectolitros de mosto y jugo de uva. Entre los establecimientos de mayor producción se destacan las bodegas integradas Del Fin del Mundo (800 ha), Malma (162 ha), Familia Schroeder (140 ha), Patriitti (110 ha) y Secreto Patagónico (50 ha), ubicadas en la localidad de San Patricio del Chañar [8]. El residuo del proceso de elaboración se denomina orujo, y está constituido por hollejo, semillas y restos de pulpa. La cantidad aproximada de residuos que genera anualmente la industria es de 2.200 toneladas, que si bien es estacionaria, plantea la posibilidad de su utilización para generación de biogás [9].

El objetivo del trabajo consistió en identificar la proporción de macroalgas que conduce a la obtención de mayores rendimientos de metano en la co-digestión anaeróbica del orujo de uva, pensando en su posible combinación para la generación de energía limpia en un escenario de economía circular. Con tal fin, se realizaron ensayos de Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM), para conocer la cantidad máxima de metano factible de generar a partir de las mezclas estudiadas. Este resulta ser una herramienta clave para definir la factibilidad técnica de una planta de biogás [10].

## 2 Materiales y métodos.

### 2.1 Muestreo.

Se realizó el muestreo a campo de orujo de uva en una bodega situada en San Patricio del Chañar, Neuquén, Argentina. El mismo fue tomado en una etapa posterior al proceso de fermentación y corresponde a uva tinta de producción orgánica. Luego del muestreo, se llevó al laboratorio donde fue homogenizado mediante su mezclado manual, eliminando ramas y palillos de gran tamaño. El fraccionamiento se realizó en bolsas de polipropileno, en bultos de 20 gramos, y se lo almacenó en freezer a -4°C (Figura 1).

Las macroalgas fueron recolectadas de las orillas del río Limay en la ciudad de Neuquén. Se realizaron lavados sucesivos con agua de red para eliminar arena e impurezas, se compactaron manualmente para eliminar humedad y se almacenaron en freezer a -4°C (Figura 1).

El inóculo utilizado fue obtenido de un biodigestor experimental alimentado con estiércol porcino y orujo de manzana.



**Figura 1.** Orujo de uva (izquierda) y macroalgas de agua dulce (derecha).

## 2.2 Caracterización

Se determinaron las características fisicoquímicas del orujo de uva y las macroalgas para los siguientes parámetros: Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), % Humedad, pH, Conductividad Eléctrica (CE), Densidad ( $\delta$ ), Carbono Orgánico Total (COT) y Carbono Oxidable (Cox), Demanda Química de Oxígeno (DQO), Nitrógeno Total Kjeldahl (NKT), Fibra Detergente Ácida (FDA) y Lignina.

El inóculo se caracterizó en ST y SV para estimar la carga y calcular los rendimientos del proceso.

## 2.3 Cálculos Previos

Para el diseño del experimento se fijó una relación inóculo/sustrato de 2 (gSV/gSV) y un espacio de cabeza del 50%. Para un reactor de 299,48 ml, el volumen de trabajo útil fue de 149,74 ml. En función del contenido de SV del inóculo, se calculó la cantidad de sustrato a adicionar de la siguiente manera:

$$\text{Cantidad sustrato} = \text{Volumen de Trabajo} \cdot \text{SV inóculo} / (2 \cdot \text{SV sustrato} + \text{Sv inóculo}) \quad (1)$$

Una vez conocida la cantidad de sustrato a adicionar, con su equivalente en SV y utilizando la relación elegida de I/S=2, se estimó la cantidad de inóculo a agregar. La cantidad de co-sustrato se calculó en relación a los SV agregados en forma de sustrato, para tres porcentajes de macroalgas (10%, 20% y 30%).

## 2.4 Determinación del Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM):

El ensayo de PBM se realizó utilizando un sistema manométrico, constituido por una botella de vidrio color caramelo, un tapón de goma y un precinto metálico para su cierre hermético.

El ensayo se llevó a cabo en condiciones mesofílicas ( $35 \pm 2^\circ\text{C}$ ), incluyendo cada tratamiento por triplicado: Orujo Uva, Orujo Uva 10%, Orujo Uva 20% y Orujo Uva 30%. Todos llevaron la misma cantidad de sustrato, y cantidades crecientes de co-sustrato (%). Se incluyó un control negativo – inóculo solo- y un control positivo con Celulosa Microcristalina (CMC). En total se montaron 18 botellas. La duración del ensayo fue de 33 días, y el criterio utilizado para su finalización fue hasta alcanzar el 1% de producción de metano respecto al total acumulado, por 3 días consecutivos [11]. Periódicamente se extrajo el biogás generado a través del tapón de goma, con una jeringa conectada a un manómetro en U que permitió ajustar su extracción hasta igualar la presión atmosférica (Figura 2). Una vez registrado el volumen, el biogás se filtró con una solución de NaOH 1N, permitiendo retener el  $\text{CO}_2$  y estimar indirectamente la fracción de metano. Los datos obtenidos fueron expresados en condiciones normales de presión y temperatura (CNPT: 1 atm,  $0^\circ\text{C}$ ).



**Figura 2.** Sistema de extracción del biogás.

### 3 Resultados y discusión

En la tabla 1 se presentan los valores obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados. Las bacterias acidogénicas y las archeas metanogénicas poseen su rango óptimo de desarrollo en medios con un pH entre 5-6 y 6,5-8, respectivamente. El valor de pH considerablemente ácido del orujo de uva (3,56) indica la necesidad de implementación de estrategias de alcalinización que permitan su correcta digestión. Si bien la co-digestión con macroalgas (pH 5,15) compensa levemente la acidez del orujo, la producción de ácidos grasos volátiles (AGV) en la acidogénesis induce un nuevo desbalance en el pH. Los estiércoles animales poseen una alcalinidad suficientemente elevada que los posiciona de forma atractiva frente a procesos de DA. Los valores de CE en ambos casos (2,8 y 0,6) es <30 mS/cm, por lo que está dentro del rango sugerido.

**Tabla 1.** Caracterización fisicoquímica del orujo de uva y las macroalgas.

Determinación	Unidades	Orujo de Uva	Macroalgas Limay
<b>pH</b>	upH	3,56 ± 0,4	5,15
<b>CE</b>	mS/cm	2,8 ± 0,14	0,65
<b>ORP</b>	mV	245 ± 7,1	672
<b>Densidad BS</b>	kg/m <sup>3</sup>	337,8	n/d
<b>ST</b>	% BH	25,94 ± 0,16	15,03 ± 1,77
<b>SV</b>	% BS	96,73 ± 0,07	82,44 ± 0,42
<b>% Humedad</b>	%	74,06 ± 0,16	84,97 ± 1,77
<b>Carbono Oxidable</b>	%	16,04 ± 2,08	7,06 ± 0,21
<b>COT</b>	%BH	20,86 ± 2,7	9,17 ± 0,27
<b>DQO</b>	g O/kg	512,36 ± 51,58	227,66 ± 36,21
<b>NKT</b>	% BS	1,91	2,46
<b>FDA</b>	%	56,09	n/d
<b>Lignina</b>	%	43,95	n/d

n/d.: determinación no realizada.

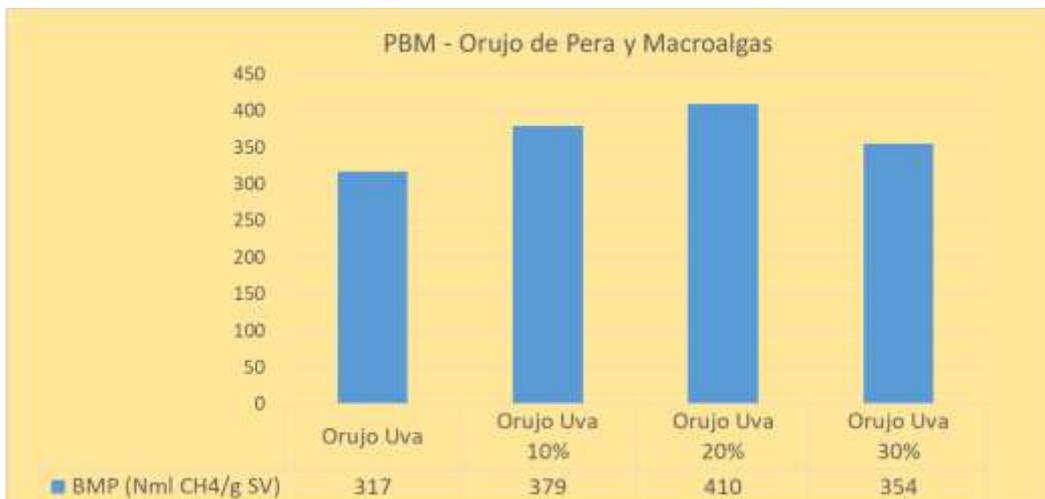
El valor de SV (96 y 82 % BS) indica una alta proporción de materia orgánica factible de ser transformada en biogás; sin embargo, la determinación de lignina reporta altos valores para el orujo (44%), lo cual significa que una gran proporción de materia orgánica presente no es biodegradable. El porcentaje de biodegradabilidad de los sustratos está relacionado de forma inversa con su contenido de lignina, aspecto que incidirá en el rendimiento del proceso de DA. Para la correcta transferencia de masa y energía, deberá considerarse una dilución de la mezcla orujo-macroalga que permita alcanzar valores de ST <10%. El inóculo utilizado en los ensayos de PBM es un buen diluyente dado su bajo contenido en ST (2,07% BS).

Las cantidades agregadas de inóculo, sustrato y co-sustrato para cada uno de los tratamientos estudiados en los ensayos de PBM pueden observarse en la tabla 2. Como puede observarse, las botellas de los tratamientos fueron cargadas con la misma cantidad de inóculo (147 g) y sustrato (2,51 g), pero diferentes cantidades de co-sustrato: 0,51 gr para el porcentaje de 10%, 1,01 g para el 20% y 1,52 gr para el 30%.

**Tabla 2.** Tratamientos estudiados en el ensayo PBM.

Tratamiento	Inóculo (gr)	Sustrato (gr) (Orujo de Uva)	Co-sustrato (gr) (Macroalga)
<b>Orujo Uva</b>	147	2,51	0,00
<b>Orujo Uva 10%</b>	147	2,51	0,51
<b>Orujo Uva 20%</b>	147	2,51	1,01
<b>Orujo Uva 30%</b>	147	2,51	1,52
<b>Control negativo</b>	150	0,00	0,00
<b>Control positivo (CMC)</b>	149	0,69	0,00

En la figura 3 se muestran los valores de PBM obtenidos para los tratamientos seleccionados.



**Figura 3.** Potencial Bioquímico Metanogénico del orujo de uva y de combinaciones con macroalgas.

La co-digestión de orujo de uva con 20% de macroalga fue el tratamiento que obtuvo el mayor rendimiento (410 Nml CH<sub>4</sub>/g SV), seguido por el orujo de uva 10% (379 Nml CH<sub>4</sub>/g SV) y el orujo de uva 30% (354 Nml CH<sub>4</sub>/g SV). En los tres casos el rendimiento es mayor al obtenido con orujo de uva como monosustrato (317 Nml CH<sub>4</sub>/g SV), cuyo valor coincide con el reportado por da Ros et al 2016 (360 NLCH<sub>4</sub>/kg SV) [12].

### 3. CONCLUSIONES.

Las características fisicoquímicas del orujo de uva y la macroalga las posicionan como biomasa atractiva desde el punto de vista energético, y permiten advertir algunas consideraciones a tener en cuenta para su digestión anaeróbica. Como principales aspectos, se puede mencionar que los valores ácidos de pH indican la necesidad de agregar componentes alcalinizantes en la mezcla de digestión, pudiendo complementarse con estiércoles animales, y por otro lado el contenido de lignina advierte que su biodegradabilidad podría ser baja, cuestión que incidiría en el rendimiento del proceso.

La co-digestión de orujo de uva con macroalgas de agua dulce potencia la degradación anaeróbica en condiciones mesofílicas, permitiendo obtener el mayor rendimiento de metano para un 20% de co-sustrato en la mezcla de alimentación, lo que es equivalente a 6,71 gramos de macroalga por cada kilogramo de orujo a digerir. Un 30% de co-sustrato (10,06 g/kg) si bien mejora la metanización respecto al tratamiento como monosustrato, alcanza menores rendimientos que el agregado del 10% (3,39 g/kg).

Estos resultados permiten pensar en la posibilidad de escalar procesos que combinen ambos sustratos para la valorización energética de dichos recursos.

### 4. REFERENCIAS.

- [1] P. D. Kerrison, M. S. Stanley, M. D. Edwards, K. D. Black, and A. D. Hughes, "ScienceDirect The cultivation of European kelp for bioenergy: Site and species selection," *Biomass and Bioenergy*, vol. 80, no. 0, pp. 229–242, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.04.035.
- [2] J. J. Milledge, B. V. Nielsen, S. Maneein, and P. J. Harvey, "A brief review of anaerobic digestion of algae for BioEnergy," *Energies*, vol. 12, no. 6, pp. 1–22, 2019, doi: 10.3390/en12061166.
- [3] M. R. Tabassum, D. M. Wall, and J. D. Murphy, "Biogas production generated through continuous digestion of natural and cultivated seaweeds with dairy slurry," *Bioresour. Technol.*, vol. 219, pp. 228–238, 2016, doi: 10.1016/j.biortech.2016.07.127.
- [4] J. C. Costa, P. R. Gonçalves, A. Nobre, and M. M. Alves, "Biomethanation potential of macroalgae *Ulva* spp. and *Gracilaria* spp. and in co-digestion with waste activated sludge," *Bioresour. Technol.*, vol. 114, pp. 320–326, 2012, doi: 10.1016/j.biortech.2012.03.011.
- [5] P. Baltrenas and A. Misevičius, "Biogas production experimental research using algae," *J. Environ. Heal. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–7, 2015, doi: 10.1186/s40201-015-0169-z.
- [6] R. J. Lawton, A. J. Cole, D. A. Roberts, N. A. Paul, and R. de Nys, "The industrial ecology of freshwater macroalgae for biomass applications," *Algal Res.*, vol. 24, pp. 486–491, 2017, doi: 10.1016/j.algal.2016.08.019.
- [7] Astorga M.; Gatti M.; Camacho A, "Co-digestión anaerobia de purines de cerdo con macrófitas acuáticas de la cuenca neuquina y residuos orgánicos derivados de la agroindustria patagónica," in *XXXII Congreso Argentino de Química*, 2019, pp. 2–3.

- [8] Ministerio de Hacienda de la Nación, "Informe Productivo Provincial. Neuquén," 2019, [Online]. Available: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro\\_informes\\_productivos\\_provinciales\\_catamarca.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/sspmicro_informes_productivos_provinciales_catamarca.pdf)
- [9] T. María and F. Lilo, "Los residuos orgánicos de las bodegas en San Patricio del Chañar de la provincia de Neuquén , Argentina desde la perspectiva del desarrollo sostenible," pp. 1–91, 2021.
- [10] P. B. María, E. Beily, and D. Crespo, *Ensayo potencial bioquímico metanogénico Una metodología clave para conocer la energía de las biomasas*. 2022.
- [11] S. Hafner, H. Fruteau, K. Koch, and C. Holliger, "Improving Inter-Laboratory Reproducibility," *Water*, vol. 12, p. 1752, 2020.
- [12] C. Da Ros, C. Cavinato, D. Bolzonella, and P. Pavan, "Renewable energy from thermophilic anaerobic digestion of winery residue: Preliminary evidence from batch and continuous lab-scale trials," *Biomass and Bioenergy*, vol. 91, pp. 150–159, 2016, doi: 10.1016/j.biombioe.2016.05.017.

# ESTUDIO DE FACTIBILIDAD BASADO EN ENERGÍA SOLAR FOTVOLTAICA ON GRID Y OFF GRID: UN CASO DE ESTUDIO EN COLOMBIA

Rincon-Quintero, Arly Darío<sup>a-b</sup>, Jaimes-Quintero, Karen Tatiana<sup>a</sup>, Sandoval-Rodriguez, Camilo Leonardo<sup>a-b</sup>, Lengerke-Perez, Omar<sup>a</sup>, Tarazona-Romero, Brayan Eduardo<sup>a-b</sup>, Ascanio-Villabona, Javier Gonzalo<sup>a-b</sup>.

<sup>a</sup> Unidades Tecnológicas de Santander – UTS – Bucaramanga, Colombia

<sup>b</sup> Universidad del País Vasco – UPV/EHU – Bizkaia, España

## RESUMEN.

Durante la última década, el desarrollo y la implementación de la energía solar fotovoltaica, ha tenido un crecimiento exponencial en torno al desarrollo de tecnologías que permitan expandir los campos de aplicación para este tipo de sistemas no convencionales. Encontrar la solución más adecuada para obtener el diseño óptimo de los sistemas de energía renovable es un desafío importante. Este artículo se ha enfocado en analizar el consumo energético tipo industrial y el perfil energético real de la granja avícola Santa Rosa, ubicada en el municipio de Simacota Santander, para poder determinar las capacidades y tamaño óptimo de las diferentes instalaciones de generación y almacenamiento de energía del sistema de energía renovable tanto en la red como fuera de la red. El estudio inicia determinando el perfil energético de la granja y posteriormente se diseña el sistema; el proceso de dimensionamiento se realiza con el espacio disponible en la zona caso de estudio. La validación de la metodología desarrollada se realiza comparando los resultados obtenidos entre el software PVSyst y System Advisor Model. Entre los principales resultados, se destaca el respaldo de los valores de producción energética obtenidos a partir de las simulaciones, así como la rentabilidad del sistema en la red para esta instalación industrial en particular, con un PIR (período de recuperación de inversión) a 3 años y una TIR (Tasa Interna de Retorno) del 31%, en comparación al sistema fuera de la red con un PIR a 55 años y una TIR del -8%. Finalmente se comprueba la factibilidad entre las configuraciones y se destaca en gran manera el sistema en la red, siendo un modelo muy atractivo para ejecutar en un futuro no muy lejano para cubrir la demanda eléctrica del lugar.

**Palabras Claves:** Consumo energético, Energía fotovoltaica, Factibilidad, Fuera de la red, Inversión.

**Área Temática:** Sostenibilidad. Sistemas fotovoltaicos.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, con el crecimiento de la demanda de energía y el rápido aumento del consumo de energía, se ha prestado cada vez más atención a la utilización de energías renovables [1]. En comparación con la energía tradicional, la energía renovable tiene las ventajas de respeto al medio ambiente, gran potencial de desarrollo y utilización sostenible [2]. De acuerdo con las perspectivas de la International Energy Agency- IEA basadas en políticas que se rigen actualmente, el desarrollo de energías renovables es una opción importante para la energía futura del mundo y representará el 80% del crecimiento de la demanda mundial de electricidad para 2030 [3]. La energía renovable ha mejorado significativamente en los últimos años, tanto en el sector comercial como en la comunidad científica de investigación [4]. Por lo tanto, se debe priorizar la energía solar como una de las fuentes de energía renovable, debido a que se encuentra disponible y se opera fácilmente [5].

Además, la energía solar es superior a otras fuentes de energía renovable debido a sus diferentes beneficios, entre ellos, el ser ecológico y económico [6]. Hay dos modos de configuración para los sistemas solares fotovoltaicos: sistemas fotovoltaicos fuera de la red y conectados a la red. El sistema de aislamiento cuenta con un sistema de almacenamiento que carga y proporciona energía a la carga cuando no hay presencia de la radiación [7]. Los sistemas fuera de la red son favorables ya que no presenta restricciones en las áreas de instalación, como tierras altas e islas, sin electricidad y telecomunicaciones, o donde es difícil conectarse a la red, incluida la electrificación rural y el alumbrado público [8].

Mientras tanto, algunos usuarios independientes están utilizando combustibles derivados del petróleo para satisfacer sus necesidades urgentes de energía eléctrica [9]. No obstante, seleccionar un sistema fotovoltaico fuera de la red en lugar de una alternativa de energía tradicional basado en recursos de combustibles fósiles no solo conllevaría a evaluar la factibilidad técnico-económica sino también las ventajas ambientales [10], [11]. En el 2018 [12], el Ministerio de Minas y Energía de Colombia junto con la Comisión y Regulación de Energía y Gas firmaron la Resolución 30 de 2018, la cual expresa lineamientos para la integración y comercialización de energías renovables en Colombia.

Colombia por su parte ha comenzado con la transición energética incorporándose progresivamente en el campo de la sustentabilidad energética [13]. Lo que permite su compromiso con la reducción del uso de los combustibles fósiles y emisiones de gases de efecto invernadero GEI. Los sistemas fotovoltaicos en el área de la producción de energía eléctrica cuentan con un porcentaje del menos del 4% [14].

La implantación del sistema fotovoltaico de Colombia ha permitido al 2% de la población de zonas sin acceso a la electricidad cubrir sus necesidades de iluminación, refrigeración y ocio, ampliando así sus capacidades y mejorando su calidad de vida [15]. Los sistemas instalados se concentran principalmente en el sector rural. Aún en el positivo panorama de desarrollo de la sociedad y del entorno productivo, existen diferentes barreras para el desarrollo de tecnologías alternativas de generación de energía, por lo que es necesario formular planes para el desarrollo de las energías renovables, diversificar el mercado energético nacional y desarrollar un matriz legal para la expansión de la energía que permita la realización de sistemas de autoconsumo, distribuidos e híbridos [16].

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo principal el determinar, por medio de cálculos teóricos y dinámicos, la viabilidad en la implementación de un sistema de generación de energía por fuentes no convencionales de energías renovables, enfocado principalmente en la energía fotovoltaica aplicada a la industria, alzándose así en el largo plazo, como una posibilidad rentable de producir energía sin emitir residuos contaminantes o daños adversos al ecosistema. De igual manera, conocer el ahorro económico y su relación costo-beneficio, basados en la configuración de dos variantes existentes para este tipo de tecnología en particular.

## 2. METODOLOGÍA

Tras el desarrollo del presente proyecto de investigación, se destaca la importancia de establecer de manera inicial, el consumo energético del lugar de interés, a fin de establecer el perfil energético del mismo, siendo este, la piedra angular en el que se basa el desarrollo del diseño, dimensionamiento, comprobación y posterior toma de decisiones. Por tal motivo, se determinó el consumo de todos los equipos del cliente industrial (ver en la Figura 1 las barras azules), permitiendo así, establecer un consumo nominal de 119,2 kWp, lo que se traduce en un consumo

de 386.320,00 kWh al año. De tal manera, se establece un consumo medio crítico de 1.408 kWh/día (ver en la Figura 1 las barras naranjas).

Debido a que se trata de una industria alejada de los centros urbanos, es indispensable trabajar con los valores críticos, de manera que se toma el consumo del mes de mayo por tener el pico energético más alto, como se demuestra en la figura 1.

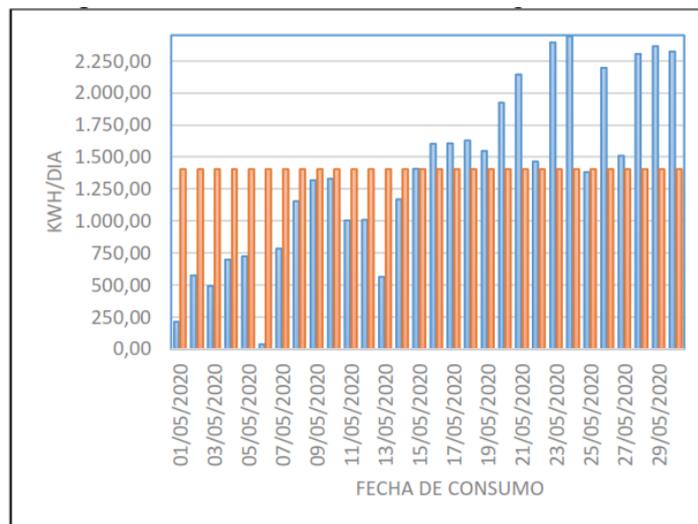


Figura 1. Consumo medio crítico en el lugar de estudio.

## 2.1. Cuadro de consumo

En una visita técnica realizada por los autores, con previa autorización de los directivos de la granja avícola y dando cumplimiento a cabalidad con los protocolos de bioseguridad, se realiza el levantamiento de cargas. Esta granja maneja al momento de realizar el presente proyecto de investigación, 5 galpones de diferentes longitudes, que van desde los 170m hasta los 225m de longitud. La supervivencia y normal desarrollo de las aves se basa principalmente en el alimento, el agua y luz.

En la tabla 1, se observa que el cálculo total del consumo de la granja obtenido a partir del levantamiento de cargas, coincide con los datos estadísticos brindados por el operador de red, lo que asegura un correcto procedimiento seguido por los autores al momento de ejecutar dicha actividad.

Tabla 1. Histórico consumo anual

Mes de Consumo	Energía Activa [kWh/mes]	Energía Reactiva [kVArh/mes]
jul-19	42.015,00	10.332,00
ago-19	11.871,00	1.814,00
sep-19	39.939,00	8.789,00
oct-19	12.985,00	2.144,00
nov-19	30.983,00	7.473,00
dic-19	40.650,00	10.347,00
ene-20	20.906,00	4.876,00
feb-20	40.117,00	9.637,00
mar-20	27.873,00	8.367,00
abr-20	27.174,00	9.331,00
may-20	<b>43.556,00</b>	16.998,00
jun-20	12.409,00	2.461,00
jul-20	35.842,00	11.697,00
<b>Total</b>	<b>386.320,00</b>	<b>104.266,00</b>

## 2.2. Dimensionamiento por espacio disponible

El espacio disponible para realizar una instalación de tipo fotovoltaico, es uno de los factores más restrictivos entre los interesados, puesto que, de no contar con el área suficiente para la disposición de los módulos fotovoltaicos, que de por sí es bastante, solamente se podrán tomar dos caminos: adquirir módulos de mayor potencia los cuales aumentan el costo de instalación, debido a lo novedoso de su desarrollo o tomar la opción de redimensionar el porcentaje de energía a suplementar, pasando de una fuente de energía 100% renovable, a una híbrida. Por lo tanto, se realiza el dimensionamiento por espacio disponible en la granja avícola, por medio de la visita se logran obtener las dimensiones. Sin embargo, en el análisis realizado para el dimensionamiento de los 5 galpones, se observa semejanza entre sus medidas por lo que, en la tabla 2 solo se relacionan medidas para un galpón en general, ya que los demás tendrán las mismas dimensiones.

Tabla 2. Dimensiones de cada sección del techo para cada galpón

	lado 1	lado 2
Galpón	Alto 6,67m Ancho:1.70m	Alto 6,67m Ancho:1.70m

## 2.3. Sistema en la red

Para iniciar, en la ejecución del cálculo de los MFV (módulos fotovoltaicos), se deben tener presente varios datos y cálculos preliminares. La potencia pico a calcular, será la del mes de mayo de 2020, con un consumo de 43556kWh/mes, pues el objetivo del presente proyecto, será satisfacer el 100% de la carga sin la necesidad de recurrir al operador de red.

El cálculo de la cantidad de MFV y la potencia pico instalada se da en función de la siguiente ecuación:

$$N_T = \frac{L_{mdcrit} * FS}{HSP_{crit} * PR * P_{MPP}} \quad (1)$$

Donde

*N<sub>T</sub>*: Numero total de paneles

*L<sub>mdcrit</sub>*: Consumo medio diario del mes critico

*FS*: factor de seguridad

*HSP<sub>crit</sub>*: Hora del sol del mes critico

*PR*: Factor global de funcionamiento o performance ratio

*P<sub>MPP</sub>* = potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida

En resumen, se obtendrá una capacidad de 600 Módulos por cada inversor (*N<sub>M i</sub>*). Y una relación entre el número total de MFV y la capacidad máxima por inversor, permitirá obtener el número total de inversores que serán necesarios para satisfacer la capacidad instalada. Sin embargo, para los intereses del presente proyecto de investigación, se distribuye de manera homogénea la cantidad total de MFV, planteando una disposición final en el galpón 3 de 521 MFV por cada agua de este.

De esta manera, se establece que el número de paneles solares para el presente sistema de estudio será:

$$N_{inv} = \frac{N_T}{N_{M i}} \quad (2)$$

Donde

*N<sub>inv</sub>*: Numero de inversores para el sistema

*N<sub>T</sub>*: Numero total de paneles

*N<sub>M i</sub>*: Numero de MFV por inversor

De la ecuación (2) se obtiene:

$$N_{inv} \approx 2 \text{ Inversores}$$

Por lo que se establece la compra de 2 Inversores CPS SC H125KTL-D0/US-600 (125kW). En la Figura 2, se presenta el diagrama eléctrico de conexión para el sistema en la red.

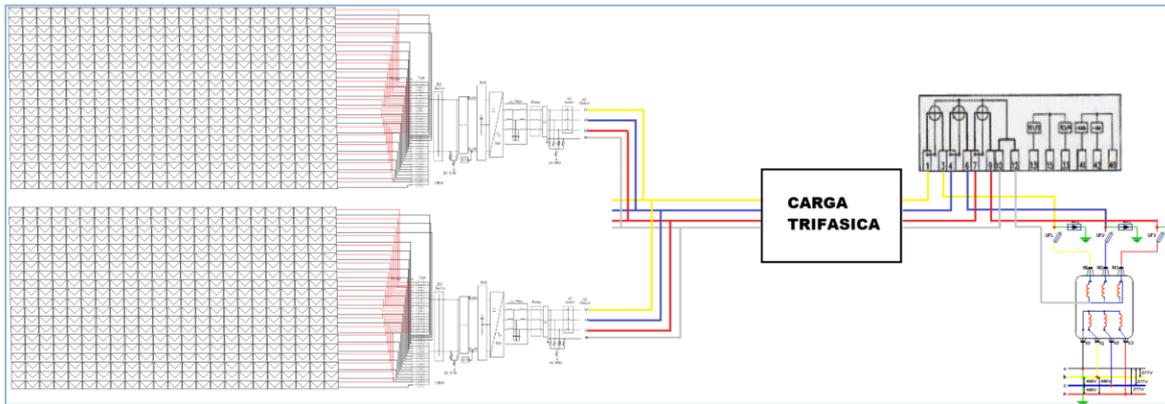


Figura 2. Diagrama eléctrico de conexión para el sistema en la red.

#### 2.4. Sistema fuera de la red

Para el caso del sistema fuera de la red, se debe tener en cuenta componentes adicionales, tales como el inversor/cargador, el banco de baterías y el controlador. Sin embargo, durante el desarrollo del presente proyecto, se concluye que no es técnicamente posible el diseño de un modelo típico del sistema fuera de la red; por lo cual, se opta por un nuevo diseño para satisfacer los objetivos del presente estudio, y esto se logra mediante el desarrollo de un sistema propuesto aislado con baterías.

Este diseño se trata de una propuesta resultado de la alianza entre VICTRON ENERGY Y FRONIUS, por lo que se respeta la designación dada por los anteriores entes. En la figura 3, se presenta el diagrama unifilar de 1 subgrupo del sistema FRONIUS-VICTRON y en la figura 4 el diagrama unifilar sistema fuera de la red.

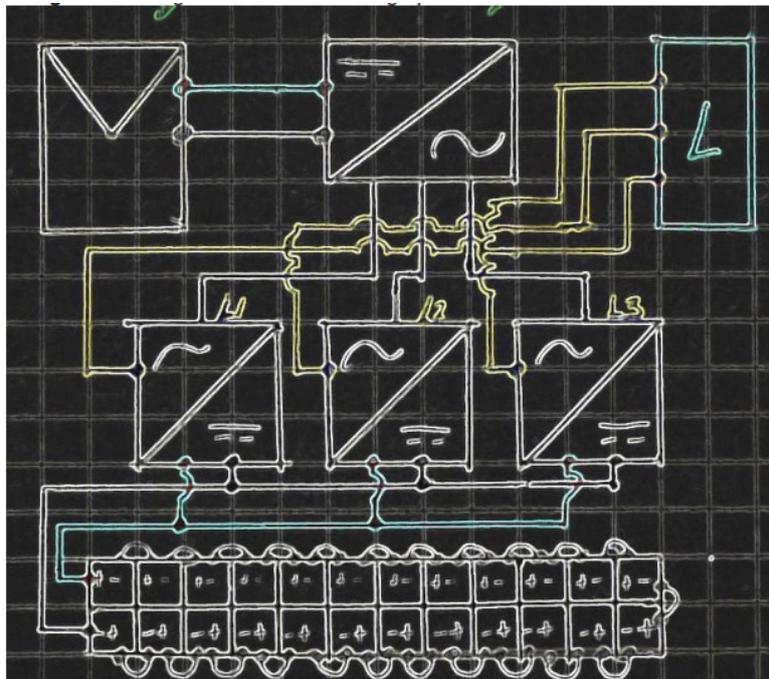


Figura 3. Diagrama unifilar de 1 subgrupo del sistema FRONIUS-VICTRON

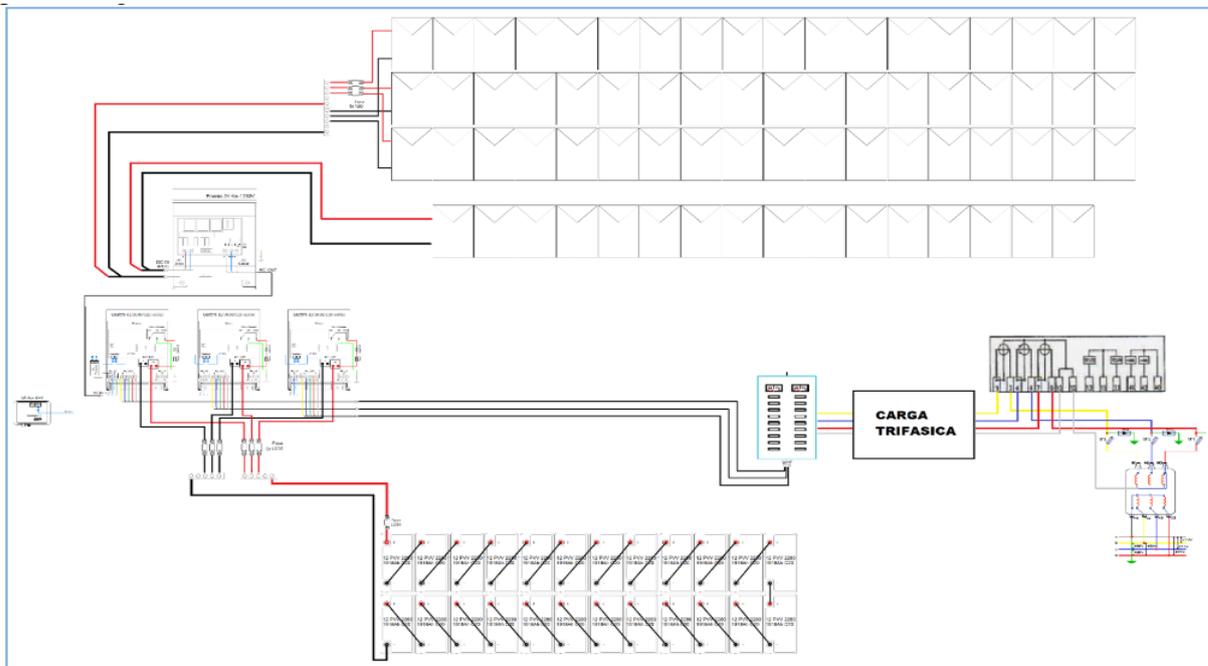


Figura 4. Diagrama unifilar sistema fuera de la red

### 3. SIMULACIONES

De la simulación ejecutada en el programa System Advisor Model para el sistema en la red se obtienen los siguientes resultados aproximados de producción de energía solar respecto al sistema de estudio. En la siguiente figura se relaciona la producción promedio en kW/h respecto a cada mes del año, en ella se puede observar el promedio de producción que se obtendría con el sistema solar propuesto.

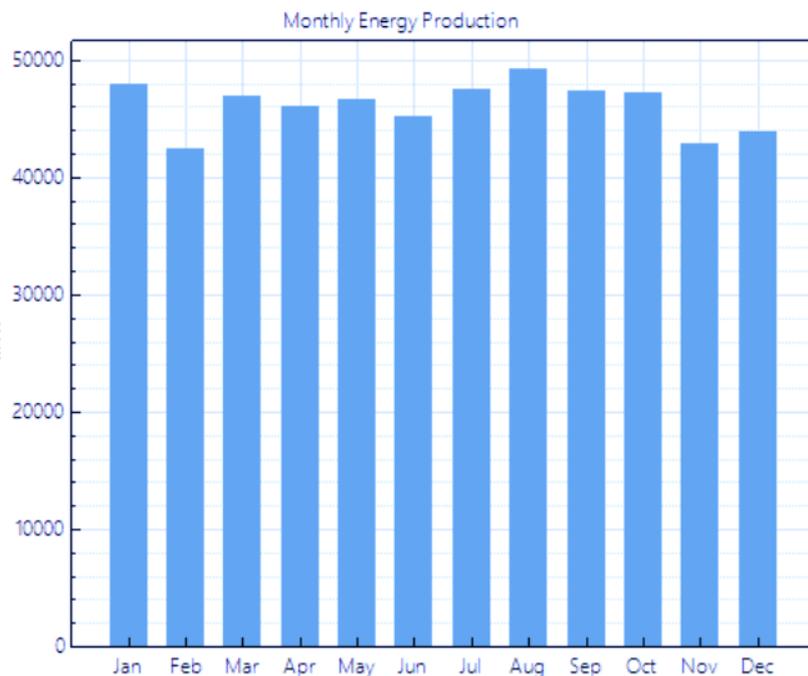


Figura 5. Gráfico de energía promedio de producción mensual sistema en la red.

Para el caso del sistema fuera de la red, una vez ejecutada la simulación en el System Advisor Model, el programa muestra resultados aproximados de producción de energía solar respecto al sistema de estudio. En la figura 6 se relaciona la producción promedio en kW/h respecto a cada mes del año, en ella se puede observar el promedio de producción que se obtendría con el sistema solar propuesto.

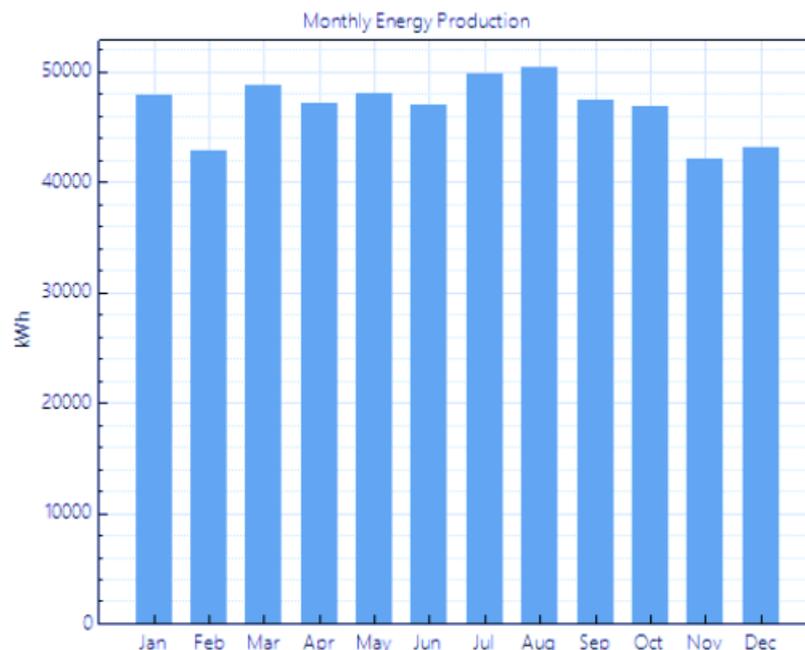


Figura 6. Gráfico de energía promedio de producción mensual sistema fuera de la red

#### 4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Dentro de los resultados de las simulaciones realizadas en el software System Advisor Model para el sistema en la red y el software de PVsyst, sistema fuera de la red, donde se obtiene como resultados como tasa de producción de energía anual, energía mensual, pérdidas, entre otros. También se lleva a cabo una selección de resultados de las simulaciones para iniciar una comparación entre los dos sistemas.

La primera variable seleccionada es la producción anual de energía, generalmente esta se expresa en Wh/año. El software PVsyst entrega como resultado una producción de 650 MWh/año y el software SAM una producción de 663 MWh/año. La siguiente variable es la producción específica de energía fotovoltaica en el día dada en (kWh/día), el resultado obtenido en el software PVsyst es de 1571 kWh/día y el valor arrojado en SAM es de 1312 kWh/día. Por último, se toma en cuenta la variable del índice de rendimiento, este valor indica la eficiencia del sistema simulado, puesto que, puede variar por los datos de pérdidas permitidos en cada programa. Los resultados son muy similares por lo tanto se puede observar que los cálculos manuales son respaldados, confiables y soportados por las simulaciones.

Tabla 3. Balance de los resultados obtenidos para un sistema en la red

Simulación PVsyst en la red		Simulación System Advisor Model en la red	
Producción del sistema	650 MWh/año	Producción del sistema	663 MWh/año
Producción específica	1571 kWh/kWp/día	Producción específica	312 kWh/kWp/día
Índice de rendimiento	0,852	Índice de rendimiento	0,7

En el sistema fuera de la red, se lleva a cabo el mismo procedimiento de simulación en los softwares PVsyst y System Advisor Model (SAM). En la primera variable de producción anual de energía, el simulador PVsyst otorga como resultado una producción anual de 585 MWh/año y a su vez la simulación en SAM arroja valores de producción de 561 MWh/año. De igual manera, la variable de producción específica de energía, el resultado obtenido en PVsyst es de 1364 kWh/día y en software SAM dio como resultado un valor de 1294 kWh/día, la variable final a comparar es el índice de rendimiento, puesto que los resultados en las simulaciones son similares, el debido cambio en el índice de rendimiento varía por los datos de pérdidas permitidos ingresados en cada software.

Tabla 4. Balance de los resultados obtenidos para un sistema fuera de la red

Simulación PVsyst fuera de la red		Simulación System Advisor Model fuera de la red	
Producción del sistema	585 MWh/año	Producción del sistema	561 MWh/año
Producción específica	1364 kWh/kWp/día	Producción específica	1294 kWh/kWp/día
Índice de rendimiento	0,638	Índice de rendimiento	0,69

Se puede concluir que las simulaciones generan resultados similares, soportando los estudios realizados en el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos, estas simulaciones se llevaron a cabo con los datos obtenidos en los cálculos manuales, el tipo de panel seleccionado, la cantidad de módulos fotovoltaicos, inversores y las pérdidas en los mismos. En las gráficas generadas por los simuladores, se puede observar que la producción de energía fotovoltaica anual, mensual y diaria, estará ligeramente por encima de la tasa de consumo de energía en la granja. Ya que, en los estudios se logran visualizar días en que la producción está ligeramente por debajo de la estadística de consumo, esto se debe a la radiación solar en la época del año; no obstante, esto no es un inconveniente para la implementación del sistema fotovoltaico, debido al consumo variado en el transcurso del ciclo de producción en la granja.

Es por esto que para la aprobación del diseño fotovoltaico se prioriza la variable de generación diaria de energía productiva. Esta decisión está basada en el valor del consumo máximo en un día de alta demanda energética en la granja, al ser capaz de proveer la energía necesaria de consumo, el sistema tendrá la capacidad de suministrar y respaldar el consumo energético de la granja.

### 5. PERIODO DE RETORNO DE INVERSIÓN

El PIR (periodo de recuperación de inversión), es un indicador, el cual hace alusión al tiempo en el que se recupera la inversión total al valor presente. Este indicador revela con precisión los años, meses y días. El PIR se puede deducir a partir de la ecuación 3:

$$PIR = I_0 + \frac{(I - FA)}{FR} \quad (3)$$

Donde:

*PIR = Periodo de recuperación de la inversión*

*I0 = Año anterior al que se recupera la inversión*

*I = Inversión inicial*

*FR = Flujo de efectivo del año en que se recupera la inversión*

*FA = Flujo efectivo acumulado del año inmediatamente anterior en el que se recupera la inversión*

Para iniciar, en la Tabla 5 se menciona la tasa de producción en la granja y la venta de energía según norma CREG 030 y 080, que se puede entregar ya que, se está generando por encima del consumo anual.

Tabla 5. Tasa de producción y venta de energía según norma CREG 030 y 080 para el año 2022.

Consumo anual Kwh/año	Consumo anual en COP	Venta de energía solar máximo CREG 030 y 080 es de 25 Kw/h anual	Producción anual de energía en COP
386.320,00	\$ 213.221.597,60	\$ 3.311.560,00	\$ 216.533.177,60

Adicionalmente se toma un plazo de 20 años como período de retorno de inversión para un sistema en la red, por lo que se obtiene como resultado, tras aplicar la ecuación 3 de PIR con los valores del sistema en la red, una recuperación de inversión en un plazo de tres años y tres días (ver tabla 5). Por otro lado, en la Tabla 6 se relaciona el retorno de inversión para un sistema fuera de la red.

Tabla 5. Retorno de inversión para un sistema en la red.

<b>PIR SISTEMA EN LA RED</b>	
PER. UTL FC ACUM. NEG	3
ABS.UTL FC ACUM.NEG	\$1.671.604,48
FC NETO SIG. PER.	\$216.533.177,60
<b>PIR</b>	<b>3,01</b>
3	0,01
MES	0,1
0	0,1
DÍAS	3

TRES AÑOS Y 3 DÍAS

Tabla 6. Retorno de inversión para un sistema en la red.

<b>PIR SISTEMA FUERA DE LA RED</b>	
PER. UTL FC ACUM. NEG	20
ABS.UTL FC ACUM.NEG	\$7.611.844.755,20
FC NETO SIG. PER.	\$216.533.177,60
<b>PIR</b>	<b>55,15</b>
3	0,15
MES	0,2
0	0,2
DÍAS	5
CINCUENTA Y CINCO AÑOS CON 5 DÍAS	

## 6. DISCUSIÓN

Uno de los mayores inconvenientes que se pueden encontrar en una instalación de tipo fotovoltaico, es la disponibilidad de la fuente primaria que es el sol, debido a lo cual los autores realizan, con ayuda de bases de datos meteorológicas de libre acceso, una estimación de HSP (hora solar pico) en los meses más críticos del año, durante los últimos 3 años, bajo el cual se determina que mínimamente en el lugar de estudio se podrá contar con 4.909 horas de sol pico al día para el funcionamiento del sistema fotovoltaico. Entre los demás tópicos de tipo geográfico para establecer las bases sólidas de un correcto modelado, se define un azimut de 0° gracias a su conveniente ubicación e de los galpones en sentido norte- sur; adicionalmente se consigue determinar la inclinación óptima de los MFV, que es de 8.4176°.

Entre los equipos seleccionados para cada configuración, el común denominador de ellos es el MFV, y entre las opciones ofrecidas en el mercado, se seleccionó el Jinko JKM 405M -72H, y bajo este parámetro se define un aforo máximo para el lugar de estudio de 5520 MFV. Con la finalidad de satisfacer la demanda media crítica del cliente, se establece una distribución de 1042 MFV, repartidos en 2 arreglos de 521 MFV para la configuración en la red en cada uno de los inversores CPS de 125KW y 15 arreglos de 70 MFV en su variante fuera de la red. A esta última, le corresponden, además, 3 cargadores-inversores VICTRON 5kVA por cada arreglo, así como 24 baterías ABB 1918Ah/2V para el apartado de almacenamiento de energía. En la figura 2 y 4 se muestra el esquema anteriormente descrito.

Al realizar los correspondientes cálculos manuales, con la finalidad de establecer un punto de partida, se da paso a la ejecución de cálculos dinámicos por medio de PVSyst y SAM, donde se presenta un balance y resultado de las dos configuraciones objeto de estudio, por la cual se demuestra una producción anual de entre 663MWh/año y 585 MWh/año. De igual manera se obtiene un valor de generación de energía diario de entre 1571 kWh/día y 1294kWh/día, similar a lo obtenido en los cálculos manuales.

El proyecto cuenta con una TIR (Tasa Interna de Retorno) del 31% y un periodo de retorno de inversión de 3 años y 3 días, muy por debajo de la vida útil de los equipos, lo cual es un dato favorable para la ejecución de la inversión en esta configuración en la red. En el caso de su contraparte fuera de la red, se evidencian resultados nada favorables, que incluso desde los cálculos manuales ya se podía prever por la cantidad de equipos necesarios, de este modo se obtiene una tasa interna de retorno de -8% y un periodo de retorno de inversión a 55 años y 5 días, como se puede observar en la figura 7.

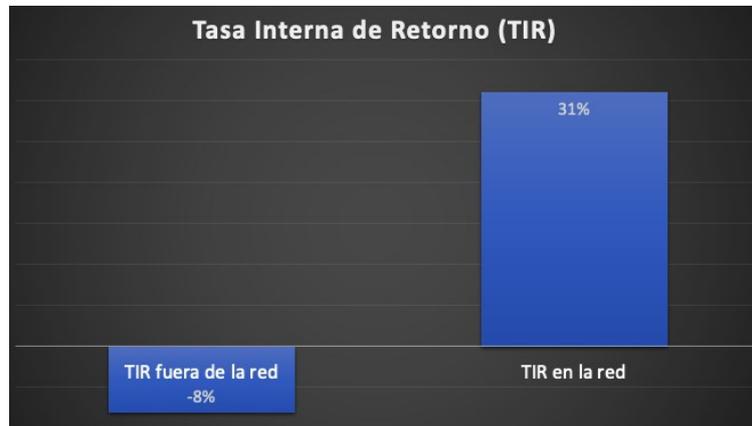


Figura 7. Comparación de TIR fuera de la red y TIR en la red

El sistema en la red genera una mayor confiabilidad en el sistema eléctrico debido al apoyo que tiene por el operador de red y la infraestructura eléctrica pública. Este sistema puede generar mayores pérdidas de energía en los ciclos de menor consumo, pero en días de baja producción y la demanda sea alta la red puede suplir la parte restante.

## 7. CONCLUSIONES.

Como demuestra la investigación y los resultados obtenidos en el dimensionamiento, estudio, comprobación y análisis de los sistemas fotovoltaicos propuestos, es posible observar que, a partir del perfil energético obtenido para la granja, fue admisible realizar el dimensionamiento de los sistemas fotovoltaicos inicialmente propuestos, bajo los cuales se obtuvo una síntesis de los componentes mínimamente requeridos para cada disposición en particular; así mismo, el dimensionamiento también implicó una interacción más dinámica entre el diseñador y el sistema, pues como tal, los equipos requieren una conexión armoniosa entre ellos, respetando siempre los lineamientos establecidos por cada fabricante, con el objeto de obtener unos valores de salida acorde a los deseados. Es así como fue necesario buscar una alternativa de solución para la configuración del sistema fuera de la red, dado que la demanda energética era prominentemente mayor a los desarrollos tecnológicos presentados comúnmente para este tipo de disposición. De acuerdo a esto, se optó por una configuración especial lograda gracias a la colaboración presente entre los fabricantes VICTRON y FRONIUS, que eliminó la problemática anteriormente descrita gracias a la unión de sus capacidades de conexión. En virtud de los análisis realizados por medio de software de diseño y simulación de instalaciones fotovoltaicas, se contempla claramente, la coherencia entre los valores teóricos obtenidos, y los validados por las herramientas informáticas empleadas. Por consiguiente y de acuerdo a los resultados, se concluye que el diseño es correcto y abarca todos los requerimientos establecidos para suplir las necesidades energéticas de la granja avícola Santa Rosa en el municipio de Simacota, Santander.

## 8. REFERENCIAS

- [1] W. Cai *et al.*, "Optimal sizing and location based on economic parameters for an off-grid application of a hybrid system with photovoltaic, battery and diesel technology," *Energy*, vol. 201, p. 117480, Jun. 2020, doi: 10.1016/J.ENERGY.2020.117480.
- [2] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar-wind-battery system for a remote island," *Appl Energy*, vol. 121, pp. 149–158, May 2016, doi: 10.1016/J.APENERGY.2014.01.090.
- [3] IEA, "World Energy Outlook 2020," París, 2020. Accessed: Sep. 05, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2020>
- [4] R. Rajbongshi, D. Borgohain, and S. Mahapatra, "Optimization of PV-biomass-diesel and grid base hybrid energy systems for rural electrification by using HOMER," *Energy*, vol. 126, pp. 461–474, May 2017, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.03.056.
- [5] S. Vakili, A. Schönborn, and A. I. Ölçer, "Techno-economic feasibility of photovoltaic, wind and hybrid electrification systems for stand-alone and grid-connected shipyard electrification in Italy," *J Clean Prod*, vol. 366, p. 132945, Sep. 2022, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.132945.
- [6] Q. Hassan, "Evaluate the adequacy of self-consumption for sizing photovoltaic system," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 239–254, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2021.11.205.
- [7] P. Pandiyan *et al.*, "A comprehensive review of the prospects for rural electrification using stand-alone and hybrid energy technologies," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 52, p. 102155, Aug. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102155.

- [8] O. O. Apeh, E. L. Meyer, and O. K. Overen, "Modeling and experimental analysis of battery charge controllers for comparing three off-grid photovoltaic power plants," *Heliyon*, vol. 7, no. 11, p. e08331, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.HELIYON.2021.E08331.
- [9] B. Zhang, R. Qiu, Q. Liao, Y. Liang, H. Ji, and R. Jing, "Design and operation optimization of city-level off-grid hydro-photovoltaic complementary system," *Appl Energy*, vol. 306, p. 118000, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.APENERGY.2021.118000.
- [10] L. F. Mulcué-Nieto and L. Mora-López, "A novel methodology for the pre-classification of façades usable for the decision of installation of integrated PV in buildings: The case for equatorial countries," *Energy*, vol. 141, pp. 2264–2276, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.ENERGY.2017.11.150.
- [11] M. Das and R. Mandal, "The effect of photovoltaic energy penetration on a Photovoltaic-Biomass-Lithium-ion off-grid system and system optimization for the agro-climatic zones of West Bengal," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102593, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SETA.2022.102593.
- [12] CREG, "CREG, resolución 030," 2018. <http://apolo.creg.gov.co/Publicac.nsf/1c09d18d2d5ffb5b05256eee00709c02/83b41035c2c4474f05258243005a1191/%24FILE/Creg030-2018.pdf> (accessed Sep. 07, 2022).
- [13] C. Granados, M. Castañeda, S. Zapata, F. Mesa, and A. J. Aristizábal, "Feasibility analysis for the integration of solar photovoltaic technology to the Colombian residential sector through system dynamics modeling," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 2389–2400, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.EGYR.2022.01.154.
- [14] M. B. Moreno, C. Jaime, F. Cardona, D. Lorena, and C. Higueta, "Evaluación de impacto económico de las redes eléctricas inteligentes en el usuario residencial de Colombia," Jul. 2019. Accessed: Sep. 07, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/76525>
- [15] L. F. Mulcué-Nieto, L. F. Echeverry-Cardona, A. M. Restrepo-Franco, G. A. García-Gutiérrez, F. N. Jiménez-García, and L. Mora-López, "Energy performance assessment of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic modules in the tropical mountain climate: The case for Manizales-Colombia," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 2828–2835, Nov. 2020, doi: 10.1016/J.EGYR.2020.09.036.
- [16] L. Cadavid, K. S. Serna, A. V. Arias, and C. J. Franco, "Las ciudades y el sol: paridad de red de la generación de electricidad con sistemas fotovoltaicos en los hogares en Colombia," *ACE: Architecture, City and Environment*, vol. 15, no. 43, pp. 1–23, Jun. 2020, doi: 10.5821/ACE.15.43.8772.

# TRATAMIENTO DE IMÁGENES POR TRANSFORMACIÓN DEL DOMINIO: APLICACIÓN DE LA TRANSFORMADA DE WAVELETS EN LA SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

GELID, Pedro Benjamin

Docente en UNSE (Argentina) y estudiante de Mg. en Ing. de Sistemas y Control (UCM, España)  
benjamingelid@hotmail.com

## RESUMEN

El presente trabajo muestra la aplicación de la Transformada de Wavelet en segmentación de imágenes, puntualmente se muestra en la detección de zonas boscosas en imágenes aéreas. El desarrollo se realizó en Matlab e incluye un conjunto de funciones de visión por computador. Se parte del supuesto que las fotografías han sido obtenidas por técnicas apropiadas y las tenemos a disposición en tamaño 512x512 píxeles.

Se aplica la transformada de wavelet para identificar zonas de bosques (o plantación pesada). Esta detección se logra analizando las texturas de las diferentes zonas presentes en una imagen y filtrando a partir de los coeficientes wavelet.

En una primera etapa, se analiza una imagen que tenga bosques para obtener su patrón característico. Luego se replica el algoritmo en otras imágenes con el fin de determinar si ese patrón se repite.

Se concluye que con el uso de la TW se puede realizar el procesamiento de imágenes para reconocimiento de especies vegetales.

Este algoritmo sirve como base para implementar en un algoritmo más robusto que podría permitir otras aplicaciones como ser el reconocimiento de otros tipos de vegetación, sembrados, tierras aradas, detección de cambios en la traza de un río, evaluación de desastres naturales, aumento del nivel del mar al perder superficie costera, entre otras.

**Palabras Claves:** Visión por computador, Transformada de Wavelet, Matlab, Segmentación de imágenes.

**Área Temática:** Fuentes de Energía Renovable. Aplicaciones agrícolas.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

La transformada Wavelet es una herramienta matemática que entró en auge desde mediados de la década del 80 del siglo XX, por ser más eficiente que la clásica transformada de Fourier en el campo de la investigación en procesamiento digital de señales e imágenes. Sus aplicaciones son diversas: análisis de ruido, compresión de señales, extracción de bordes, análisis de texturas entre otros [1].

En la presente memoria se hace uso de la transformada wavelet que permite extraer las componentes vertical, horizontal y diagonal de una imagen, al mismo tiempo genera una versión de la misma con un tamaño menor a la original y sirve como base para el reconocimiento de patrones.

El mayor problema, cuando se trata de visión por computadora, es la segmentación de imágenes [2], lo que ha motivado la investigación realizada en este artículo, donde la segmentación está orientada a la detección exitosa de partes verdes, a través del enfoque basado en wavelets.

### 1.2. Revisión de métodos

Hoy en día la mayoría de las imágenes que se procesan son imágenes en color, por lo tanto, las técnicas de segmentación de color cobran gran importancia. A lo largo de las décadas, se desarrollaron y describieron técnicas para extraer información de imágenes en color, como se ve en [3] y [4] y se recogen en [5], el cual a su vez sintetiza varios de los métodos que se emplean en segmentación de imágenes.

En [6] se utiliza un método que introduce un desplazamiento medio en el algoritmo de segmentación de color, mejorando la tasa de segmentación de las imágenes.

En [7] se usa la binarización para diferenciar las enfermedades de las plantas aplicando el criterio de Fhiser.

En [4] se implementó una segmentación supervisada utilizando algoritmos genéticos que identifica las malezas en el espacio de color Tono-Saturación-Intensidad (HSI).

Hay técnicas que necesitan fijar un umbral para la segmentación final, a partir de lo cual se desprende la definición de diversos índices a aplicar: índice de exceso de verde ExG [8], índice de exceso de rojo ExR [9], índice de color de extracción de vegetación [10], índice de exceso de verde menos exceso de rojo ExGR [11], y el índice vegetativo VEG [12].

También se identifican técnicas que asumen a la segmentación como un problema de dos clases donde por ejemplo se deben identificar las plantas y el suelo. En [13] estimaron una función de decisión bajo el supuesto de que las clases siguen distribuciones gaussianas. El método de Otsu [4] también considera un problema biclase que se aplican a imágenes grises. En [15] aplicaron umbrales transformando las imágenes de RGB a escala de grises. En [16] utilizan una combinación de verdor e intensidad derivada de las bandas espectrales roja y verde y calculan un umbral automático asumiendo dos funciones gaussianas. En [17] aplicaron el método de umbralización automática de Otsu para binarizar ExG y aplicaron el llamado índice de diferencia normalizada (NDI). En [18] realizan la binarización de la imagen con un índice de vegetación, utilizando un umbral que se establece automáticamente para cada imagen considerando el método Otsu. En [2] se elige el valor medio estadístico porque con Otsu algunas plantaciones no son convenientemente identificadas. En [19] se utiliza un doble umbral para separar dos tipos de plantas con alto y bajo grado de verdor. También se aplicó un doble umbral en [20] para discriminar entre plantas de maíz y malezas de alta densidad.

En cuanto a los métodos basados en el aprendizaje, En [9] aplican el agrupamiento difuso para segmentar regiones de interés. En [21] propusieron el algoritmo de segmentación ambientalmente adaptable (EASA) para detectar plantas a través de un proceso de aprendizaje supervisado. En [22] aplicaron el EASA más tarde bajo el espacio de color HSI para enfrentar al problema de variabilidad en la iluminación. En [2] se combina cuatro índices espectrales y aplica el agrupamiento difuso para discriminar plantas y suelo y, en una segunda etapa, cultivo y malezas. En [23] aplica máquinas de vectores como estrategia de aprendizaje para discriminar entre plantas con alto y bajo grado de verdor.

Por último, los métodos basados en wavelet presentan dos enfoques principales. Por un lado el análisis sobre el contenido de frecuencia en la imagen [24] donde se utilizan diferentes familias wavelet y filtros Gabor para obtener un método de diferenciación automática, que es capaz de separar los componentes de baja frecuencia (suaves variaciones de color) y de alta frecuencia (los bordes que dan detalles). Por otro lado el análisis de las texturas [25] se basa en la consideración de que diferentes plantas responden de manera diferente al filtrado de paso alto/bajo, en este sentido en [27] calculan los coeficientes de energía de varias bandas de frecuencia para hacer la discriminación de las plantas.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Transformada de Wavelet

Un correcto entendimiento de la Transformada de Wavelet se puede ver en [27] de donde se recoge algunos segmentos que enriquecen a la presente memoria.

Las wavelets son funciones matemáticas de duración limitada y valor medio cero. Consisten en la descomposición de una señal arbitraria  $f$  en versiones escaladas y trasladadas de la wavelet original, es decir que representa cualquier función  $f$  como una superposición de un conjunto de wavelets.

La transformada de wavelets de una señal  $f$  es la familia de coeficientes  $C(a, b)$ , donde  $a$  y  $b$  están asociados a la escala y posición de la señal. En una dimensión estos coeficientes se obtienen como se muestra en la Ecuación (1):

$$C(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

Se observa que la transformada es una suma sobre todo el intervalo de la función  $f$  multiplicada por versiones escaladas y trasladadas de la función wavelet  $\psi$ . Multiplicando cada coeficiente por la wavelet escalada y trasladada se obtiene el conjunto de wavelet que componen la señal original.

La transformada de wavelet en dos dimensiones es la extensión de la transformada en una dimensión, donde la descomposición se hace iterativamente en la dirección vertical seguida por la dirección horizontal. Dado la complejidad del cálculo para todas las escalas y posiciones se recurre a la *transformada discreta de wavelet (TDW)* donde se elige un subconjunto de escalas y posiciones, como se muestra en la Ecuación (2).

$$C(a, b) = C(j, k) = \sum_{x \in \mathbb{Z}} f(x) g_{j,k}(x) \quad (2)$$

Una forma de implementar las wavelets es mediante el uso de filtros. En las imágenes, el filtrado de baja frecuencia suaviza la imagen y el filtrado de alta extrae los bordes. La *TDW* descompone una señal en un cierto número de bandas de frecuencia.

Una imagen puede definirse por una función  $f(x, y)$  donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas de un punto de la misma en el plano, y la amplitud de  $f$  es la intensidad de la imagen en ese punto. Cuando las coordenadas y los valores de amplitud son cantidades discretas, se tiene una imagen digital, la cual está compuesta por un número finito de elementos que tienen una localización y un valor particular de intensidad. Tales elementos se denominan píxeles [28].

La transformada de wavelet se utiliza con múltiples fines, en este caso será para el reconocimiento de patrones que presentan cambios bruscos o discontinuidades a través de sus píxeles.

Una imagen de tamaño  $m \times n$  píxeles puede representarse por una matriz como se muestra en la Ecuación (3):

$$f(x, y) = \begin{bmatrix} f(1,1) & \dots & f(1,n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f(m,1) & \dots & f(m,n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cada elemento de la matriz es un píxel de la imagen y coinciden tanto la coordenada del píxel con la ubicación del elemento dentro de la misma matriz. De la Ecuación (3) se desprende que dentro de una imagen el píxel situado en su esquina superior izquierda se lo representa con el elemento de la matriz situado en  $f(1,1)$ . Adicionalmente, el valor numérico de cada elemento de la matriz es la intensidad de la imagen en ese punto.

Cuando la señal es una imagen discreta de dimensión  $n \times n$  píxeles, la TDW la descompone mediante la aplicación de dos filtros: paso bajo y paso alto, en dos direcciones (columnas y filas), obteniendo cuatro imágenes filtradas en cada escala de aplicación. Por ello, la TDW proporciona cuatro matrices de orden  $n/2$  [28].

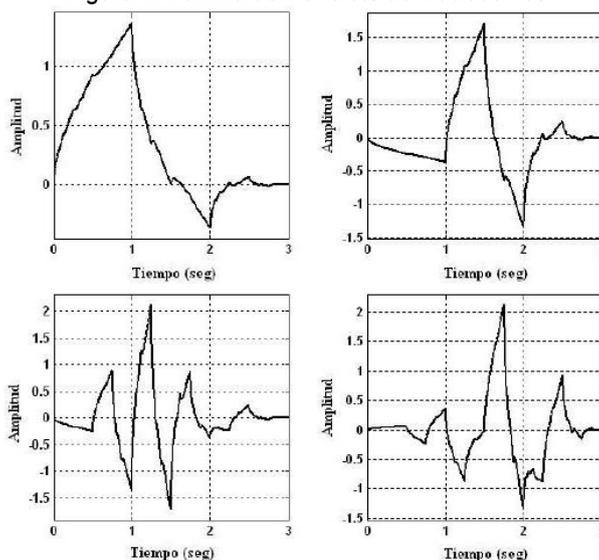
Los tipos de Wavelet son las llamadas Wavelets madre, entre los que tenemos: Haar, Daubechies, Symlets, Coiflets, BiorSplines, Reverse Bior, Meyer, DMeyer, Gaussian, Mexican\_hat, Morlet, Complex, Gaussian, Shannon, Frequency B-Spline y Complex Morlet.

Los filtros más utilizados para implementar la TDW son el de Daubechies y el de Haar, de donde se obtienen vectores base para las operaciones de filtrado PB/PA.

Una sola función wavelet madre genera una familia de wavelets por dilatación (expandiéndola o contrayéndola) y trasladándola a lo largo del eje horizontal que para propósitos de explicación

se considera el tiempo, llamando a cada una de estas funciones wavelets hija, como se explica en [29]. En la Figura 1 se muestra la familia de wavelets de Daubechies.

Figura 1: Familia de wavelets de Daubechies



Según la Wavelet madre utilizada, se puede seleccionar el grado de la misma. Ejemplo: tipo Daubechies: Grado: db1, db2, db3, etc.

## 2.2. Implementación de la TDW

Una imagen puede definirse por una función  $f(x,y)$  donde  $x$  e  $y$  son las coordenadas de un punto (píxel) de la misma en el plano, y la amplitud de  $f$  es la intensidad de la imagen en ese punto. Una imagen de tamaño  $m \times n$  píxeles puede representarse por una matriz dada por la Ecuación (3).

Se han propuesto numerosos filtros para implementar la TDW, de los cuales los más utilizados son el de Daubechies y el de Haar. Para el filtro Paso Bajo y Paso Alto de Haar, los vectores base se muestran la Ecuación 4 y Ecuación 5 respectivamente:

$$Haar PB = \frac{1}{\sqrt{2}} [1,1] \quad (4)$$

$$Haar PA = \frac{1}{\sqrt{2}} [-1,1] \quad (5)$$

Una vez elegido los vectores base para las respectivas operaciones de Paso Bajo/Alto, se obtiene la TDW a través de los siguientes pasos.

1. Realizar la convolución de la imagen original en las filas con el filtro PB. Sub-muestrear las columnas manteniendo las pares.
2. Realizar la convolución de las columnas con el filtro PB a partir de los resultados de 1. Sub-muestrear las filas manteniendo las pares. Se obtiene una imagen reducida a la mitad (un píxel cada dos) denominada PB/PB o también llamada aproximación (A1).
3. Realizar la convolución de las columnas con el filtro PA a partir de los resultados de 1. Sub-muestrear las filas manteniendo las pares. Se obtiene una imagen denominada PB/PA, donde se observan los bordes horizontales por la aplicación del filtrado paso alto a las columnas, también llamada detalle horizontal (H1).
4. Realizar la convolución de la imagen original en las filas con el filtro PA. Sub-muestrear las columnas manteniendo las pares.
5. Realizar la convolución de las columnas con el filtro PB a partir de los resultados de 4. Sub-muestrear las filas manteniendo las pares. Se obtiene una imagen denominada PA/PB, donde se observan los bordes verticales por la aplicación del filtrado paso alto a las filas, también llamada detalle vertical (V1).
6. Realizar la convolución de las columnas con el filtro PA a partir de los resultados de 4. Sub-muestrear las filas manteniendo las pares. Se obtiene una imagen denominada PA/PA, también llamada detalle diagonal (D1).

El resultado de aplicar una vez la TDW a una imagen de por ejemplo 512x512 pixeles serán cuatro imágenes de 256x256, y la convención utilizada para mostrar los resultados como una única imagen se muestra en la Figura 2:

Figura 2: Localización de las bandas de frecuencia en una TDW.

Paso Bajo/Paso Alto (Aproximación, A1)	Paso Bajo/Paso Alto (Detalle horizontal, H1)
Paso Alto/Paso Bajo (Detalle vertical, V1)	Paso Alto/Paso Alto (Detalle diagonal, D1)

La imagen almacenada como “aproximación” contiene la información más importante de la imagen original e indican la tendencia de la misma. Mientras que los “detalles” (H,V,D) tienen valores próximos a cero y son una medida de la magnitud de los cambios en las direcciones horizontal, vertical y diagonal [28], que a su vez son muy utilizados en aplicaciones de reconocimiento de texturas.

A partir de lo expuesto se desprende el término del nivel de la TDW. Cuando se dice que es de nivel 1 el resultado que se obtiene es una aproximación (A1) y tres detalles (V1, H1, D1) de la imagen original y dispuestos como se ha indicado en la Figura (2). Luego, si la TDW es de nivel 2, se realiza el mismo proceso de aplicación de la TDW pero tomando como base a la imagen que se ha almacenado como “A1”, obteniendo nuevamente una imagen de aproximación (A2) y tres detalles (V2, H2, D2), por consiguiente, se deduce la misma mecánica para los niveles posteriores.

### 3. DESARROLLO

Para el desarrollo de esta aplicación se utilizó el software Matlab. Se parte del supuesto que las fotografías han sido obtenidas por técnicas apropiadas y las tenemos a disposición en tamaño 512x512 pixeles, como se muestra en la Figura 3:

Figura 3: Imagen aérea “Bosque 1”



Se aplica la transformada de wavelet para identificar zonas, la zona de bosques (o plantación pesada). Esta detección se logra analizando las texturas de las diferentes zonas presentes en una imagen y filtrando a partir de los coeficientes wavelet.

En una primera etapa, se analiza una imagen que tenga bosques para obtener su patrón característico. Luego se replica el algoritmo en otras imágenes con el fin de determinar si ese patrón se repite.

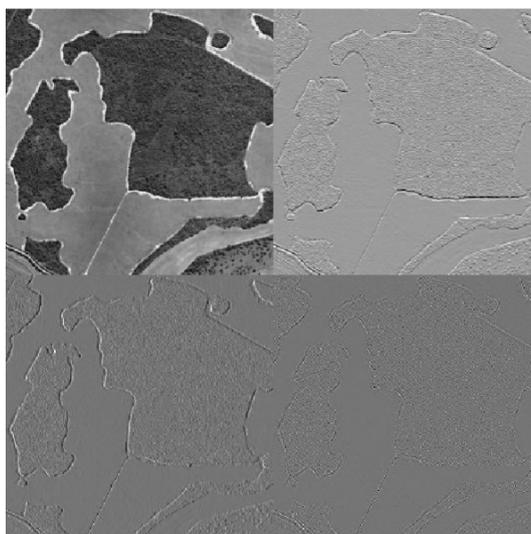
Para el procesamiento de la imagen se realizaron las siguientes etapas.

1. Lectura de la imagen desde un fichero .jpg previamente almacenado en la computadora.
2. Extracción de la capa verde (green) presente en la imagen a color (RGB).
3. Aplicación de la TDW de nivel 1, para obtener los coeficientes de aproximación y los de detalles.
4. Análisis de los valores de coeficientes a fin de determinar algún patrón que se pueda aprovechar en la detección de la zona de interés. Para destacar la diferencia se utilizó el mapeo de la matriz con la función mesh.
5. Aplicación de la TDW de nivel 2 y binarización de la imagen de coeficientes de aproximación A2.

#### 4. RESULTADOS

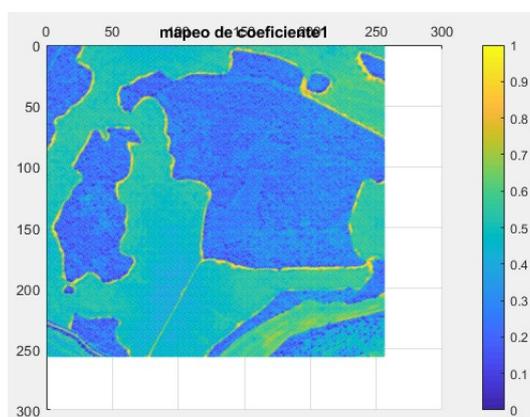
A continuación, en la Figura 4 se muestra el resultado del paso número 3 descrito en la sección precedente, aplicación de la TDW de nivel 1:

*Figura 4: Transformada de Wavelet nivel 1*



En la Figura 5 se muestra el mapeo con la función mesh. Se destaca en la sub-imagen de coeficientes de aproximación (A1) una gran diferencia entre los valores de las zonas boscosas contra otras zonas que no lo son. Aprovechamos esta situación para avanzar en el reconocimiento de la zona de interés.

*Figura 5: Mapeo del coeficiente de aproximación (A1) con la función mesh*



Cuando se intentó binarizar la imagen A1 se obtuvieron varios píxeles interpuestos entre zonas de bosques y zonas que no lo son. Este problema se solucionó al aplicar el paso 5: aplicación de la TDW de nivel 2 y binarización de la imagen de coeficientes de aproximación A2. El resultado se muestra en la Figura 6, donde con negro se muestran las zonas de bosques (o vegetación pesada).

*Figura 6: Resultado de detección de bosques en la imagen "Bosque 1"*



Se probó el funcionamiento del algoritmo de MATLAB aplicando a otras imágenes para evaluar el desempeño.

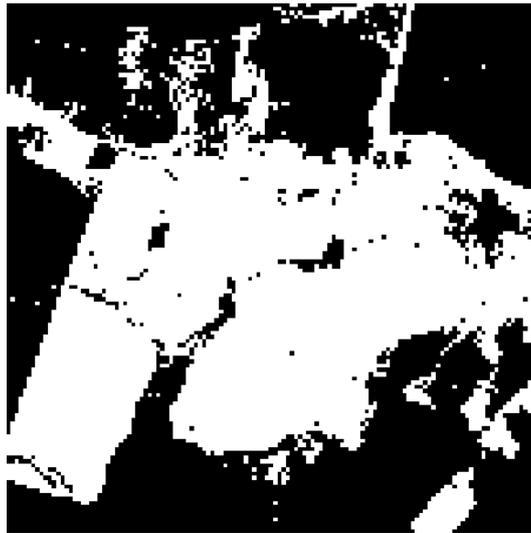
En la Figura 7 se muestra una imagen de la zona Amazona de Brasil, en donde se presentan zonas de bosques y zonas de tala.

*Figura 7: Imagen aérea "Bosque 2"*



El resultado se muestra en Figura 8 donde en negro se muestra la zona de bosques.

*Figura 8: Resultado de detección de bosques en la imagen "Bosque 2"*



La Figura 9 es en una imagen de una ciudad en donde se observan plantaciones pesadas.

*Figura 9: Imagen aérea "Bosque 3"*



En la Figura 10 se muestran los resultados del procesamiento sobre esta imagen.

*Figura 10: Resultado de detección de bosques en la imagen "Bosque 3"*



## 5. CONCLUSIÓN

De la presente memoria se puede concluir que con el uso de la transformada de wavelets se puede realizar el procesamiento de imágenes para reconocimiento de especies vegetales.

El algoritmo implementado detectó en buena medida las zonas de bosques y plantaciones pesadas. A veces se distinguen ruidos en las imágenes de los resultados, esto se podría mejorar implementando más herramientas en la etapa de pre-procesado de la imagen.

En este caso, para detección de vegetación pesada, fue suficiente con el análisis de los coeficientes de aproximación que provee la transformada de Wavelet.

En aplicaciones donde el objetivo sea detectar distintos tipos de plantaciones (por ejemplo sembrados, o especies arbóreas), no será suficiente la metodología adoptada y sería necesario poner énfasis principalmente en los coeficientes de detalles horizontal, vertical y diagonal, como se ve en [30], donde luego aplican herramientas estadísticas que favorezcan la multi segmentación.

Este algoritmo sirve como base para el reconocimiento de plantaciones pesadas. En la manera que se presenta, y con los resultados que muestra, podría tener usos adicionales como ser: detección y análisis de tala de bosques, análisis del grado de avance de urbanización con el correr del tiempo, administración de campos y espacios rurales.

Para una visión integral de técnicas de visión por computador, donde se compara el uso de la transformada de wavelet con otras técnicas, puede verse en [31].

Este algoritmo sirve como base para implementar en un algoritmo más robusto que podría permitir otras aplicaciones como ser el reconocimiento de otros tipos de vegetación, sembrados, tierras aradas, detección de cambios en la traza de un río, evaluación de desastres naturales, aumento del nivel del mar al perder superficie costera, entre otras.

Por último, se indica que se ha utilizado una computadora con procesador i7 y Matlab 2019, mientras que el tiempo de cómputo fue 2.7656 segundos, sin embargo aún se puede optimizar el algoritmo e incluso lograr el desarrollo de un software en un trabajo futuro.

## 6. REFERENCIAS

- [1] García O.A.; Bello E.J.; González C.A., (2009). Reconocimiento de formas en visión artificial: Aplicación de la transformada Wavelet. *Visión Electrónica*, 3(2).
- [2] Guijarro, M., Pajares, G., Riomoros, I., Herrera, P.J., Burgos-Artizzu, X.P., Ribeiro, A., 2011. Automatic segmentation of relevant textures in agricultural images. *Comput. Electron. Agric.* 75 (1), 75-83.
- [3] Lucchesez, L., Mitray, S.K., 2001. Color image segmentation: a state-of-the-art survey. *Proceedings of the Indian National Science Academy (INSA-A)* 67 (2), 207-221.
- [4] Zhang, Y.J., 1996. A survey on evaluation methods for image segmentation. *Pattern Recognit.* 29 (8), 1335-1346.
- [5] M. Guijarro, I. Riomoros, G. Pajares, P. Zitinski, 2015. Discrete wavelets transform for improving greenness image segmentation in agricultural images, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 118, 2015, Pages 396-407.
- [6] Zheng, L., Zhang, J., y Wang, Q., 2009. Mean-shift-based color segmentation of images containing green vegetation. *Comput. Electron. Agric.* 65, 93-98.
- [7] Tian, Y.W., Li, C.H., 2004. Color image segmentation method based on statistical pattern recognition for plant disease diagnose. *J. Jilin Univ. Technol. (Nat. Sci.Ed.)* 2, 028.
- [8] Ribeiro, A., Fernández-Quintanilla, C., Barroso, J., García-Alegre, M.C. 2005. Development of an image analysis system for estimation of weed. In: *Proc. 5th European Conf. On Precision Agriculture (5ECPA)*, pp. 169-174.
- [9] Meyer, G., Metha, T., Kocher, M., Mortensen, D., Samal, A., 1998. Textura! imaging and discriminant analysis for distinguishing weeds for spot spraying. *Trans. ASAE* 41 (4), 1189-1197.
- [10] Kataoka, T., Kaneko, T., Okamoto, H., Hata, S. 2003. Crop growth estimation system using machine vision. In: *The 2003 IEEE/ASME Internat. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*.
- [11] Neto, J.C., 2004. A Combined Statistical Soft Computing Approach for Classification and Mapping Weed Species in Minimum Tillage Systems. University of Nebraska, Lincoln, NE.
- [12] Hague, T., Tillet, N., Wheeler, H., 2006. Automated crop and weed monitoring in widely spaced cereals. *Precision Agric.* 1 (1), 95-113.
- [13] Reid, J., Searcy, S., 1987. Vision-based guidance of an agriculture tractor. *Control Syst. Mag., IEEE* 7 (2), 39-43.
- [14] Otsu, N., 1979. A threshold selection method from gray-level histogram. *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 9, 62-66.

- [15] Gebhardt, S., Kaühbauch, W.A., 2007. A new algorithm for automatic Rumex obtusifolius detection in digital image using colour and texture features and the influence of image resolution. *Precision Agric.* 8 (1), 1-13.
- [16] Kirk, K., Andersen, H.J., Thomsen, A.G., Jørgensen, J.R., 2009. Estimation of leaf area index in cereal crops using red-green images. *Biosyst. Eng.* 104, 308-317.
- [17] Meyer, G.E., Camargo-Neto, J., 2008. Verification of color vegetation indices for automated crop imaging applications. *Comput. Electron. Agric.* 63, 282-293.
- [18] Burgos-Artizzu, X.P., Ribeiro, A., Guijarro, M., Pajares, G., 2011. Real-time image processing for crop/weed discrimination in maize fields. *Comput. Electron. Agric.* 75, 337-346.
- [19] Montalvo, M., Guerrero, J.M., Romeo, J., Emmi, L., Guijarro, M., Pajares, G., 2013. Automatic expert system for weed/crops identification in images from maize fields. *Expert Syst. Appl.* 40 (1), 75-82.
- [20] Montalvo, M., Pajares, G., Guerrero, J.M., Romeo, J., Guijarro, M., Ribeiro, A., Ruz, J.J., Cruz, J.M., (2012). Automatic detection of crop rows in maize fields with high weeds pressure. *Expert Syst. Appl.* 39 (15), 11889-11897.
- [21] Tian, L.F., Slaughter, D.C., 1998. Environmentally adaptive segmentation algorithm for outdoor image segmentation. *Comput. Electron. Agric.* 21 (3), 153-168.
- [22] Ruiz-Ruiz, G., Gomez-Gil, J., Navas-Gracia, L.M., 2009. Testing different color spaces based on hue for the environmentally adaptive segmentation algorithm (EASA). *Comput. Electron. Agric.* 68 (1), 88-96.
- [23] Guerrero, J.M., Pajares, G., Montalvo, M., Romeo, J., Guijarro, M., 2012. Support vector machines for crop/weeds identification in maize fields. *Expert Syst. Appl.* 39, 11149-11155.
- [24] Bossu, J., Gée, Ch., Jones, G., Truchetet, F., 2009. Wavelet transform to discriminate between crop and weed in perspective agronomic images. *Comput. Electron. Agric.*, 133-143.
- [25] Ishak, A.J., Hussain, A., Mustafa, M.M., 2009. Weed image classification using Gabor wavelet and gradient field distribution. *Comput. Electron. Agric.* 66 (1), 53-61.
- [26] Chou, J.J., Chen, C.P., Yeh, J.T., 2007. Crop identification with wavelet packet analysis and weighted Bayesian distance. *Comput. Electron. Agric.* 57 (1), 88-98.
- [27] Pajares Martinsanz G. & J.M. de la Cruz García, (2007). *Visión por computador: imágenes digitales y aplicaciones*. 2º Ed, RA-MA, Madrid, 2007.
- [28] Muñoz F.R., (2007). "Reconocimiento de patrones en imágenes fijas usando wavelets". Universidad del Cauca. Popayán, febrero 2007.
- [29] Ramírez Romero E. & Rico Espino J.G., (2015). Detección de primitivas horizontales y verticales en imágenes mediante wavelets. Disponible en: <http://ciateq.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1020/143>
- [30] Van Coillie, Frieke & Verbeke, Lieven & Wulf, Robert. (2008). Semi-automated forest stand delineation using wavelet based segmentation of very high resolution optical imagery. 10.1007/978-3-540-77058-9\_13.
- [31] García Santillán I.D., (2018). "Métodos de visión por computador para detección automática de líneas de cultivo curvas/rectas y malas hierbas en campos de maíz. Tesis doctoral, director G.Pajares Martinsanz. Madrid, 2018.

### **Agradecimientos**

Al PhD. Gonzalo Pajares Martinsanz por introducirme en el área de la visión por computador, promover la lectura, investigación y desarrollo de aplicaciones en el contexto del Máster de Ingeniería de Sistemas y de Control de la UCM-UNED, Madrid.

# ESTUDIO PRELIMINAR DEL APROVECHAMIENTO ENERGETICO DEL SORGO FIBROSO EN TUCUMÁN, ARGENTINA.

Cruz, M. Carolina <sup>a</sup>; Casen, Sergio <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales

<sup>b</sup> Sección Caña de Azúcar

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC)

ccruz@eeaoc.org.ar

## RESUMEN

En este trabajo se determina de manera preliminar, la energía que se consume o energía insumida en el proceso, al realizar las actividades de logística del sorgo fibroso, desde su siembra hasta su combustión en una caldera bagacera para luego calcular su productividad energética (PE). La PE es la relación entre la cantidad de energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso de obtención del biocombustible. Para determinar esta relación, se analizaron los consumos de gasoil insumidos en las etapas de siembra, aporte de agroinsumos (sin considerar su valor energético), cosecha con máquina para corte y picado de forrajes, transporte a la fábrica, carga y alimentación a la caldera bagacera; y la energía producida en la posterior combustión. Con esta metodología y en base a datos aportados por bibliografía y ensayos experimentales realizados por técnicos de la EEAOC, se determinó la energía insumida por el sorgo fibroso desde su siembra hasta la carga y alimentación a la caldera, la cual resultó de 20.428,2 GJ. La energía producida por su combustión de 473.420 GJ se determinó según [1], logrando una PE de 23,2. Si comparamos este valor con el obtenido para el residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar de 21,96 se puede decir que la PE de sorgo fibroso calculada es un valor alentador para considerar a este material como una alternativa para sumar a la matriz energética renovable. Los resultados de este trabajo sugieren realizar un estudio más detallado de la PE del sorgo fibroso, donde se evalúe la energía producida e insumida para este cultivo.

**Palabras Claves:** Sorgo fibroso, Biocombustibles, Productividad energética.

**Área Temática:** Energías Sustentables.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha generado un creciente interés en la producción de energía a partir de biomasa vegetal, como una opción sustentable frente a la utilización de combustibles fósiles, ya que es un recurso abundante, tiene bajas emisiones de CO<sub>2</sub> y bajo costo. Además, en el año 2016, la biomasa ocupó el cuarto lugar en el consumo total de energía del mundo precedido por el carbón, el petróleo y el gas natural [2].

Hoy en día la producción de biocombustibles a partir de biomasa como recurso energético renovable es bastante importante ya que es un recurso energético limpio que interrelaciona el cuidado del medio ambiente, las actividades económicas, los manejos agrícolas y la generación de puestos de trabajo. Por otro lado, el desarrollo de biocombustibles a partir de cultivos energéticos tiene un papel fundamental en el desarrollo de la economía mundial y la reducción del cambio climático global [3].

La producción de energía a partir de la biomasa pretende, lógicamente, utilizar en primer lugar todas aquellas biomásas residuales que no tienen otros usos, pero dado que este recurso es insuficiente, se plantea también, la utilización de cultivos específicamente desarrollados para la producción de energía. [4].

Los cultivos energéticos son generalmente plantaciones comerciales de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Los cultivos energéticos sólidos (p. ej., cardo, sorgo, tuna, maíz integral, aliste, miscanto, sauce, álamo y eucalipto) se pueden utilizar enteros para producir calor y electricidad directamente a través de la combustión o indirectamente a través de la conversión para su uso como biocombustibles [5].

Entre los cultivos energéticos adaptados a condiciones agroecológicas desfavorables, se encuentra el sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), tipo silero (Figura 1), que posee entre sus características más importantes, una alta producción de biomasa y un buen nivel en contenido de fibras, por ello se lo llama fibroso o de alta fibra [6]. Este cultivo presenta como ventajas que requiere escasos recursos agroclimáticos para la obtención de altos rindes culturales, se adapta a tierras marginales con problemas de napas freáticas y/o salinidad, ayudando a favorecer la recuperación de suelos degradados. Adicionalmente a los beneficios agronómicos, este cultivo ayuda a ampliar la oferta energética de la región [7].



Figura 1. *Sorgo fibroso del tipo silero (Sorghum bicolor (L.) Moench).*

En relación a la sustentabilidad del manejo agronómico del sorgo fibroso, la bibliografía científica también destaca que este cultivo genera biomasa de manera sustentable por su alta eficiencia en el uso de recursos [8], y es mejorada con la disponibilidad de distintos genotipos de sorgo. En relación a esto último, [9] evaluaron el impacto ambiental y el rendimiento energético de una central eléctrica de mediana escala a partir de tres genotipos de biomasa de sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench). Todos los genotipos lograron al menos una reducción de GEI del 47,7% en comparación con un sistema de gas natural.

El desarrollo de cultivos energéticos como el sorgo fibroso y otros similares, suele ir acompañado del desarrollo paralelo de la correspondiente industria de transformación de la biomasa producida en biocombustible [10].

Existe un indicador de gran utilidad conocido como Tasa de Retorno Energético (TRE) o productividad energética (PE), cuyo concepto se fue comenzando a definir décadas atrás [11]. La PE es la razón entre la energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso de obtención del biocombustible.

En tal sentido se debe procurar que la energía consumida en las etapas de producción y transporte de un biocombustible sea la menor posible para que su balance energético, es decir la energía neta que deja disponible, sea mayor [12].

En este trabajo se plantea calcular la PE del sorgo fibroso, analizando las actividades de industrialización necesarias para su transformación en biocombustible.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema con la logística del procesamiento del sorgo fibroso que se tuvo en cuenta para calcular el consumo de gasoil está representado en la Figura 2, y comprende las etapas de: siembra, aplicación de herbicidas e insecticidas, cosecha con máquina cortado y picado de forraje, transporte en camiones al ingenio, carga y alimentación; y su posterior combustión en una caldera bagacera.

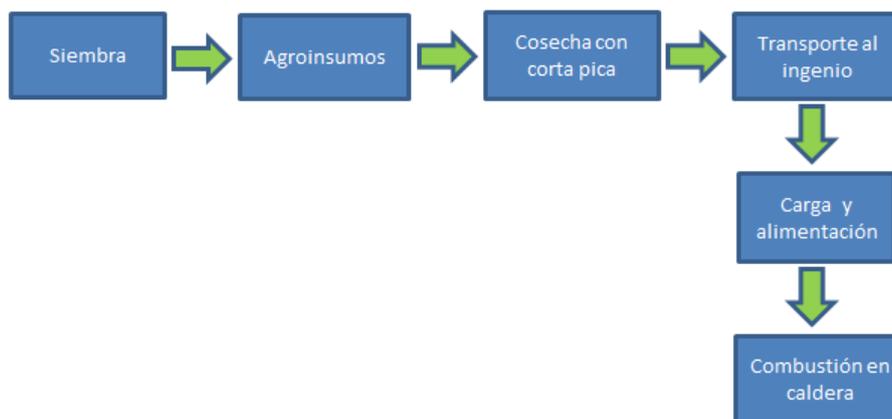


Figura 2: Esquema de logística del sorgo fibroso. Elaboración propia.

El consumo de gasoil correspondiente al manejo agronómico (siembra, cosecha y aplicación de agroquímicos) del sorgo fibroso se consideró para la masa vegetal total generada en el campo consistente en la biomasa transportada y recibida en fábrica, que representa el 85% del total de biomasa vegetal generada, y la materia vegetal residual que permanece sobre el suelo luego de la cosecha.

### 1.1. Logística del sorgo fibroso

Los volúmenes de combustible consumido en cada etapa que conforma la logística de manejo agronómico y transporte del sorgo fibroso fueron calculados tomando como base los resultados de disponibilidad y requerimientos de biomasa para el proceso fabril fuera de zafra planteado en [1] que se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos obtenidos del trabajo [12], donde  $w$ =humedad del sorgo.

Datos [10]	Unidades	Valor
Superficie efectiva de sorgo fibroso requerido para el proceso fabril.	[ha]	979,6
Sorgo fibroso requerido para el proceso fabril. $G_s$ ( $w=30\%$ )	[t/d]	303,2
Toneladas de sorgo transportadas a fábrica. $G_t$ ( $w=30\%$ )	[t]	45.490
Rendimiento cultural del sorgo fibroso ( $w=30\%$ )	[t/ha]	46,5
Energía de combustión entregada por el sorgo fibroso*	[GJ]	473.420
Eficiencia de recolección en cosecha ( $\eta$ )	%	85

\*: La energía de combustión entregada por el sorgo fibroso se determina en un artículo previo de [1].

#### 1.1.1. Siembra

El consumo de gasoil para la etapa de siembra en litros por hectárea fue adoptado de [13] y corresponde a 13,5 l/ha. El consumo de combustible en litros se calcula mediante la Ecuación (1):

$$GASOIL_{siembra} (l) = Cons. esp. \left[ \frac{l}{ha} \right] * Sup. sorgo req. [ha] / \eta cosecha$$

(1)

Dónde:

**GASOIL<sub>siembra</sub>**: Cantidad de combustible que se consume durante la siembra, en litros.

Cons. esp.: consumo específico de gasoil por ha=13,5 l/ha.

Sup. sorgo req.: superficie de sorgo requerida.

$\eta$ cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

### 1.1.2 Aplicación de agroinsumos

Los datos de consumos de gasoil empleados en la aplicación de herbicidas en barbecho, en pre-emergente e insecticidas, fueron provistos por técnicos de la EEAOC, a través de experiencias realizadas en la Localidad de Graneros, Tucumán (Tabla 2). Cabe aclarar que en este análisis no se considera la energía consumida en la producción de cada herbicida e insecticida, solo se tomó el gasto de gasoil que ocasionó la máquina pulverizadora para su aplicación. Este consumo de combustible en litros se calcula mediante la Ecuación (2):

Tabla 2: Consumo de gasoil ocasionado por la aplicación de agroinsumos en las etapas de barbecho, pre emergente y post cosecha.

Aplicación de agroinsumos	Consumo específico
Herbicidas (En barbecho)	0,8 [l/ha]
Herbicidas (Pre-emergente)	0,8 [l/ha]
Insecticidas	0,8 [l/ha]

$$GASOIL_{agr.} (l) = N^{\circ} de aplic. * Cons. esp \left[ \frac{l}{ha} \right] * Sup. sorgo req. [ha] / \eta cosecha$$

(2)

**GASOIL<sub>agr.</sub>**: Cantidad de combustible que se consume en la aplicación de agroinsumos, en litros.

N° de aplic.: número de aplicaciones.

**Cons. esp**: Consumo específico de gasoil por ha=0,8 l/ha

Sup. Sorgo req.: superficie de sorgo requerido.

$\eta$ cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

No se consideraron las actividades de riego, ni aplicación de fertilizantes en el manejo agronómico del sorgo fibroso puesto que el propósito de incorporar este cultivo energético se basa en favorecer la sustentabilidad del mismo en términos de aprovechamiento energético.

### 1.1.3. Cosecha

De acuerdo a lo reportado por [14], con los materiales genéticos existentes en la actualidad, se sugiere que la cosecha de sorgo puede realizarse con una humedad del 50% de masa vegetal. El consumo de combustible en esta etapa se calculó utilizando los datos aportados por el fabricante de la máquina autopropulsada diseñada para el corte y picado de forrajes utilizada por [15]. Dicha cosechadora es una New Holland Modelo FR 9060, con potencia 500 HP. En la Figura 3 se observa la cosechadora New Holland Modelo FR 9060.

Con este tipo de máquina existente en el mercado hoy en día se puede lograr cortar y picar el sorgo fibroso hasta una granulometría de 5mm, tamaño similar al bagazo de caña de azúcar y al Residuo Agrícola de Cosecha de Caña de azúcar (RAC).

El consumo de gasoil de 204,45 l/ha se determina con un rendimiento cultural de 65,1 t/ha de sorgo al 50% [16] y con el consumo específico de combustible por tonelada de sorgo cosechado de 3,14 l/t [15], se calcula la cantidad de combustible en litros, mediante la Ecuación (3):

$$GASOIL_{cosecha} (l) = Cons. esp. \left[ \frac{l}{ha} \right] * Sup. sorgo req. [ha] / \eta cosecha$$

(3)

**GASOIL<sub>cosecha</sub>**: Cantidad de combustible que se consume en la cosecha, en litros.

Cons. esp.: consumo específico de gasoil. Valor = 204,45 l/ha.

Sup. sorgo req.:superficie de sorgo requerida.  
 $\eta$ cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

#### 1.1.4. Transporte

Se adopta para los cálculos de consumo de combustible en esta etapa, el transporte en camiones hasta el ingenio de la masa vegetal cosechada a un 50% de humedad con sistema corte y pica hasta una granulometría de aproximadamente 5mm.

Se consideró un radio de 25 km como distancia media recorrida por los camiones para el transporte de la biomasa, tomando como centro el ingenio donde se utiliza el sorgo fibroso como combustible. Este radio adoptado un valor promedio que generalmente se aplica para la evaluación del costo operativo de transporte para durante el período de zafra de la caña de azúcar [17].

En el cálculo de gasoil que se consume en esta etapa, se tomó como referencia un consumo específico de 0,7 litros por km, informado por [11], considerando un camión con acoplado, con motor turbocooler de 269 kW a 1900 rpm, según curva de desempeño del motor Mercedes-Benz [18].

La cantidad de biomasa de sorgo cosechada y transportada a granel en camiones desde el campo al ingenio, se calculó tomando como referencia el trabajo [19], donde se determinó que un camión de 30 m<sup>3</sup>, puede transportar entre 70 y 90 kg/m<sup>3</sup> (densidad aparente) de biomasa de RAC cosechados (con la misma máquina para corte y picado utilizada para la cosecha de sorgo) con una humedad del 15%. Siendo que en este trabajo se considera el transporte de material con 50% de humedad, la rectificación de la carga transportada a granel por camiones se calculó mediante la Ecuación (4):

$$G(w = 50\%) = da(w = 15\%) * \frac{xsol(w=15\%)}{xsol(w=50\%)} * Vol.$$

(4)

Dónde:

$G(w = 50\%)$ : Carga de sorgo por camión al 50% de humedad, en toneladas.

$da(w = 15\%)$ : Densidad aparente de biomasa de RAC por camión al 15% de humedad, en kg/m<sup>3</sup>, valor=70 kg/m<sup>3</sup>.

$xsol(w = 15\%)$ : contenido de sólidos en la biomasa al 15% de humedad.

$xsol(w = 50\%)$ : contenido de sólidos en la biomasa al 50% de humedad.

$Vol$ : Volumen del camión, valor=30 m<sup>3</sup>

La cantidad total de biomasa de sorgo fibroso al 50% de humedad que debe ser cosechado y transportado se calculó a través de un balance de sólidos en base a la demanda de biomasa al 30% de humedad que fija el proceso industrial Tabla 1, mediante la Ecuación 5:

$$Gt(w = 50\%) = Gt(w = 30\%) * 0,7/0,5$$

(5)

En base a las toneladas de material a transportar en camión por viaje  $G(w=50\%)$ , la cantidad total de biomasa de sorgo que demanda el proceso fabril  $Gt(w=50\%)$  y los kilómetros que debe recorrer el camión, se calculó, mediante las Ecuaciones 6 y 7, la cantidad de viajes que deben realizarse y el combustible que se consume durante el transporte:

$$Cvc = \frac{Gt(w=50\%)}{G(w=50\%)} \tag{6}$$

$$GASOIL_{transporte} = Cons. esp.* Cvc * K$$

(7)

Dónde:

$GASOIL_{transporte}$ : Cantidad de combustible que se consume en el transporte, en litros.

$Cons. esp$ : Consumo específico de gasoil, en l/km, informado por [9], valor=0,7.

$Cvc$ : Cantidad de viajes que debe realizar el camión.

$K$ : Distancia que debe recorrer el camión ida y vuelta, en km.

#### 1.1.5. Carga y alimentación

Siendo que, la materia vegetal transportada llega al ingenio con un contenido de humedad del 50%, se considera que la biomasa recibida se almacenará en pilas en un playón en las inmediaciones del ingenio para que se produzca el secado natural a cielo abierto hasta una humedad del 30%. Se asume dos meses como tiempo necesario para secar el sorgo fibroso hasta el 30% de humedad, sujeto a las condiciones climáticas reinantes durante ese período

[20]. Transcurrido este periodo el sorgo cortado y picado se supone listo para su carga y alimentación a la caldera.

Para el cálculo de la cantidad de combustible que insume esta tarea, se tuvo en cuenta que la actividad de carga y alimentación a la caldera se realiza con una pala cargadora marca Liu Gong CLG 835, con capacidad del balde de 1,7 m<sup>3</sup>, una carga de 3.000 kg, peso operativo de 10.900, potencia nominal de 92 kW y un consumo de combustible de 224 g/kwh.

El consumo de gasoil para las tareas de movimiento de biomasa y carga de tolva de alimentación de rastras a calderas para los 150 días de operación fue calculado determinando primeramente el número de cargas de la pala cargadora, el tiempo de cada carga, el factor de carga y el consumo de gasoil por operación de la pala cargadora, mediante las Ecuaciones 8, 9, 10, 11 y 12.

$$N^{\circ} \text{ de cargas} = Gs / \text{Carga}$$

(8)

$$tc = dr / vt$$

(9)

$$Fc = (1 + 0,725) / 2$$

(10)

$$Ccop. = (Cc * Pot. Nom. * tc * Fc) / dc$$

(11)

$$GASOILcya = Ccop. * N^{\circ} \text{ de cargas} * \text{días de operación}$$

(12)

Dónde:

*GASOILcya*: consumo de gasoil para carga y alimentación, en litros.

*N<sup>o</sup> de cargas*: Número de cargas totales que debe realizar la pala.

*Gs*: Cantidad de sorgo a procesar, en t/d.

*Carga*: Peso que puede soportar la pala, en toneladas, valor=3t.

*tc*: Tiempo de carga, en segundos.

*vt*: Velocidad del tractor, valor=8,5 km/h.

*dr*: distancia recorrida, se asume 0,5 km.

*Fc*: Factor de carga

*dc*: Densidad del gas oil, valor=0,8176 kg/l

*Pot. Nom*: Potencia nominal de la pala cargadora, valor=92 kW

*Cc*: Consumo de combustible, g/kwh, valor=22,4.

*Ccop*: Consumo de combustible por operación, en litros.

*Días de operación*: 150 días.

Los parámetros operativos de la pala cargadora adoptados para los cálculos fueron, velocidad de circulación promedio (vt) de 8,5 km/h y la distancia recorrida media de ida y vuelta (dr) de 0,5 km.

## 1.2. Energía insumida versus energía producida

Para el cálculo de la productividad energética (PE), definida como la razón entre la energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso se utilizó la Ecuación 13.

$$P. E = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía insumida}}$$

(13)

Los volúmenes de gasoil consumidos en cada una de las actividades fueron transformados en unidades energéticas utilizando la Ecuación (14):

$$E(KJ) = \text{Gasoil (l)} * d \left( \frac{kg}{l} \right) * PCI \left( \frac{kJ}{kg} \right)$$

(14)

Dónde:

*d*: Densidad de gasoil, valor=0,8176 kg/l

*PCI*: Poder Calorífico Inferior del gasoil, valor=42636 kJ/kg

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1.1. Siembra directa

El consumo de gasoil calculado de la ecuación 1 para la etapa de siembra resulto de 15.558,4 litros.

$$GASOIL_{siembra} = 13,5 \frac{l}{ha} * 979,6 ha / 0,85$$

$$GASOIL_{siembra} = 15.558,4 l$$

#### 3.1.2. Aplicación de agroinsumos

El consumo de gasoil para la aplicación de los agroinsumos considerados en la Ecuación (2), resulto de 2.765,9 litros.

$$GASOIL_{agroinsumos} (l) = 3 * 0,8 \frac{l}{ha} * 979,6 ha / 0,85 = 2.765,9 litros$$

#### 3.1.3. Cosecha

El consumo de gasoil para la cosecha de sorgo fibroso calculado de la Ecuación (3) resulto de 235.622,6 litros, utilizando una máquina cosechadora autopropulsada corta y pica.

$$GASOIL_{cosecha} (l) = 204,45 \left[ \frac{l}{ha} \right] * 979,6 [ha] / 0,85$$

$$GASOIL_{cosecha} (l) = 235.622,6 litros$$

#### 3.1.4. Transporte

La cantidad de biomasa al 50% de humedad que transporta cada camión por viaje se calculó mediante la ecuación 4 resulto en 3,57 toneladas por viaje.

$$G(w = 50\%) = (70kg / m^3 * 0,85 / 0,5) * 30m^3 / 1000kg$$

$$G(w = 50\%) = 3,57 t / viaje$$

Las toneladas de sorgo totales al 50% de humedad que debe transportarse, calculada mediante la ecuación 5 en base a los requerimientos del proceso de biomasa al 30% de humedad, resulto de 63.686 toneladas.

$$Gt(w = 50\%) = (45.490(t) * 0,7) / 0,5$$

$$Gt(w = 50\%) = 63.686(t)$$

De las Ecuaciones 6 y 7 se obtuvo el número de viajes necesarios y combustible consumido total para transportar las toneladas de sorgo fibroso al 50% que se requieren en la planta industrial obteniéndose un valor de 17.839 viajes y 312182,5 litros de gasoil.

$$C_{vc} = \frac{63.686(t)}{3,57 \left( \frac{t}{viaje} \right)}$$

$$C_{vc} = 17.839 viajes$$

$$GASOIL_{transporte} = 0,7 \left( \frac{l}{km} \right) * 17.839 * 25(km)$$

$$GASOIL_{transporte} = 312.182,5(l)$$

#### 3.1.5. Carga y alimentación

Los valores obtenidos de número de cargas diarias, tiempo de carga y factor de carga, calculados mediante las ecuaciones 8, 9 y 10, resultaron en 101,08 cargas por día, 0,06 horas y 0,862 respectivamente.

$$N^{\circ} de cargas = 303,26 \left( \frac{t}{d} \right) / 3(t/carga)$$

$$N^{\circ} de cargas = 101,08 \left( \frac{cargas}{d} \right)$$

Se considera directamente un valor de 102 cargas por día.

$$t_c = 0,5(km)/8,5\left(\frac{km}{h}\right)$$

$$t_c = 0,06(h)$$

$$F_c = (1 + 0,725)/2$$

$$F_c = 0,862$$

El consumo de combustible de la pala cargadora por operación determinado a través de la Ecuación (11) resultó en 1,30 litros.

$$C_{cop.} = [224(g/kWh) * 92 (kW) * 0,06(h) * 0,862]/(0,81768(g/ml) * 1.000)$$

$$C_{cop.} = 1,30 (l)$$

Luego, el consumo de combustible total para el manejo de toda la materia vegetal determinado a través de la ecuación 12 resultó en 19.890 litros.

$$GASOIL_{cya} = 1,30(l) * 102\left(\frac{cargas}{d}\right) * 150(d)$$

$$GASOIL_{cya} = 19.890(l)$$

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos de consumos de gasoil para cada etapa de logística de sorgo fibroso analizado y la energía que se insume en cada etapa, calculada con la Ecuación (14).

Tabla 3. Consumo de gasoil, energía insumida para cada etapa analizada y energía producida por el sorgo fibroso.

Etapa	Consumo de gasoil [l]	Energía insumida [GJ]	Energía producida [GJ]
Aplicación de agroquímicos	2765,9	96,42	-
Siembra directa	15558,4	542,4	-
Cosecha	235622,6	8213,6	-
Transporte	312.182,5	10882,4	-
Carga y alimentación	19.890,0	693,3	-
Combustión	-	-	473420,0
<b>Total</b>	<b>586.019,4</b>	<b>20.428,2</b>	<b>473.420,0</b>

### 3.2. Energía insumida versus energía producida

La productividad energética obtenida resulta en un valor de 23,2.

$$P.E = \frac{473.420, (GJ)}{20428,2 (GJ)}$$

$$P.E = 23,2.$$

Este valor de PE obtenido indica que la energía producida que entrega el sorgo fibroso cuando se quema en una caldera para las condiciones dadas es 23,2 veces mayor que la energía que requiere para las actividades en campo y fábrica evaluadas. En otras palabras, por cada unidad de energía invertida se obtienen 23,2 unidades de energía producida.

En el caso del cálculo de la productividad energética del residuo agrícola de cosecha (RAC), determinado por [19], se obtuvo un valor de 21,96.

Otros autores como [21], estudiaron la productividad energética del sorgo azucarado, algodón y trigo, obteniendo valores tales como 12,3; 3,1 y 8,36 respectivamente, [22] obtuvieron valores de productividad energética del sorgo azucarado de entre 15,11 y 18,68. En todos los casos citados, los valores son siempre inferiores, comparados con el obtenido por el sorgo fibroso, sin embargo están en el rango 10-32 mencionado por [23].

La mayor productividad energética del sorgo fibroso, reportada en este artículo, con respecto a las obtenidas por [21] y por [22] se debe a que el sorgo fibroso presenta mayor contenido de

fibra en los tallos, aprovechamiento del 100% de biomasa y un menor contenido de humedad al momento de la cosecha.

El objetivo de este trabajo fue un estudio preliminar del aprovechamiento energético del sorgo fibroso, sin considerar los gastos energéticos de obtención de agroinsumos, evidenciando, de este modo, diferencias con otros autores [21], [22] y [23] en los resultados de la PE.

Para las tareas de logística del manejo de este tipo de cultivos, se recomienda el uso de energías renovables en vez de las provenientes de origen fósil, ya que cualquier entrada de energía de fuente no renovable, causa efectos negativos en la sostenibilidad de producción de cultivos bioenergéticos, por lo tanto se tiende a fomentar la investigación y desarrollo para reducir las emisiones de GEI y mejorar la seguridad bioenergética [21].

Tucumán cuenta con un potencial de 24.700,8 hectáreas de tierra para el cultivo del sorgo fibroso [10], de lo cual se utilizaría solo el 3,96% para llevar a cabo este proyecto que podría funcionar en interzafra azucarera, por lo tanto el 96,03% restante podría utilizarse para abastecer la demanda actual de combustible durante la zafra azucarera y citrícola. Sin embargo, antes de lanzar una producción comercial de sorgo fibroso se necesita una evaluación más exhaustiva de la viabilidad y sostenibilidad del proyecto. Un proceso eficiente requiere que la energía invertida en la producción de una unidad de biocombustible incluyendo las etapas agrícola e industrial sea menor de la que sale del sistema [22].

#### 4. CONCLUSIONES

La energía producida estimada por el sorgo fibroso resultó 23,2 veces mayor que la energía insumida en los procesos que se tuvieron en cuenta para el análisis. Si bien una parte de la información utilizada para el cálculo de este indicador fueron obtenidas en diferentes condiciones a las locales, se evidencia la factibilidad de este tipo de fuente de biomasa con fines bioenergéticos.

Con esta propuesta se lograría incluir en la matriz energética un nuevo combustible de origen renovable, logrando activar la bioeconomía de la región, ya que se complementa con la zafra azucarera, se utiliza la infraestructura y equipamiento disponible en ingenios azucareros locales, se reemplaza un combustible de origen fósil por uno de origen renovable, apostando a la sustentabilidad del sistema.

Los resultados de este trabajo sugieren realizar un estudio más detallado de la PE del sorgo fibroso, donde se evalúe la exergía producida e insumida para este cultivo, además de una evaluación de huella de carbono del proceso total.

#### 5. REFERENCIAS.

- [1] Cruz, M.C.; De Boeck, G., y Paz, D. 2020. Estudio preliminar del aprovechamiento de sorgo fibroso como combustible para abastecer energéticamente a un ingenio durante la interzafra en Tucumán. Tomo 97(1): 43-50. Revista Industrial Agrícola de Tucumán (RIAT)
- [2] Wang, R., Zhang, J., Kang, H., & Zhang, L. 2016. Design, preparation and properties of bio-based elastomer composites aiming at engineering applications. 133, 136–156. Composites Science and Technology.
- [3] Koçar y Civaş. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 28.900-916.
- [4] IDAE. 2009. Biomasa – Ahorro y eficiencia energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura. [En línea]. Disponible en: [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_biomasa\\_cultivos\\_energeticos\\_07\\_4bd9c8e7.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf). (Consultado el 25 de Marzo de 2015).
- [5] Sims, A. Hastings, B. Schlamadinger, G. Taylor, P. Smith. 2006. Cultivos energéticos: estado actual y perspectivas de futuro Global Change Biology, 12 (noviembre (11)), pp. 2054 – 2076.
- [6] Casen, S.D.; Romero, E.R.; Fernandez Gonzalez, P. y De Boeck, G.; J. 2020. Sorgo fibroso para la producción de bioenergía. Revista Avance Agroindustrial. Vol. 41 (3), p: 20-24.
- [7] Fernandez González, P y Sanchez Ducca, A. 2012. Análisis del sorgo fibroso como cultivo alternativo para la obtención bioenergía. II Simposio Nacional de sorgo realizado por AIAMBA en Pergamino, Bs. As.
- [8] Amaducci, S.; M. Colauzzi; F. Battini; A. Fracasso and A. Perego, 2016. Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment. Eur. J. Agron. 76: 54-65.
- [9] Serra, P.; J. Giuntoli; A. Agostini; M. Colauzzi and S. Amaducci. 2017. Coupling sorghum biomass and wheat straw to minimize the environmental impact of bioenergy production. Journal of Cleaner Production 154: 242-254

- [10] IDAE y BESEL S.A. 2007. Biomasa – Cultivos Energéticos. [En línea]. Disponible en [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_10737\\_biomasa\\_cultivos\\_energeticos\\_07\\_4bd9c8e7.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf). (Consultado el 25 de Marzo de 2015).
- [11] Murphy, D. J. y Charles A. S. H. 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1185, 102–118.
- [12] Golato, M.A. y Cárdenas, G.. 2012. Consumo de combustible y energía en el transporte de biodiesel. *Avance Agroindustrial*. Vol. 33 (1).p: 39-42.
- [13] Donato, L.B. 2013. Estimación del consumo potencial de gasoil para lastareas agrícolas, transporte y secado de granos en el sector agropecuario. INTA. Castelar – Buenos Aires. [En línea]. Disponible en <http://inta.gob.ar/personas/donato.lidia>. (Consultado el 29 de Enero de 2017).
- [14] May, A.; D da Silva, D. y dos Santos, F.C. Embrapa. 2013. Cultivo do sorgo biomassa para cogeneración de energía eléctrica. ISSN 1518-4277.
- [15] Belo de Oliveira, N. O. 2016. O uso do sorgo biomassa para cogeração: aspectos técnicos e econômicos. São Paulo. Brasil.
- [16] Casen, S.D.; Fernandez Gonzalez, P; De Boeck, G.; Tonatto, J.; Medina, M. y Romero E.R. 2015. Estudio del comportamiento de híbridos de alta fibra de sorgo para su utilización en la cogeneración de energía. Congreso Nacional de Maíz y Sorgo realizado por AIAMBA en Pergamino, Bs. As.
- [17] Olea, I., E., Romero; F. Perez Zamora y C. González Terán. (1992). Transporte de la caña de azúcar en Tucumán. Reunión Técnica realizada por la EEAOC. Miscelánea N° 95. Pág., 13-27.
- [18] Mercedes-Benz. (2010). Catálogo de camión Extra-Pesado L1634/51. [En línea]. Disponible en: [http://www.automotoresmega.com.ar/imagenesmega/vehiculos\\_1\\_1634.pdf](http://www.automotoresmega.com.ar/imagenesmega/vehiculos_1_1634.pdf) (Consultado 12 agosto de 2019).
- [19] Feijóo. E. (2020). Análisis de diferentes opciones logísticas para el uso de los residuos agrícolas de la caña de azúcar con fines energéticos en la provincia de Tucumán. Trabajo Integrador de la Especialización en Ingeniería Bioenergética. Universidad Tecnológica Nacional.
- [20] Francescato, V.; Antonini, E. and Zuccoli Bercomi, L.. (2012). Biomass Trade Centre II - EU. Manual de Combustibles de Madera. [En línea]. Disponible en [www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf](http://www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf). (Consultado el 5 de Marzo de 2019).
- [21] Ren, L. T.; Liu, Z. X.; Wei, T. Y.; Xie, G. H. Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. (2012). *Energy*, 47, 166–173.
- [22] López-Sandín, I.; Gutierrez-Soto, G.; Gutiérrez-Díez, A.; Medina-Herrera, N.; Gutiérrez-Castorena E. y Zavala-García, F. (2019). Evaluation of the Use of Energy in the Production of Sweet Sorghum (*Sorghum Bicolor* (L.) Moench) Under Different Production Systems. Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila, Carretera a Morón, Km 9 1/2, Ciego de Ávila, Cuba. *Energies* 2019, 12, 1713.
- [23] Venturi, P.; Venturi, G. (2003). Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenergy*. Vol 25, pag. 235–255.

# DESARROLLOS RELACIONADOS A LOS TEMAS ENERGÉTICOS, QUE AYUDAN EN EL CAMINO DE TRANSFORMACIÓN A CIUDADES INTELIGENTES

Maccarone, José Luis<sup>a</sup>; Rapallini, José<sup>a</sup>; Pascual, Osvaldo<sup>a</sup>; Colavitte, Facundo<sup>a</sup>; Rodríguez, Inti<sup>a</sup>; Bifano, Lautaro<sup>a</sup>; Rodríguez, Omar<sup>a</sup>; Mazzeo, Hugo<sup>a</sup>

a CODAPLI – TSSE - LEEA – Ingeniería Eléctrica – UTN La Plata  
josmacca@gmail.com

## RESUMEN

Este proyecto toma como base una ciudad del interior de la provincia de Buenos Aires para analizar el estado de situación desde la visión del “Modelo de Ciudades Inteligentes de País Digital” propuesta por la Argentina para la transformación de una ciudad convencional en una ciudad inteligente. En base a ello, se proponen desarrollos y acciones relacionados a los temas energéticos que amalgaman con el modelo. La ciudad para este proyecto es San Miguel del Monte, ubicada en la provincia de Buenos Aires, distante 101 km de la ciudad de La Plata. Se cuenta con el apoyo del Municipio y de la Cooperativa Eléctrica de San Miguel Monte, el cual se sustenta en Convenios de Cooperación entre las Instituciones mencionadas y la UTN La Plata. El modelo está compuesto por 5 dimensiones: Gobernanza, Ambiente, Desarrollo Humano, Planeamiento Urbano y Competitividad. Cada dimensión está estructurada por 3 o 4 Ejes y cada Eje está compuesto por Factores (un promedio de 3 Factores por cada Eje). Los trabajos se focalizan en desarrollar indicadores energéticos regionales, esto permite realizar un seguimiento a dos ejes del Modelo, la Gestión de Recursos y la Ecología Urbana, que aportan a la dimensión Ambiente. Establecer indicadores energéticos para los edificios públicos aportando a la Dimensión Ambiente y teniendo como factor principal el de Edificaciones Sustentables. Para la dimensión planeamiento Urbano, enfocados en los ejes de Movilidad y Transporte, se desarrolla una Estación de Recarga para Vehículos Eléctricos de la ciudad, dando apoyo al transporte sustentable y también aporta al eje de Logística en la Dimensión de Competitividad. En el eje de Innovación, se analiza un sistema de comunicación para control de puntos clave de la red de distribución de energía eléctrica a través de PLC (Power Line Communications). Y el eje Productividad, se enfoca a un mejor desempeño energético de las PyMEs de la región.

**Palabras Claves:** Ciudades, Inteligentes, Energía, País, Digital

**Área Temática:** Energía y Medio Ambiente. Desafíos para las ciudades.

O en la temática:

Generación Distribuida. Optimización en la producción, almacenamiento y uso de la Energía. Uso racional y eficiente de la Energía. Usos especiales

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de investigadores

## 1. INTRODUCCIÓN

Cuando comenzamos a analizar la importancia de ciudades inteligentes nos encontramos con ideas centrales como se expone en [1]: *Mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y el desarrollo sostenible de las ciudades [propuesto por diversos autores, Dameri, 2013; Caragliu, Del Bo, & Nijkamp, 2011; Toppeta, 2010 y Batty et al., 2012]*

En este orden de ideas (Nam & Pardo, 2011) afirma que el objetivo de las ciudades inteligentes es crear un entorno para el intercambio de información, colaboración, interoperabilidad y experiencias perfectas para sus habitantes asumiendo la innovación tecnológica como un mecanismo para mejorar los servicios y crear condiciones donde las herramientas pueden ser mejor utilizadas; donde el uso de las tecnologías son indispensables para mejorar la competitividad y asegurar un futuro más sostenible por la relación entre personas, empresas, tecnologías, infraestructuras y gobierno.

Se pueden encontrar diversas definiciones de ciudad inteligente:

- Una ciudad inteligente es un área geográfica o territorio que se caracteriza por el uso intensivo de las tecnologías con el objetivo, de manera general, de mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y el desarrollo sostenible de las ciudades bajo los supuestos de la colaboración y la innovación. [Revisión de literatura sobre ciudades inteligentes [2]
- Una ciudad se puede definir como inteligente o como inteligentemente eficiente, cuando la inversión social, el capital humano, las comunicaciones, y las infraestructuras, conviven de forma armónica con el desarrollo económico sostenible, apoyándose en el uso y la modernización de nuevas tecnologías [3].

Existe un consenso en el significado del término de ciudad inteligente, existiendo otros similares como ciudad digital, ciudad del conocimiento, entre otras. Las palabras clave para la búsqueda de información en la necesidad de ese consenso corresponden a: Smart City, Digital City, Smart/Digital City and ICT/IT y ICT cities.

En cuanto a enfoques para la concepción de ciudades inteligentes algunos autores presentan el enfoque de innovación abierta (OI – open innovation [4,5]) o el sistema de sistemas (SoS – system of systems [6,7]). Una definición simple de OI es un proceso de apertura de los límites para compartir e intercambiar conocimientos e información; es el modo de transformar colaborativamente para mejorar u obtener un nuevo producto o servicio, donde a partir de la confianza, se buscan y se comparten las soluciones. Por otra parte, un SoS se caracteriza por un conjunto o arreglo de sistemas independientes unidos entre sí de varias maneras para proporcionar capacidades. Los sistemas se pueden adaptar para proporcionar capacidades deseadas, dependiendo de la situación. Una ciudad inteligente constituye un “sistema de sistemas” - un conjunto de sistemas públicos y privados interdependientes que la ciudad puede integrar y optimizar para lograr un nuevo nivel de eficacia y eficiencia.

En base a lo planteado un camino para la mejorar la calidad de vida de los ciudadanos y el desarrollo sostenible es que en pasos progresivos las ciudades como hoy la conocemos implementen acciones para transformarse en ciudades inteligentes. Y la pregunta que podemos realizar es ¿cómo las ciudades del interior de la provincia de Buenos Aires pueden ir transformándose en ciudades inteligentes?, la respuesta puede comenzar a encontrarse en el modelo de transformación propuesto por la Argentina y denominado *Modelo de Ciudades Inteligentes de País Digital* [8], el cual permite analizar el estado de situación para avanzar en los ejes de transformación. El modelo está compuesto por 5 dimensiones: Gobernanza, Ambiente, Desarrollo Humano, Planeamiento Urbano y Competitividad. Cada dimensión está estructurada por 3 Ejes (exceptuando Desarrollo Humano que tiene 4 ejes) y cada Eje está compuesto por Factores (un promedio de 3 Factores por cada Eje). La unidad mínima de medida es el indicador y el modelo cuenta con más de 300 de ellos entre cualitativos y cuantitativos internacionalmente usados y reconocidos.

En la siguiente figura 1, podemos ver las áreas involucradas



Figura 1 – Áreas y ejes del Modelo de ciudades inteligentes, país digital, propuesta por la Argentina <https://www.argentina.gov.ar/jefatura/innovacion-publica/gobierno-abierto-y-pais-digital>

Pero el problema es que, en general, la carga administrativa y operativa de los municipios sumado al contexto actual de pandemia, influye para que ese camino de transformación sea vea como un camino muy duro de recorrer sin cierta ayuda y colaboración de sectores que pueden dar un apoyo sustancial [9].

Las Universidades pueden aportar conocimiento y desarrollo para ayudar en ese camino de transformación hacia la mejora de la calidad de vida y del desarrollo sostenible, a través de recursos humanos calificados y entrenados para el desarrollo de nuevos desafíos, las ciudades inteligentes. Es en esta dirección que este proyecto con base en un Centro de Desarrollo como CODAPLI (Codiseño Aplicado) con asiento en la Universidad Tecnológica Nacional Facultad La Plata, el cual se encuentra conformado por investigadores de dos disciplinas claves para el tema de interés, por un lado el Área de Ingeniería en Sistemas y por otro lado el Área de Ingeniería en Energía Eléctrica, asegurando el desarrollo de proyecto en las instalaciones de ambas áreas ubicadas en la misma Facultad de la UTN La Plata, (Laboratorio CODAPLI del área Sistemas, Laboratorio de Eficiencia Energética Aplicada y Laboratorio de Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos del área de Ingeniería en Energía Eléctrica).

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GENERAL

Por lo tanto, se puede decir que el objetivo general de este proyecto es aportar desarrollos y acciones relacionados a temas energéticos que ayuden a una ciudad de la provincia de Buenos Aires en su camino de transformación a ciudad inteligente

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1 Desarrollo del proyecto de ingeniería para la 1ª Estación de Recarga de Vehículos Eléctricos de la ciudad y de la Región de San Miguel del Monte en punto estratégico de la Región.

2 Adaptar metodología y software de Gestión de la Energía (Planergy, 2022), para el Municipio y PyMEs de la Región de San Miguel del Monte, que quieran participar del proyecto para desarrollar un camino de mejora continua en términos de desempeño energético.

3 Desarrollo de Indicadores Energéticos para la ciudad y para Edificios Públicos de San Miguel del Monte

4 Desarrollo, Adaptación y Pruebas de un sistema de Comunicación a través de las actuales redes de alimentación de energía eléctrica de baja tensión.

## 3. DESARROLLO

Como se comentó anteriormente el proyecto toma como referencia la mejora de la calidad de vida y el desarrollo sostenible de las ciudades pero en términos energéticos (que es parte de la principal experiencia del grupo de trabajo), de esa manera permite relacionar el concepto de Ciudades Inteligentes con el concepto de Redes Inteligentes, Indicadores Energéticos, Desempeño Energético, los cuales forman tres pilares claves para la transformación.

En cuanto a las Redes Inteligentes, se puede decir que es un sistema de transmisión y distribución de energía eléctrica que incorpora elementos tecnológicos y de procesos relacionados a la automatización, a la tecnología de información y comunicación en busca la mejora en la calidad de servicio y producto de la energía que abastece a la comunidad.

Mientras que los Indicadores Energéticos, son expresiones y valores utilizados para monitorear, controlar y/o supervisar cambios en entre dos situaciones dadas, la situación real actual y la situación esperada, entre ellas existe como mínimo un plan de acción para cambiar la realidad actual del medioambiente y de la prestación de servicios a la comunidad.

El Desempeño Energético se entiende como un concepto que abarca la relación entre la eficiencia energética, el uso y el consumo de la energía, que ayudado con indicadores de desempeño energético permite establecer objetivos de mejora continua general de la región o particular enfocado a organizaciones y PyMEs.

Para algunas tareas el equipo de investigadores se divide en grupos incorporando alumnos de la carrera de ingeniería, de tal manera que se pueda avanzar en tareas para el aporte de al menos dos objetivos al año. Durante el primer año, 2022, se comienza con tareas relacionadas a los objetivos específicos 1, 2 y los relevamientos y toma de datos necesarios que servirán de base para las tareas de los objetivos 3 y 4. Durante el año 2 y 3 los grupos se centran en los objetivos específicos 3 y 4.

Para cumplir con el Objetivo General se toma el “Modelo de Ciudad Inteligente de País Digital”, sugerido por la Argentina como base para la transformación de las ciudades con vistas hacia la mejora de la calidad de vida y el desarrollo sostenible. Por lo tanto, los trabajos se centran en implementar desarrollos y acciones desde la visión energética. El aporte se puede ver en la última columna de la Tabla 1, donde también se resume como se interrelaciona con las Dimensiones del Modelo de Ciudades Inteligentes de País Digital.

Tabla 1 – Relación entre las Dimensiones del Modelo de Ciudades Inteligentes de País Digital y los ejes de desarrollo de este proyecto

Dimensión Modelo	Ejes Modelo	Factores Modelo	Ejes del Proyecto
Ambiente	Gestión de Recursos	Energía	Desarrollo de Indicadores Energéticos Regionales (obj3)
Ambiente	Ecología Urbana	Edificaciones Sustentables	Desarrollo de Indicadores Energéticos Edificios (obj3)
Planeamiento Urbano	Movilidad	Energía Eléctrica	Estudio y Desarrollo de Proyecto de Estación de Recarga Vehículos Eléctricos (obj 1)
Competitividad	Logística	Niveles de infraestructura	
Competitividad	Innovación	Energía Eléctrica	Desarrollo de PLC (Power Line Communications) Gestión Energética de la Red (obj4)
Competitividad	Productividad	Energía	Modelo mejora desempeño Energético en las PyMEs Software Planergy (obj2)

Para cumplir con el Objetivo Específico 1 (Estación de recarga), se utiliza la metodología de Diseño, Proyecto y Cálculo de Estaciones y Redes Eléctricas teniendo en cuenta el aprovechamiento de energías renovables y los lineamientos generales de estandarización Internacional y Local de una Estación de Recarga de Vehículos Eléctricos. Esta parte se realizará en el marco de la Cátedra de Proyecto Final de la Carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica, y con base las disposiciones vigentes para este tipo de proyecto [10].

Para dar cumplimiento al Objetivo Específico 2 (adaptación software Planergy), se utilizará como base la metodología y el software desarrollado por la UTN La Plata [11]

Para cumplir con el Objetivo Específico 3, se utiliza la metodología de desarrollo de los indicadores energéticos para ciudades y regiones, tomando como base la Norma ISO 50049:2020 y la ISO 17743:2016 [12], las cuales se enfocan a regiones, ciudades y países.

Para dar cumplimiento al Objetivo Específico 4, se utiliza el concepto de Power Line Communications (PLC), para poder transmitir señales en banda angosta a través de las redes eléctricas de baja tensión. Esta parte se realiza con graduados iniciados en investigación y

desarrollo que han realizado una experiencia teórica similar en su Proyecto Final de Carrera [13]

#### **4. RESULTADOS**

Hasta la fecha de este trabajo se avanzó en el análisis para la instalación de la estación de recarga en la ciudad de San Miguel del Monte. En dicho análisis se tuvo en cuenta que a la Ciudad de San Miguel del Monte la cruza la ruta nacional nº 3, entre otras importantes, además de encontrarse distanciada 100 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, y cercana a otras grandes urbes como la ciudad de La Plata, Lobos, Brandsen, Las Flores. La laguna de S. M. del Monte (contigua a la ciudad) es un lugar elegido también por el turismo por las diferentes actividades deportivas y de esparcimiento que se llevan a cabo en la Laguna y en sus campings alrededor de la misma. Si bien el Proyecto para la instalación de la estación de recarga está concluido, del análisis surge que se replanteará la forma de ofrecer la recarga a los futuros usuarios locales de vehículos eléctricos y principalmente a los visitantes que se acercan con fines turísticos [14].

Con respecto al PLC (power line communications) está desarrollado el hardware con prueba satisfactoria, y se está adaptando para la prueba en campo, para lo cual se utilizan dos medidores conectados a la misma fase de alimentación de energía en baja tensión, para lo cual se utiliza la red eléctrica de la Cooperativa de San Miguel del Monte, por la vinculación que se tiene con la cooperativa y para comparar las mediciones con la tecnología actual que tienen, ya que cuentan en varios puntos de la red, con telemedición. Las primeras aproximaciones de costo nos indica que el desarrollo del PLC se puede realizar a mitad de valor de mercado [15]. Este sistema aportará al proceso de la conversión a redes eléctricas inteligentes (Smart Grid) y de esa manera suma en el eje de Innovación de la dimensión de Competitividad del Modelo.

Los otros dos objetivos se comienzan a trabajar durante los próximos meses enfocando a que la región de San Miguel del Monte pueda contar con la con una adaptación del software y de la metodología desarrollada por la UTN La Plata para la gestión de las energías utilizadas y consumidas, y el resultado esperado es una mejora sustancial en la gestión de los recursos energéticos que en el tiempo se convierte en un mejor desempeño energético, fijando un camino de mejora continua. Si bien el resultado esperado es en dependencias del Municipio, también se espera que algunas PyMEs de la Región se puedan adherir a esta metodología. De esta manera el Municipio estaría dando respuesta a la Dimensión Competitividad y Ambiente del Modelo.

En cuanto a desarrollar la Matriz de Indicadores Energéticos se comenzará durante el 2023, esto puede permitir contar con un marco de referencia para la planificación energética regional y la toma de decisiones para las mejoras futuras. Cumpliendo este objetivo se aporta a la dimensión Ambiente del Modelo y puede ser una de las primeras aplicaciones en el país de Indicadores Energéticos Regionales, por lo tanto, también puede ser de utilidad para otras ciudades cercanas que quieran aplicar esta metodología.

#### **5. CONCLUSIONES**

Se puede afirmar que para la provincia de Buenos Aires es uno de los pocos proyectos propuestos para ir avanzando a ciudades inteligentes centradas en la comunidad en donde se da lugar al debate, análisis y adaptación para comenzar el camino. El debate entre los actores es clave para este proceso y eso está garantizado por el Convenio Marco entre una Ciudad (Municipalidad de San Miguel del Monte), una Universidad (UTN La Plata) y con el apoyo de la Cooperativa Eléctrica que provee energía en la Región.

El avance con cada uno de los objetivos propuestos, permite afianzar el siguiente paso porque se incrementa el vínculo con los actores, y tomar decisiones como por ejemplo re-direccionar el proyecto de la Estación de Recarga para vehículos eléctricos a otro proyecto de mayor flexibilidad pero conservando el objetivo principal de manera que la ciudad pueda contar con un proyecto que apoya el uso del Transporte Sustentable (Dimensión Planeamiento Urbano y Competitividad del Modelo), siendo el primero en esa Región puede ser de utilidad para otras ciudades cercanas que quieran comenzar el mismo camino.

El impacto de este proyecto es tanto puertas a fuera de la Facultad como puertas hacia dentro de la Facultad. Es sabido que los recursos humanos son clave en cualquier tipo de organización y específicamente en el sector Académico-Científico, motivo por el cual se propone seguir enfocado en la consolidación de los Integrantes del Centro CODAPLI en general y en particular a los que dependen del área Eléctrica de CODAPLI, a través de su formación y capacitación, brindando la posibilidad a sus integrantes de participar en forma activa, con aportes sustanciales en investigación y desarrollo, especialmente en la temática

propuesta. Así mismo proponer nuevos integrantes para generar vocaciones en el área de I+D+i del Departamento de Ingeniería en Energía Eléctrica de la Facultad La Plata.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Maestre Góngora, Gina Paola; Nieto Bernal, Wilson. (2015). *Factores Clave en la Gestión de Tecnología de Información para Sistemas de Gobierno Inteligente*. Journal of Technology Management & Innovation, vol. 10, núm. 4, pp. 109-117 Universidad Alberto Hurtado Santiago, Chile.
- [2] Maestre, Gina. (2015). Revisión de literatura sobre ciudades inteligentes: una perspectiva centrada en las TIC. *Ingeniare*. 11. 137-149.
- [3] [[https://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad\\_inteligente](https://es.wikipedia.org/wiki/Ciudad_inteligente)]
- [4] H. Schaffers, N. Komninos, M. Pallot, B. Trousse, M. Nilsson and A. Oliveira. (2011). *Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation*. Springer.
- [5] K. A. Paskaleva. (2011). *The smart city: A nexus for open innovation*. Intelligent Buildings International, vol. 3, pp. 153-171.
- [6] C. Harrison and I. A. Donnelly. (2011). *A theory of smart cities*, in Proceedings of the 55th Annual Meeting of the ISSS-2011, Hull, UK.
- [7] M. Naphade, G. Banavar, C. Harrison, J. Paraszczak, and R. Morris. (2011). *Smarter cities and their innovation challenges*. Computer, vol. 44, pp. 32-39.
- [8](<https://www.argentina.gob.ar/jefatura/innovacion-publica/gobierno-abierto-y-pais-digital/paisdigital/ciudadesinteligentes>)
- [9] Parafraseamos de las reuniones mantenidas con el Intendente y colaboradores del Municipio de San Miguel del Monte en oportunidad de la firma del Convenio Marco entre la Municipalidad de San Miguel del Monte y la Universidad Tecnológica Nacional La Plata.
- [10] Cátedra de Proyecto Final Carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica UTN La Plata
- [11] <http://ingenio.frlp.utn.edu.ar/index.php/ingenio/article/view/e022> - volumen 3 - 2021
- [12] <https://www.iso.org/home.html>
- [13] Colavitte, Facundo; Castro Ponte, Richard. (2021). *Estudio y desarrollo de comunicación PLC para telemedición en redes de distribución de baja tensión*. Cátedra de Proyecto Final Carrera de Ingeniería en Energía Eléctrica UTN La Plata.
- [14] Rodriguez, Inti; Gucciardini, Agustín; Merker, Germán; Maccarone, José; Pascual, Osvaldo; Abraham, Abel. (2022). *En el camino de transición a ciudades inteligentes – Estación de recarga eléctrica – caso San Miguel del Monte*. Para presentar en el Seminario Nacional de Energía de la Universidad Tecnológica Nacional – UTN Mendoza.
- [15] Colavitte, Facundo; (2022). Invitados por FACE (Federación Argentina de Cooperativas Eléctricas para presentar: *Adaptación del desarrollo del PLC para telemedición en redes de distribución de baja tensión – Caso San Miguel del Monte*. ExpoTécnica Energías y telecomunicaciones – 27 y 28 de octubre – Buenos Aires

## Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades de la Facultad La Plata de la Universidad Tecnológica Nacional por el apoyo para este proyecto, como así también a las autoridades y colegas del Centro CODAPLI, TSSE, LEEA y Departamento de Ingeniería en Energía Eléctrica, Investigadores, graduados y alumnos que participan del proyecto. Especialmente agradecemos a las autoridades de la Cooperativa Eléctrica de San Miguel del Monte, sin su apoyo no podríamos realizar las pruebas necesarias para los desarrollos y también a las Autoridades del Municipio de San Miguel del Monte, por abrirnos sus puertas para encarar este ambicioso proyecto.

# IMPLEMENTACIÓN DE EMULADOR DE TURBINA EÓLICA: PRIMERA ETAPA CONTROL DE MÁQUINA PRIMARIA

N. Bohn, T. Barreneche y S.J. Amodeo

Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras  
Universidad Nacional del Sur  
Av. Alem 1253, (8000) Bahía Blanca, Argentina  
nicolas.bohn23@gmail.com

## RESUMEN

El presente trabajo incluye parte del desarrollo de la implementación de un emulador de un generador eólico basado en la máquina asíncrona doblemente alimentada. Se desarrollan los modelos de los sistemas conversión a potencia mecánica del viento para su máximo aprovechamiento y el correspondiente a la dinámica mecánica de la turbina, incluyendo los casos de aplicar una reducción a dos o tres masas concentradas. La implementación está basada en la utilización de la herramienta Simulink Coder™ aplicada a microcontroladores Arduino Due. Se presentan el detalle del modelado, los resultados obtenidos por simulación numérica y mediciones de laboratorio. Los resultados experimentales obtenidos se encuentran dentro de las tolerancias esperadas.

### Palabras Claves:

Generación Eólica, Emulador de Turbina Eólica, Laboratorios de Resonancias en Sistema de Potencia

**Área Temática:** ENERGÍAS SUSTENTABLES y EDUCACIÓN.

**Categoría del Trabajo:** Docentes-Investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

La participación de la generación eólica en la matriz de generación eléctrica ha aumentado considerablemente en el último tiempo. Esta tendencia se mantendrá sostenidamente en las próximas décadas en búsqueda de un mejor aprovechamiento del recurso energético [1]. Con los niveles de participación alcanzados actualmente, resulta necesario contemplarlos en los estudios de los sistemas eléctricos de potencia. Despreciar sus efectos, como era el caso en una primera instancia cuando esta participación era muy baja, causa un error importante [2] [3]. Además este tipo de generación presenta sus características propias debidas a la dinámica que introducen sus componentes mecánicos particulares y, como es el caso de las fuentes de energía renovable, al hecho de no tener control sobre la fuente primaria de energía [2] [4].

Dada la complejidad de interacciones entre los sistemas eléctricos y mecánicos, desarrollar prototipos completos a escala para realizar estudios que permitan la validación de modelos, de algoritmos de control y la mitigación de las nuevas problemáticas, resulta en equipos con mayor dificultad de operación, disponibilidad de espacio, cantidad de componentes involucrados y de sistemas accesorios necesarios, y por lo tanto conlleva a un alto costo económico. Una técnica cada vez más habitual para afrontar estos desarrollos sin sacrificar precisión de análisis es la utilización de emuladores. Haciendo uso de los modelos dinámicos muy conocidos y validados experimentalmente de los sistemas involucrados y el fuerte avance en el procesamiento digital en microcontroladores de los mismos, es posible reducir ciertas partes del sistema a una implementación por emulación que interactúe con otra parte que si se implementa con sistemas reales a escala [5] [6] [7] [8].

Es interés de este trabajo desarrollar un equipo que permita estudios de las interacciones a nivel eléctrico por lo tanto la parte del sistema correspondiente al comportamiento del viento y la dinámica mecánica de la turbina serán las partes emuladas.

En las secciones 2 y 3 de este trabajo se desarrollan los modelados involucrados en la emulación, en una primera instancia el modelado que permite maximizar la extracción de potencia mecánica en función del viento disponible y el modelado del sistema multimasa que constituye la turbina, respectivamente. Luego en la sección 4 se presentan los detalles de la implementación, presentando las estructuras de los algoritmos, el hardware utilizado y los criterios adoptados. Luego en la sección 5 se presentan los resultados de dos casos de estudio con sus resultados experimentales obtenidos. Finalizando en la última sección donde se presentan las conclusiones.

## 2. MODELADO DE TURBINA EÓLICA

La turbina eólica es un complejo sistema aerodinámico encargado de convertir la energía cinética del viento en energía mecánica. A partir de la misma se tracciona un generador que la convierte en energía eléctrica. La relación de entrada y salida depende de la velocidad del rotor y la energía transformada del viento. Resulta de gran importancia desarrollar un modelo analítico detallado de este convertidor que luego será implementado por el emulador y permita reproducir esta respuesta dinámica. El análisis de la respuesta emulada permite la optimización de los sistemas de control, de monitoreo y el dimensionamiento de los componentes principales como el eje, soportes, rodamientos, etc.

### 2.1 POTENCIA DE LA TURBINA EÓLICA

En (1) se expresa la energía cinética del viento como

$$U = \frac{1}{2}mV_w^2 = \frac{1}{2}(\rho A)V_w^2 \quad (1)$$

Donde,  $m$  es la masa del aire,  $V_w$  es la velocidad del viento en la dirección de  $x$ ,  $\rho$  la densidad del aire y  $A$  es la sección del área transversal de la turbina. La potencia del viento ( $P_w$ ) por lo tanto quedará definida por la variación temporal de esta energía, definida por la derivada de (1).

$$P_w = \frac{dU}{dt} = \frac{1}{2}(\rho A)V_w^2 \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}(\rho A)V_w^3 \quad (2)$$

En la práctica la ecuación que se utiliza para modelar la potencia extraída del viento viene dada por (3).

$$P_w = \frac{1}{2}\rho\pi R_T^2 V_w^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch}) \quad (3)$$

donde  $C_p(\lambda, \theta_{pitch})$  es el coeficiente de potencia, que representa la cantidad de potencia del viento que es convertido en potencia mecánica por la turbina eólica [9]. Este coeficiente es un indicador

directo del aprovechamiento de la energía disponible. En la práctica los valores típicos de  $C_p$  rondan entre 0.35-0.45 bajo condiciones óptimas [2].

El torque producido, denominado torque del viento se expresa en como,

$$T_{\omega} = \frac{\rho \pi R_T^2 V_{\omega}^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch})}{2 \omega_h} \quad (4)$$

Como se puede observar el coeficiente de potencia de la turbina depende de dos variables, por un lado del ángulo de pitch de la turbina  $\theta_{pitch}$  [grados], y por el otro de la relación entre la velocidad tangencial de la turbina y la velocidad del viento, conocido en la bibliográfica inglesa como *tip speed ratio* y simbolizado con  $\lambda$ ,

$$\lambda = \frac{R_T \omega_T}{V_{\omega}} \quad (5)$$

En este trabajo el coeficiente de potencia adoptado de la turbina se expresa como [10]:

$$C_p(\lambda, \theta_{pitch}) = 0.73 \left( \frac{151}{\alpha} - 0.58 \theta_{pitch} - 0.002 \theta_{pitch}^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{\alpha}} \quad (6)$$

donde  $\alpha$  se obtiene como,

$$\alpha = \left( \frac{1}{\lambda - 0.02 \theta_{pitch}} - \frac{0.003}{\theta_{pitch}^3 + 1} \right)^{-1} \quad (7)$$

Para obtener el valor óptimo del coeficiente de potencia, es necesario derivar la potencia extraída del viento con respecto a la velocidad de la turbina e igualarla a cero, es decir:

$$\left. \frac{dP_{\omega}}{d\omega_T} \right|_{(\omega_T = \omega_T^*)} = 0 \quad (8)$$

A partir de (8) y considerando un ángulo de pitch nulo ( $\theta_{pitch} = 0^\circ$ ), en este caso, se obtiene (9) que representa la velocidad óptima de la turbina en función de la velocidad del viento.

$$\omega_T^* = 6.908 \frac{V_{\omega}}{R_T} \quad (9)$$

El coeficiente de potencia máximo y la relación  $\lambda$  serán entonces:

$$\lambda^* = \frac{R_T \omega_T^*}{V_{\omega}} = 6.908 \quad (10)$$

$$C_p^* = 0.441 \quad (11)$$

Donde \* indica que se trata del valor óptimo [11].

En la Figura 1 se indican estas características junto a las gráficas correspondientes a distintos niveles de viento basadas en (3).

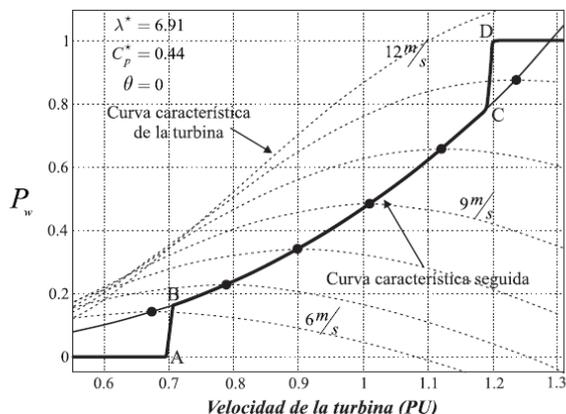


Figura 1 Potencia de la turbina a distintas velocidades de viento con ángulo de pitch  $\theta_{pitch} = 0^\circ$  (valores en pu - Generador sincrónico).

## 2.2 MODELADO RÁFAGA DE VIENTO

El estudio de los vientos en la actualidad se basa en modelos estocásticos, que tienen en cuenta los distintos valores de velocidad presente en el espacio. En este trabajo, sin embargo, los modelos que se utilizarán para representar al viento entrante serán la función escalón y la función conocida como sombrero “mexicano” [12], Figura 2, cuya expresión es:

$$m(t) = 100 \frac{1 - \left( (t - t_0) - \frac{g_d}{2} \right)^2}{g_d^2} e^{-\frac{100 \left( (t - t_0) - \frac{g_d}{2} \right)^2}{2g_d^2}} \quad (12)$$

donde  $g_d$  es la duración de la ráfaga y  $t_0$  permite realizar un corrimiento en el tiempo.

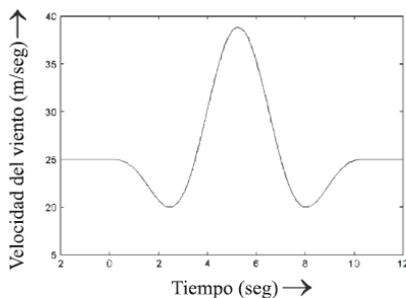


Figura 2 Forma de ráfaga de viento.

## 3. SISTEMA MULTIMASA

Los fundamentos teóricos de los métodos dinámicos actualmente utilizados en la simulación de sistemas multimasa se apoyan en la mecánica clásica, concretamente en las ecuaciones diferenciales del movimiento de sistemas de varios sólidos concentrados con vinculaciones elásticas.

En aerogeneradores de gran tamaño, cobra vital importancia analizar qué parámetros del sistema mecánico tienen una influencia notable sobre el transitorio eléctrico, con el fin de determinar el modelo mecánico multimasa más acertado.

De manera genérica se puede reducir un sistema mecánico a un sistema de  $n$  masas y aplicar las leyes de Newton para el análisis [13], tal como se observa en la Figura 3.

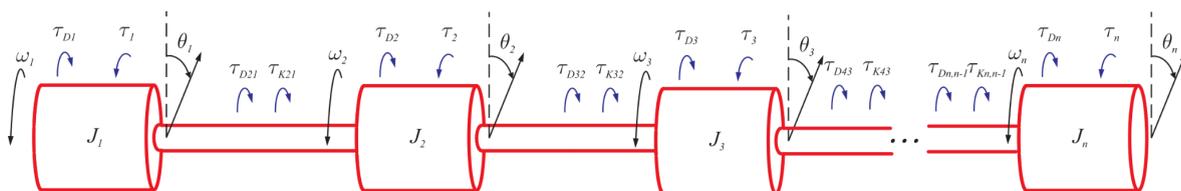


Figura 3 Representación modelo de  $n$  masas.

Dada la cadena de masas, se puede referenciar los ángulos ( $\theta$ ) al último, y así eliminar la referencia indefinida de los mismos y evitar que crezcan indefinidamente en forma de rampa. Lograr esto influye al momento de la implementación en DSP, arduino, etc.

Quedando expresado el sistema mecánico como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}^{n \times 1} \\ \dot{\omega}^{n \times 1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{n \times n} & \Omega_{Br} \mathbf{I}^{n \times n} \\ (2\mathbf{H}^{n \times n})^{-1} \mathbf{K}^{n \times n} & (2\mathbf{H}^{n \times n})^{-1} \mathbf{D}^{n \times n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta^{n \times 1} \\ \omega^{n \times 1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{0}^{n \times n} \\ (2\mathbf{H}^{n \times n})^{-1} \end{bmatrix} \tau^{n \times 1} \quad (13)$$

La problemática del modelado distribuido, propio de la geometría y dimensiones de las turbinas eólicas [14], puede ser reducida a una representación como un conjunto de masas conectadas a través de ejes flexibles. Existen diferentes representaciones, cuya diferencia reside en la cantidad de masas que se utilizan. En nuestro caso nos enfocamos en los modelos de 2 y 3 masas, que de manera genérica se lo representa en la Figura 4.

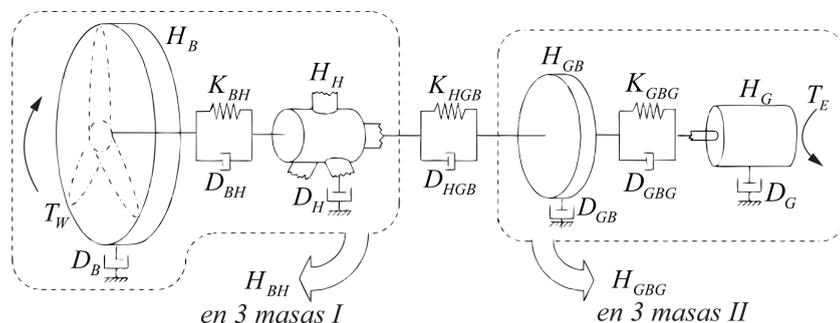


Figura 4 Esquema de modelo de 4 masas.

El modelo de 2 masas se lo reduce como se observa en la Figura 5.

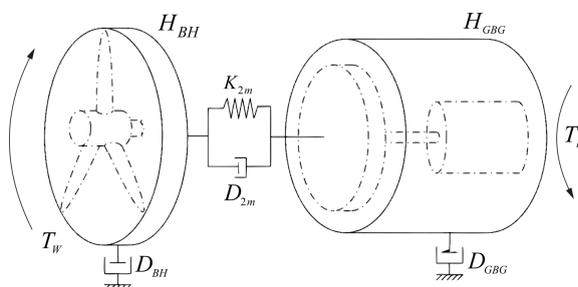


Figura 5 Esquema del modelo de 2 masas.

Los parámetros K y D son difíciles de determinar a partir de datos físicos de las partes mecánicas que componen el sistema multimasa. Sin embargo, si se tiene una respuesta real, o experimental, se puede determinar la frecuencia natural de la oscilación y el amortiguamiento de la misma.

#### 4. DESARROLLO DE LA IMPLEMENTACIÓN ADOPTADA

El sistema físico utilizado en este trabajo consta de dos motores de inducción acoplados en sus ejes. Uno de ellos es un motor de jaula de ardilla de dos polos, que realiza una emulación dinámica del sistema mecánico la cual se encarga de transformar la energía primaria en energía rotacional para el eje del generador. Para el enfoque de generación eólica, el sistema está compuesto por la energía extraída del viento por las palas de la turbina y la caja reductora. Esto se puede apreciar en la Figura 6.

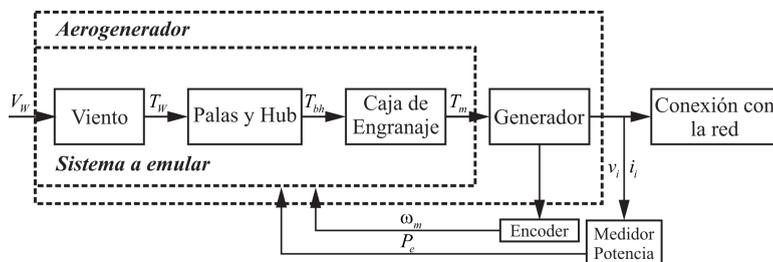


Figura 6 Diagrama de elementos del generador eólico.

Para controlar el motor se utilizó un variador de frecuencia marca Siemens Sinamics G120 PM250. La referencia de velocidad proviene de un segundo Arduino Due, que posee implementado digitalmente el modelo multimasa del generador con los parámetros que se desean emular. Este

Arduino recibe la potencia y velocidad del primer Arduino y realiza la resolución numérica de la parte indicada en el recuadro interno de la Figura 6.

La máquina utilizada como generador es un motor de rotor bobinado de dos pares de polos, va a estar conectada a la red eléctrica para lo cual se utilizó un contactor y un relé de máxima corriente, como protección del generador. Además, para el lazo de control se necesita el torque, calculando la potencia que inyecta el generador y su velocidad se halla de forma indirecta, por lo tanto, para la medición de las variables eléctricas se realizaron dos placas. Una se encarga de la medición de la tensión en cada fase y la otra la corriente. Las salidas de ambos circuitos están aisladas eléctricamente, la tensión por medio del optoacoplador HCPL-7840 y la corriente por ser un sensor de efecto hall, siendo una señal entre 0 – 3,3V con valor medio en 1,65V que se introduce en el Arduino Due el cual se encarga del cálculo de la potencia mediante la suma del valor instantáneo de potencia ( $v_i(t) \cdot i_i(t)$ ) de cada fase. Para la velocidad, dado que se tiene el encoder, se adapta su señal a una tensión de 3,3V y se introduce en el Arduino Due, el cual cuenta los pulsos y calcula la velocidad. Estos datos correspondientes a la potencia y velocidad se le transfieren al segundo Arduino due, el cual posee el modelo mecánico del generador eólico (modelo de masas) y las ecuaciones que transforman la velocidad del viento en torque mecánico. Con estos datos, genera la referencia que se le transfiere a una entrada analógica de corriente 4-20 mA del variador, mediante una fuente de corriente. El diagrama de este sistema explicado, se visualiza en la Figura 7.

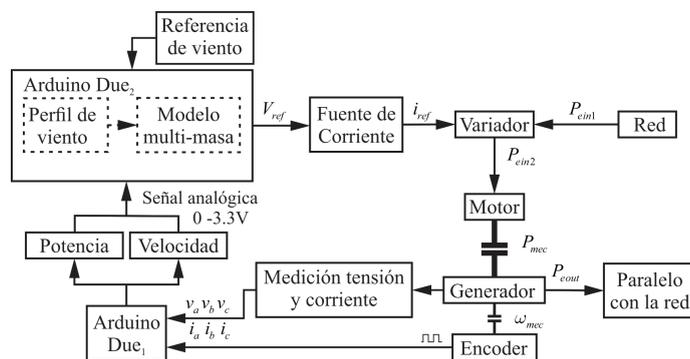


Figura 7 Diagrama del emulador eólico realizado.

En la Figura 8 se observa el sistema que se le cargó al Arduino para que realice el control del sistema, esta programación fue realizada en el entorno de Simulink-Matlab mediante la utilización de un soporte para Arduino, llamado Simulink Support Package for Arduino, el cual se encarga de traducir la programación en Simulink al lenguaje de la placa. Además, nos da la posibilidad de utilizar el mismo archivo para realizar simulaciones en el entorno de Simulink.

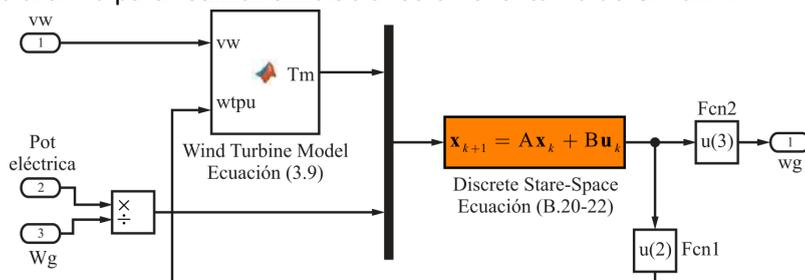


Figura 8 Sistema cargado al Arduino.

En el bloque WindTurbineModel se encuentra la ecuación (véase Ecuación 4) que calcula el torque mecánico producido por ese viento, con este dato y el de torque electrico se ingresa al bloque DiscreteState – Space el cual posee el modelo del sistema multimasa (véase Sección 3). Con los valores calculados se genera la referencia de velocidad, representada por la salida 1 (wg) en la figura.

## 5. RESULTADOS

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos de los ensayos dinámicos realizados al vincular el emulador a la red. Previo a estos se verificó el correcto funcionamiento del emulador como de los diferentes componentes, ensayando el seguimiento de una referencia de viento y torque, mediciones eléctricas, de velocidad y determinando la frecuencia de corte del emulador en 3Hz. Además se verificó la curva  $C_p - \lambda$ .

## 5.1 MEDICIONES EXPERIMENTALES

Se utilizó el sistema completo del emulador, como se vio en la Figura 7. En este ensayo se emplea una máquina de 2MW, con un radio de palas de 46m. Los valores del modelo de masas se presentan en la Tabla 1. Este sistema posee un primer modo en 0.7Hz con  $T_s = 7.85s$  y un segundo modo en 2.5Hz y un  $T_s = 4s$ .

Tabla 1 *Parámetros utilizado en los ensayos.*

Modelo	$H_{bh}$	$H_{gb}$	$H_g$	$H_{gbg}$	$K_{bhgb}$	$D_{bhgb}$	$K_{gbg}$	$D_{gbg}$	$K_{2m}$	$D_{2m}$
3 masas	0.25	0.525	0.975	-	0.0547	1.024	0.4481	1.1389	-	-
2 masas	0.25	-	-	1.5	-	-	-	-	0.054	0.571

Con los datos característicos del generador a emular cargados, se obtuvieron los valores de velocidad de la turbina para diferentes velocidades de viento. Esto se realizó para tres ángulos de pitch, de esta manera se obtuvo la gráfica real del  $C_p$  en función de  $\lambda$ , la cual se observa en la Figura 9. Luego, se procede a los estudios dinámicos realizados en dos etapas. La primera, utiliza una referencia de torque mecánico y la segunda, una de viento.

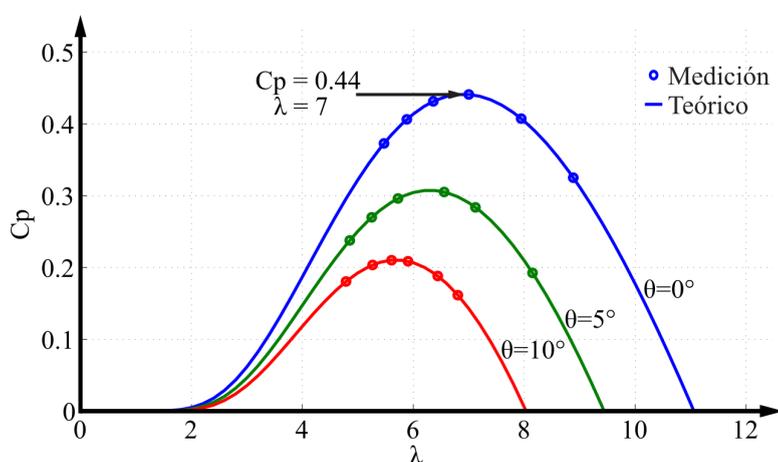


Figura 9 *Curva obtenida del coeficiente de potencia.*

### 5.2.1 PERTURBACIONES DE TORQUE MECÁNICO

Para este primer caso, el sistema cargado al Arduino2 difiere del expuesto en la Figura 8 dado que no posee el modelado de la conversión de la energía del viento, este sistema se ve en la Figura 10.

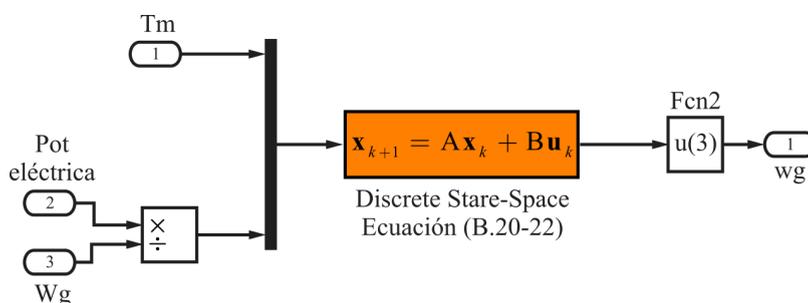


Figura 10 *Sistema cargado al Arduino.*

Se analizó el comportamiento de sistemas de dos y tres masas. Estos se presentan en la Figura 11. Donde claramente se visualiza que en el modelo de dos masas se encuentra la oscilación de 0,7 Hz. En el modelo de tres masas, no se logran apreciar las dos frecuencias dado que en nuestro caso por la limitaciones técnicas no es posible distanciar las dos frecuencias del modelo lo suficiente para apreciar estas oscilaciones.

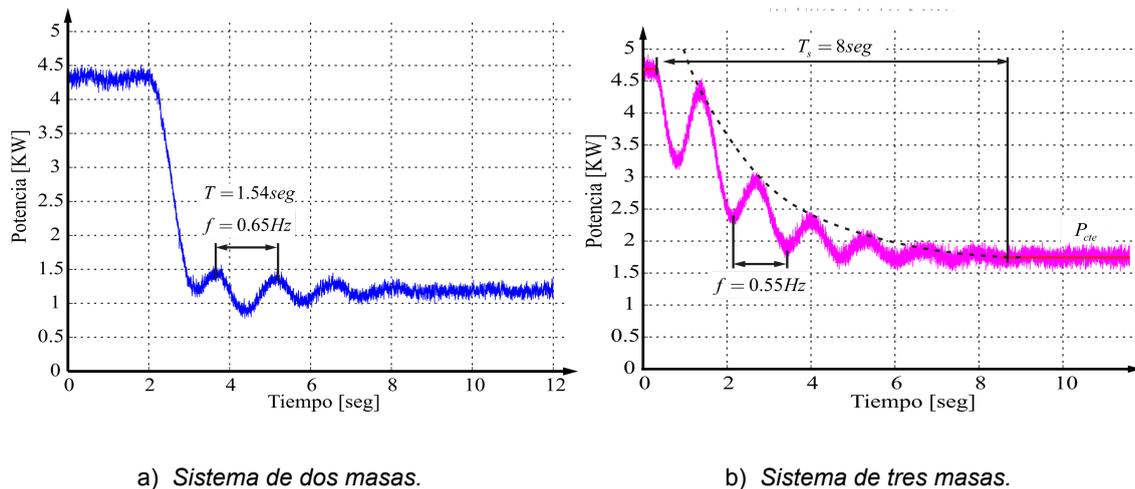


Figura 11 Datos adquiridos del sistema dinámico, con referencia de  $T_m$ .

### 5.2.2 PERTURBACIONES DE VELOCIDAD DE VIENTO

En el segundo caso, se trabajó con referencias de velocidad del viento, con esta velocidad se obtiene el torque mecánico, ecuaciones expuestas en el Capítulo 2. Las perturbaciones introducidas en este caso fueron la inserción de escalones de viento y perturbaciones del tipo sombrero mexicano.

En la Figura 12, podemos observar la dinámica del sistema ante escalones de viento, el sistema de tres masas se le redujo el parámetro  $D_{12}$  al 50 %, para poder visualizar mejor este fenómeno.

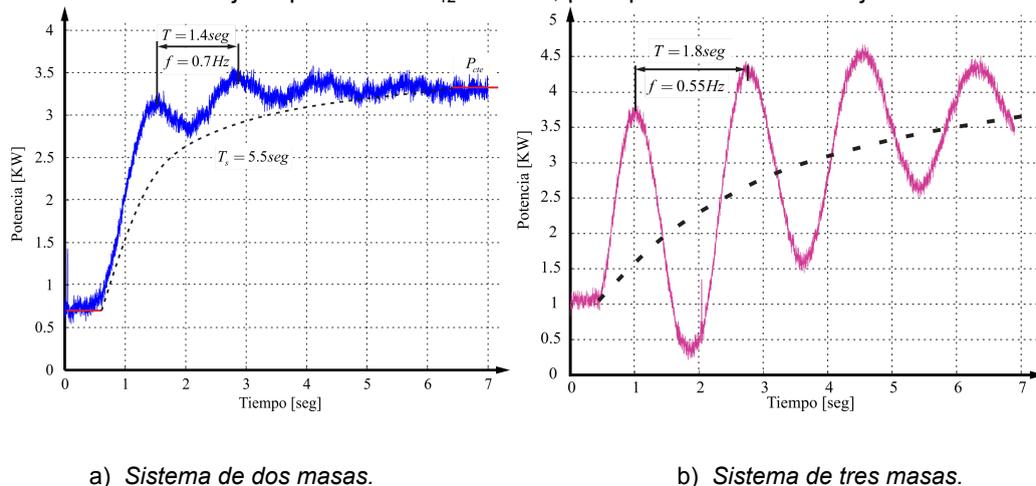
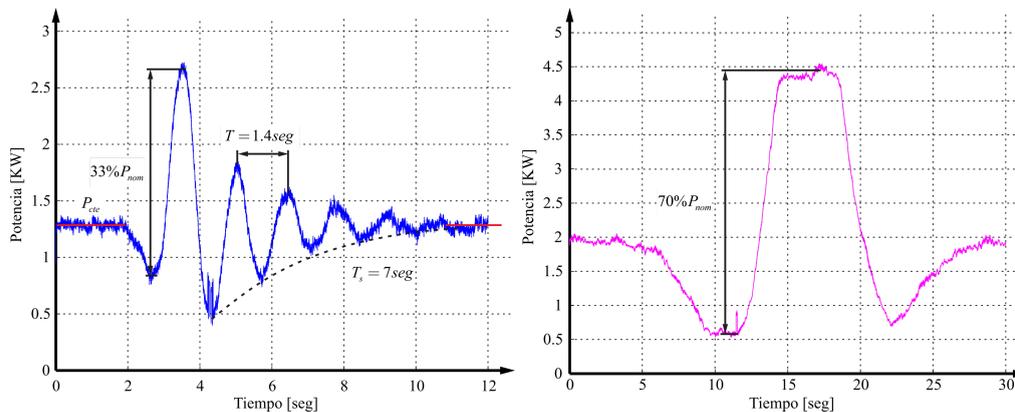


Figura 12 Datos adquiridos del sistema dinámico, con referencia de viento.

Luego se le aplicó como referencia una onda del tipo Sombrero Mexicano, a la cual se le varió el periodo, para visualizar cual es el efecto sobre el generador.

En la Figura 13 se puede observar la respuesta ante una onda de período 30 seg, el sistema la sigue la referencia dado que esta dinámica es lento, caso contrario ocurre cuando el período de la referencia es de 5 seg., notemos que en este caso el sistema sigue la referencia hasta la pendiente decreciente en la cual comienza a oscilar.

En la Figura 14 observamos los datos adquiridos, al estimular el sistema de tres masas con un sombrero mexicano de  $T = 5$ seg. donde notamos como este estimula el sistema generando una oscilación en el mismo. Nuevamente, solo se puede observar el primer modo de oscilación del sistema multimasa.



a) Respuesta al sombrero mexicano ( $T=30\text{seg}$ ).      b) Respuesta al sombrero mexicano ( $T=5\text{seg}$ ).

Figura 13 Respuesta del sistema de dos masas al sombrero mexicano.

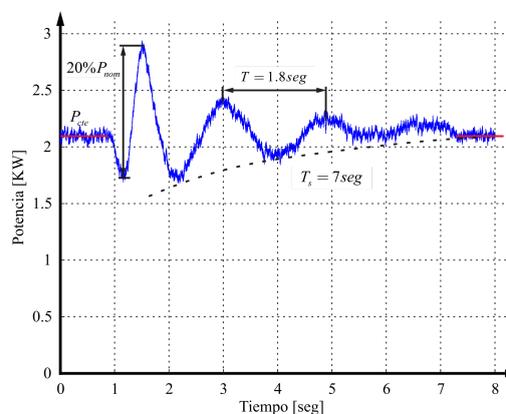


Figura 14 Respuesta del sistema de tres masas, al sombrero mexicano.

## 6. CONCLUSIONES

Se pudo comprobar que mediante el emulador construido se pueden replicar fenómenos transitorios y estacionarios de una máquina primaria, en este caso, una turbina eólica. Permitiendo de esta manera realizar experiencias y obtener resultados experimentales en estas máquinas durante las etapas formativas.

Los ensayos de estado transitorio como la respuesta del sistema ante el cambio de inercia en un modelo de una masa y distintas entradas de torque y viento en modelos de dos y tres masas; los resultados obtenidos fueron consistentes de acuerdo a los parámetros elegidos.

En el modelo de tres masas no se logró visualizar correctamente los dos modos esperados, lo cual se debe principalmente al acotado ancho de banda logrado con los componentes utilizados para la construcción del emulador, lo que obligó a elegir valores de frecuencia de resonancia muy cercanas una de otra. Sin embargo los resultados obtenidos son similares a los presentados en otros trabajos [15] [16] con equipos equivalentes.

Una de las mejoras a realizar más inmediata, es aumentar el ancho de banda del emulador, de esta manera se podrán utilizar modelos con un número mayor de masas como los desarrollados en este trabajo. Una forma de cumplir este objetivo, es utilizar como referencia un valor de torque en lugar de velocidad. De esta manera el drive responderá de manera más rápida, ya que solo utilizará su lazo interno de control.

Siguiendo la tendencia actual [17] [18] y a partir de los resultados del equipo desarrollado resulta claro el potencial de su incorporación a laboratorios para uso en etapas educativas y de formación de recursos humanos.

## 7. REFERENCIAS

- [1] Stiebler, Manfred. (2008). Wind Energy Systems for Electric Power Generation.
- [2] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems," John Wiley & Sons Ltd., Hoboken, 1998.

- [3] J. Vaheeshan, V. Vihirthanath, S. G. Abeyaratne, A. Atputharajah and G. Ramatharan, "Wind Turbine Emulator," *2011 6th International Conference on Industrial and Information Systems*, 2011, pp. 511-516.
- [4] L. M. Tolbert et al., "Reconfigurable Real-Time Power Grid Emulator for Systems With High Penetration of Renewables," in *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 7, pp. 489-500, 2020.
- [5] S. Kumsup and C. Tarasantisuk, "Real-time wind turbine emulator for testing wind energy conversion systems," *2010 IEEE International Energy Conference*, 2010, pp. 7-9.
- [6] J. R. de Oliveira and A. L. Andreoli, "Wind Turbine Emulator: A Tool for Experimental and Computational Study," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, no. 11, pp. 1832-1839, Nov. 2021.
- [7] R. Nair and G. Narayanan, "Emulation of Wind Turbine System Using Vector Controlled Induction Motor Drive," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 4124-4133, July-Aug. 2020.
- [8] H. Garg, N. Sharma and R. Dahiya, "Design and Simulation of Wind Turbine Emulator," *2018 IEEE 8th Power India International Conference (PIICON)*, 2018, pp. 1-6.
- [9] R. Nair and G. Narayanan, "Emulation of Wind Turbine System Using Vector Controlled Induction Motor Drive," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 4, pp. 4124-4133, July-Aug. 2020.
- [10] J. G. Sloopweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder and W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 1, pp. 144-151, Feb. 2003.
- [11] Y. Zou, M. E. Elbuluk and Y. Sozer, "Stability Analysis of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Method in Wind Power Systems," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1129-1136, May-June 2013.
- [12] Bierbooms, Wim. (2004). A Gust Model for Wind Turbine Design. *Jsmc International Journal Series B-fluids and Thermal Engineering - JSME INT J SER B*.
- [13] Z. Xu and Z. Pan, "Influence of different flexible drive train models on the transient responses of DFIG wind turbine," *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*, 2011, pp. 1-6.
- [14] K. Ohyama and T. Nakashima, "Wind turbine emulator using wind turbine model based on blade element momentum theory," *SPEEDAM 2010*, 2010, pp. 762-765.
- [15] J. M. Guerrero, C. Lumberras, D. D. Reigosa, P. Garcia and F. Briz, "Control and Emulation of Small Wind Turbines Using Torque Estimators," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53, no. 5, pp. 4863-4876, Sept.-Oct. 2017.
- [16] B. Rabelo, W. Hofmann and M. Gluck, "Emulation of the static and dynamic behaviour of a wind-turbine with a DC-machine drive," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, 2004, pp. 2107-2112 Vol.3.
- [17] M. Shamshiri, C. K. Gan and Chee Wei Tan, "A review of recent development in smart grid and micro-grid laboratories," *2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference Melaka, Malaysia*, 2012, pp. 367-372.
- [18] J. R. Arribas et al., "Computer-Based Simulation and Scaled Laboratory Bench System for the Teaching and Training of Engineers on the Control of Doubly Fed Induction Wind Generators," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 3, pp. 1534-1543, Aug. 2011.

# DISEÑO DE ENSAYOS DE DURABILIDAD SOBRE COLECTORES SOLARES TÉRMICOS EN EL TERRITORIO ARGENTINO SEGÚN NORMA IRAM 210007: 2017

Barnetche Orenzans, Magdalena<sup>a</sup>; Haim, Pablo Alejandro<sup>a</sup>; Nores Pondal,  
Federico<sup>a, b</sup>

<sup>a</sup> Laboratorio de Estudios Sobre Energía Solar (LESES), Depto. de Ingeniería  
Civil, UTN-FRBA.

<sup>b</sup> Instituto de Tecnologías de Hidrógeno y Energías Sostenibles (ITHES), UBA-  
CONICET.  
fnorespondal@frba.utn.edu.ar

## RESUMEN

Los colectores solares térmicos son dispositivos que utilizan la radiación solar para calentar un fluido, para aplicaciones de agua caliente sanitaria, calefacción de ambientes, de piscinas, procesos industriales, etc. La diferencia principal con los dispositivos convencionales basados en combustibles fósiles es que los colectores solares no contaminan el medio ambiente con gases de efecto invernadero.

En Argentina existen normas dedicadas para mejorar el desempeño y la durabilidad de los colectores. Una de estas normas es la IRAM 210007:2017, en la cual se describen los ensayos que deben realizarse para comprobar la durabilidad de los colectores. El presente trabajo tiene por objetivo el diseño de ensayos establecidos en dicha norma. El aporte innovador de este trabajo, a nivel país, es el desarrollo de un diseño propio con materiales y costos locales. También se diseñaron los procedimientos y una evaluación sobre la manera óptima de ordenar la serie de ensayos para realizar la cantidad máxima posible en un año. Se encontró que es conveniente poder ensayar 2 colectores en simultáneo dado que el ensayo de exposición termina siendo el cuello de botella, ya que en los meses de invierno la irradiancia solar en la zona centro de Argentina no es suficiente para realizar estos ensayos. Además, no todos los ensayos solicitados en la norma IRAM 210007 resultaron fáciles de adaptar a las condiciones de los laboratorios actuales, como el ensayo de resistencia a las heladas que requiere de una cámara de frío, lo que eleva los costos.

Como resultado del trabajo realizado los laboratorios existentes en la Argentina pueden usar esta información para construir los dispositivos necesarios para realizar los ensayos con recursos locales y también como guía para poder realizar los ensayos de durabilidad con éxito. Y de esta forma aportar a la confiabilidad de los colectores solares disponibles en Argentina para favorecer la inserción de esta tecnología sostenible en el país.

**Palabras Claves:** Energía Solar, Colectores Solares Térmicos, Ensayos de Durabilidad, Laboratorio de Ensayos, IRAM 210007.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad.

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

En Argentina el 89,33% del consumo de energía primaria proviene de recursos fósiles como el gas y el petróleo (Agencia Internacional de la Energía, 2020). Dichos combustibles son los responsables de las emisiones de gases efecto invernadero. En la Figura 1, podemos ver como se distribuye la energía primaria consumida por tipo de fuente. En cuanto a la distribución del consumo de energía primaria por sectores podemos ver en la Figura 2 que el sector residencial es el segundo más importante con un 25% del total de la energía consumida [1-3]. Los principales consumos a nivel residencial corresponden al uso de gas natural o gas licuado de petróleo para calentamiento de agua, cocinar alimentos, climatización y calefacción y electricidad para iluminación el funcionamiento de los distintos electrodomésticos.

Los colectores solares no sólo pueden brindar calor residencial en forma de agua caliente sanitaria o calefacción, sino que también pueden ser utilizados por la industria. La industria es también un gran consumidor de energía. En la Figura 2 podemos ver que ocupa el tercer lugar con un 24% del total consumido. El 71% de la energía consumida por la industria se hace en forma de gas natural para brindar calor a los procesos manufactureros (Informe nacional de monitoreo de la eficiencia energética de La República Argentina, 2014). Muchos procesos industriales requieren de calor a temperaturas menores a los 100°C donde los colectores solares sin concentración, a los cuales la norma IRAM 210007 hace referencia, pueden ser utilizados.

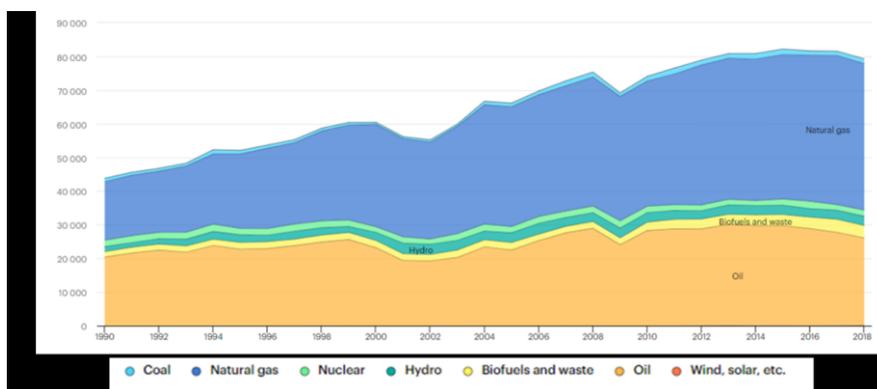


Figura 1 Distribución de la demanda de energía primaria por fuente hasta año 2017.  
Fuente: Data and Statistics, International Energy Agency web: <https://www.iea.org/statistics>

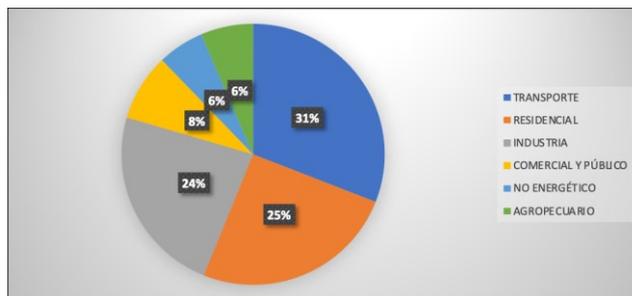


Figura 2 Distribución de energía primaria por sectores.  
Fuente: Balance Energético Nacional. Secretaría de Energía (2018).

Los colectores solares son dispositivos diseñados para absorber la radiación solar, transformarla en energía térmica y transferirla a un fluido que circula por su interior.

La ventaja de los colectores solares empleados para agua caliente sanitaria radica en el ahorro de gas o energía eléctrica para calentar el agua en el hogar y, por lo tanto, en la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero.

La norma IRAM 210007 establece los procedimientos necesarios para determinar la durabilidad, confiabilidad y seguridad de los colectores solares térmicos. En nuestro conocimiento no existe en el país al momento de realizar este trabajo ningún laboratorio capaz de realizar la totalidad de los ensayos dispuestos por esta norma. Por otro lado, hay laboratorios nacionales que adquirieron bancos de prueba "llave en mano", importándolos desde el extranjero a un costo elevado que muy pocos laboratorios pueden solventar.

El objetivo de este trabajo fue realizar un diseño técnico y económico de un laboratorio de ensayos según la norma IRAM 210007 para colectores solares que servirá para alargar la vida útil de estos y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero generadas en el consumo de ACS [4-6].

El aporte innovador del presente trabajo, a nivel país, es el desarrollo de un diseño propio con materiales y costos locales, para que cualquier laboratorio de energía solar existente pueda aplicarlo para construir sus propios dispositivos para realizar los ensayos de durabilidad.

El diseño de los ensayos cuenta con un análisis detallado de cada uno de los diez ensayos incluidos en la norma IRAM 210007. Este análisis se enfocó en determinar todo lo necesario para poder llevar a cabo con éxito dichos ensayos. Por un lado, se diseñaron las instalaciones físicas para poder realizar cada uno de estos ensayos proveyendo de diagramas de procesos, hojas de datos y listas de materiales. También, se desarrolló la metodología para poder llevar a cabo estos ensayos con las instalaciones previamente diseñadas; mediante procedimientos detallados que describirán paso a paso las acciones que uno o más trabajadores deben realizar [7].

Por otro lado, se diseñó un sistema de adquisición de datos para poder registrar todas las variables requeridas para monitorizar el desempeño de cada uno de los ensayos y poder elaborar los informes finales.

Se explica de manera detallada el procedimiento de inspección final de los colectores solares y se complementa con planillas diseñadas para el registro del desarrollo de los ensayos y sus respectivos resultados.

El trabajo se realizó para los colectores de placa plana o de tubos de vacío para calentamiento de fluidos líquidos. Por lo que quedaron excluidos en esta primera etapa los colectores que se utilizan para el calentamiento de aire y los sistemas compactos. Un sistema compacto es un colector solar unido a su tanque almacenamiento. Se decidió diseñar los ensayos solo para los colectores para calentamiento de líquidos ya que los colectores de aire tienen una participación menor en el mercado.

Por otro lado, en cuanto a las exigencias nacionales sobre la calidad de los colectores solares la obligatoriedad del cumplimiento de algunas normas es muy reciente. En agosto del 2018 la Secretaría de Comercio del Ministerio de Producción publicó en el Boletín Oficial la resolución 520 (modificado por resolución 573 del 2020) donde se exigen como obligatorios los ensayos para colectores solares de la norma IRAM 210022-1 y los ensayos para los sistemas compactos dentro de la norma IRAM 210015-1. Las normas 210022-1 y 210015-1 contienen los requisitos mínimos que deben cumplir los colectores solares la primera y los sistemas compactos la segunda (sistemas en donde el colector viene acoplado al tanque de almacenamiento). Mientras que la norma 210007 describe los ensayos que se debe realizar para poder cumplir con los requisitos de seguridad. Como se analiza en las siguientes secciones ésta es de suma importancia para garantizar un buen funcionamiento de los colectores solares y en los países que ya tienen una fuerte conciencia sobre medidas contra el cambio climático y la utilización de colectores solares térmicos ya está instaurada, existen mecanismos de validación de esta norma o su equivalente.

Es necesario contar con un número de laboratorios que sean capaces de realizar la totalidad de los ensayos de durabilidad según la normativa argentina para permitir un grado de confiabilidad sobre los productos disponibles del mercado y de esta manera aportar al desarrollo de esta tecnología sostenible a nivel país.

El presente trabajo se enmarca en la tesis de maestría de Magdalena Barnetche Orensanz [7].

## **1. DESARROLLO**

### **1.1. Objetivo general.**

Diseñar una instalación para realizar todos los ensayos de durabilidad para colectores solares planos y de tubos de vacío para el calentamiento de fluidos líquidos según la norma IRAM 210007 en el territorio argentino.

### **1.2. Objetivos específicos.**

- Diseñar y dimensionar cada dispositivo que permita realizar cada ensayo descrito la norma IRAM 210007 para colectores planos y de tubos de vacío.
- Evaluar aprovisionamiento de equipamiento y materiales necesarios desde el mercado local.
- Diseñar el proceso y camino crítico para poder llevar a cabo de manera eficiente todos los ensayos optimizando tiempos y recursos.

### **1.3. Ensayos.**

En la Tabla 1 se enumeraron cada uno de los ensayos de la norma IRAM 210007 y se describe brevemente su objetivo:

Tabla 1 Resumen de los ensayos de durabilidad descritos en la Norma IRAM 210007: 2017.

Ítem	Ensayos de durabilidad	Objetivo
1	Presión Interna de colectores Inorgánicos (PI)	Determinar las presiones que puede alcanzar durante operación normal.
	Presión Interna de colectores Orgánicos	Fuera del alcance de este trabajo.
2	Resistencia a alta temperatura (AT)	Determinar si el colector puede soportar elevados niveles de irradiancia solar sin fallas.
3	Temperatura de estancamiento (TE)	Determinación de la temperatura máxima que puede alcanzar el colector sin extracción de calor útil con radiación solar y temperatura ambiente elevadas.
4	Exposición (EX)	Secuencia de ensayos de confiabilidad de bajo costo, simulando condiciones de funcionamiento que pueden ocurrir en servicio. También acondiciona el colector para que los subsiguientes ensayos den con mayor probabilidad resultados repetibles.
5	Choque térmico externo (CE)	Determinar la capacidad del colector de resistir choques térmicos debido a repentinias lluvias en días calurosos o soleados sin fallas.
6	Choque térmico interno (CI)	Determinar la capacidad del colector de resistir choques térmicos debido al ingreso de un fluido frío en días calurosos o soleados sin fallas.
7	Penetración de lluvia (PLL)	Determinar hasta qué punto son resistentes a la penetración de la lluvia. Los colectores no deben permitir la entrada de la lluvia por ningún sitio incluyendo los agujeros para drenaje o ventilación.
8	Resistencia a las heladas (HE)	Determinar la resistencia a las bajas temperaturas. No se aplica en colectores para los que en cuyo manual especifique que sólo pueden ser utilizados con fluido anticongelante o aire. Tampoco cuando se utilicen medios especiales para evitar el congelamiento del agua, por ejemplo, mediante algoritmos antiheladas, salvo que se utilicen líquidos adicionales con riesgo de congelamiento como en algunos <i>heat pipes</i> .
9	Carga mecánica (CM)	Determinar hasta qué punto la cubierta del colector, las sujeciones y la carcasa son capaces de soportar una carga de presión positiva causada por el efecto del viento o de la nieve.
10	Resistencia al impacto (RI)	Determinar hasta qué punto el colector puede soportar los efectos de los impactos causados por el granizo.
11	Rendimiento térmico	Ensayos detallados en la IRAM 210002-1. Fuera del alcance de este trabajo.
12	Medición de la caída de presión	
13	Rotura o Colapso	Ensayos destinados únicamente a colectores para el calentamiento de aire. Fuera del alcance de este trabajo.
14	Estanqueidad	
15	Inspección final (IF)	Evaluar el estado del colector y de su estructura después de que se haya finalizado los ensayos.

#### 1.4. Selección de bases de diseño.

Se determinó un conjunto de valores marco para facilitar el diseño de una instalación estándar que pueda ser capaz de testear a la gran mayoría de los colectores disponibles en el mercado argentino sin necesidad de realizar grandes modificaciones en sus instalaciones.

Para obtener estos valores se recurrió al Censo de Energía Solar Térmica en 2016 realizado por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) a través del Programa de Energías Renovables y el Área Solar Térmica [8]. De esta base de datos se tomaron los fabricantes de colectores solares e importadores argentinos y se identificaron las características más importantes de sus productos. Durante el análisis de datos se observó que los datos de presión y temperatura máxima de los colectores solares son muy variables y no hay un estándar determinado. Por ejemplo, los valores de presión máxima van desde los 1 bar hasta los 12 bares, además de que muchos equipos no poseen esta información en su hoja de datos.

En la Tabla 2 se resumen las bases de diseño para los ensayos de durabilidad, por un lado, se eligieron los valores más comunes de operación y por el otro los máximos.

Tabla 2 Valores de condiciones estándares para colectores.

Presión operación (bar)	3
Temperatura operación (°C)	70
Presión máx. (bar)	12
Temperatura máx. (°C)	260
Caudal (kg/s.m <sup>2</sup> )	0,02
Área (m <sup>2</sup> )	2

**1.5. Diseño de instalaciones y procedimientos de ensayos.**

En esta sección se analizó cada ensayo por separado y los requerimientos mínimos para realizarlos, es decir, los elementos materiales necesarios para construir los dispositivos y las tareas que los operadores de los laboratorios deberán seguir para poder realizarlos. Para alguno de los ensayos existe más de una metodología para llevarlos a cabo, éstas son las que se encuentran explicadas en la norma IRAM 210007. En esos casos se decidirá cuál de las opciones es la más conveniente por motivos determinados como: presupuesto, agilidad, reproducibilidad y repetitividad.

**1.5.1. Elaboración de diagramas de ensayo.**

Para cada ensayo se realizó un diagrama de flujo para poder identificar qué elementos son necesarios para poder llevar a cabo el ensayo. El dimensionamiento de los elementos que se identificaron en los diagramas de flujo se puede encontrar en el trabajo de tesis de maestría de Magdalena Barnetche [7] en el cual se basa el presente trabajo. En la Figura 3 se muestra la simbología empleada en los diagramas para los instrumentos. Las letras utilizadas para nombrar los equipos y las válvulas se resumen en la Tabla 3.

SIMBOLOGIA	LETRAS EN INSTRUMENTOS																																
 INSTRUMENTO MONTADO EN CAMPO  SÍMBOLO DE CONTINUACIÓN XXX = NÚMERO DE DIBUJO  CONEXIÓN A PROCESO O SUMINISTRO A INSTRUMENTO  VALVULA ESCLUSA  VALVULA GLOBO	 <table border="0"> <tr> <td>LETRA</td> <td>VARIABLE</td> </tr> <tr> <td>X = TAG DEL INSTRUMENTO</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Y = NÚMERO DE TAG</td> <td></td> </tr> <tr> <td>N</td> <td>FUERZA</td> </tr> <tr> <td>F</td> <td>FLUJO</td> </tr> <tr> <td>H</td> <td>MANUAL</td> </tr> <tr> <td>L</td> <td>NIVEL</td> </tr> <tr> <td>P</td> <td>PRESIÓN</td> </tr> <tr> <td>R</td> <td>RADIACIÓN SOLAR GLOBAL</td> </tr> <tr> <td>T</td> <td>TEMPERATURA</td> </tr> <tr> <td>v</td> <td>VELOCIDAD DEL VIENTO</td> </tr> <tr> <td>Y</td> <td>FUNCIÓN EN COMPUTADORA</td> </tr> <tr> <td>*E</td> <td>ELEMENTO (PRIMARIO)</td> </tr> <tr> <td>*I</td> <td>INDICADOR</td> </tr> <tr> <td>*IT</td> <td>TRANSMISOR INDICATIVO</td> </tr> <tr> <td>*T</td> <td>TRANSMISOR</td> </tr> </table>	LETRA	VARIABLE	X = TAG DEL INSTRUMENTO		Y = NÚMERO DE TAG		N	FUERZA	F	FLUJO	H	MANUAL	L	NIVEL	P	PRESIÓN	R	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL	T	TEMPERATURA	v	VELOCIDAD DEL VIENTO	Y	FUNCIÓN EN COMPUTADORA	*E	ELEMENTO (PRIMARIO)	*I	INDICADOR	*IT	TRANSMISOR INDICATIVO	*T	TRANSMISOR
LETRA	VARIABLE																																
X = TAG DEL INSTRUMENTO																																	
Y = NÚMERO DE TAG																																	
N	FUERZA																																
F	FLUJO																																
H	MANUAL																																
L	NIVEL																																
P	PRESIÓN																																
R	RADIACIÓN SOLAR GLOBAL																																
T	TEMPERATURA																																
v	VELOCIDAD DEL VIENTO																																
Y	FUNCIÓN EN COMPUTADORA																																
*E	ELEMENTO (PRIMARIO)																																
*I	INDICADOR																																
*IT	TRANSMISOR INDICATIVO																																
*T	TRANSMISOR																																

Figura 3 Simbología empleada en los diagramas para instrumentos. Fuente: elaboración propia.

Tabla 3 Simbología para válvulas y equipos. Fuente: elaboración propia.

VV	Válvula de Venteo
VB	Válvula de Bloqueo
VP	Válvula de Purga
VR	Válvula anti-Retorno
VC	Válvula de Control
PCV	Válvula de Control de Presión
F	Filtro
P	Bomba
C	Colector Solar
M	Aparejo
B	Bandeja Recolectora
E	Calentador Eléctrico

### 1.5.2. Ejemplo del diagrama del ensayo de presión interna para colectores inorgánicos.

A continuación se muestra, como ejemplo, uno de los diagramas de ensayo realizados, el correspondiente al ensayo de presión interna. Los diagramas del resto de los ensayos se pueden encontrar en la tesis de maestría de la Ing. Magdalena Barnetche [7], en la cual se basó este trabajo.

Los elementos necesarios para realizar el ensayo son una bomba manual (P-102), una válvula de purga de aire (VV-003) y una válvula de drenaje (VP-004). Para registrar las mediciones se utilizarán sensor de presión (PIT-01) con una incertidumbre típica menor al 5% y un sensor de temperatura (TIT-02). Se utilizarán conexiones rígidas para los instrumentos y las válvulas, y tuberías flexibles.

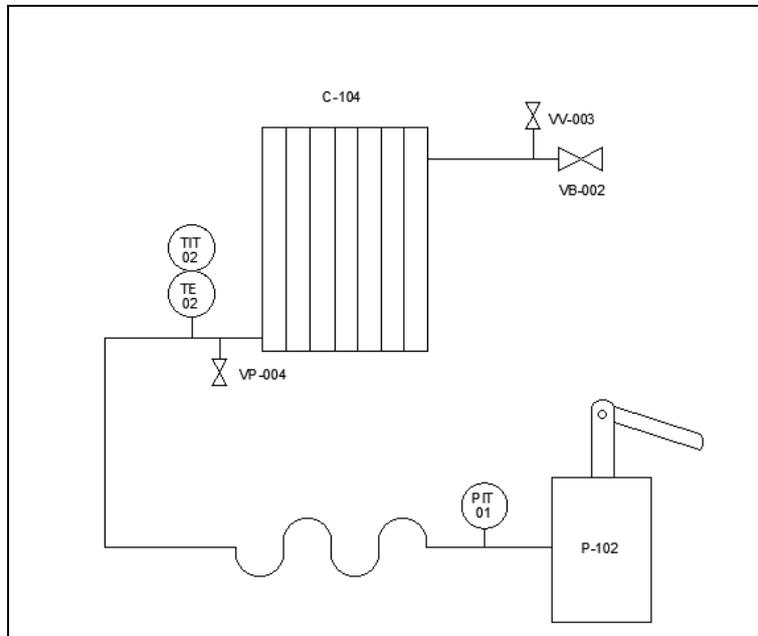


Figura 4 *Ensayo de presión interna colectores inorgánicos.*  
Fuente: *Elaboración propia.*

### 1.6. Optimización de la secuencia de ensayos

En esta sección se hizo un análisis de todos los ensayos en su conjunto para poder optimizar el requerimiento de materiales a usar por el conjunto de ensayos. Además, se estudió el mejor orden para la realización de todos los ensayos.

Los ensayos de exposición, alta temperatura y de temperatura de estancamiento pueden realizarse en simultáneo y sobre el mismo colector. También pueden combinarse con los ensayos de choque térmico interno y externo. Todos estos ensayos deben realizarse en el exterior dado que requieren de irradiación solar.

Para los ensayos de penetración de lluvia, resistencia a las heladas y carga mecánica es necesario haber realizado el ensayo de exposición previamente, o una pre-exposición.

Para el ensayo de resistencia al impacto se requiere realizar el ensayo de exposición previamente si la cubierta del colector es polimérica. Estos ensayos además del ensayo de presión interna deben realizarse en el interior sin radiación solar.

El tiempo requerido para realizar la totalidad de los ensayos depende la cantidad de equipos del colector que se desea ensayar. En el caso de que solo tengamos un colector disponible, los ensayos pueden ordenarse de la manera propuesta en la Figura 5:



Figura 5 *Flujograma de ensayos cuando todos serán realizados sobre el mismo equipo.*  
Nota: AT: ensayo de resistencia a la alta temperatura, TE: ensayo de temperatura de estancamiento, CI: ensayo de choque térmico interno, CE: ensayo de choque térmico externo, PLL: ensayo de resistencia a la penetración de lluvia, HE: ensayo de resistencia a las heladas, CM+: ensayo de carga mecánica positiva, CM-: ensayo de carga mecánica negativa, PI: ensayo de presión interna, RI: ensayo de resistencia al impacto, IF: inspección final. Fuente: *Elaboración propia.*

El ensayo de exposición es el más extenso y en el mejor de los casos durará 30 días (probablemente en invierno se necesite de una cantidad mayor de días para alcanzar los niveles requeridos de exposición, la cantidad de días reales según el mes del año se analizó en la sección 2.6.1). En simultáneo mientras se realiza el ensayo de exposición pueden realizarse los ensayos de AT, TE, CE y CI. Para poder realizar los ensayos de AT y TE deberá tenerse un día claro con condiciones de irradiación global mayores a 1000 W/m<sup>2</sup> por lo que probablemente se tenga que realizar el ensayo cerca del mediodía solar. Para los ensayos de CE y CI también se requiere de un día soleado con altos valores irradiación global, para el caso del LESES ubicado en Buenos Aires tenemos un tipo de clima templado entonces tomamos de la Tabla 8 el valor de 800 W/m<sup>2</sup>, estos ensayos también deben realizarse en el mediodía solar para asegurar las condiciones de irradiación. Los ensayos de carga mecánica negativa y positiva pueden realizarse el mismo día y también los de presión interna y resistencia al impacto dado que son ensayos más cortos.

En el caso que el fabricante solicite únicamente realizar los ensayos exigidos por la resolución 520 la línea de tiempo sería la que se muestra en la Figura 6.

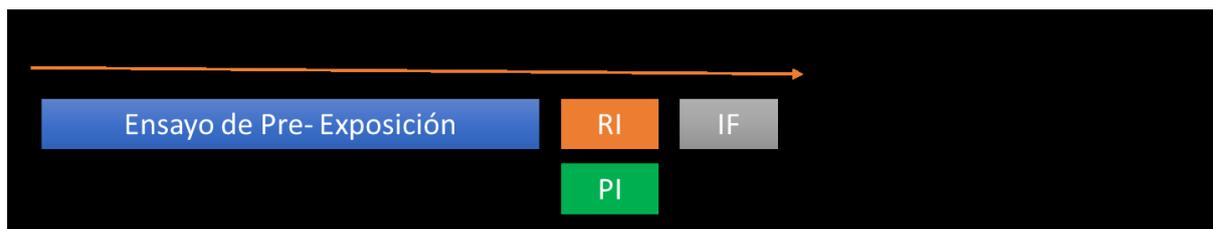


Figura 6 Flujograma de ensayos para los exigidos sobre la resolución 520. Nota: PI: ensayo de presión interna, RI: ensayo de resistencia al impacto, IF: inspección final. Fuente: elaboración propia.

En este caso, para realizar el ensayo de resistencia interna se debe realizar previamente el ensayo de preexposición. El mismo es idéntico al ensayo de exposición, pero el colector solamente debe ser expuesto durante 15 días.

La secuencia óptima de ensayos en el tiempo se obtiene utilizando dos colectores idénticos en simultáneo. En uno de los colectores se realizarán todos los ensayos definidos en la etapa 1, y en el segundo colector todos los ensayos definidos en la etapa 2.



Figura 7 Flujograma de ensayos para 2 equipos.

Nota: AT: ensayo de resistencia a la alta temperatura, TE: ensayo de temperatura de estancamiento, CI: ensayo de choque térmico interno, CE: ensayo de choque térmico externo, PLL: ensayo de resistencia a la penetración de lluvia, HE: ensayo de resistencia a las heladas, CM+: ensayo de carga mecánica positiva, CM-: ensayo de carga mecánica negativa, PI: ensayo de presión interna, RI: ensayo de resistencia al impacto, IF: inspección final. Fuente: Elaboración propia.

Esta cronología corresponde al mejor escenario dado que la verdadera duración del ensayo de exposición dependerá de las condiciones climáticas.

El personal mínimo necesario para la realización de los ensayos es de 2 personas, dado que algunos de los ensayos puedan requerir de carga de elementos pesados y montaje de sistemas.

El ensayo de penetración de lluvia y el de choque externo pueden utilizar la misma estructura de rociadores. Si se decide compartir la estructura, entonces la misma deberá montarse al exterior dado que el ensayo de choque externo se realiza con irradiación. Cuando se requiera realizar el ensayo de penetración de lluvia deberá cubrirse el colector del sol.

### 1.6.1. Análisis de cuello de botella.

Como se vio en esta sección el ensayo limitante es el ensayo de exposición que su duración mínima con condiciones climáticas de irradiación aceptable es de 30 días. Para obtener una estimación más realista de cuántos ensayos de exposición se pueden realizar en un año en el LESES, se utilizó un año meteorológico típico para la Provincia de Buenos Aires [9] y se

verificaron los días necesarios para cumplir con las dos condiciones meteorológicas necesarias: que el colector esté expuesto a un mínimo de 30 hs con una irradiancia superior a los 800 W/m<sup>2</sup> y que esté expuesto a un mínimo de 30 días con una irradiación mayor a 420 MJ/m<sup>2</sup>. Como el año meteorológico típico no disponía de los datos de irradiación global solar inclinada, ésta se estimó utilizando el método descrito en el Anexo 7.7 de la Tesis de Barnetche Orensanz [7] para una superficie inclinada a 35° y orientada al norte.

Luego de este análisis, llegamos a la conclusión que solo es posible realizar 7 ensayos al año. Esto se debe a que en los meses de abril a agosto los niveles de irradiancia son menores a 800 W/m<sup>2</sup> la mayor parte de los días, por lo que se necesitarían 166 días corridos para completar un solo ensayo en este periodo del año.

En la Figura 8 se plasmaron de manera gráfica los resultados obtenidos del análisis de irradiación del año meteorológico típico. Donde en columnas azules se muestra la acumulada de días de exposición y en columnas naranjas la acumulada de horas con irradiancia superior a 800 W/m<sup>2</sup>. El límite de mínimo de 30 días y 30 hs se muestra con una línea roja. Para poder empezar un nuevo ensayo de exposición se deben superar estos dos mínimos.

Como la plataforma dispone de lugar para colocar 2 colectores en simultáneo el total de ensayos anuales será de 14.

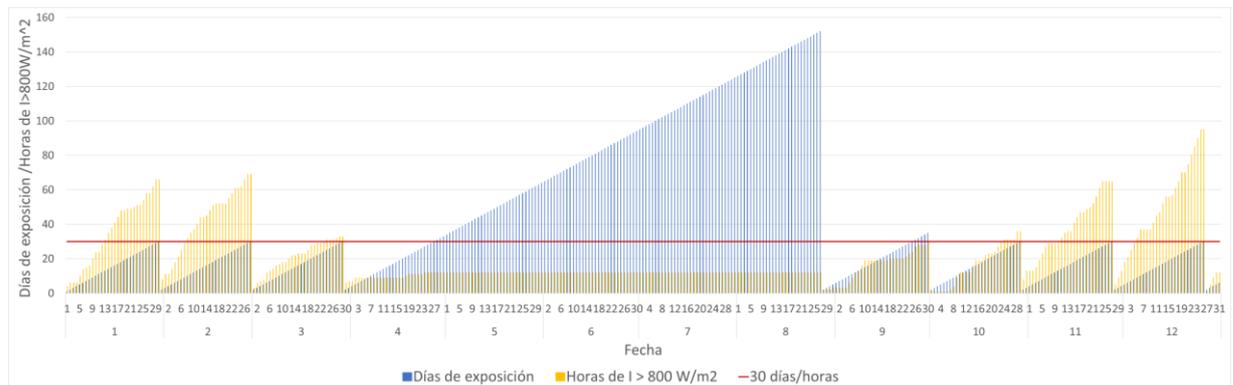


Figura 8 *Secuencia de ensayos de exposición para un año meteorológico tipo de Buenos Aires. Fuente: Elaboración propia.*

### 1.7. Layout del laboratorio.

En la actualidad el laboratorio LESES cuenta con un banco de pruebas ubicado en una plataforma exterior, equipado con lo necesario para realizar el ensayo de rendimiento de la norma IRAM 210002-1. En la Figura 9 podemos ver el diagrama de procesos del banco de ensayos ubicado en la plataforma exterior.

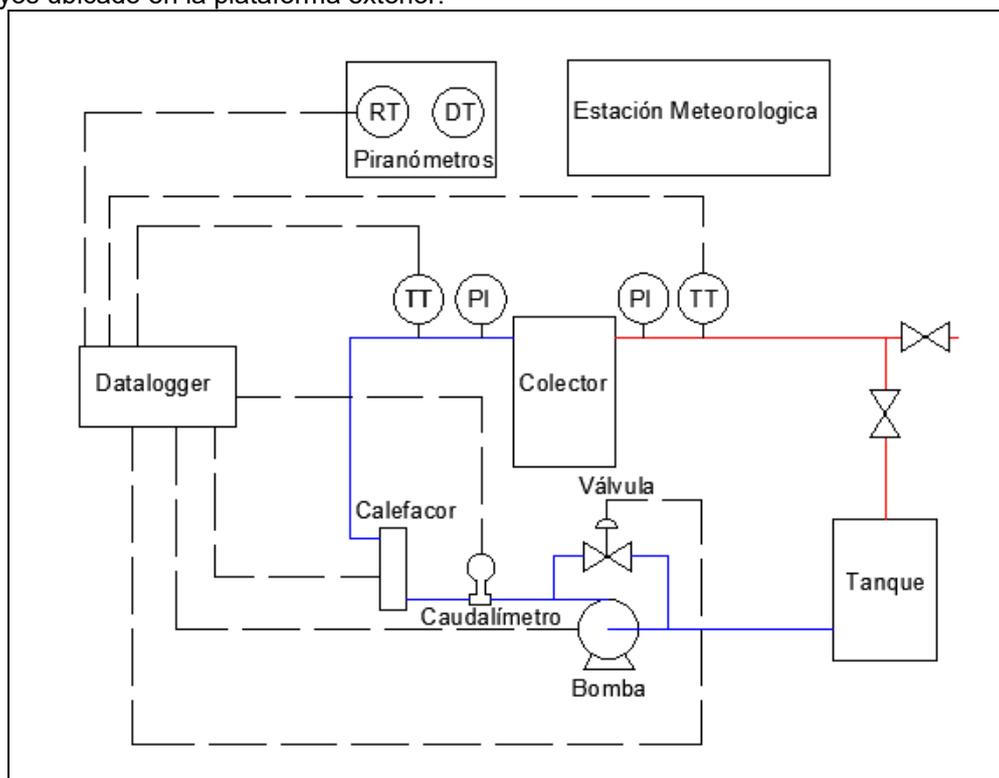


Figura 9 *Banco de ensayos de la plataforma exterior en el LESES. Fuente: Elaboración propia.*

El banco cuenta con una estación meteorológica que mide las siguientes variables: temperatura, presión, humedad, precipitación, velocidad y dirección del viento en el plano del colector. También, se dispone sobre el plano del colector de medición de radiación solar global y difusa.

En la Figura 10 se muestra una imagen del banco de pruebas actual, donde se puede ver la estructura con espacio para montar los 2 colectores, un piranómetro para medir irradiancia global, otro con un disco de sombreado para medir irradiancia difusa, y la estación meteorológica. Por detrás de los colectores se puede ver el tanque de almacenamiento de agua.



Figura 10 Imagen del banco de ensayos del LESES. Fuente: LESES.

Este banco tiene que adaptarse para poder realizar los ensayos que requieren de irradiación solar, es decir: resistencia a alta temperatura, temperatura de estancamiento, exposición, choque térmico interno y externo. Y también al de resistencia a la penetración de lluvia para poder compartir el sistema de rociado con el ensayo de choque térmico externo. El laboratorio cuenta también con los dispositivos para realizar los ensayos de presión interna y resistencia al impacto. En la Tabla 4 se resume que es necesario adaptar de la plataforma actual para poder realizar todos los ensayos.

Tabla 4 Adaptaciones al banco actual del LESES. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo	Adaptaciones al banco actual del LESES
Resistencia alta temperatura y temperatura de estancamiento	Sensor de temperatura tipo PT100 para medir la superficie del absorbedor.
Exposición	
Choque térmico interno	No requiere adaptaciones, se puede usar el sistema actual.
Choque térmico externo	Sistema de rociado de agua completo, balanza digital tipo pilón [7].
Resistencia a la penetración de lluvia	
Presión interna	Sensor de presión (en la actualidad cuenta con un manómetro).
Resistencia a las heladas	Cámara de Frío.
Carga Mecánica	Se requiere todo lo necesario para realizar estos ensayos [7].
Resistencia al impacto	El laboratorio ya cuenta con los dispositivos para realizar este ensayo.

En cuanto al sistema de adquisición de datos colecta como se ve en la Figura 9, señales de dos resistencias de platino (Pt100) que dispone el sistema para medir la temperatura del fluido, dos piranómetros que miden irradiancia difusa y global y el caudalímetro. También envía señales a la bomba, la válvula solenoide y la resistencia calefactora. A este *data logger* habrá que sumarle las señales de los ensayos que se realizan en el exterior, estas son: un caudalímetro que podrá ser conectados en una entrada digital, un sensor de presión y una Pt100 para la línea de

rociado, una Pt100 para la superficie del absorbedor. Por lo tanto, con 3 entradas analógicas y una digital será suficiente. En resumen, se puede utilizar el *datalogger* existente.

Para los ensayos interiores la única variable que debe ser registrada es la presión para el ensayo de presión interna y resistencia a las heladas, por lo tanto, la mejor opción será emplear un sensor de presión con salida USB para descargar los datos cada vez que se ha terminado el ensayo.

### 3. CONCLUSIONES

Como conclusión general de este trabajo se puede decir que es totalmente posible realizar un diseño de laboratorio con la mayor parte de los elementos provenientes del mercado local capaz de cumplir con los ensayos de la norma IRAM 210007. Se debe resaltar que no existe ningún laboratorio en la fecha que se realizó este trabajo (2019- octubre 2020) que realice la totalidad de los ensayos de durabilidad. Los laboratorios existentes podrán tomar este trabajo como guía para poder realizar todos los ensayos de la IRAM 210007. Sin embargo, no todos los ensayos solicitados en la norma IRAM 210007 son tan fáciles de adaptar a las condiciones de los laboratorios actuales. Por ejemplo, el ensayo de resistencia a las heladas requiere de una cámara de frío, este equipo es muy costoso y tal vez algunos laboratorios no puedan afrontar su inversión inicial.

Poder realizar 14 ensayos al año en Buenos Aires significa tener espacio suficiente en la plataforma para ensayar 2 colectores en simultáneo dado que el ensayo de exposición termina siendo el cuello de botella, ya que en los meses de invierno la irradiancia solar no es suficiente para realizar estos ensayos. Sin embargo, este ensayo no tiene costos adicionales muy altos siempre que se coloquen los colectores sobre el mismo plano de exposición para poder compartir la medición del piranómetro. Otro punto para tener en cuenta es que la irradiancia solar en Buenos Aires no es muy favorable comparada con otras zonas del país como el Noroeste. Es probable que en estas regiones las condiciones de irradiancia permitan realizar una cantidad mayor de ensayos al año para la misma cantidad de plataformas solares que en Buenos Aires.

En resumen, podemos decir que la mayoría de los ensayos se pueden realizar por los laboratorios, excepto algunos, que solo estarán disponibles en centros más importantes como el de resistencia a las heladas. De todas formas, este ensayo no será requerido por todos los colectores, sino que solamente por los que el fabricante garantice que son resistentes a las heladas.

Además, se debe resaltar que para contribuir de manera sostenible al desarrollo urbano es fundamental que existan políticas gubernamentales que exijan como obligatorio el cumplimiento de los ensayos de durabilidad. Dado que es totalmente factible realizarlos y dichos ensayos brindarían de un aseguramiento de calidad de los equipos extendiendo su vida útil. Mayor vida útil para un equipo significa una reducción de los residuos que se producen al fin de su ciclo de vida y una menor cantidad de recursos consumidos para fabricar más equipos. Por lo tanto, con la creación de laboratorios que puedan testear la durabilidad de los colectores solares se estará potenciando una tecnología sostenible no solo desde el punto de vista de la reducción de los gases de efecto invernadero, sino que también en cuanto a reducción de consumo de recursos para la fabricación de colectores solares y la contaminación que se produce por su disposición inicial.

Quedará evaluar para futuros trabajos como adaptar este laboratorio para poder testear sistemas compactos, es decir, sistemas en los cuales el tanque de almacenamiento se encuentra fijado al colector solar.

### 4. REFERENCIAS

- [1] Secretaría de Energía. (2018). Balance Energético Nacional de la República Argentina.
- [2] Secretaría de Energía. (2019). Evolución de Subsidios Oferta y Demanda de la Energía 2015-2019.
- [3] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable. (2017). Segundo Informe Bial de Actualización de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- [4] Ortega Abril, Fernando Xavier; Urquiza Acosta, Guillermo Isidro (2016). Diseño de dos bancos de prueba para colectores solares de placa plana. Revista Tecnológica ESPOL.
- [5] Cooperación Alemana al Desarrollo. (2016). Lecciones aprendidas de la infraestructura de calidad en calentadores solares de agua a nivel internacional. Mexico: giz.
- [6] Navntoft, Luis Christian (2018). Calentadores Solares de Agua: Estudio de casos de normas de calidad, procedimientos de verificación e instrumentos de información al consumidor para calentadores de agua solares en países de América Latina y El Caribe. Banco Interamericano de Desarrollo.

[7] Barnetche Orensanz, Magdalena (2020); "Diseño de planta de ensayos de durabilidad sobre colectores solares térmicos y sistemas compactos en el territorio argentino según la normativa IRAM". Maestría en Tecnologías Urbanas Sostenibles, Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires.

[8] Cordi, Martín; Sabre, Martín; Bornancin, Marianela (2016). Censo de energía solar térmica 2016. Mapa del sector en Argentina. Instituto Nacional Tecnológico Industrial (INTI).

[9] Página web: <http://climate.onebuilding.org/> (6 de 5 de 2020). Base de datos climática global. Año meteorológico típico de la Provincia de Buenos Aires.

# **Análisis de variables para la producción y uso de hidrógeno verde en la Universidad Nacional de La Matanza**

Eterovic, Jorge E.<sup>(a)</sup>, Blanco, Gabriel E.<sup>(a)</sup>, Fauroux, Luis E.<sup>(a)</sup>,  
Alterini, Federico J.<sup>(a)</sup>, Lohigorry, Agustín J.<sup>(a)</sup>

<sup>a</sup> Depto. de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas – Universidad Nacional  
de La Matanza  
lfauroux@unlam.edu.ar

## **RESUMEN.**

En el marco de la problemática ambiental y crisis climática, y la necesidad de recorrer, cuanto antes, una transición energética, el Depto. de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas (DIIT), de la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM), está avanzando con la prefactibilidad de la instalación de una planta electrolizadora, piloto, para la producción en una forma sustentable y sostenible de hidrógeno, a partir de energía solar fotovoltaica, lo que hará que el mismo pueda ser clasificado como “verde”. El hidrógeno será destinado, en un principio, para la investigación de la reconversión de motores diésel a hidrógeno en motores utilizados en locomoción pesada. Este trabajo describe las diferentes etapas del proceso, el análisis de este proyecto incluye la comparativa entre distintos tipos de electrolizadores, el origen y acondicionamiento del agua a electrolizar, los requerimientos para la instalación de paneles fotovoltaicos, y el análisis de las problemáticas de la reconversión a resolver sobre un banco de motores destinado a tal fin, planteándose posibles soluciones para la problemática. El proyecto busca poder vincular en esta temática, a la universidad con distintos actores, tanto estatales, como privados, fomentando la implementación de tecnologías sostenibles y sustentables con el ambiente.

**Palabras Claves:** Hidrógeno, Verde, Transporte, Pesado.

**Área Temática:** Energías Alternativas y Sustentabilidad, Fuentes de Energía Renovable, Sistemas Sustentables, Bioenergía, Hidrógeno, Nuevas Fuentes de Energía. Aplicaciones agrícolas e industriales, térmicas y químicas

**Categoría del Trabajo:** Trabajo de docentes y/o investigadores.

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía es un factor clave para realizar cualquier actividad. A través del tiempo los distintos países han desarrollado diferentes matrices energéticas para satisfacer su demanda, compuestas por fuentes diversas, como carbón, petróleo, hidráulica, nuclear, etc. Sin embargo, el desarrollo de estas matrices ha causado alteraciones en los ecosistemas, poniendo de manifiesto las afectaciones realizadas al ambiente en general. Esto ha motivado la transición a fuentes renovables de energía, con impactos sensiblemente menores, como la solar, y la eólica, entre otras. En este sentido, un aspecto crítico a tener en cuenta es la disponibilidad de la energía para cuando se la necesite, de aquí deriva la necesidad de desarrollar fuentes de energía y tecnología que permitan el almacenamiento de la energía excedente, producida en los períodos propicios, para luego poder utilizarla en aquellos períodos de escasez del recurso. Actualmente las formas de almacenar energía son, entre otras, embalses, baterías, calor, y en este punto aparece el hidrógeno, como vector energético. Este proyecto plantea la prefactibilidad de la instalación de una planta piloto productora de hidrógeno verde mediante el uso de paneles solares fotovoltaicos. Se evaluará la factibilidad de destinar el mismo a la investigación, desarrollo, y de la reconversión de algunas modalidades de transporte del sistema actual de locomoción, principalmente basado en combustibles fósiles, la factibilidad de la reinyección a la red eléctrica del excedente de energía producido o previamente almacenado, y la escalabilidad de la planta electrolizadora. Se espera poder obtener los conocimientos necesarios en plantas, de baja escala.

La utilización del hidrógeno, como combustible, surge con la línea de investigaciones acerca del cambio de la matriz energética dependiente del petróleo. El hidrógeno obtenido, se clasifica mediante una escala de colores. Así, por ejemplo, el hidrógeno “gris” es el que deriva de la combustión de gas natural, se denomina “azul” a aquel que se obtiene del mismo modo que el “gris”, pero recuperando el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), y “verde” para aquel hidrógeno obtenido aprovechando las fuentes de energía renovables [1]. Esta clasificación pretende visibilizar el impacto ambiental de su obtención y la huella de carbono generada, donde el “verde” supone “emisiones cero” de carbono. En este contexto es que en la Universidad Nacional de La Matanza (UNLaM), se realizó un estudio de prefactibilidad [1] para la producción de hidrógeno verde, con el objeto disponer de dicho producto para la investigación en banco de motores, la posibilidad del autoconsumo del eventual remanente de energía eléctrica, y la prefactibilidad del escalado de la planta.

Este análisis dio comienzo con la confección de un esquema básico de etapas, en bloques, en el que se definieron las etapas, a grandes rasgos, del proceso.

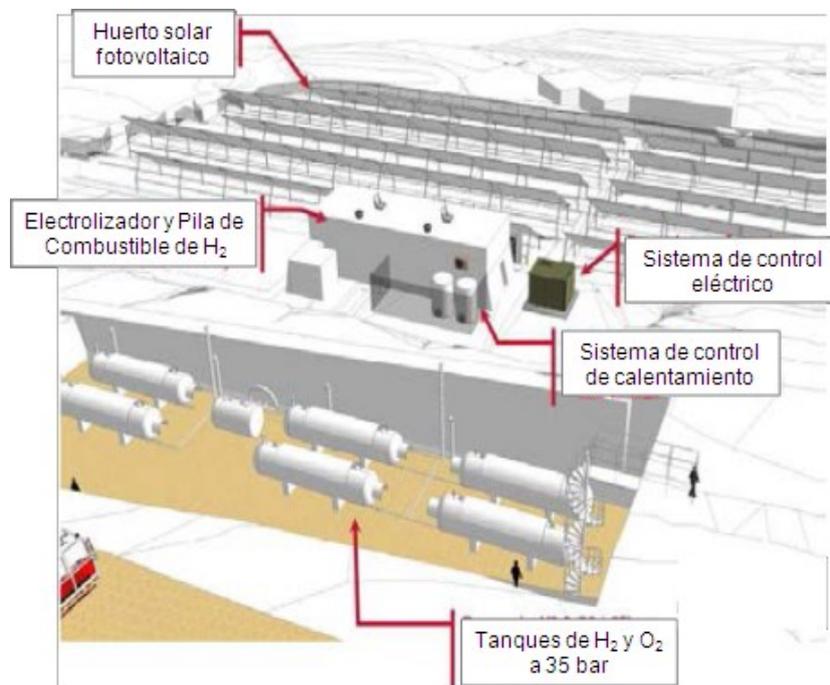


Figura 1: Esquema básico de etapas.

Los pasos siguientes paso del análisis consisten en la evaluación y desglose de cada bloque, sus componentes, sus requisitos técnicos, y si existiera alguna problemática ambiental y/o legal asociada que atender.

## 2. BLOQUES DEL PROYECTO

### 2.1. Análisis de la fuente de energía

La selección de la fuente primaria de energía se realizó en base a la decisión de producir hidrógeno “verde”, a partir de las fuentes renovables disponibles en el sitio, vale decir mediante energía eólica, recurso escaso en la locación de San Justo, La Matanza (Bs. As.), o energía solar. La energía solar puede ser del tipo térmica, o fotovoltaica. Una instalación solar térmica requiere de una columna colectora de los rayos reflejados por espejos, dispuestos alrededor de la misma y, a priori, un esfuerzo extra para la conservación del calor generado, y su posterior conversión a energía eléctrica.



Figura 2: Planta de energía solar térmica.  
Planta termosolar torre central Noor Ouarzazate III. Energy Sener

Comparada con la disponibilidad actual en la UNLaM de techos dispuestos en forma de “diente de sierra” y con una orientación ligeramente desplazada del norte, una instalación solar térmica resulta ser de mayor complejidad, y de mayor inversión, que una solar fotovoltaica.



Figura 3: Vista aérea de la UNLaM

Otros ingresos podrán provenir de acuerdos con privados o instituciones públicas interesadas en el desarrollo de la economía del hidrógeno verde, como así también el ahorro que se logre en la factura de electricidad de la universidad. También los eventuales ingresos que generen la comercialización de los derechos intelectuales que se logren desarrollar. Más adelante, otras plantas de hidrógeno verde deberían verse favorecidas en sus inversiones de capital (capex), como ya fuera comentado, por la economía de escala.

## 2.2. Análisis de los tipos de electrolizadores

Las tecnologías para electrolizadores más difundidas son la alcalina y la de membrana de intercambio protónico [6, 9]. La tabla 1 resume una comparación inicial entre ambos tipos [2,12]

Tabla 1: Comparación de tecnologías para electrolizadores.

Alcalino	Membrana de intercambio protónico (PEM)
Relativo bajo costo	Costo mayor
Mezcla de gases (pureza < 98%)	Gases de alta pureza
	Sistema compacto
Tecnología establecida	Tecnología más reciente
Poco dinámico	Operación dinámica
Menor eficiencia a carga parcial	Excelente comportamiento a carga parcial
Respuesta más lenta	Rápida respuesta
Celdas en el rango de los MW	Celdas debajo del rango de los MW
Baja densidad de corriente	Alta densidad de corriente
	Alta eficiencia de voltaje
Estabilidad de largo plazo	Posible menor duración
Bajas presiones de operación	Baja presión de salida
Electrolito líquido corrosivo	Agua

Los motivos por los que se eligió el sistema PEM, se centraron fundamentalmente en su capacidad de operar en un rango de suministro energía eléctrica variable, como presenta la solar fotovoltaica, una temperatura de operación relativamente baja (60°C), y que sólo necesita agua como insumo, a diferencia de los alcalinos, que necesitan de hidróxido de potasio (KOH), sustancia inscripta en el registro de la Secretaría de Políticas Integrales sobre Drogas de la Nación Argentina (SEDRONAR), lo que obliga a seguir un procedimiento administrativo muy detallado y complicado para su manipulación.

## 2.3. Consideraciones generales del origen y acondicionamiento del agua

Otro aspecto conflictivo es el uso del agua, regulado en la provincia de Buenos Aires por la Autoridad del Agua (ADA), que también supervisa a las empresas proveedoras de servicio como Agua y Saneamientos Argentino S.A. (AYSA), y Aguas Bonaerenses S.A. (ABSA).

Tabla 2: Composición inorgánica típica de agua corriente

Alcalinidad total	mg/l	400
Aluminio residual	mg/l	0,2
Arsénico	mg/l	0,05
Cadmio	mg/l	0,005
Cianuro	mg/l	0,1
Cloro residual libre	mg/l	0,2
Cloruros	mg/l	250
Cobre	mg/l	1
Cromo	mg/l	0,05
Dureza total	mg/l	400
Fluoruro	mg/l	2
Hierro total	mg/l	0,1
Manganeso	mg/l	0,05
Mercurio	mg/l	0,01
Nitrato	mg/l	45
Nitrito	mg/l	0,1
Amoníaco	mg/l	0,2
Plomo	mg/l	0,01
Selenio	mg/l	0,01
Sulfatos	mg/l	200
Zinc	mg/l	5

En este sentido, tres son las alternativas, agua corriente, agua de pozo, y agua pluvial. De estas, la tercera es la que menos inconvenientes conlleva con las legislaciones vigentes, y su captación se ve facilitada por la ya mencionada gran disponibilidad de superficie techada.

Se necesitan aproximadamente entre 1,5 y 2 litros de agua provenientes de la red para producir 1 Nm<sup>3</sup> de hidrógeno [3]. Sea cual fuere la fuente de agua, esta debe ser analizada a fines de conocer la composición local.

#### 2.4. Compresión del hidrógeno obtenido

La etapa de compresión de las plantas electrolizadoras disponibles en el mercado, hasta el momento del presente trabajo, alcanza sólo los 30 bar de presión, y resulta insuficiente para las necesidades de un transporte de locomoción pesada (colectivos, camiones, etc.), los que requieren una presión de 350 bar. Además, es necesario contemplar, sin olvidar los aspectos de seguridad, el tiempo de demora en la recarga de los tubos del vehículo.

Para este proyecto, por el momento, el almacenaje se realizará en un pulmón (buffer) destinado a tal fin, desde el cual se procederá a la provisión de hidrógeno para motores en el banco de pruebas, a 30 bar de presión.

#### 2.5. Dimensionado de la planta

El dimensionamiento de la planta se asemejó a un proceso iterativo, en el que intervinieron, en forma estimativa, el cálculo de la demanda de hidrógeno, el dimensionamiento de la instalación en general, y el presupuesto potencialmente disponible.

Considerando los montos ofrecidos por diferentes convocatorias a las que podría ser posible acceder para obtener financiación, se consideró la adquisición de una planta generadora de 60 Nm<sup>3</sup>/h [12, 13, 15], con una alimentación de 300 kW. Previendo que las horas de asoleamiento máximo, en la zona, para junio suceden entre las 13:00 hs y las 17:00 hs., se sobredimensionó la necesidad de paneles fotovoltaicos, de manera tal de garantizar ese suministro mínimo por el período de 4 hs mencionado. Así, se planteó una instalación capaz de entregar 600 kW en su pico máximo, analizando el destino que se le daría al excedente de energía producida, como su almacenaje en baterías, la reinyección a la red, o el autoconsumo.

En principio, la idea es no destinar el hidrógeno producido para la producción de energía eléctrica en períodos de bajo asoleamiento, sino que el excedente que pudiera resultar de la producción de la planta solar fotovoltaica, será el destinado al autoconsumo de la universidad. De este modo, la instalación de los paneles solares requeriría, basados en empresas de mercado (Amerisolar, Worldwide Energy and Manufacturing USA Co., Ltd.), de 1120 paneles de aproximadamente 2,25 metros por 1,13 metros, lo que representan una necesidad, también aproximada, de 2900 m<sup>2</sup> de techos. La distribución de las filas se realizará una vez seleccionados los techos a intervenir, lo que dependerá de la ubicación, el estado de conservación, la cercanía a subestaciones eléctricas, y también a la distancia de la ubicación que se le daría a la planta. La conexión de la instalación solar fotovoltaica sería la de una típica instalación en línea (on grid) con la red eléctrica)

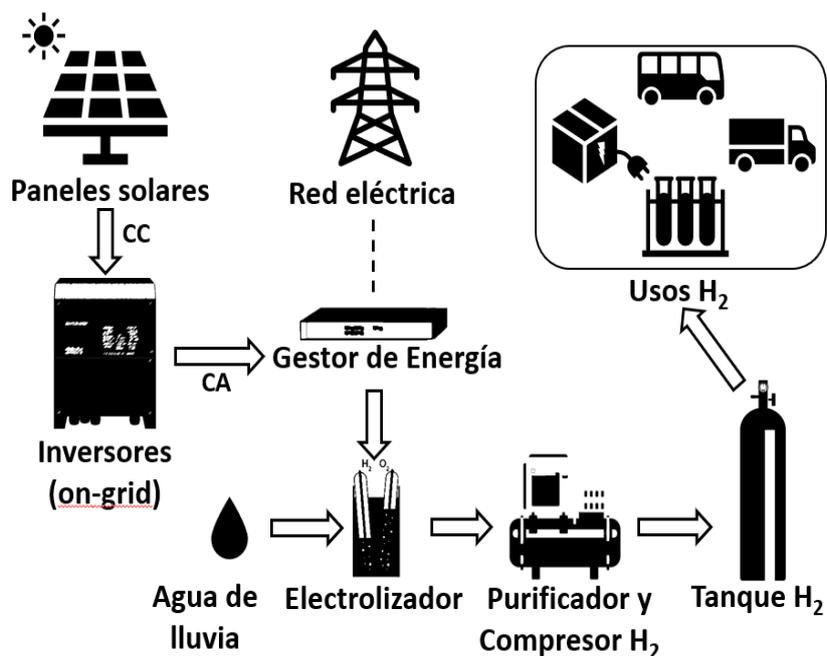


Figura 4: Esquema de instalación de la planta y de los paneles "on grid"

Para generar solamente hidrógeno verde, e inyectar excedentes, y/o facilitar el autoconsumo interno de la energía eléctrica producida por la instalación solar fotovoltaica), los paneles pueden ser montados generando una retroalimentación de control entre el electrolizador y los

inversores / administrador de energía, de forma que el electrolizador no solicite consumo de energía a la red mientras aún esté recibiendo un mínimo preestablecido por parte de la instalación fotovoltaica, por esto es que se seleccionó una tecnología PEM, bastante versátil en el rango de entrada de energía [6, 13], situación que se puede dar en las primeras horas de la mañana, de la tarde, y también en días nublados, por ejemplo. De esta manera, el hidrógeno producido es “verde”. Por otra parte, de optar por la inyección de excedentes de energía eléctrica producidos por el parque solar, a la red eléctrica, y/o su autoconsumo, puede ser controlada por el administrador de energía, siempre en el caso que en ese momento no esté funcionando el electrolizador, o que exista un excedente de producción de energía, respecto a su requerimiento.

### 3. PROBLEMAS ABORDADOS

#### 3.1. Captación de energía solar fotovoltaica

La UNLaM posee la superficie más que suficiente y adecuada para colocación de un campo solar fotovoltaico de 600 kWp. La infraestructura eléctrica, ya disponible, es adecuada para su conexión al anillo de la red eléctrica interna, ya que dispone de estaciones transformadoras para equilibrar las cargas de demanda, siendo necesario realizar el tendido hasta la planta de electrólisis.

- Paneles Solares Fotovoltaicos
- Estaciones transformadoras
- Ubicación Potencial de la Planta



Figura 5: Proyecto de instalación de la planta y del campo solar en el predio de la UNLaM

#### 3.2. Electrolizadores PEM

En este sentido los inconvenientes se encuentran en los metales preciosos, como platino e iridio, que componen los electrodos, además que las membranas de intercambio son costosas, y sensibles a la calidad del agua a electrolizar. Las composiciones, expresadas en la tabla 2, sirven como referencia en el caso de ser viable la captación, acumulación y mantenimiento de agua pluvial, es de esperar que el agua de lluvia, así recolectada, posea menor contenido en metales pesados, lo que expandiría la vida útil de la membrana de intercambio y el sistema de acondicionamiento que de por sí son parte del electrolizador. Cabe mencionar que las plantas “llave en mano” incorporan una etapa de adecuación del agua a electrolizar. Teniendo en cuenta que los electrolizadores PEM tienen un requerimiento de conductividad del agua entre 0,1 y 0,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  [3, 12], y que incide directamente en la durabilidad de las celdas, es recomendable que los sistemas de control del electrolizador tengan protocolos en caso de conductividad elevada. Asimismo, los fabricantes de estas plantas son pocos, y se ha detectado que muchos oferentes en realidad trabajan con un mismo fabricante, y que esto provoca una demora en la entrega entre 10 y 18 meses. La planta generadora de hidrógeno ocupa el espacio de un contenedor (o dos, a escala piloto), en este sentido la UNLaM cuenta con el espacio físico, y en una ubicación adecuada, disponiendo a su alrededor el espacio necesario para auxiliares, compresión y despacho. El despacho consiste en el llenado de tubos, disponibles bajo la modalidad de comodato, siendo la empresa dueña de los tubos la responsable de realizar el mantenimiento y pruebas periódicas de los mismos.

Hay una larga espera para quien quiera adquirir hoy un electrolizador y la oferta debería reaccionar en ese sentido. Beneficios al consumo de energías limpias, o penalidades al consumo de combustibles fósiles, podrán ser parte del menú para una solución que le permita competir al hidrógeno frente al combustible fósil [7, 8]. Una futura expansión en la demanda de electrolizadores, podría, o bien aumentar la oferta de proveedores, o bien la ampliación de la capacidad de producción de los actuales, ambas situaciones, con el tiempo, se podrán traducir en, mejoras en la tecnología, descenso de los precios, y disminución de los plazos de entrega.

### 3.3. Captación de agua pluvial

Considerando el régimen pluvial en la zona, se estima necesario contar con una reserva de 40m<sup>3</sup> de agua para contemplar los períodos de sequía, Si bien la UNLaM cuenta con techos de fácil intervención para la recolección de esta cantidad, los techos a realizar para la cobertura de la planta y sus auxiliares, tendrán la superficie requerida a tal fin, por lo que se evitarían los costos de transporte hacia la planta.

Además de lo antedicho, la idea de usar agua pluvial surge de la intención de no malgastar el agua ya tratada para consumo humano, y considerando la relativa facilidad en la que podrían ser intervenidos los techos para recolectar el agua, se elaboró un plan para tal fin, basado en la experiencia de un proyecto similar ya ejecutado en la UNLaM [4].



Figura 6: Ejemplo de Intervención en descarga pluvial realizado en UNLaM

El mismo consiste en descartar las primeras aguas por el “lavado” de los techos y el despeje de sólidos (hojas), mediante una desviación “T”, evitando los desbordes que podrían causarse por la intervención ante una lluvia de grandes proporciones en poco tiempo. Luego, en desviaciones “Y”, se realiza el tratamiento con resinas de intercambio iónico, y carbón activado [11, 12], antes de ser almacenada, de manera tal de facilitar su posterior conservación, la intervención se dimensiona en base al rango del parámetro de conductividad y el grado del tratamiento estará dado en función de la velocidad del flujo, cuánto más rápido, menor es el intercambio iónico, mayor conductividad.

### 3.4. Banco de motores

Un camino natural sería determinar el precio de venta del hidrógeno por su equivalente en rendimiento energético al de un motor térmico a diésel, con impuestos incluidos. Pero así, el valor obtenido resultaría muy lejano del necesario para viabilizar económicamente un proyecto. Beneficios mayores a los de la ley actual de promoción del hidrógeno o penalidades al consumo de combustibles fósiles, podrán ser parte del menú para una solución.

La combustión del hidrógeno conlleva riesgos, y altas temperaturas. El motor más adecuado para estudiar su reconversión es, por su robustez, el diésel, sin embargo, es necesario implementar el cambio del ciclo diésel (por compresión), al ciclo Otto (por chispa). Esta reconversión implica analizar la viabilidad técnico-financiera [5, 14], cambios en la admisión, la velocidad de inyección de hidrógeno, las presiones y temperatura de trabajo, y los volúmenes de mezcla. Asimismo, es imperativo considerar generación de gases derivados de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), que también son contaminantes. En este caso, hay varias opciones que están investigando, donde intervienen la urea, en un círculo virtuoso, las membranas separadoras, y

otras soluciones. Estas investigaciones tendrán vinculación y transferencia con entidades tanto públicas como privadas en el marco de los convenios específicos correspondientes, y serán realizadas con el propio suministro de tubos de hidrógeno a 30 bares, o bien adquiridos, hasta tanto no pueda contarse con la planta, sobre un banco de pruebas instalado para tal fin, junto a los sensores tanto de interés mecánico, como los específicos de análisis de gases de escape (CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, etc), siendo los motores suministrados por las empresas interesadas en recibir transferencia.

## 1. CONCLUSIONES

El quemado directo de hidrógeno en motores de combustión interna, tiene una fuerte mejora en cuanto emisiones respecto a combustión de hidrocarburos, dado que no se genera CO<sub>2</sub> ni otras sustancias tóxicas como el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), pero continúan presentes emisiones de óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Para evitar estas últimas emisiones la industria avanza, desarrollando sistemas postratamiento que permitan eliminarlas en su mayoría y/o trabajando sobre la admisión de los motores con relaciones de aire muy superiores a la estequiométrica, a mayor cantidad de oxígeno, menor generación de NO<sub>x</sub>, entre otras opciones. Es de destacar, que también es posible trabajar con mezclas de combustibles donde el hidrógeno sea una parte, logrando una contribución parcial al medioambiente.

En el transporte pesado el hidrógeno resultaría más competitivo frente a la locomoción a baterías, hoy de litio, por autonomía, tiempos de recarga y una menor exigencia de espacio y peso para su funcionamiento. A su vez, la combustión directa del hidrógeno en motores térmicos podría cobrar relevancia en países como la Argentina frente a la pila de combustible, a pesar de un rendimiento energético inferior, ciclo Otto vs pila combustible, por las mayores dificultades para acceder a la tecnología y al crédito.

En números del Consorcio H2ar, en Argentina cada año se producen cerca de 400 kTon de hidrógeno; hoy es posible producir hidrógeno azul con 90% de captura de CO<sub>2</sub> a 1,4 – 1,8 USD/kg, considerando un costo del gas natural de entre 3 y 5 USD/Mbtu. El hidrógeno verde podría igualar los costos del azul hacia 2030 en proyectos del orden de 1GW aislado de la red eléctrica (off-grid). El costo hasta podría duplicarse en escalas de 100 MW; sin embargo, un mayor grado de interacción con la red eléctrica (on-grid), mejoraría el factor de utilización al posibilitar la compra de energía verde a terceros y tendería a igualar el costo.

Al determinar el precio de venta del hidrógeno, por su equivalente en rendimiento por km recorrido, respecto a un motor térmico a diésel, hoy obtendríamos un valor de venta (4 USD/kg en EEUU), muy inferior al que actualmente es posible conseguir en las estaciones de servicio de países desarrollados que recorren la transición. En números del Departamento de Energía de Estados Unidos, hoy sería factible producir hidrógeno verde en EE.UU. a un costo de 5 USD/kg. De cumplirse el objetivo para 2030, ese valor se reduciría hasta 1 USD/kg (Hydrogen Shot Summit- 2021). Una mejora importante podría entonces esperarse en el precio en surtidor y volver competitivo al hidrógeno para el usuario final en términos de gasto de combustible. También será necesario una caída del precio de los vehículos. En EE.UU., se estima, por ejemplo, que hacia 2025, un camión de carga de 23 toneladas a celda de hidrógeno quintuplicará en precio de venta a su equivalente a diésel.

En un contexto de prefactibilidad, sólo se mencionará que se cuenta con presupuestos de diferentes proveedores, para plantas piloto productoras de entre 60 Nm<sup>3</sup>/h y 100 Nm<sup>3</sup>/h de hidrógeno, junto a sus auxiliares, de bancos de motores, y campo solar, sin considerar fletes, y cargos no incluidos en las exenciones impositivas contempladas por el Registro de Organismos y Entidades Científicas y Tecnológicas (ROECYT).

## 2. REFERENCIAS

- [1] Morante, J.R.; Andreu, T. (2020). Hidrógeno. Vector energético de una economía descarbonizada. Fundación Naturgy, 2da. Edición. Madrid, 87-90.
- [2] Pino Priego, A. (2009). Aprovechamiento de recursos energéticos renovables no integrables en la red eléctrica. El caso de la producción de Hidrógeno. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla, 26-35
- [3] Crozzoli, P; Gullo, F.; Milanesi, J.; Sanchez Barros, A.; Trivellini, L. (2020). Análisis de prefactibilidad de una planta productora de Hidrógeno. Escuela de Ingeniería y Gestión. Instituto Tecnológico Buenos Aires.
- [4] Fauroux, Luis E. y otros, "Recuperación y tratamiento de agua pluvial a baja escala", en Libro de Actas del IIIer Congreso Argentino de Ingeniería. pp. 1870-1882, 2016.

- [5] Lilio, P.; Belmar, F. (2021). "Evaluación técnico-económica implementación bus de hidrógeno en Sistema de Transporte Metropolitano". Unidad de Tecnologías del Hidrógeno, 17-24. Recuperado de: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/20211230\\_informe\\_ext\\_mtt\\_men.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/20211230_informe_ext_mtt_men.pdf)
- [6] Venturino, V.; Lare M.; Gras F. (2016). "Caracterización de electrolizadores". Facultad Regional Concordia – Universidad Tecnológica Nacional (UTN – FRCon).
- [7] (2020). Path to hydrogen competitiveness - A cost perspective. Recuperado de: [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness\\_Full-Study-1.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2020/01/Path-to-Hydrogen-Competitiveness_Full-Study-1.pdf)
- [8] Skoczylas, T. (2020). Green H2 for a Sustainable Integrated Economy. NEL-ASA, Electrolyser.
- [9] Retuerto, M. (2021). La Electrólisis: Tipos de electrolizadores. IDEAGreen. <https://ideagreen.es/hidrogeno-verde/tipos-de-electrolizadores/>
- [10] Condaire. (2013). Tratamiento del agua. Recuperado de <https://www.aquaglobals.com/filtro-de-carbon-activado.php>
- [11] Aquaglobal. (2022). Filtro de Carbón Activado. Recuperado de <https://slideplayer.es/slide/3477927/>
- [12] Degaetani, O.; Eterovic, J., Blanco, G., "Análisis comparativo de plantas piloto para la producción de H2 verde", en Libro de Actas del XV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial. 2022.
- [13] Fauroux, L.; Piñero, C.; Morais, M.; Del Puerto, C., "Análisis preliminar de la factibilidad técnica de instalación de una planta piloto para la producción de hidrógeno verde" en Libro de Actas del VI Congreso Argentino de Ingeniería. 2022
- [14] Eterovic, J.; Alterini, F.; Lohigorry A.; Blanco, G. (2022). "Hidrogeno verde, una oportunidad sustentable para el transporte". Revista Digital del Depto de Ingeniería. Universidad Nacional de La Matanza. DOI: <https://doi.org/10.54789/reddi.7.1.3>
- [15] Lohigorry, A.; Alterini, F.; Fauroux, L.; Sobral, P.; Pisera, G. "Análisis de la prefactibilidad para la producción de hidrógeno verde en la UNLaM". en Libro de Actas del XV Congreso Internacional de Ingeniería Industrial. 2022.