

Marcelo Vega - Rubén D Piacentini

»»» Coordinadores

# »»» ENERGÍA

Investigaciones en América del Sur. II



CENTRO DE ESTUDIOS  
INTERDISCIPLINARIOS

UNR

# ENERGÍA

## Investigaciones en América del Sur II

Marcelo Vega y Rubén D. Piacentini coordinadores



Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO



ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA | ORGANIZATION OF LATIN AMERICAN ENERGY | ORGANISATION DE L'ÉNERGIE LATINO-AMÉRICAINNE



CENTRO DE ESTUDIOS  
INTERDISCIPLINARIOS



Universidad  
Nacional  
de Rosario

Energía : investigaciones en América del Sur II / Marisa A. Frechero ... [et al.] ;  
coordinación general de Marcelo Vega ; Rubén D. Piacentini. - 1a ed. -  
Rosario : CEI ediciones, 2023.  
Libro digital, PDF  
Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-82864-1-9  
1. Energía. 2. Recursos Energéticos. I. Frechero, Marisa A. II. Vega, Marcelo,  
coord. III. Piacentini, Rubén D., coord.  
CDD 541.351

Diseño de tapa: Luciano Duyos  
Diseño y maquetación: Cintia Corestein

Marcelo Vega y Rubén D. Piacentini  
Universidad Nacional de Rosario, 2022  
Hecho el depósito que marca la ley 11.723

Publicado bajo licencia Creative Commons



Edición y publicación Centro de Estudios Interdisciplinarios, UNR  
Director: Prof. Darío Maiorana  
Maipú 1065 3º piso of 309, Rosario, Argentina  
Tel: (0341) 4802781  
Correo electrónico: cei@unr.edu.ar

## PRÓLOGO

La Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), organismo de cooperación, coordinación y asesoría técnica, de carácter público intergubernamental, constituido el 2 de noviembre de 1973 mediante la suscripción del Convenio de Lima, ratificado por 27 países de América Latina y El Caribe. Tiene el inmenso agrado de apoyar esta publicación desarrollada por el Comité Académico de Energía de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (CAE - AUGM).

Siendo el objetivo fundamental de OLADE el de fomentar la integración, conservación, racional aprovechamiento, comercialización y defensa de los recursos energéticos de la Región, es de nuestro interés mantener una activa relación con el sector académico de la región.

Hace ya cinco años, AUGM y OLADE desarrollan tareas conjuntas que han producido objetivos concretos, uno de ellos es la revista ENERLAC, publicación periódica que tiene como objetivo contribuir a la difusión de resultados de investigaciones y trabajos científicos de carácter técnico del sector energético de América Latina y El Caribe. Fruto de esta cooperación, se han desarrollado mecanismos potentes de postulación y revisión de artículos técnicos que garantizan la calidad de los contenidos ofertados en las diferentes ediciones. Este método de arbitraje ha conseguido que la revista sea incluida en varios índices, como el catálogo Latindex, Google Scholar y la Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico (REDIB).

Reconocemos y celebramos el esfuerzo dedicado a la publicación de este libro que contiene material relevante, producido por académicos, y que tratan de problemáticas propias del sector energético de la región. Auguramos el éxito de esta publicación y seguiremos apoyando los esfuerzos para que el conocimiento producido en la investigación académica, trascienda este ámbito y se proyecte hacia un público amplio interesado en los temas energéticos.

*Numar Alfonso Blanco Bonilla*  
Secretario Ejecutivo  
Olade - Organización Latinoamericana de Energía

# **PALABRAS PRELIMINARES**

## **ASOCIACIÓN UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDEO**

Energia há muito tempo deixou de ser um bem supérfluo para ser um bem fundamental na sociedade atual, sendo fator preponderante para promover o desenvolvimento e o crescimento da economia de qualquer país. Não apenas isso, a eletricidade acaba aumentando a desigualdade social, pois sua utilização traz oportunidades de desenvolvimento que somente beneficiam aqueles que possuem acesso à energia elétrica.

A América do Sul é uma das regiões que mais dispõe de recursos naturais, não apenas em termos quantitativos, mas também no que diz respeito às variedades de fontes de energia, tais como a hidroelétrica, gasífera, petrolífera, biomassa, eólica, solar, maremotriz, ou mesmo a nuclear. A integração dos recursos energéticos entre os países da América do Sul permite acordos para o aproveitamento racional dos recursos naturais. Além disso, cria oportunidades de redução de desigualdade dos países envolvidos, contribui para o desenvolvimento econômico e social da região e, sobretudo, permite uma maior segurança energética, através da complementaridade dos recursos energéticos.

O Comitê Acadêmico de Energia (CAE) da Associação de Universidades do Grupo Montevideo (AUGM) tem como um dos seus objetivos proporcionar uma maior aproximação entre os pesquisadores das universidades membro para apresentar soluções para a complexa questão da melhor utilização e integração dos recursos energéticos. Com este intuito foi idealizado o volume II do livro “Energía: investigaciones en América del Sur”, onde foi disponibilizado um meio gratuito de divulgação de pesquisas na área de Energia.

Todos os membros do CAE se empenharam na divulgação e busca de trabalhos de interesse relevante para a comunidade científica. O resultado foi um compilado de pesquisas que abordou o tema energia na sua forma mais ampla, com conteúdo multidisciplinar, interdisciplinar e transdisciplinar.

Nos tempos difíceis que estamos vivendo, com uma crise sanitária e econômica sem precedente, deixamos nosso enorme agradecimento a Universidad Nacional de Rosario (UNR), que mesmo com toda a dificuldade acreditou e financiou a publicação do livro. Uma menção especial de agradecimento deve ser dada ao nosso colega prof. Marcelo Vega, por seu destacado empenho na coordenação dos trabalhos para a edição deste livro. Agradecemos também.

*Agnelo Marotta Cassula*

CAE - Coordinador Comité Académico de Energía  
AUGM - Asociación Universidades Grupo Montevideo

# **PALABRAS PRELIMINARES**

## **UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO**

La Energía es un factor clave para el desarrollo humano. La difusión de los resultados de las investigaciones en temas energéticos y afines, permite avanzar en su utilización en forma eficiente y con emisiones a la atmósfera cada vez menos contaminantes. Nuestra Universidad Nacional de Rosario (Argentina) está orientada a apoyar todas las medidas tendientes a lograr que la disponibilidad de fuentes energéticas limpias sea una realidad en estas décadas, lo cual será un paso fundamental para el cumplimiento de los Acuerdos de París relativos al Cambio climático y que se reduzca la contaminación del aire, la cual, según la Organización Mundial de la Salud, es la que más contribuye de las distintas contaminaciones ambientales, a reducir la expectativa de vida de la humanidad.

La Universidad Nacional de Rosario, contribuye a través del presente libro, a lograr los objetivos antes mencionados.

*Lic Franco Bartolacci*  
Rector

UNR- Universidad Nacional de Rosario

# ÍNDICE

Prólogo	4
<b>PARTE I: BIOCOMBUSTIBLES</b>	<b>11</b>
Diseño de Nuevos Materiales para la Obtención de Energías Verdes <i>Marisa A. Frechero</i>	12
Tratamiento de Biomasa Para la Producción de Bioenergía <i>Gabriela Cristiano</i>	29
La Biomasa como recurso energético en la Región Cuyana <i>José Nicolás Martín; Emmanuel Carrasco; Silvia Poetta; Andrea Hidalgo</i>	41
La gasificación como modelo sustentable de biorrefinería para la transformación de la cáscara de maní en gas de síntesis <i>Jorge Esteban Vera, Marianela Carubelli, Luis Alberto Bertolino</i>	60
Aplicación de un modelo cinético de consorcios metanogénicos para la degradación de efluentes lácteos para la producción de biogás utilizando biorreactores UASB y EGSB <i>Cristhian Carrasco, John Vino, Marcelo Clavijo, María Teresa Álvarez</i>	88
<b>PARTE II: EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	<b>107</b>
Consumo y Eficiencia Energética en Edificios <i>Néstor F. Ortega, Alejandro R. Ratazzi, Juan M. Moro</i>	108
Avaliação do Conforto Térmico: Uma Aplicação Buscando a Economia de Energia Elétrica em Sistemas de Ar-condicionado em Edificações de Alta Eficiência Energética <i>Antonio Faria Neto, Inácio Bianchi, Francisco Antonio Lotufo, Frédéric Wurtz, Benoit Delinchant</i>	149
Análise de medições de potência em medidores bidirecionais submetidos a cargas não lineares <i>Daniel J. B. S. Sampaio, Jader V. Nascimento P., N. Athula Kulatunga</i>	165

Microrredes Eléctricas Inteligentes con Hibridación de Fuentes de Energía Renovables y Almacenamiento de Energía. Diseño, Gestión de la Energía y Control	179
<i>Sergio Junco, Javier M. Cabello, Daniel Alba, Joaquín Ezpeleta, Juan Tomassini</i>	
Plan de Uso Responsable de la Energía en la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina: auditorías energéticas en el Campus Resistencia	206
<i>Hugo Daniel Zurlo, Tatiana Karenina Yakimchuk</i>	
Enfoque integral de la eficiencia energética en edificios y su aplicación a la reglamentación térmica para vivienda nueva en Montevideo, Uruguay	225
<i>Alicia Picción, Magdalena Camacho, María Noel López</i>	
<b>PARTE III: ENERGÍA SOLAR Y OTRAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE</b>	<b>236</b>
Geração Distribuída Fotovoltaica em um Campus Universitário: Tecnologia, Sociedade e Sustentabilidade ambiental	237
<i>Thiago Matheus Martins de Moraes, Gabriela Maia Camargo, André Kakiuthi, Felipe Fernandes Jacintho, Rubens Alves Dias, José Feliciano Adami</i>	
Calibración de Controladores Sistema Turbina - Gobernador	265
<i>Ing. Rodmy Miranda Ordoñez</i>	
Sistemas de Almacenamiento: una alternativa real para el Sistema eléctrico Chileno?	275
<i>Javiera Guajardo y Hector Chavez</i>	
<b>PARTE IV: POLÍTICAS ENERGÉTICAS</b>	<b>288</b>
Sistemas fotovoltaicos residenciales: Uma análise política no Brasil	289
<i>Thamyres Machado David, Marcela Aparecida Guerreiro Machado, Paloma Maria Silva Rocha Rizol</i>	
El nexo agua-energía-alimentos en la agroecología peri-urbana en Rosario: una estrategia de inclusión social y acción hacia la sustentabilidad del desarrollo	306
<i>Terrile, Raúl, Céspedes, Lucía, Lang, Florencia, Budai, Natalia, Martinez, Nahuel; Costa, Mariano</i>	



**PARTE I**

**BIOCOMBUSTIBLES**

# DISEÑO DE NUEVOS MATERIALES PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍAS VERDES

Marisa A. Frechero<sup>1</sup>

Colaboradores: S. Terny, E. Cardillo, M. Sola, M.C. Molina, P.E. diPrátula<sup>2</sup>.

## RESUMEN

Uno de los grandes desafíos actuales tanto para la ciencia como para la tecnología es el desarrollo de fuentes de almacenamiento que permitan cosechar y almacenar energía de fuentes alternativas, i.e. no dependientes de los hidrocarburos. Estas “energías verdes o limpias” se espera que también den lugar a su expansión en redes de distribución. En este capítulo analizaremos la acumulación de energía por procesos electroquímicos siendo que en la actualidad las grandes estrellas son las baterías de litio. Habitualmente estas baterías pueden operar debajo del límite oxidativo de ciertos electrolitos, pero una pequeña sobrecarga implica alcanzar procesos con generación de gases que derivan en riesgo de explosión con alta probabilidad de daño a las personas. Esto nos lleva a la búsqueda de materiales más seguros, con mayor vida útil, de menor costo y menor índice de toxicidad.

---

1 M.A. Frechero: Departamento de Química- INQUISUR- Universidad Nacional del Sur- CONICET- Av. Alem 1253, Bahía Blanca- Buenos Aires, Argentina. CP 8000. [frechero@uns.edu.ar](mailto:frechero@uns.edu.ar)

2 Colaboradores: S.Terny. investigadora CONICET, E. C. Cardillo es investigadora CIC BsAS, M.E.Sola es investigadora UNS, M.C.Molina es becaria ANPCyT, P.E.di Prátula, es becario de CONICET.

## INTRODUCCIÓN

Casi finalizando la segunda década del siglo XXI probablemente nadie tenga dudas de que en materia de energía el cambio de paradigma es un hecho. En unos años o en unas pocas décadas, dependiendo del país en el que vivamos, la energía de consumo masivo a partir de hidrocarburos pasará a la historia. Sin embargo, la gran pregunta es cuál es su verdadero reemplazo. Hoy en día escuchamos a muchas personas de variados entornos referirse a “energía limpia”, “energía verde”, “energía alternativa” y seguramente aparecerán nuevas denominaciones en los próximos años. Lo cierto es que los humanos somos devoradores de electrones, nuestra vida en todas sus formas, depende de un incesante flujo de portadores de carga eléctrica y si conseguirlos es ya un desafío, almacenarlos para disponer de ellos en todo momento y lugar, es una contienda que no da tregua a gran número de científicos y tecnólogos. Nos hemos dado cuenta que la naturaleza nos provee de otras fuentes de energía, que al parecer están allí para quien quiera usarlas, en principio sin costo. Claro, en un planeta donde todo parece depender de la economía y la disponibilidad de dinero algo gratis parece una solución casi mágica. Sin embargo, capturar esa maravillosa energía que proviene del Sol, del Viento, de las Mareas, del Calor en el seno del Planeta y tantas otras propuestas es un problema tecnológico más o menos resuelto. Pero almacenarla y distribuirla sigue siendo un problema a mejorar. Y nuevamente, los recursos para este objetivo no están igualmente distribuidos para todos sobre la superficie de nuestro planeta, el Sol nos ilumina a todos y el viento en mayor o menor medida visita a todos, pero los recursos para poder almacenar esta energía es de algunos.

Dentro de la variedad de realidades vinculadas a esta problemática, trataremos aquí el tema del Litio. A finales del siglo XX, cuando en los noventa Sony lanzó su millonaria revolución de energía portable con las innovadoras baterías de Litio, pequeñas celdas, livianas, con alta densidad de energía que permitieron la tecnología portable, abrió la puerta a un desafío mucho mayor, la posibilidad de alimentar de energía grandes objetos -surgiendo luego los vehículos eléctricos- para luego escalar a las ligas mayores y dar lugar a enormes fuentes de almacenamiento para proveer de energía a las ciudades. Podíamos ahora cosechar toda esa energía de la naturaleza y almacenarla. Sólo teníamos que mejorar un poco los materiales necesarios para ensamblar esos antiguos objetos que ya conocíamos, las celdas electroquímicas. La cuestión, obtener todo el litio necesario. En la región Andina de Sudamérica están los salares de Argentina, Bolivia y Chile, donde el 80% de las reservas de este elemento se encuentran más o menos fácil de ser obtenido. En el libro Geopolítica del Litio, Industria, Ciencia y Energía en Argentina, se dice: “vivimos en un planeta envuelto en un proceso de transición geopolítica y ecológica, donde la naturaleza se encuentra

al servicio de un nuevo campo de acumulación y valorización financiera, bajo una extendida privatización de recursos. A su vez, el consumo acelerado e ininterrumpido de los recursos vitales de la tierra hace que su valor se acreciente día a día. A causa de la entropía destructora y el tipo de metabolismo propio del capital, la existencia, la explotación y el transporte de los recursos naturales, dibujan lentamente una nueva geografía de conflictos". Hoy se denomina al Litio el "oro blanco" y en Argentina su explotación es más o menos reciente. Pero, comercializar la materia prima no es tan rentable como comercializar los acumuladores de litio y esto dio lugar a "un Nuevo imaginario de desarrollo: estaríamos en presencia de un elemento químico que aseguraría el futuro energético del país, la región y el mundo, situándonos en el límite de la tecnología de punta"[1].

Ahora bien, la oportunidad de fabricar baterías de litio en la Argentina es una realidad y por esta razón somos muchos científicos los que apoyamos este desafío tecnológico y económico de nuestro país. En particular, la demanda de baterías con altas densidades de energía requiere de sistemas termodinámicamente más estables que los conocidos electrolitos líquidos y el desarrollo de electrodos menos costosos y diseñados con materiales más amigables con el medio ambiente. El reciclado de estas baterías es aun un tema abierto. En este capítulo, revisamos algunos resultados destacados de los últimos años obtenidos en nuestro grupo de investigación: GFCIES-Grupo de fisicoquímica de conductores iónicos de estado sólido- UNS.

## **CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES.**

Un electrolito sólido es un material que alcanza una conductancia eléctrica debida en su totalidad al movimiento iónico dentro del sólido. Estas fases se conocen desde hace más de un siglo y, hasta hace poco, todos los materiales conocidos de este tipo tenían una alta resistividad a temperatura ambiente. Sin embargo, se necesita un electrolito con alta conductividad a temperatura ambiente y un elevado potencial de descomposición. En estos últimos años se han estudiado muchos compuestos con especial interés en el catión de litio. Este ion tiene propiedades muy atractivas como portador de carga: es el catión metálico con el peso atómico más bajo y permite obtener elevadas densidades de energía, esto da lugar a desarrollar baterías livianas y compactas con altos voltajes y bajo nivel de descarga, que a su vez permite extender la vida útil de un dispositivo eléctrico también.

En general, los electrolitos sólidos pueden ser cristalinos o amorfos. Para considerar si son lo suficientemente buenos como conductores eléctricos, deben compararse con electrolitos líquidos fuertes cuyas conductividades son cercanas a  $10^{-3}$  -  $10$  S.cm<sup>-1</sup> a temperatura ambiente.

Los sistemas vítreos fueron propuestos como los mejores candidatos debido a las siguientes ventajas: son más fáciles de fabricar, sus propiedades son isotrópicas y son muy versátiles en cuanto a las posibilidades en sus composiciones, y quizás la más importante, son más seguros de usar debido a su estabilidad química. Para hacer un electrolito sólido vítreo necesitamos esencialmente dos o tres componentes fundamentales. Primero, un componente capaz de dar una matriz vítrea, la verdad es que hay muchos óxidos que pueden originar una matriz vítrea:  $B_2O_3$ ,  $GeO_2$ ,  $SiO_2$ ,  $TeO_2$ ,  $P_2O_5$ , etc., en algunos casos, algunos óxidos necesitan una cantidad muy pequeña de otra especie, un óxido diferente para lograr vitrificar con mayor facilidad. Este sería el segundo componente y su función está entre la modificación y la formación de la matriz de vidrio (por ejemplo, algunos óxidos de metales de transición). Y, finalmente, el tercer componente, es un óxido estrictamente modificador cuya función fundamental es proporcionar los cationes móviles a la matriz de vidrio, y será responsable de la conductividad de los iones. El método más comúnmente utilizado para fabricar vidrios es el enfriamiento rápido del fundido. El salto de temperatura es decisivo para obtener un sólido amorfo, es decir, un sistema de vidrio. Esta historia térmica del proceso de fabricación es relevante en algunas propiedades por lo que será importante conocerla. Para conocer las características de los sólidos vítreos conductores iónicos se utilizan diferentes técnicas: espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier, difracción de Rayos X, calorimetría diferencial de barrido, medidas de densidad y espectroscopia de impedancia.

Desafortunadamente, la sola selección de materiales para electrolito y electrodos no es suficiente para garantizar una batería con buena funcionalidad. Uno de los mayores retos tecnológicos es encontrar cuplas de materiales -electrodo/ electrolito- con alta compatibilidad. En el caso de los cátodos, en general, se utilizan dos tipos de materiales para las baterías de Litio-ion: compuestos aniónicos en capas estrechamente empaquetados que contienen centro redox-activos dados por metales de transición; otro tipo, son materiales de una estructura más abierta que suelen contener óxidos de vanadio y dióxido de manganeso, entre otros. El mejoramiento del rendimiento del cátodo ha sido explorado a través de diferentes métodos, incluyendo recubrimientos de carbono, sustitución aliovalente, dopado, etc., todos éstos, aplicados a materiales conformados por microesferas o microescamas [2-3-4]. Aunque se prefieren materiales nanoestructurados debido a su mayor área de contacto entre el electrodo y el electrolito [5]. Esta morfología permite que los iones  $Li^+$  difundan más fácilmente y logren un proceso de carga/ descarga más rápido dada la capacidad de tener menos tensión en la estructura debido a la disposición atómica de sus partículas logrando mejorar su rendimiento y vida útil. Sin embargo, hasta ahora, el rendimiento de los materiales del cátodo compuesto de carbono en condiciones de alta velocidad no es absolutamente satisfactorio para aplicaciones industriales. Y se avanza en procesos de recubrimiento

para adquirir materiales compuestos de estructura optimizada para alta velocidad de descarga con una capacidad adecuada y una estabilidad de ciclado útil a un costo razonable. Además, es necesario desarrollar un material de electrodo altamente compatible con los materiales de los electrolitos dado que es el factor clave para aumentar la vida útil y el rendimiento con buenas condiciones de seguridad de las baterías [6]. A la luz de estos requisitos, nos referiremos a un conjunto de materiales de cátodo basado en polianiones de fosfato modificados con fuentes de carbono adicionales como lo son las Nano-Fibras de Carbono (NFC) y el negro de carbono (CB) recubriendo una fase pura bien cristalizada del polianión, proporcionando una conducción electrónica reforzada. Describiremos sus características estructurales aplicando diferentes técnicas como micro Espectroscopia Raman y FTIR, Microscopía electrónica de barrido, DSC, DRX, etc. Adicionalmente, vamos a discutir los resultados del estudio eléctrico integral, por espectroscopia de impedancia.

## 1. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ELÉCTRICA DE ALGUNOS ELECTROLITOS VÍTREOS.

Comenzaremos revisando a continuación, un pequeño grupo de vidrios conductores iónicos conformados por tres matrices bien diferente. De acuerdo a su composición nominal, estos materiales son:

**ZLVT:**  $[0.07 \text{ ZnO} \cdot 0.63 \text{ Li}_2\text{O} \cdot 0.15 \text{ V}_2\text{O}_5 \cdot 0.15 \text{ MoO}_3 \cdot 2 \text{ TeO}_2]$

**LBPB:**  $[0.42 \text{ Li}_2\text{O} \cdot 0.18 \text{ BaO} \cdot (0.36 \text{ P}_2\text{O}_5 \cdot 0.04 \text{ Bi}_2\text{O}_3)]$

**LMB:**  $[0.20 \text{ Li}_2\text{O} \cdot 0.20 \text{ MoO}_3 \cdot 0.60 \text{ B}_2\text{O}_3]$

En la figura 1 se muestra el patrón de difracción de rayos X de cada uno de los vidrios antes mencionados. Dado que los mismos carecen de picos agudos e intensos, confirman su naturaleza amorfa, lo que nos permite afirmar que los materiales preparados son vidrios.

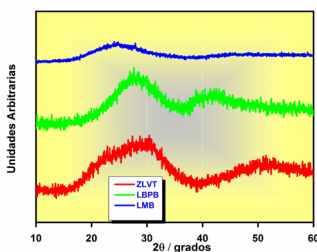


Figura 1: Patrón de difracción de rayos X a temperatura ambiente.

Tal como se aprecia en las imágenes presentadas en la figura 2, los materiales presentan el aspecto típicamente traslúcido y/o transparente de los vidrios de óxidos obtenidos por el método del enfriamiento rápido del fundido (quenching). Este método de enfriamiento rápido del fundido consiste en pesar primero la cantidad adecuada de los componentes de óxido de acuerdo a su formulación nominal en una balanza de laboratorio ( $\pm 0.1$  mg) utilizando reactivos de calidad analítica. En los ejemplos presentados hemos usado:  $\text{TeO}_2$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$ ,  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{Ag}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnO}$ ,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ ,  $\text{BaCO}_3$  y  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ . Luego, todos los polvos se mezclan en un mortero y se los incorpora a un crisol de platino, se los calienta en mufla a temperaturas inferiores a la fusión hasta que la descarboxilación de los carbonatos finaliza, y la eliminación del amoníaco se completa en el caso de los fosfatos, y luego se funden a 1023-1123 K (según la composición).

El producto fundido resultante se mantiene a esta temperatura durante aproximadamente 30-45 min. Finalmente, se vierte en una placa de acero inoxidable en forma de gotas y se lo somete a un proceso de templado durante 2 h para eliminar las tensiones mecánicas residuales [7-8-9-10-11-12].



Figura 2: preparación y aspecto de los materiales obtenidos.

Luego, aplicando técnicas calorimétricas (DSC o DTA) se determinan las temperaturas de transición vítrea de cada material. Esta temperatura marca

la temperatura máxima a partir de la cual el material deja de comportarse estrictamente como un sólido. A temperaturas superiores el material cambia sus propiedades. Es esta temperatura el límite de su aplicación tecnológica. Para los materiales aquí presentados las temperaturas de transición vítreas obtenidas son: LBPB: 357°C; ZLVT: 257°C; LMB: 512°C.

Una vez conocida su temperatura de transición vítrea, se procede al estudio de la respuesta eléctrica de estos materiales, dado nuestro interés en sus futuras aplicaciones como electrolitos de estado sólido. Para este estudio se utiliza la técnica de espectroscopia de impedancia. [13]

La relajación eléctrica en sólidos iónicos se atribuye generalmente al movimiento de los iones. Tal como lo explican en gran detalle los trabajos de Moynihan y de Jonscher [14-15-16]. Una descripción de las propiedades eléctricas de los materiales se puede alcanzar en términos de la relajación del campo eléctrico aplicado. Típicamente, las magnitudes medidas por la técnica de espectroscopia de impedancia son: el módulo de impedancia ( $Z$ ) y el ángulo de fase  $\phi$  entre las señales de entrada y salida ( $V$  e  $I$ ). Un modelo físico-eléctrico detallado de cada uno de los procesos involucrados en un material bajo el efecto de un campo eléctrico externo es extremadamente ambicioso y hasta el momento es demasiado complicado para darlo a priori sin demasiada información estructural. Una alternativa más simple es entender la respuesta eléctrica del material utilizando un circuito equivalente, es decir, un circuito compuesto de elementos eléctricos ideales que se comportan de manera similar a la respuesta de la impedancia obtenida. Cuando analizamos vidrios conductores iónicos, el circuito equivalente más comúnmente elegido para analizar su respuesta de impedancia es un circuito paralelo  $R - C$  o más bien un  $R - CPE$  [65]. El elemento CPE es un elemento de fase constante y surge a partir de una distribución de respuestas microscópicas en el seno del material y sus datos se presentan como un semicírculo en el plano  $Z' - Z''$  (es decir, el plano complejo de la impedancia). Este tipo de gráficos, conocidos como diagramas de Nyquist, son muy populares debido a que la forma de la gráfica nos permite comprender los posibles mecanismos que gobiernan el proceso del transporte de carga eléctrica en el seno del material. Si los puntos dan lugar a un semicírculo perfecto en el cuarto cuadrante del plano complejo, generalmente, se acepta que la respuesta de impedancia corresponde a un solo proceso. Además, de estos gráficos se obtiene la resistencia eléctrica del material a una temperatura dada simplemente de la intersección de la curva con el eje real de la impedancia tal como se muestra en la figura 3.

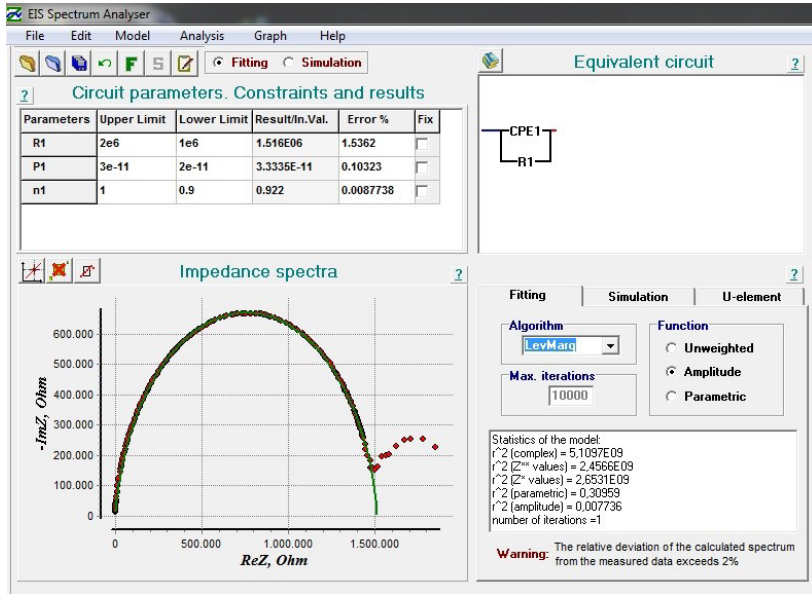


Figura 3: análisis de los datos de impedancia a partir de los gráficos de Nyquist utilizando un software libre denominados EIS [17].

El valor de conductividad del material a cada temperatura se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$(1) \quad \sigma_{(T)} = \frac{l}{A} \cdot R_{(T)}^{-1}$$

donde A y l son el factor geométrico de la muestra (su área y espesor).

Luego, dado que el comportamiento de la conductividad eléctrica de los materiales de los vidrios se ajusta a una ecuación de tipo Arrhenius, podemos afirmar que el mecanismo de transporte queda definido como un mecanismo térmicamente activado. Esta ecuación, permite obtener además la energía de activación del proceso.

Conocidos los valores de conductividad a las temperaturas de interés se puede evaluar la respuesta del material y su potencial aplicación en diferentes dispositivos, y entonces rediseñar el material en busca de alcanzar el desempeño necesario, lo que se conoce como diseño inteligente. A modo de ejemplo, presentamos a continuación las sucesivas mejoras introducidas en la matriz vítrea de fosfato en pro de alcanzar

la mayor conductividad iónica a temperatura moderada, evitando el deterioro del material en su estado vítreo [18]:

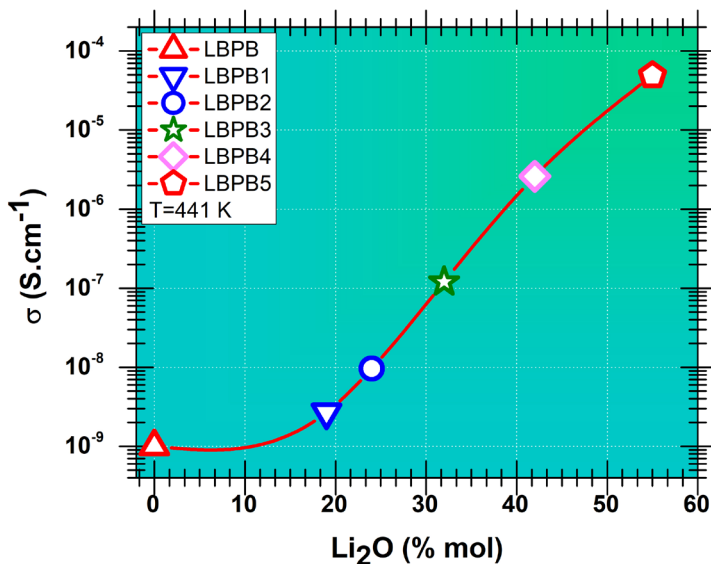


Figura 4: Isoterma de conductividad para la matriz de vidrio de fosfato con distintos contenidos de iones portadores de carga (iones litio)

Los estudios de envejecimiento de los materiales desarrollados son menos frecuentes en la literatura. Sin embargo, los mismos son de vital importancia al momento de definir su potencial uso tecnológico.

Nuevamente, a modo de ejemplo presentamos un caso de estudio de envejecimiento acelerado realizado sobre el mejor conductor obtenido en el ejemplo anterior, el LBPB5. En este caso, el material fue sometido a tratamientos de sobrecalentamiento en la región de la transición vítreo por distintos espacios de tiempo. En principio, una inspección visual pone de manifiesto el cambio estructural sufrido por el vidrio (figura 5) y, luego, en la figura 6 mostramos los cambios en la respuesta eléctrica, poniendo en evidencia el deterioro estructural sufrido por la matriz vítreo ilustrado en la figura 7 con una microfotografía de microscopía de barrido electrónico (SEM). En la figura 6 se puede observar la disminución de la conductividad del material conforme se aumenta el tiempo al que el material es sometido a un sobrecalentamiento.

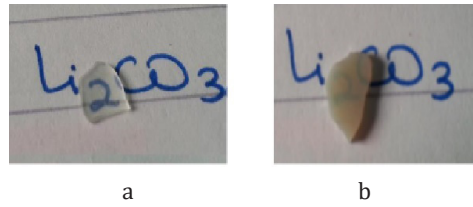


Figura 5: a) muestra original de LBPB5; b) muestra de LBPB5 tratada por 72 hs ligeramente por encima de su temperatura de transición vítrea.

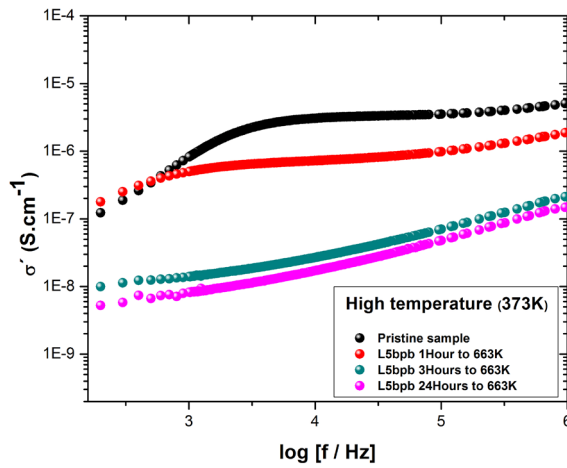


Figura 6: parte real de la conductividad de la muestra de LBPB5 tratada por distintos intervalos de tiempo (1,3 y 24 hs) ligeramente por encima de su temperatura de transición vítrea.

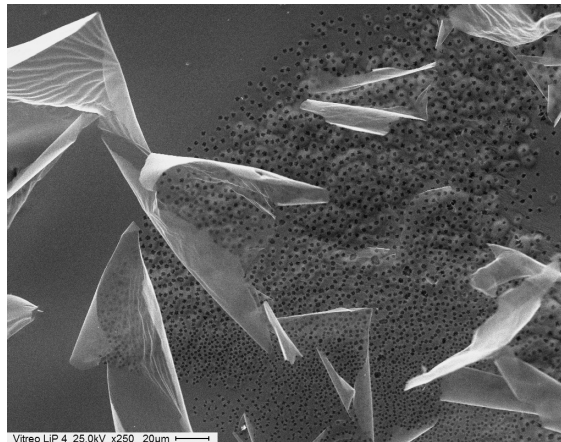


Figura 7: Imagen de SEM de la muestra LBPB5 tratada por 72 hs ligeramente por encima de su temperatura de transición vítrea.

## 2. CARACTERIZACIÓN ESTRUCTURAL Y ELÉCTRICA DE ALGUNOS ELECTRODOS CERÁMICOS.

A modo ilustrativo presentamos aquí algunos de los resultados de nuestros desarrollos en materiales para electrodos. Nos referiremos al  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  / C monoclinico recubierto de carbono. El material en base de fosfato cuenta en realidad con la incorporación de dos fases carbonosas: la primaria, incorporada durante el proceso de síntesis y la secundaria, agregada luego de que el material ya fue obtenido y que en este caso han sido o bien negro de carbón (CB) o nanofibras de carbón (CNF). Los compuestos fueron preparados por el método de sol-gel convencional, que es uno de los métodos de preparación más comunes para este tipo de materiales, tal como se esquematiza en la figura 8.

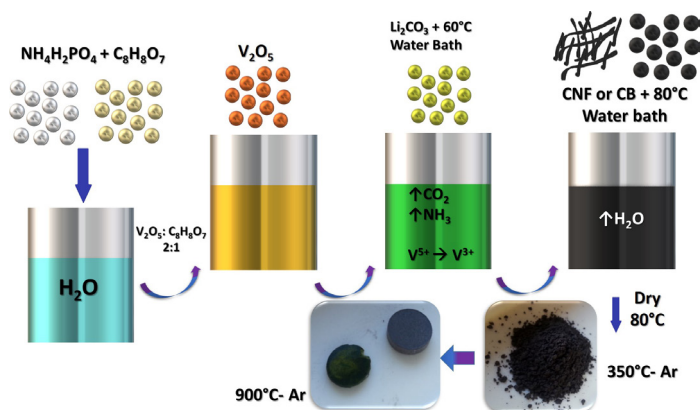


Figura 8: esquema del método de sol-gel empleado en la preparación de los electrodos cerámicos.

En comparación con las reacciones en estado sólido, el método sol-gel tiene una enorme ventaja, ya que tiene mayor tendencia a dar una mezcla homogénea de los componentes (a nivel atómico) [19-20]. Nos referiremos a los composites nanoestructurados como:

1. LVP-Cit-CB/ CNF:  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  - Ácido cítrico.
2. LVP Nb01-Ox- CB/CNF:  $\text{Li}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_3$  - ácido Oxálico - dopado con  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ .

Aplicando la técnica de microRaman acoplado a un AFM es posible mostrar que el material de electrodo se obtiene recubierto en forma más eficiente utilizando nanofibras de carbon, tal como lo muestra la figura 9 [21].

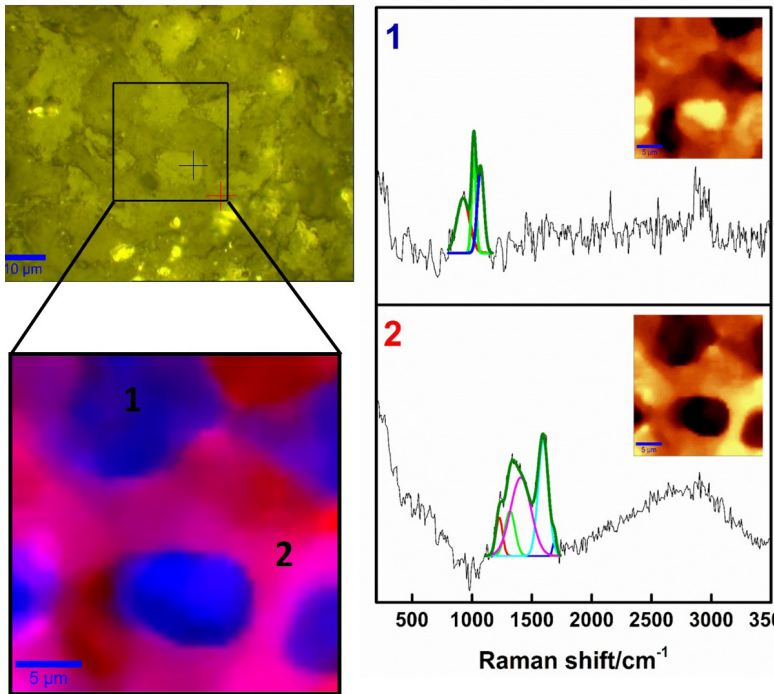


Figura 9: Imagen de microRaman, mapping y bandas de carbón del recubrimiento sobre la muestra LiVP-Cit.-CNF

La figura 10 muestra la estructura cristalina del material electródicos sin la fase carbonosa. En esta figura se puede observar que el reemplazo parcial del vanadio por niobio se lleva a cabo exitosamente. Este reemplazo busca minimizar, o aun eliminar, el contenido de vanadio en el material dado su cuestionamiento a nivel internacional por su elevado índice de toxicidad para el medioambiente. En nuestro material el reemplazo fue altamente exitoso, lográndose además, una mejora en la respuesta eléctrica mucho más favorable con CNF como fuente de carbono secundaria, tal como se observa en la figura 11, donde mediante el diagrama de Nyquist se puede observar una disminución de un orden de magnitud el valor de la resistencia [22].

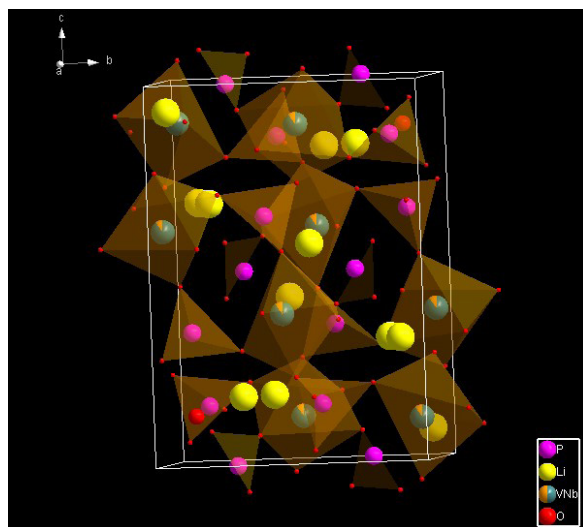


Figura 10: estructura cristalina del material de electrodo LVP, con un reemplazo parcial del vanadio por niobio.

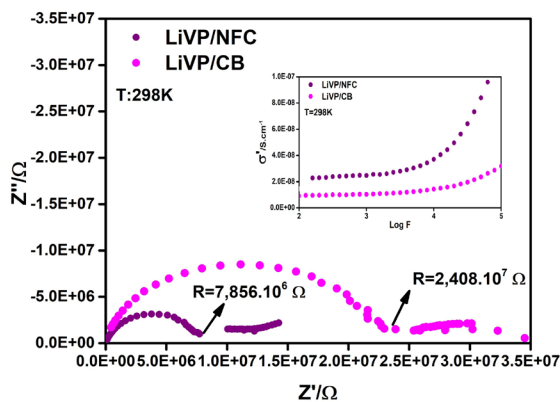


Figura 11: Diagrama de Nyquist para el material de electrodo LVP-Cit-CB y LVP-Cit-CNF 298 K.

Finalmente, a modo ilustrativo presentamos uno de los primeros prototipos de celdas de litio de estado sólido ensayadas en nuestro laboratorio.

Hemos utilizado el método de prensado por ser de los más económicos y dado que hemos utilizado materiales a base de óxidos para el electrolito y el cátodo, sumado a un ánodo a base de nanofibras de carbono, este procedimiento no requiere de costosas instalaciones de atmósferas libres de oxígeno.

Los primeros ensayos son favorables y en la actualidad nos encontramos estudiando el desempeño de las celdas conformadas con los materiales desarrollados y estableciendo sus periodos de vida útil a través de los estudios de ciclabilidad. Los primeros resultados son alentadores. En la figura 12 se muestra una fotografía de una celda del LVP-NB-CNF/ LBPB5/NF de 10 mm de diámetro y 0.7 mm de espesor.

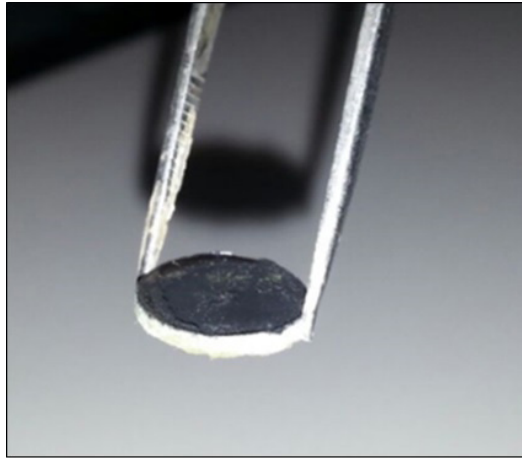


Figura 11: primer prototipo de celda de litio de estado sólido completamente desarrollada en el GFCIES de la Universidad Nacional del Sur.

## CONCLUSIONES

De los breves resultados que hemos presentado en este capítulo, podemos enumerar las siguientes ventajas y desventajas de los electrolitos sólidos y de los materiales para electrodos de nanocompuestos combinados con una fase secundaria de carbono aplicable a celdas de litio de estado sólido:

- Es posible considerar los materiales vítreos como buenos candidatos para ser utilizados como electrolitos en celdas de estado sólido. Entender la respuesta en base a su composición, y subestructura microscópica, es fundamental para controlar su respuesta eléctrica. Todas esas características dependen fuertemente de la mezcla de óxidos y la simulación de dinámica molecular -que no hemos desarrollado aquí- es una excelente técnica para aportar información de gran valor en este tópico [23-24].
- Se ha demostrado que el óxido de litio no provoca un cambio muy agresivo en una matriz vítrea, sino que se logra incorporar una gran concentración de

portadores en ciertas matrices vítreas y alcanza una movilidad suficiente como para comportarse como un buen electrolito sólido.

- Los resultados calorimétricos muestran que la incorporación de algunos los óxidos promueven matrices vítreas más prácticas, es decir, dentro de un rango de temperatura más amplio. Por otro lado, los diferentes óxidos de metales transición influyen significativamente en la estructura vítrea, principalmente en la temperatura de transición vítrea pero con una influencia menos significativa sobre su conductividad iónica.
- Para obtener un mejor conductor de iones de litio, la matriz vítrea de óxido de fosfato parece ser mucho más conveniente aunque los vidrios de borato-molibdeno son muy prometedores. Esta es una clara evidencia de que los movimientos de iones de litio dependen de la naturaleza del tipo de matriz vítrea. Por lo tanto, las modificaciones sutiles pueden provocar fuertes variaciones estructurales. Por esta razón, se necesita una fuerte investigación sistemática.
- La respuesta eléctrica de los vidrios conductores es reproducible y también estable en el tiempo, incluso después de varios ciclos de calentamiento-enfriamiento. Por lo tanto, son confiables como electrolitos en aplicaciones tecnológicas.
- Se han obtenido materiales de electrodo con recubrimiento de carbono por el método sol-gel utilizando ácido cítrico y oxálico como fuente primaria de carbono. Además, fueron probados utilizando una fuente extra de carbono como CB o CNF, siendo el recubrimiento CNF mejor que el recubrimiento CB.
- Una integración uniforme de otras formas de estructuras de nanocarbono en diferentes composiciones de polianión se presenta como un próximo paso prometedor. La sustitución del vanadio por un metal de transición “más verde” es fundamental. También, la sustitución de fosfato por otros polianiones como el silicato -de bajo costo- es una posibilidad interesante para buscar nuevos compuestos, lo que ofrecerá una oportunidad para aumentar tanto la energía como la densidad de potencia simultáneamente.
- La mejora de la magnitud de la conductividad del ion litio en las matrices vítreas es un hecho. Sin embargo, se necesita una investigación sistemática para esclarecer el vínculo matriz-movilidad.

Es innegable que la nanociencia y la nanotecnología son estimulantes y que abren campos de investigación prometedores para ser aplicados en el desarrollo de nuevas tecnologías para las energías “verdes”. Sin embargo, las propiedades de la nanodimensión en la ciencia de los materiales siguen siendo un gran desafío dado que a menudo surgen comportamientos muy diferentes al de los macromateriales y esto exige la creación de estrategias diversas si queremos obtener un rendimiento adecuado en su aplicación.

#### ACKNOWLEDGMENTS

Nuestros trabajos han sido posibles gracias a las siguientes fuentes de financiamiento: MINECO (project MAT2013- 48009-C4-3-P), ARCOIRIS ERASMUS MUNDUS ACTION 2 Lot16A (Argentina); PIP 11220120100010CO – CONICET (Argentina); PGI Q24/078; Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica: PICT 2016-0101. M.A.F es investigadora de CONICET y directora del GFCIES- UNS-INQUISUR.  
[https://scholar.google.com.ar/citations?hl=es&user=W-b6-0wAAAAJ&view\\_op=list\\_works&sortby=pubdate](https://scholar.google.com.ar/citations?hl=es&user=W-b6-0wAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate)  
[https://www.researchgate.net/profile/Marisa\\_Frechero](https://www.researchgate.net/profile/Marisa_Frechero)

#### REFERENCIAS

- [1] FORNILLO, B. (coord.) (2015). *Geopolítica del Litio Industria, Ciencia y Energía en Argentina*, 1<sup>º</sup> ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: El Colectivo ;CLACSO, ISBN 978-987-1497-75-1.
- [2] TIMMERMANS, J.M.; OMAR, N.; VAN MIERLO, J.; RODRIGUEZ-MARTINEZ, L.M.; VILLARRREAL, I.; SWIERCZYNSKI, M.; RODRIGUEZ, P.; WARNECKE, A.; GOSSO, M.; MARCKX, E.; JUTZ, G. y GAUTIER, L. (2020) *Batteries2020– A Joint European Effort towards European Competitive Automotive Batteries*. EVS28 International Electric Vehicle Symposium and Exhibition.
- [3] RUI, X.; YAN, Q.; SKYLLAS-KAZACOS, M.; LIM, T.M. (2014) *J. Power Sources* 258, pp. 19-38.
- [4] LIU, H.; GAO, P.; FANG, J.; YANG, G. (2011) *CHEM. COMMUN* 47, pp. 9110-9112, CUTLER, M.E.J.; BOYD, D. S.; FOODY, G. M. AND VETRIVEL, A. (2012) *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 70, pp. 66-7.
- [5] GORIPARTI, S.; MIELE, E.; DE ANGELIS, F.; DI FABRIZIO, E.; ZACCARIA, R.P.; CAPIGLIA, C. (2014) *J. Power Sources* 257, pp. 421-443.
- [6] SCROSATI, B.; GARCHE, J. (2010) *J. Power Sources* 195, pp. 2419-2430.

- [7] MONTANI, R.; LORENTE, A.; FRECHERO, M. (2002) *Solid State Ionics* 146 pp. 323-327.
- [8] MONTANI, R.A.; FRECHERO, M.A. (2003) *Solid State Ionics* 158 pp. 327-332.
- [9] MONTANI, R.A.; FRECHERO, M.A. (2006) *Solid State Ionics* 177 pp. 2911-2915.
- [10] FRECHERO, M.A.; QUINZANI, O.V.; PETTIGROSSO, R.S.; VILLAR, M. (2007) *J. of Non-Cryst. Solids* 353 pp. 2919-2925.
- [11] CARDILLO, E.C.; MONTANI, R.A.; FRECHERO, M.A. (2010) *Non-Crystalline Solids* 356 50-51, 2760-2763.
- [12] FRECHERO, M.A.; TERNY, C.S.; CARDILLO, E.C. (2013) *Lithium glasses: Improvements as solid electrolyte (Book Chapter) Lithium: Technology, Performance and Safety*. Nova Science Publishers, Inc., ISBN: 978-162417634-0.
- [13] BARSOUKOV, E.; MACDONALD, J.R. (2005) *Impedance Spectroscopy Theory, Experiment, and Applications*, 2nd ed., John Wiley and Sons, Inc., Publication, Hoboken, ISBN-10: 9780471647492, ISBN-13: 978-0471647492.
- [14] MACEDO, P.; MOYNIHAN, C.; BOSE, R. (1972) *Phys. Chem. Glasses*, 13, pp. 171-175.
- [15] MOYNIHAN, C. (1994) Dielectric relaxation in solids. In: *J. Non-Cryst. Solids*, 172-174, 1395-1407.
- [16] JONSCHER, A.K. (1999) *J. Phys. D: Appl. Phys.* 32, R57-R70.
- [17] <http://www.abc.chemistry.bsu.by/vi/analyser/>
- [18] DI PÁTULA, P.E.; TERNY, S.; SOLA, M. E. AND FRECHERO, M. A. (2016) Research and Reviews in *Materials Science and Chemistry* 7, 1, pp. 25-42 [www.jyotiacademypress.org/jyotic/journalview/21/article/38/65](http://www.jyotiacademypress.org/jyotic/journalview/21/article/38/65)
- [19] LIU, S.Q.; LI, S.C.; HUANG, K.L.; CHEN, Z.H. (2007) *Acta Phys. Chim. Sin.* 23, 537.
- [20] ZHANG, B.; LIU, J.Q.; ZHANG, Q.; LI, Y.H. (2010) *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 20, 619.
- [21] TERNY, S.; VEGA-CASTILLO, J.; DE LA RUBIA, M. A.; DE FRUTOS, J.; FRECHERO, M.A. (2019) *Materials Science & Engineering B* 241 pp. 66-74.
- [22] TERNY, S. AND FRECHERO, M.A. (2016) *Study of Phosphate Polyanion Electrodes and their performance with glassy electrolytes: potential application in Lithium ion solid state batteries*. Advanced Materials Series. published by WILEY-Scribner, USA. ISBN 978-1-119-24252-9.
- [23] FRECHERO, M.A.; DIPRÁTULA, P.E.; CARDILLO, E.; TERNY, S. (2014) Molybdenum oxide. Its positive action on ionic glasses conductors. *Molybdenum: Chemical and electrochemical properties, geological implications and industrial applications*. ISBN: 978-1-63321-210-7. Nova Science Publishers, Inc. 400 Oser Avenue, Suite 1600. Hauppauge, NY 11788.
- [24] BALBUENA, C.; MONTANI, R.A. AND FRECHERO, M.A. (2015) *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 432, pp. 400-409.

# TRATAMIENTO DE BIOMASA PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOENERGÍA

Gabriela Cristiano<sup>1</sup>

## RESUMEN

Desde hace unos años se ha puesto especial énfasis en el diseño de políticas vinculadas a disminuir la problemática que enfrenta el medio ambiente en materia de contaminación y degradación. En particular, en nuestro país se ha dado un gran impulso a la producción de energías renovables, estableciendo diversos programas de promoción de las mismas. Las actividades productivas vinculadas al sector agropecuario y agroindustrial generan residuos orgánicos, los cuales podrían ser sometidos a un cierto tratamiento de modo tal de mitigar las externalidades negativas que estos provocan. En este trabajo se propone presentar una alternativa conducente al desarrollo económico para proteger el medio ambiente mediante la aplicación de una tecnología que permite transformar la biomasa en energía calórica, aprovechando el contexto de políticas públicas que promueven el uso de energías sobre la base de biomasa. Se recopiló información primaria mediante entrevistas a actores clave de la región para estimar la cantidad de residuo orgánico proveniente de efluentes bovinos de un establecimiento localizado en la zona de influencia a Bahía Blanca (Buenos Aires) a los efectos de evaluar el potencial energético del mismo con miras a la obtención de biogás. Como resultado se obtuvo que, a partir del efluente generado por 500 cabezas de vacunos, es posible obtener 10.125 metros cúbicos de biogás por mes, el que podría ser empleado por la firma agropecuaria para autoconsumo, implicando ello una disminución de costos para la empresa.

---

<sup>1</sup> Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina  
Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (IIESS), Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur (UNS)-CONICET, Bahía Blanca, Argentina  
gcristiano@uns.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

Actualmente, los combustibles fósiles y la energía nuclear proporcionan cada año más del 80% de la energía que se utiliza en el mundo. Pero las reservas de combustibles fósiles son limitadas y, en mayor o menor grado, contaminantes. Desde mediados del siglo XX, con el crecimiento de la población, la extensión de la producción industrial y el uso masivo de tecnologías, comenzó a crecer la preocupación por el agotamiento de las reservas de petróleo y el deterioro ambiental.

Por otra parte, la mirada puesta hacia el deterioro del medio ambiente a nivel mundial ha comenzado a manifestarse hacia fines de 1960. Este tema fue paulatinamente formando parte de la agenda del sector público y de numerosos organismos internacionales. Esto conllevó a considerar con mayor profundidad los impactos ambientales que las actividades productivas que se insertan en un territorio traen aparejados. La contaminación del aire, del suelo y del agua atentan contra la productividad del sistema, afectando el bienestar de las generaciones futuras y a la sostenibilidad del mismo. “Tal como lo plantea Olade/Cepal/Gtz (2003), el desarrollo sustentable implica la evolución coordinada de la dimensión económica, social, política y ambiental” (Recalde, 2012). Esto pone en evidencia la urgente necesidad de implementar un eficiente plan de acción para llevar adelante una adecuada gestión y tratamiento de los residuos orgánicos generados por diversas actividades productivas, con la posibilidad de obtener subproductos inocuos para el medio ambiente y que, a su vez, puedan tener un valor de mercado, tales como el biogás y los biofertilizantes (Gruber et al, 2010; Bragachini, 2014). Estos subproductos también podrían ser utilizados intra-firma y representar un ahorro en costo en materia energética.

Las consecuencias medioambientales negativas de los combustibles fósiles y la incertidumbre acerca del suministro a tasa constante de petróleo y gas han estimulado la búsqueda de biocombustibles como energías alternativas; esto es, fuentes energéticas que pueden ser consideradas renovables. En este caso, la biomasa constituye un potencial interesante en el ámbito del ciclo económico. Desde entonces se impulsó el desarrollo de energías alternativas basadas en recursos naturales renovables y menos contaminantes, como la luz solar, las mareas, el agua y la biomasa (Di Paola, 2013).

Una forma de alcanzar un sendero de desarrollo con miras a la protección del medio ambiente es mediante el tratamiento de los residuos orgánicos. En este trabajo se expone un estudio de caso en el que se presenta la factibilidad de aplicar una tecnología que permite transformar la biomasa proveniente de estiércol vacuno de un establecimiento representativo de una región en energía calórica, aprovechando el

contexto de políticas públicas que promueven el uso de energías sobre la base de biomasa.

## **LA BIOENERGÍA EN ARGENTINA. ANTECEDENTES LEGALES**

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria posiciona a la bioenergía dentro de su agenda de trabajo a través de sus Programas Nacionales. Desde varias décadas atrás este organismo viene desarrollando estudios vinculados a temas bioenergéticos, los cuales se desarrollaron en torno a la gestión de los residuos animales para poder obtener biogás. Así, surgen el Programa Nacional de Bioenergía y la Red de Cooperación de Políticas Públicas Agropecuarias, abocados al estudio sobre Políticas Públicas en Agroenergía que contribuyan al equilibrio medioambiental y a reducir la pobreza. El programa apunta a impulsar emprendimientos que puedan asegurar un suministro energético basado en fuentes renovables, de modo de incrementar la participación de la bioenergía dentro de la matriz energética nacional. El programa se vincula con diversos organismos, ya sean nacionales o del exterior, lo cual contribuye a abordar de modo más eficiente los temas vinculados a la demanda energética. (Hilbert, 2011).

El INTA, en el marco del programa antes mencionado, preside la Comisión de Agricultura de la Iniciativa Global del Metano (Global Methane Initiative), que es una asociación mixta pública-privada. La meta propuesta es, a través de la generación de proyectos diversos, lograr reducir la cantidad de metano emitido al medioambiente, dado que éste es uno de los gases más importantes responsables del efecto invernadero. Esta organización está compuesta por 36 países, los cuales son responsables de más del 65% de las emisiones globales. La asociación se ha centrado en el desarrollo de proyectos provenientes de cuatro fuentes: agricultura, rellenos sanitarios, minas de carbón y sector petrolero y gas (Hilbert, 2011). Por otra parte, se encuentra el Proyecto para la Promoción de la Energía Derivada de Biomasa (PROBIOMASA), el cual tiene como misión transformar a los residuos orgánicos de índole animal y vegetal en biogás a los efectos de lograr una mayor diversificación energética. Fue lanzado en octubre de 2012 y participan en él, el Ministerio de Agricultura, la Secretaría de Energía y la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

En cuanto al marco legal, en nuestro país se han promulgado en los últimos años tres leyes que tratan sobre los biocombustibles. La Ley 26.093 “Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Autoridad de aplicación. Funciones. Comisión Nacional Asesora. Habilitación de plantas produc-

toras. Mezclado de Biocombustibles con Combustibles Fósiles. Sujetos beneficiarios del Régimen Promocional. Infracciones y sanciones”, promulgada de hecho el 12 de mayo de 2006, en su Artículo 5º define qué se entiende por biocombustible:

ARTICULO 5º — A los fines de la presente ley, se entiende por biocombustibles al bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación.

Por otra parte, la Ley 26.190, “Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Objeto. Alcance. Ámbito de aplicación. Autoridad de aplicación. Políticas. Régimen de inversiones. Beneficiarios. Beneficios. Sanciones. Fondo Fiduciario de Energías Renovables”, sancionada el 6 de diciembre de 2006 y promulgada de hecho el 27 de diciembre del mismo año, en su Artículo 2º, establece como meta que las energías renovables alcancen, en el término de una década, una participación del 8% del consumo de energía eléctrica dentro del total nacional.

ARTICULO 2º — Alcance - Se establece como objetivo del presente régimen lograr una contribución de las fuentes de energía renovables hasta alcanzar el OCHO POR CIENTO (8%) del consumo de energía eléctrica nacional, en el plazo de DIEZ (10) años a partir de la puesta en vigencia del presente régimen.

Por otra parte, el Artículo 6º promueve, desde distintos aspectos, la generación de bioenergía:

ARTICULO 6º — Políticas - El Poder Ejecutivo nacional, a través de la autoridad de aplicación, instrumentará entre otras, las siguientes políticas públicas destinadas a promover la inversión en el campo de las energías renovables:

- a) Elaborar, en coordinación con las jurisdicciones provinciales, un Programa Federal para el Desarrollo de las Energías Renovables el que tendrá en consideración todos los aspectos tecnológicos, productivos, económicos y financieros necesarios para la administración y el cumplimiento de las metas de participación futura en el mercado de dichos energéticos.
- b) Coordinar con las universidades e institutos de investigación el desarrollo de tecnologías aplicables al aprovechamiento de las fuentes de energía renovables, en el marco de lo dispuesto por la Ley 25.467 de Ciencia, Tecnología e Innovación.

- c) Identificar y canalizar apoyos con destino a la investigación aplicada, a la fabricación nacional de equipos, al fortalecimiento del mercado y aplicaciones a nivel masivo de las energías renovables.
- d) Celebrar acuerdos de cooperación internacional con organismos e institutos especializados en la investigación y desarrollo de tecnologías aplicadas al uso de las energías renovables.
- e) Definir acciones de difusión a fin de lograr un mayor nivel de aceptación en la sociedad sobre los beneficios de una mayor utilización de las energías renovables en la matriz energética nacional.
- f) Promover la capacitación y formación de recursos humanos en todos los campos de aplicación de las energías renovables.

El Artículo 14º, Inc. III, propone los incentivos de carácter económico para promover e impulsar el desarrollo y la producción de energía renovable, en el que se contempla la remuneración al kw/h producido a partir de la generación de biogás, entre otras energías:

ARTICULO 14º — INC III. Remunerar en hasta UNO COMA CINCO CENTAVOS POR KILOVATIO HORA (0,015 \$/kWh) efectivamente generados por sistemas de energía geotérmica, mareomotriz, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás, a instalarse que vuelquen su energía en los mercados mayoristas o estén destinados a la prestación de servicios públicos. Están exceptuadas de la presente remuneración, las consideradas en la Ley 26.093.

La Ley 27.191, que modifica a la Ley 26.190, promulgada el 15 de octubre de 2015 y reglamentada el 30 de marzo de 2016, en su Capítulo II, “Segunda Etapa del Régimen de Fomento Nacional para el Uso de fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Período 2018-2025”, Artículo 5º, propone como objetivo que las energías renovables alcancen el 20% del total del consumo de energía eléctrica de la nación hacia fines de 2025:

ARTÍCULO 5º — Se establece como objetivo de la Segunda Etapa del “Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica” instituido por la ley 26.190, con las modificaciones introducidas por la presente ley, lograr una contribución de las fuentes renovables de energía hasta alcanzar el veinte por ciento (20%) del consumo de energía eléctrica nacional, al 31 de diciembre de 2025.

## EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIOGÁS

Los rumiantes, a través de sus excretas, liberan gases a la atmósfera –entre ellos gas carbónico y metano-, los cuales deterioran la capa de ozono y al contribuyen calentamiento global. El metano producido se genera principalmente por los procesos fermentativos del alimento que ingresa al rumen del animal. Las bacterias anaerobias metanógenas son las que llevan adelante el proceso de producción de metano, las cuales emplean para su generación, entre otros gases, el hidrógeno y el dióxido de carbono. “La digestión anaerobia es el proceso biológico por el cual se descompone la materia orgánica para dar lugar a un gas combustible (biogás), mayoritariamente formado por metano ( $\text{CH}_4$ ) en un 55- 70% y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ )” (Flotats, 2010, p. 23).

El proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica (estiércol), el cual se realiza en ausencia total de oxígeno o nitratos, produce un gas combustible que está compuesto de un elevado porcentaje de gas metano. En este tipo de procesos producen conjuntamente la transformación y depuración de la materia orgánica, la cual conlleva a la generación de este gas. Esto se realiza en instalaciones cerradas, especialmente diseñadas para optimizar este proceso, denominadas biodigestores, los cuales se detallarán más adelante. Esta técnica simple permite abastecer parcial o totalmente la demanda energética en las zonas rurales, contribuye a disminuir la deforestación que se origina a partir de la tala indiscriminada con el propósito de obtener leña y permite reciclar los desechos de las actividades agropecuarias. Teniendo en cuenta estudios realizados en la producción aviar, “los cambios en el manejo de las deyecciones en una granja, con tratamiento de éstas, se tradujeron en una mejora de la calidad del aire de las naves, una reducción de la mortalidad en un 57%, un incremento en el aumento diario de peso en un 11%, unas tasas de conversión incrementadas en un 5,4% y un aumento de las ventas de peso vivo en un 5,6%” (Flotats, 2010).

De acuerdo a Xavier Flotats (Flotats, 2010), el tratamiento de las excretas de origen animal, luego de un proceso de digestión anaerobia, contribuye a:

1. Reducir los malos olores. Esto es debido a la descomposición de compuestos orgánicos volátiles que se transforman en metano y dióxido de carbono durante la digestión anaeróbica controlada; caso contrario, serían emitidos a la atmósfera. Estos gases pueden emplearse para obtener gas y electricidad.
2. Reducir el contenido de huevos y larvas de insectos, semillas de malezas y microorganismos patógenos que suelen encontrarse en los excrementos.

3. Disminuir la viscosidad y tamaño de las partículas. Este efecto tiene una incidencia positiva en la infiltración de los digestatos (residuos obtenidos a partir de la digestión anaerobia) en el suelo, ya que reduce la pérdida por volatilización de nitrógeno amoniacal durante la aplicación agrícola. Esto hace que estas deyecciones digeridas sean aptas para la fertilización, sin efectos nocivos posteriores (si es que se lo compara con el empleo de las deyecciones sin tratamiento previo). Cabe mencionar que esto es posible a raíz de que, en el proceso de digestión anaerobia, el nitrógeno gaseoso se transforma en amoníaco y, luego de ser disuelto en agua, queda a disposición de las plantas como nutriente. Los efluentes líquidos son más ricos en nitrógeno que en potasio, mientras que los más densos, como los obtenidos de paja y pasto fermentado, son relativamente más ricos en fósforo.

El proceso de digestión anaeróbica tiene lugar en un biodigestor. Es un tipo de tecnología muy simple, que consta de un contenedor cerrado, hermético e impermeable, denominado reactor. En él se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales -excepto los cítricos porque son acidificantes-) con un cierto porcentaje de agua. A través de la fermentación anaerobia se obtiene gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio. De esta forma, se disminuye el potencial contaminante de los excrementos y se da paso a la generación de un tipo de energía limpia y renovable, como lo es el biogás.

Un biodigestor es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales -no se incluyen cítricos ya que acidifican-, etc.) en determinada dilución de agua para que a través de la fermentación anaerobia las bacterias produzcan gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio (Solé y Flotats, 2004).

Para la obtención de biogás se puede utilizar como materia prima los excrementos animales, la cachaza de la caña de azúcar, los residuales de mataderos, destilerías y fábricas de levadura, la pulpa y la cáscara del café, así como la materia seca vegetal, entre otras. Esta técnica permite resolver parcialmente la demanda de energía en zonas rurales, reduce la deforestación debida a la tala de árboles para leña, permite reciclar los desechos de la actividad agropecuaria y es un recurso energético "limpio" y renovable.

El biogás puede ser utilizado igualmente como combustible en quemadores para la calefacción de pollos, cerdos y otros animales recién nacidos, para la iluminación

mediante lámparas incandescentes. También puede ser utilizado como combustible único para refrigeradores, calentadores de agua y secadores de granos y forrajes. Habitualmente, se utiliza como segundo combustible en motores de explosión estacionarios o móviles, cuya iniciación se hace con diesel o gasolina.

El residuo orgánico del biodigestor, “el biol o biofertilizante”, se presenta como una suspensión de barros en agua estabilizada biológica y fisicoquímicamente (es decir, no se seguirá degradando biológicamente o lo hará muy lentamente en el suelo); luego del proceso anaeróbico de las bacterias, pierde todo el olor característico de la basura (Varnero Moreno, 2011).

Se ha comprobado que el nitrógeno, fósforo y potasio permanecen en “el desecho” luego del proceso de fermentación. Por lo tanto, este fertilizante es más rico que el “humus” y de granulación más fina que el estiércol, lo que facilita su penetración y mezcla en el suelo. Se utiliza en el mejoramiento de los suelos arcillosos y arenosos, que son pobres en humus, y como medio nutritivo de los vegetales bajo cultivo hidropónico y cultivos orgánicos en invernadero o en el campo. También puede ser utilizado como alimento para animales mezclándolo para mejorar su “gustocidad”, con granos, tortas, miel, forrajes ya que el afluente puro posee una concentración de aminoácidos similares a los granos de soja (Varnero Moreno, 2011).

## ESTUDIO DE CASO

En los párrafos siguientes se abordará el caso de un productor representativo de la región de CORFO, Río Colorado. Esta zona se localiza al sur de la provincia de Buenos Aires. Constituye un valle fértil, el que está irrigado por más de 5000 Km de canales, los cuales llevan el agua del Río Colorado. Esta área se constituye en una de las principales cuencas hídricas del país.

Este establecimiento agropecuario posee 300 hectáreas y la infraestructura y equipamiento necesarios para llevar adelante el engorde a corral (*feedlot*) de 500 cabezas de ganado vacuno.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente, se considerará la posibilidad de producir biogás a partir del tratamiento de los efluentes generados en dicho establecimiento (heces + orina). Al estar emplazada en un área irrigada, la preservación del recurso hídrico se torna vital para el crecimiento de la región. La ley que regula este tipo de actividad productiva en la provincia de Buenos Aires -sancionada

el 30 de noviembre de 2016-, constituye el marco institucional propicio para comenzar a considerar esta problemática. Específicamente, en sus Artículos 4º y 5º, hace referencia a la obligatoriedad de realizar un estudio de impacto ambiental, el cual deberá incluir, entre otros, un estudio de los recursos hídricos superficiales y subterráneos, como así también un plan integral de gestión de residuos.

Según Aníbal Pordomingo (Pordomingo, 2014), considerando la digestibilidad de la dieta del vacuno, un novillo de 450 kg produce un promedio diario de 27 kg de excrementos húmedos (orina y heces), con una variación de 25% (dependiendo del clima, el consumo de agua y el tipo de dieta). En este caso, el establecimiento, con 500 cabezas de ganado, produce diariamente 13,5 tn de estiércol, lo que mensualmente arroja 405 tn. Este estiércol, sometido al tratamiento de digestión anaeróbica, genera biogás y biofertilizante.

Teniendo en cuenta que a partir de una tonelada de excrementos húmedos proveniente de ganado vacuno es posible obtener 25 m<sup>3</sup> de biogás (Pordomingo, 2014), en este establecimiento se generarían 10.125 m<sup>3</sup> de biogás al mes.

El biogás proveniente de estiércol bovino es un gas pobre, ya que la eficiencia de conversión es baja. Es decir, por cada tonelada de residuo se obtiene entre 20 y 30 m<sup>3</sup> de biogás (Flotats, 2010). Por otro lado, 1 m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,6 m<sup>3</sup> de gas natural. Por lo tanto, los 10.125 m<sup>3</sup> producidos mensualmente serían equivalentes a 6.075 m<sup>3</sup> de gas natural.

Lo mencionado anteriormente puede ser expresado en términos de los tubos de gas propano empleados frecuentemente por el productor agropecuario. Cada tubo de 45 Kg equivale a 58,4 m<sup>3</sup> de gas natural. Es decir, entonces, que el productor podría sustituir unos 104 tubos de gas al mes mediante el tratamiento de los residuos generados por su actividad productiva.

A los efectos de cuantificar y valorar los 104 tubos de gas, se tomó como referencia el precio promedio de mercado de los tubos, el que actualmente asciende a \$1500. Teniendo en cuenta el valor del dólar de \$28,50 al 29 de junio de 2018, cada tubo tiene un costo de U\$S 53 para el productor. Los 104 tubos representarían un ahorro de U\$S 5.512 al mes. Si bien esto no significa que el productor emplee necesariamente esa cantidad de tubos (ya que, en todo caso, dependerá de la naturaleza del proceso productivo energético intensivo que realice en forma conjunta con la actividad de base, que es la ganadería), el resultado sirve de ejemplo a los efectos de mostrar la conveniencia de tratar la biomasa generada en el establecimiento. A ello habría

que sumarle el valor del fertilizante obtenido, que es el sustrato final digerido resultante del proceso de digestión anaeróbica, equivalente a unos U\$S 5.700 anuales (Cristiano, 2018).

En este trabajo no se consideró la inversión inicial ni los costos asociados al proceso de digestión anaeróbica, ya que el objetivo fue mostrar la potencialidad que reviste esta tecnología para el productor, como así también para la sociedad en su conjunto al disminuir los impactos negativos hacia el medio ambiente.

Para finalizar, es interesante mencionar los resultados a los cuales arriba un estudio reciente (Chorkulak, 2016), en el que se evaluó el potencial que reviste nuestro país para generar biogás a partir de sistemas productivos cárnicos en confinamiento. En él se analizó la capacidad de generación de biogás considerando la totalidad de establecimientos de producciones intensivas de ganado bovino, cerdos y aves. "(...) la capacidad del país de producir biogás, tomando en consideración las actuales existencias animales en sistemas de confinamiento, es de 18.249 MW/h, permitiendo cubrir más de la mitad de la demanda energética actual del país" (Chorkulak, 2016, p. 65). Por otra parte, en ese mismo trabajo se analizaron diversos casos en los que se calculó la rentabilidad de diferentes tipos de producciones intensivas que trataron sus residuos orgánicos por medio de digestores anaeróbicos, los cuales arrojaron diferentes rentabilidades en base a escala y tecnología aplicada (de punta, media y baja).

## CONCLUSIONES

La preocupación por el medio ambiente ha llevado a crear marcos institucionales tendientes a morigerar los impactos negativos que las diferentes actividades productivas generan. En particular, tanto el sector agropecuario como el agroindustrial -los cuales ocupan un rol fundamental en la economía del país- son generadores de un importante volumen de residuos orgánicos (biomasa). Las nuevas modalidades de producción -tal como es el caso de la actividad ganadera que produce carne vacuna bajo la modalidad feedlot-, ponen de manifiesto la necesidad de realizar un tratamiento a estos residuos, posibilitando obtener biogás (que puede ser aprovechado por el establecimiento agropecuario), impactando en una reducción en el costo de energía calórica de la firma.

Este es un gas que se obtiene a partir del proceso de digestión anaeróbica de los residuos orgánicos, la cual tiene lugar en los biodigestores. Por otra parte, el sustrato digerido o biofertilizante proveniente del mencionado proceso puede ser empleado

como abono orgánico sobre el suelo, ya que es rico en macronutrientes, tales como nitrógeno, fósforo y potasio. Esto también implicaría un ahorro en costos en términos de fertilizantes. El tratamiento adecuado de los residuos contribuye a reducir o hasta en algunos casos eliminar los impactos negativos que se originan en la producción, protegiendo de esta forma al medio ambiente.

## REFERENCIAS

- [1] AGUILERA KLINK, F. y ALCÁNTARA, V. (2011) *De la economía ambiental a la economía ecológica*. CIP-Ecosocial. Barcelona.
- [2] BRAGACHINI, A.M.; MATHIER, A.D. y MÉNDEZ, A.J. (2014) *Oportunidades del sector agropecuario y agroindustrial argentino para la generación de bioenergía en origen*. Jornada Nacional de Forrajes Conservados. 09 y 10 de abril de 2014. Manfredi, Córdoba. AR.
- [3] DI PAOLA, M.M. (2013) *La producción de biocombustibles en Argentina*. Disponible en <https://www.google.com.ar/#q=la+produccion+de+biocombustibles+en+argentina>
- [4] FLOTATS, X. (2010) Biogás y gestión de deyecciones ganaderas, en *SUIS/IVIS*, (72), 22-29.
- [5] GRUBER, S.; HILBERT, J.A. y SHEIMBERG, S. (2010) Una planta de biogás en base de estiércol animal en mezcla de silaje forrajeras de maíz en el marco agropecuario argentino. INTA. *Estudio de caso preliminar de generación eléctrica de 1 MW con una planta de biogás de alta eficiencia*. N° Doc BC-INF-16-10. 28/10/2010.
- [6] HILBERT, A. et al (2011) *Programa Nacional del INTA PNB 2011*. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/programa-nacional-de-bioenergia-del-inta-pnb>
- [7] INTA (2014) El tratamiento de los residuos, clave en la gestión ambiental. Disponible en <http://intainforma.inta.gov.ar/?p=24508>
- [8] Ley N° 26093: Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Autoridad de aplicación. Funciones. Comisión Nacional Asesora. Habilitación de plantas productoras. Mezclado de Biocombustibles con Combustibles Fósiles. Sujetos beneficiarios del Régimen Promocional. Infracciones y sanciones. Disponible en <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/115000-119999/116299/norma.htm>
- [9] Ley N° 26190: Régimen de Fomento Nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica. Objeto. Alcance. Ámbito de aplicación. Autoridad de aplicación. Políticas. Régimen de inversiones. Beneficiarios. Beneficios. Sanciones. Fondo Fiduciario de Energías Renovables.

Disponible en <http://infoleg.mecon.gov.ar/infolegInternet/anexos/120000-124999/123565/norma.htm>

- [10] Ley N° 27191: Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación. Disponible en <http://www.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/250000-254999/253626/norma.htm>
- [11] PAMPURO, J.M. (2015) *Diseño del feedlot bovino y aprovechamiento de sus efluentes*. Documento de trabajo disponible en la Biblioteca Digital de la Universidad Católica Argentina.
- [12] PORDOMINGO, A. (2014) *Efectos ambientales de la intensificación ganadera*. Edic. INTA. INTA Anguil. La Pampa.
- [13] RECALDE, M. (2012) Una visión integrada del desarrollo del biodiesel en Argentina en *Estudios, Sociedade e Agricultura*, (20), 188-216.
- [14] SOLÉ, F. y FLOTATS, X. (2004) *Guía de técnicas de gestión ambiental de residuos agrarios*. Lérida. Ed. Fundació Catalana de Cooperació.
- [15] VARNERO MORENO, M.T. (2011) *Manual de biogás*. Santiago de Chile. FAO.

# LA BIOMASA COMO RECURSO ENERGÉTICO EN LA REGIÓN CUYANA

José Nicolás Martín<sup>1</sup>; Emmanuel Carrasco<sup>1</sup>; Silvia Poetta<sup>1</sup>; Andrea Hidalgo<sup>1</sup>

## RESUMEN

Se presenta el estado actual de los proyectos que abordan la biomasa como recurso energético en la región de Cuyo. Se revisan conceptos básicos, estudios de disponibilidad, experiencias desarrolladas en el marco de la Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo) en red con otras instituciones y la sociedad. Un último apartado bosqueja las oportunidades y desafíos para el desarrollo de la biomasa con fines energéticos.

La biomasa, como el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o resultante de una transformación de estas, presenta gran versatilidad, permitiendo obtener combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, mediante diferentes procedimientos.

Diversos estudios determinan la disponibilidad de biomasa propensa a ser utilizada como energía, proveniente de cultivos de vid, olivo, frutales, hortalizas, y de la actividad agropecuaria regional. En la provincia de Mendoza, podrían obtenerse 1,4 millones de tn/año de material biomásico seco para generar energía y 1.783 tep/año de material biomásico húmedo para biogás.

El uso de biomasa seca se centra principalmente en emprendimientos privados que reutilizan sus residuos para generar calor. La utilización de biomasa húmeda se ve restringida, según un estudio nacional de INTI, a 105 plantas de biogás de las cuales sólo el 4% es con fines netamente energéticos.

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias. Almirante Brown 500 C.P.5505 Chacras de Coria, Mendoza-Argentina. Correo electrónico: [ahidalgo@fca.uncu.edu.ar](mailto:ahidalgo@fca.uncu.edu.ar)

La UNCuyo realiza experiencia en investigación, desarrollo y formación de profesionales, en proyectos referentes al aprovechamiento de biomasa con fines energéticos y como método de saneamiento ambiental. Cabe citar los desarrollos en biogás a partir de residuos de las cadenas agropecuarias regionales, generación de biodiesel, recuperación de metano de vertederos de RSU, formación de profesionales de grado y posgrado e intercambio de conocimientos con el medio.

La biomasa se presenta como una fuente confiable y disponible de energía, con amplio desarrollo científico tecnológico, poco explotada en la región. Se reconoce su factibilidad técnica, económica y ambiental con ventajas sociales, generación de empleo y descentralización de energía. Vincula transversalmente muchas disciplinas y actividades económicas. Su despegue se asocia principalmente a la falta de políticas de Estado, que fomenten su aplicación desde el nivel hogareño al industrial.

## ¿QUÉ SE ENTIENDE POR BIOMASA?

Se considera biomasa a todas aquellas sustancias orgánicas que fueron formadas a partir de los compuestos de carbono elaborados mediante el proceso de fotosíntesis, que pueden haber sido sometidas o no a diferentes procesos de transformación, y que son susceptibles de ser utilizadas por debajo de su tasa de renovación natural (en cantidad producida por unidad de tiempo). No se incluyen por tanto en la definición a los combustibles fósiles que, si bien tienen un primer origen en los compuestos formados en la fotosíntesis, se usan muy por encima de su tasa de renovación (tardan millones de años en formarse) [1].

Diferentes sistemas de clasificación han sido propuestos en la búsqueda de incluir todos los tipos de biomasa que pueden ser utilizados con fines energéticos. Muchas veces estas clasificaciones aparecen combinadas, algunas de las más importantes se detallan a continuación (figura 1).



Figura 1: Clasificación combinada de los recursos de biomasa.  
Donde RSU: Residuos Sólidos Urbanos. Fuente: [1].

Desde el punto de vista energético, resulta más conveniente considerar los recursos de biomasa según su contenido de humedad, que tendrá una casi directa relación con el proceso de conversión energética a aplicarse:

- Biomasa Seca (BS): Aquella que puede obtenerse en forma natural con un contenido de humedad menor al 50%, como residuos (forestales, agrícolas y agroindustriales), cultivos energéticos (anuales o perennes). Lo ideal para su aprovechamiento energético es el empleo de procesos termoquímicos.

- **Biomasa Húmeda (BH):** Se denomina así cuando el porcentaje de humedad supera el 50%, como por ejemplo en aguas residuales (urbanas, ganaderas, industriales), residuos sólidos urbanos-RSU (considerando la fracción orgánica, susceptible de ser tratada mediante un proceso biológico). Resulta adecuada para su tratamiento mediante procesos bioquímicos, o en algunos casos particulares, mediante simples procesos físicos, obteniéndose combustibles líquidos y gaseosos.

Esta clasificación no es definitiva, ya que todo tipo de recurso puede ser empleado utilizando cualquier proceso si la biomasa es sometida a pre-tratamientos para su adecuación (reducción de humedad, tamaño, eliminación de componentes no deseados, etc.). Sin embargo, mientras mayor cantidad de pre-tratamientos sean incorporados, menor será el margen energético obtenido y más altos los costos generados [1].

## **DISPONIBILIDAD Y POTENCIAL DE USO DE BIOMASA COMO ENERGÍA EN LA REGIÓN DE CUYO**

La búsqueda de nuevas fuentes de energías es esencial para el desarrollo sustentable, siendo de interés para los países desarrollados por la reducción de las emisiones de dióxido de carbono y en el caso de países en vías de desarrollo como una necesidad de aumentar la oferta energética y el acceso a la electricidad en zonas aisladas.

Por ello, adquiere relevancia la inclusión de las Energías Renovables en nuestra matriz energética, teniendo en cuenta los diversos recursos que disponen las regiones de nuestro país, tales como la factibilidad técnica, económica y ambiental. Dicha inclusión trae aparejado el desarrollo de la industria nacional y la generación de empleo, contribuyendo a la mitigación del cambio climático y mejorando la calidad de vida de la población.

Dado que nuestro país se caracteriza por un sólido sector agropecuario y agroindustrial, la producción de granos, carnes, productos lácteos, alimentos, etc., genera una gran cantidad y diversidad de residuos y subproductos [2]. Dichas características convierten a la Argentina en un gran productor de biomasa con potencial energético.

Según un relevamiento realizado en el año 2014 por el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) que tuvo por objetivo la realización de un diagnóstico de carácter nacional de los antecedentes en biodigestión anaeróbica, existen en nuestro país, 105 plantas de biogás de las cuales un 33% tiene fines educativos y/o de investigación y un 54% de las plantas de bio-

digestión anaerobia se construyen para tratamiento de efluentes cloacales y/o valorización de la Fracción Orgánica de los Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) [3].

La región de Cuyo, conformada por las provincias de Mendoza, San Luis y San Juan, es reconocida en el sector productivo por la excelencia de sus uvas y su producción vitivinícola.

*Mendoza:* posee diversidad en su producción agrícola: uva, aceituna, ajo, ciruela y durazno para industria, papa, damasco, cebolla, zanahoria, cereza, orégano, maíz para choclo, lechuga. Región ganadera, olivícola y de la industria conservera y de deshidratados.

*San Luis:* En la agricultura el principal cultivo es el maíz, lo siguen el sorgo granífero, soja y la avena. En cuanto a ganadería prevalece el ganado vacuno y caprino. Otras actividades son la apicultura y la avicultura.

*San Juan:* La economía se fundamenta en la agricultura, esencialmente en el cultivo de la vid y un importante potencial como productor de aceite de oliva y aceitunas en conserva. Se destaca la producción de cebolla y ajo y frutas como ciruelas, durazno y damasco.

En la provincia de Mendoza, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) utiliza la metodología WISDOM para determinar la cantidad de biomasa seca y húmeda disponible, identificando oferta, demanda y balance de diversos tipos de biomasa. Estudios específicos a nivel de oasis irrigado o a nivel de tipo de residuo también aportan datos de cómo se producen, distribuyen y podrían utilizarse los distintos recursos biomásicos [4].

Cabe destacar que la oferta de biomasa seca en la provincia con fines energéticos se produce a partir de los cultivos de vid, olivo, otros frutales, forestaciones y hortalizas, como así también de bosques nativos y otras formaciones leñosas. FAO (2017)<sup>1</sup> denomina a esta biomasa de oferta directa y alcanza 1.226.024 tn/año. La oferta indirecta es de 169.791 tn/año, propia de la actividad agroindustrial de bodegas, frigoríficos de frutas y verduras, poda urbana y secaderos de frutas y verduras (figura 2) [4].

---

1 Datos relevados en el año: 2009 (olivos, secaderos de frutas y hortalizas, frigoríficos frutihortícolas, poda urbana); 2011 (frutales); 2013 (bosque nativo y otras forestaciones); 2015 (cultivo de vid, ajo y bodegas).

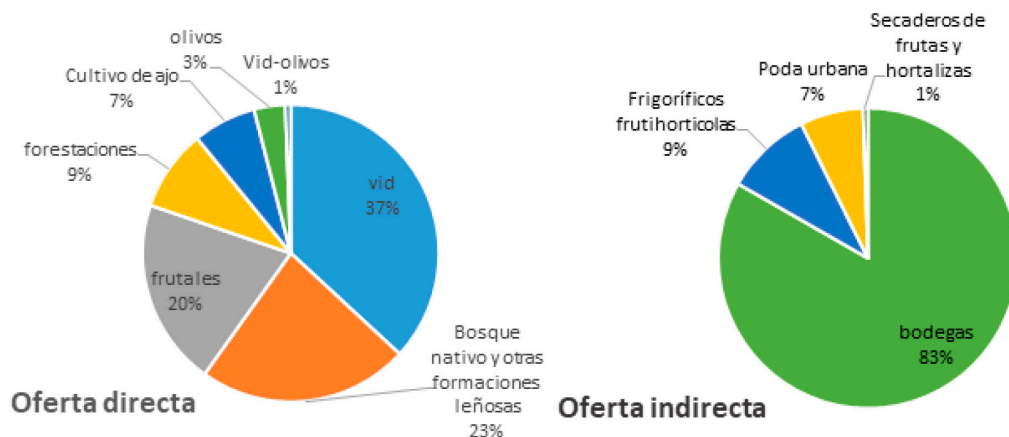


Figura 2: Oferta de biomasa directa e indirecta en la provincia de Mendoza.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de [4].

Si tenemos en cuenta la demanda de biomasa, se estima la siguiente distribución por sector:

- Sector industrial: 10.750 tn/año de leña y carbón vegetal usado por ladrilleras, de zonas periurbanas.
- Sector residencial: 6.600 tn/año para calefacción y cocción de alimentos, donde un 54% se demanda en los oasis.

Al realizar un balance se demuestra un excedente de 1.378.465 tn/año, a lo que se le debe sumar la oferta resultante de biomasa húmeda (1783 tep/año proveniente de tambos, porcinos y *feedlots*), disponible para ser utilizada en biodigestión.

$$\text{Balance (oferta directa + indirecta) - (demanda industrial + residencial) = 1.378.465 tn/año}$$

Lo cual evidencia que la provincia de Mendoza posee un enorme potencial bioenergético debido al volumen y a la amplia variedad de fuentes de biomasa seca y húmeda existente, susceptible de ser aprovechada para producir energía renovable [5].

Es imprescindible tener en cuenta además de lo expuesto, la accesibilidad y la distribución geográfica y temporal de esta biomasa, pues ello determina el grado de aprovechamiento de todo recurso biomásico.

Cabe destacar que el mayor potencial energético, de acuerdo al balance realizado entre oferta y demanda energética de biomasa, se sitúa en el área comprendida por los oasis Norte, Centro y Sur, coincidiendo, con las zonas más productivas de la provincia. Según los datos relevados San Rafael, San Martín y General Alvear, son los que disponen del mayor volumen de biomasa para ser empleada con fines energéticos y los departamentos con mayor demanda de biomasa son Las Heras, San Rafael y Llavalle, debido al consumo de leña y carbón que realizan las ladrilleras situadas en ellos.

En la figura 3 se puede observar los resultados del análisis de oferta y demanda de biomasa con fines energéticos, realizado por radio censal, a partir del cual se ponen en evidencia las siguientes zonas:

- con baja o nula disponibilidad, como en el departamento de Malargüe, debido a ser un sector con temperaturas poco favorables al ser muy bajas para el desarrollo de vegetación,
- con déficit de biomasa, en los departamentos de Guaymallén y Las Heras (-274 y -261 tn/año respectivamente),
- con superávit en biomasa, corresponden a zonas muy productivas o también a extensas superficies,
- con una importante cobertura de bosque nativo, en las cuales la demanda es muy baja.

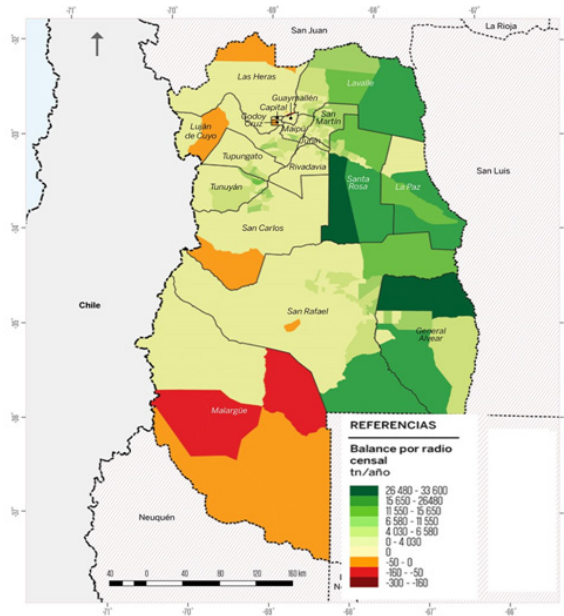


Figura 3: Balance de biomasa [tn/año] por radio censal para la Provincia de Mendoza. Fuente: Denaday F. en [5].

## EXPERIENCIAS DE UTILIZACIÓN DE BIOMASA CON FINES ENERGÉTICOS

Se presentan múltiples experiencias en relación al aprovechamiento energético de la biomasa que han sido llevadas a cabo principalmente en el ámbito de la Universidad Nacional de Cuyo sin dejar de lado las realizadas en otras instituciones u organizaciones. Algunas de ellas han sido concretadas y otras están actualmente en desarrollo.

### 1. BIOGÁS

*Codigestión anaerobia de guano de gallina con residuos orgánicos generados por la fábrica de aceite de oliva de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo.* Se evaluó la viabilidad metanogénica de los residuos orgánicos de la producción de aceite de oliva en la Fábrica de la Facultad de Ciencias Agrarias-UNCuyo, en codigestión con Guano de Gallina [6].

*Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos.* Diseño básico de ingeniería de una planta de biodigestión anaeróbica seca, con aprovechamiento del biogás y del lodo generado; y evalúa económicamente una propuesta tecnológica para el tratamiento de la fracción mayoritaria de los RSU [7].

*Sistema tecnológico integrado para generación de energía: Estimulación de la producción de Biogás en rellenos sanitarios con ingreso de efluentes líquidos tratados.* Producción de gas combustible a partir de los RSU depositados en El Borbollón, Las Heras, para generar energía eléctrica a partir del metano [8].

*La presencia de metales pesados en los residuos de la agroindustria mendocina y su factibilidad para su aprovechamiento en la obtención de biogás y en la elaboración de alimentos balanceados para animales.* Se determinaron de metales pesados en residuos de la industria agroalimentaria y se evaluó la factibilidad de uso como materia prima para alimentos balanceados y biogás [9].

*Tratamiento integral de residuos sólidos de mercados de concentración agrícolas de Mendoza.* Estableció un mecanismo de recolección, clasificación y tratamiento primario de residuos en los mercados de concentración de frutas y hortalizas de Mendoza, planteando la reutilización de los mismos, ya sea como generación de energía (biogás), alimento de animales o compost [5].

*Planta Experimental de Biogás de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo.* Se llevan a cabo estudios del Potencial de generación de Biogás a partir de residuos agroindustriales, generados en la provincia de Mendoza. Se busca encontrar una relación entre la composición de la biomasa empleada y la calidad de biogás producido, a través de experimentación en planta piloto y a nivel laboratorio. También tiene como finalidad promover los conocimientos y experiencias técnico-científicas por medio del trabajo académico y la enseñanza universitaria sobre la producción de biogás con la finalidad de generar energía térmica y eléctrica, y establecer relaciones Universidad - Instituciones Nacionales - Empresa, incentivar y propiciar la innovación y facilitar la transferencia de biotecnología desde la Universidad al medio por medio del conocimiento institucionalizado y de los ingenieros egresados [10].

*Criadero de cerdos con producción de biogás - Yanquetruz, provincia de San Luis.* Emprendimiento que dispone de biodigestores industriales que producen biogás a partir de purines de cerdo, silo de sorgo y de maíz. Generan electricidad y energía calórica para calefaccionar el criadero Están insertos en el programa renovar con una potencia eléctrica de 1,2 MW. Asociación de Cooperativas Argentinas (ACA), provincia de San Luis [11].

*Manual de uso de biodigestores / Manual de construcción de biodigestores.* Guía para el uso y construcción de un biodigestor. Contempla procesos de operación del biodigestor, rendimiento, tipos de residuos que pueden utilizarse, y recomendaciones para el mantenimiento de los mismos [12].

*Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás en colegio Técnico-Rural - Escuela N° 4-035 Julia Silva De Cejas, Tunuyán.* Construcción de un biodigestor que proveerá gas a los invernaderos de la escuela y al domicilio del personal que cuida el establecimiento [13].

*Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás en colegio Técnico-Rural - Escuela Moisés J. Chade.* Busca concientizar en energías renovables, medio ambiente, construcción de biodigestores y manejo de residuos a alumnos del establecimiento. Produce biogás para suplir las demandas energéticas del comedor escolar [13].

## 2. BIOCOMBUSTIBLES

*Uso de aguas residuales urbanas en el riego de colza (Brassica napus L.) con destino a biocombustible.* El aceite de colza es comestible y también puede utilizarse en la producción de biodiesel. Cuando el destino es el energético, puede regarse con aguas residuales urbanas o cloacales. Se compara el rendimiento de un cultivar regado con agua cloacal y agua subterránea, y su potencial para producir biodiesel [14].

*Experiencias con cultivos energéticos en Mendoza.* El trabajo presenta una síntesis de experiencias en investigación de cultivos energéticos como colza, cártamo y topinambur, en la provincia de Mendoza. Se exponen además los resultados de la utilización de aguas residuales para el riego de estos mismos cultivos [15].

*Análisis de pre inversión para generar energías renovables usando SYNGAS producido por los residuos sólidos de agro industria vitivinícola -San Juan.* Utilización de residuos sólidos derivados de la actividad agroindustrial vitivinícola para satisfacer la demanda socio-industrial de energías (térmica y eléctrica) originada por el fuerte impulso productivo de la industria minera zonal [5].

## 3. BIOMASA LEÑOSA

*Eucalyptus camaldulensis Dehnh productividad en cultivos energéticos bajo riego.* Implantación de cultivos energéticos con especies forestales para obtener biomasa y posteriormente transformarla en energía. Por ello, se instaló en Mendoza un cultivo de Eucalyptus camaldulensis Dehnh regado con agua de efluentes domiciliarios [16].

*Estudios de mejoramiento de hornos solares a partir del uso híbrido con biomasa.* Diseño de un horno solar para cocción de alimentos en combinación con energía de biomasa. Se presenta como una opción al utilizar una fuente auxiliar para permitir la cocción en el mismo dispositivo en condiciones de baja insolación [17].

*Evaluación experimental del funcionamiento de una estufa rusa mejorada instalada en una vivienda unifamiliar de San Rafael Mendoza.* Estudio teórico-experimental del funcionamiento de una estufa de mampostería con hogar cerrado y horno para cocción de alimentos (estufa rusa) empleada en la calefacción de una vivienda de San Rafael, Mendoza [18].

*Leña ecológica en San Rafael-Mendoza.* Se recolectan las hojas secas, restos de poda, rastrojos, papeles. La briqueta obtenida se seca al sol, y se entrega a familias de escasos recursos que la utiliza para cocinar o calefaccionar [5].

*Estudio ambiental y social del ciclo de vida de la producción de ladrillos artesanales, utilizando combustibles tradicionales y alternativos en el Algarrobal, Mendoza: evaluación de daños en los recursos naturales, en la calidad de los ecosistemas y en la salud humana.* Trabajo correspondiente a una tesis de grado, en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, en la que se determina la conveniencia del uso de combustible alternativo (gas natural o biogás), en comparación con la quema de leña tradicional, en la actividad ladrillera que se lleva a cabo en el distrito El Algarrobal, de Las Heras, Mendoza [19].

*La biomasa residual lignocelulósica como recurso energético renovable en el Oasis Norte de la provincia de Mendoza, Argentina.* Trabajo correspondiente a una tesina de grado de la carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables que evalúa la disponibilidad de biomasa residual lignocelulósica, proveniente de la viticultura, olivicultura y fruticultura, en el Oasis Norte de la provincia de Mendoza, como recurso energético renovable [20].

*Valorización energética de RSU en la provincia de San Juan.* Se trata de una unidad generadora de energía eléctrica a partir del tratamiento térmico ambientalmente controlado, con una usina de ciclo combinado (gas-vapor), de aproximadamente 435 kw de potencia instalada [21].

*Angiord SACI / INTI.* La conservera mendocina Angiord SACI, junto al Instituto Nacional de Tecnología Industrial trabajó en un proyecto innovador que le permite ahorrar un 25% del gas que consumen. Aprovecha la biomasa del carozo de durazno para la generación de energía térmica [22].

*Energía a través de los residuos agroindustriales provenientes del Oasis Norte de la provincia de Mendoza.* Emprendimiento colaborativo de 4-Familias, en el Parque Industrial de San Martín, Mendoza, que reutiliza la cáscara de frutos secos a través de calderas de biomasa y produce calor para la lucha contra heladas y el proceso agroindustrial. Se está avanzando en la producción de briquetas y pellets para uso domiciliario, industrial y de generación de energía eléctrica a partir de estos residuos y otros provenientes de las actividades agroindustriales de la región [23].

## LEYES Y PROGRAMAS NACIONALES

En el marco del aprovechamiento energético de la biomasa se expone en este apartado una reseña de las principales leyes y programas nacionales que dieron lugar a la última etapa de desarrollo de las energías renovables en el país, motivado principalmente por el Acuerdo de París de diciembre de 2015.

-Ley 27.191 Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica - Modificación. Septiembre de 2015 [24]. Modifica la ley 26.190 y da inicio a la Segunda Etapa del Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía Destinada a la Producción de Energía Eléctrica. A las fuentes de energías reconocidas como renovables provenientes de algún tipo de biomasa: biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración y biogás, incorpora los biocombustibles con salvaguarda de lo estipulado ya en la Ley 26.093. Con el objetivo de llegar a cubrir el 20% de la demanda de energía eléctrica del país en 2025, establece un régimen escalonado cuyos objetivos parciales a fin de cada año son: 8% en 2017, 12% en 2019, 16% en 2021, 18% en 2023, finalizando con el 20% en 2025.

-Ley 26.093. Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Mayo de 2006 [25]. Entiende por biocombustibles al bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos. Establece que para inicios de 2010 se debía realizar un corte de gasoil o diesel con un mínimo de 5% de biodiesel.

-Ley 26.334. Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol [26]. Impulsa el desarrollo de productores de caña de azúcar e ingenios azucareros en los procesos de fabricación de bioetanol. Vincula a los beneficios accesibles a través de la Ley 26.093.

Se citan en la Tabla 1 tres proyectos creados para fomentar la generación de energía a partir de fuentes renovables. Se destaca el Programa Renovar que se detalla a continuación con más detalle.

Tabla 1. Principales programas de fomento de la biomasa como fuente energética.

Proyecto	Tecnología/Características	Estado actual	Referencias
RENOVAR	Biogás, Biomasa, y otras renovables. Desarrollo abajo.	En licitación Ronda 3	[28]
PROBIOMASA	Biomasa en general. Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa Metodología WISDOM Provincia de Mendoza (FAO, 2017)	Carta de Intención entre Gob. de la Provincia de Mendoza y FAO en 2013.	[5]
GENREN	Biogás, Biomasa y otras renovables. Se concretaron 193,1 MW de un total de 895 MW adjudicados.	Finalizado	[29]

### 1. Programa RENOVAR

Ronda 1: Se adjudicaron 29 proyectos con 1.142 MW. 8 proyectos a nivel nacional adjudicados para biomasa (2 proyectos) y biogás (6 proyectos) con precios de energía de 110 y 154 U\$/MWh respectivamente, representando el 2,1% de la potencia adjudicada total. De estos, sólo 1 proyecto se realiza en la zona de Cuyo, es el proyecto C.T. Yanquetruz en la provincia de San Luis con 1,2 MW de potencia instalada. El resto de los proyectos adjudicados en Cuyo son 4 pequeños aprovechamientos hidráulicos en la provincia de Mendoza que suman 5 MW de potencia instalada.

Ronda 1,5: Se adjudicaron 30 proyectos con 1.281 MW. No hay adjudicaciones para biomasa. Sin embargo, la región de Cuyo recibe varias adjudicaciones en la provincia de Mendoza con 1 proyecto eólico de 50 MW y 6 parques solares que suman 94 MW. En la provincia de San Juan 7 parques solares con una potencia de 213 MW y la provincia de San Luis con 2 parques solares con 47 MW. Los proyectos eólicos se adjudican con un precio de energía promedio de 57 U\$/MWh y los solares con un promedio de 55 U\$/MWh.

Ronda 2: Se adjudicaron 88 proyectos con 2.043 MW. De la fase 1 resulta de un total de 66 adjudicaciones que suman 1408,7 MW de potencia a instalar, dos proyectos de biogás adjudicados en la provincia de San Luis, de 1 MW cada uno y precio de la energía en 160 U\$/MWh. La fase 2 con un total de 22 adjudicaciones más, suma la segunda etapa del proyecto C.T. Yanquetruz II en la provincia de San Luis con 0,8 MW y un precio de 156,85 U\$/MWh. En total 2,8 MW representando casi el 0,2% del total adjudicado.

La Ronda 3: se encuentra actualmente en licitación.

## 2. Estado actual del Mercado eléctrico nacional en relación a la participación de energías renovables

Para el periodo 2011 a 2017 las energías renovables aportaron un 1,8% de la demanda eléctrica del MEM [27]. Para 2017 el aporte eléctrico de las renovables al MEM alcanzó el 2%, muy por debajo del valor objetivo de la Ley 27.191, del 8% a final de ese año. Del total de energía solo 0,2% fue cubierta por fuentes biomásicas renovables. La web de CAMMESA indica que para enero de 2019 un 3,8% del total de energía eléctrica demandada (38.539 MW) a nivel país, es cubierto por energías renovables. El objetivo a fin del mismo año es lograr cubrir el 12% de esta potencia.

## OPORTUNIDADES Y DESAFÍOS

La provincia de Mendoza cuenta con alto potencial para la generación energética a partir de biomasa según lo demuestra el Análisis de la disponibilidad de biomasa [4]. Las provincias de San Luis y San Juan no cuentan con estudios de disponibilidad de biomasa como el realizado por FAO pero sería factible extrapolar la situación de Mendoza a sendas provincias.

Los desarrollos a gran escala en biomasa y biogás reciben los precios más altos por unidad de energía dentro de RENOVAR, entre U\$D/MWh 110 y 160. Sumado a esto, por cada MW instalado las fuentes biomásicas generan entre 6 a 8 MWh/año. Esto las pone en ventaja en comparación con la eólica y solar con 4,2 y 2,4 MWh/año respectivamente.

A nivel general las fuentes biomásicas se caracterizan por brindar energía continua a lo largo del día y del año superando a sus pares eólicos y solares por su alta variabilidad temporal y menor factor de utilización. Esto supone una gran ventaja en momentos de escasez de energía en épocas invernales donde los grandes consumidores deben limitar su producción por cortes programados del suministro de gas natural y energía eléctrica. La biomasa, debidamente acopiada puede suplir en estos momentos.

La generación de energía mediante estas tecnologías requiere de recursos humanos con una formación específica que, frecuentemente, no se encuentra disponible en la actual oferta educativa. Cabe destacar que el desarrollo en biomasa requiere un trabajo multidisciplinario, dada la cantidad de requerimientos tecnológicos que

esto implica. Por ello casi siempre se constituyen equipos de trabajo integrados por diferentes profesionales tales como Ingenieros, Sociólogos, Arquitectos, entre otros.

Los proyectos existentes en funcionamiento o en construcción son mayormente de tipo privados, en agroindustrias cuya producción de residuos biomásicos se ha constituido en un problema y surge allí la oportunidad de solucionarlo, a la vez de proveer una fuente de energía adicional. Sin embargo, del sector privado sólo el 6% de las instalaciones de biogás, tienen fines de generación eléctrica.

Por último, se hace necesario reconocer que el aprovisionamiento de biomasa a las centrales requiere de una logística especializada y de desarrollo local, dada la gran dispersión geográfica y temporal del recurso.

## **CONCLUSIONES**

Argentina es un país rico en oferta de biomasa, con su tradicional producción agrícola y ganadera que marca su rol agro-exportador a nivel mundial. Así, diversos proyectos abordan el desarrollo de prácticas y equipos de biomasa con fines energéticos, muchas veces motivados por líneas propias que marcan las metas del trabajo y otras siguiendo hilos de grupos internacionales que denotan el ritmo de qué investigar y desarrollar. En ocasiones son proyectos extranjeros que buscan sentar precedente en el país, ya sea con fines comerciales, de investigación cooperativa, u otros.

Indudablemente el sector se presenta como una nueva oportunidad de negocios para la obtención de energía eléctrica y calorífica a partir de la biomasa; también como una alternativa para el tratamiento de los residuos orgánicos generados en establecimientos agrícolas e industriales, y trae aparejados beneficios tanto sociales como económicos, porque colabora a la asociación de diversos actores, y denota un incremento del desarrollo de aquellas regiones que lo aplican.

A pesar de las experiencias realizadas, éstas no resultan ser suficientes para su despegue final. La investigación lleva la ventaja en cuanto a aprovechamientos de la biomasa en general. Sin embargo, más allá de la “moda” reciente de las energías renovables, muchas industrias, como los ingenios del norte del país, maniseras del centro o madereras en el noreste, vienen usando hace décadas estos recursos como base de generación y destino de residuos cuya disposición diferente sería muy costosa.

Cabe destacar que a nivel país, la región de Cuyo no puede considerarse óptima para encarar proyectos de biomasa, dadas las condiciones naturales de la misma. En cambio, se postulan como candidato natural las regiones Nor-Oeste, Nor-Este y la región Pampeana argentina. Por eso aquí se hace fundamental el enfoque de aprovechamiento de biomasa residual, ya sea de procesos agrícolas o agroindustriales, donde su uso conlleve al menos un doble impacto, por ejemplo, de remediar un pasivo y generar energía útil. Discusión aparte es el uso como energía versus como enmienda orgánica, tan necesaria para nuestros suelos pobres en materia orgánica.

Entonces, ¿qué motiva (o desmotiva) hoy el uso de biomasa? A veces exigencias de las casas matrices de grupos empresariales extranjeros, a veces el greenwashing, a veces la moda o mejor expresado la novedad. Son escasos los casos concretos de uso como un buen método de aprovechamiento, ya sea por legítimo interés en el cuidado del ambiente, en la remediación de pasivos biomásicos o en la generación eléctrica con menor impacto.

¿Qué falta? Además de masa crítica de personas que puedan soportar en la realidad proyectos multidisciplinarios, la política de querer llevarlo adelante. Y la política como decisión de querer llevarlo adelante en todas las escalas, desde la doméstica fomentando el uso de equipos de combustión de alta eficiencia, como en generadores eléctricos o calderas sofisticadas, actualmente ya en construcción en el país.

Los desarrollos de la tecnología en la baja escala se remiten a individuos o pequeños grupos que lo hacen por iniciativa propia, con o sin un enfoque de cuidado ambiental y/o económico. En cambio, las grandes inversiones se hacen conociendo muy bien los riesgos y la rentabilidad de los proyectos. Al ser la biomasa para energía un recurso naturalmente disperso, relativamente predecible en el tiempo, pero con una logística compleja, pone barreras naturales a su desarrollo cuando de proyectos foráneos o de insuficiente compromiso con el medio se tratan.

## REFERENCIAS

- [1] MANRIQUE, S. (2015) *Biomasa con fines energéticos. Recursos, potencialidad y cambio climático*. -1a ed.- Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe.
- [2] TOBARES, L. (2012) *La importancia y el futuro del biogás en la Argentina*. 3º Congreso Latinoamericano y del Caribe de Refinación. Buenos Aires-Argentina.

- [3] GOICOA, V. (2016) *Relevamiento Nacional de plantas de biogás*. INTA <https://inta.gob.ar/documentos/relevamiento-nacional-de-plantas-de-biogas>
- [4] FAO (2017) *Análisis espacial del balance energético derivado de biomasa. Metodología WISDOM, provincia de Mendoza*.
- [5] Probiomasa. (s/f). UTF/ARG/020/ARG - "Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa" <http://www.probiomasa.gob.ar>
- [6] CARRASCO, E. (2018) Conferencia virtual sobre producción de biogás, <http://www.fca.uncu.edu.ar/conferencia-virtual-sobre-produccion-de-biogas>
- [7] REYNOSO, M.A. (2017) *Biodigestión anaeróbica: una alternativa para el tratamiento de la fracción orgánica de residuos sólidos urbano* (Tesina de grado). Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias, 2017. Dirección URL del informe: <http://bdigital.uncu.edu.ar/9434>. Fecha de consulta del artículo: 17/12/18.
- [8] MINCYT (2016) *Sistema tecnológico integrado para generación de energía: Estimulación de la producción de biogás en rellenos sanitarios con ingreso de efluentes líquidos tratados en relleno sanitario El Borbollón- Las Heras - Mendoza*. Disponible en: <http://www.bioeconomia.mincyt.gob.ar/presentaciones/2016/Luna.pdf>
- [9] POETTA, S.; LÓPEZ, M.; NARVARTE, C.; QUIROGA, N.A; MENECEZ PÉREZ, L.; HIDALGO, A. y MARTÍNEZ, A. (2016) *La presencia de metales pesados en los residuos de la agroindustria mendocina y su factibilidad para su aprovechamiento en la obtención de biogás y en la elaboración de alimentos balanceados para animales*. Proyecto Sectyp tipo I bienal 2016.
- [10] ICA-UNCuyo. (s/f). *Planta Experimental de Biogás*, Facultad de Ciencias Agrarias - UNCuyo. Disponible en: <http://imd.uncuyo.edu.ar/paginas/index/planta-experimental-de-biogas-para-la-facultad-de-ciencias-agrarias-uncuyo>
- [11] Asociación de Cooperativas de Argentina. <http://www.acacoop.com.ar/>
- [12] IDE-UNCuyo. (s/f). *Manual de uso y construcción de biodigestores*. Disponible en: <http://imd.uncuyo.edu.ar/paginas/index/manual-de-uso-de-biodigestores>
- [13] IDE-UNCuyo. (s/f). *Aprovechamiento de residuos orgánicos para la producción de biogás en colegio técnico-rural*. Disponible en: <http://imd.uncuyo.edu.ar/programa-de-biogas>
- [14] RÉBORA, C.; H. LELIO, H. y GÓMEZ, L. (2010) Uso de aguas residuales urbanas en el riego de colza (*Brassica napus* L.) con destino a biocombustible. *Rev. FCA UNCuyo*. Tomo 42. N° 1. Año 2010. 207-212. Disponible en: [http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/2010-01/t42\\_1\\_nb03\\_rebora.pdf](http://revista.fca.uncu.edu.ar/images/stories/pdfs/2010-01/t42_1_nb03_rebora.pdf)

- [15] RÉBORA, C.; IBARGUREN, L. y BERTONA, A. (2017) Experiencias con cultivos bioenergéticos en Mendoza. En: *Energía -Investigaciones en América del Sur / ROMANO, S.D. ... [et al.]; coordinación general de H.G. Chiaccharini. 1 ed. Bahía Blanca - Universidad Nacional del Sur. Ediuns.*
- [16] BUSTAMANTE, J.A; PÉREZ, S.A. y LLERA, J. (2013) Eucalyptus camaldulensis DEHNH. Productividad en cultivos energéticos bajo riego. *Ciencia e Investigación Forestal INFOR Chile* Vol. 19, N° 1 Abril 2013. Disponible en: <http://biblioteca.infor.cl/DataFiles/31216.pdf>
- [17] QUIROGA, V.N.; ESTEVES, A. y BUENANUEVA, F. (2014) Horno híbrido solar-biomasa. Evaluación cualitativa y térmica de su funcionamiento. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.03.27-03.32. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433.
- [18] BOCCACCINI, L. y HERNÁNDEZ, A. (2014) Evaluación experimental del funcionamiento de una estufa rusa mejorada instalada en una vivienda unifamiliar de San Rafael - Mendoza. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 18, pp.08.51-08.58. Impreso en la Argentina ISSN 2314-1433
- [19] HERRERA, A.A. (2014) *Estudio ambiental y social del ciclo de vida de la producción de ladrillos artesanales, utilizando combustibles tradicionales y alternativos en el Algarrobal, Mendoza: evaluación de daños en los recursos naturales, en la calidad de los ecosistemas y en la salud humana.* (Tesina de grado). Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Dirección URL del informe: <http://bdigital.uncu.edu.ar/6110>. Fecha de consulta del artículo: 17/12/18.
- [20] MARTÍN, J.N. (2014) *La biomasa residual lignocelulósica como recurso energético renovable en el Oasis Norte de la provincia de Mendoza, Argentina.* (Tesina de grado). Mendoza, Universidad Nacional de Cuyo. Facultad de Ciencias Agrarias. Dirección URL del informe: <http://bdigital.uncu.edu.ar/6050>. Fecha de consulta del artículo: 17/12/18.
- [21] Nota: Inauguraron una planta de residuos sólidos urbanos en Sarmiento (2015). *Diario La Provincia SJ* Disponible en: <https://www.diariolaprovinciasj.com/sociedad/2015/9/18/inauguraron-planta-residuos-slidos-urbanos-sarmiento-38509.html>
- [22] Instituto Nacional de Tecnología Industrial. [www.inti.gov.ar](http://www.inti.gov.ar)
- [23] BISMACH, M. (2018) Comunicación personal, entrevistador MARTÍN J.N.
- [24] Ley Nacional N° 27.191. Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica. Modificación 2015. Disponible en: <http://www.infoleg.gov.ar/>

- [25] Ley Nacional N° 26.093. (2006) Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Autoridad de aplicación. Funciones. Comisión Nacional Asesora. Habilitación de plantas productoras. Mezclado de Biocombustibles con Combustibles Fósiles. Sujetos beneficiarios del Régimen Promocional. Infracciones y sanciones. Disponible en: <http://www.infoleg.gob.ar/>
- [26] Ley Nacional N° 26.334, (2007). Apruébese el Régimen de Promoción de la Producción de Bioetanol. Disponible en: <http://www.infoleg.gob.ar/>
- [27] Despacho de Energías Renovables al Sistema interconectado Nacional Argentino. <https://despachorenovables.cammesa.com/>
- [28] Plan RENOVAR - Programa de abastecimiento de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. <https://www.argentina.gob.ar/renovar>
- [29] Programa GENREN - Programa de Generación Eléctrica a partir de Fuentes Renovables [www.argentina.gob.ar](http://www.argentina.gob.ar)

# LA GASIFICACIÓN COMO MODELO SUSTENTABLE DE BIORREFINERÍA PARA LA TRANSFORMACIÓN DE LA CÁSCARA DE MANÍ EN GAS DE SÍNTESIS

Jorge Esteban Vera<sup>1</sup>, Marianela Carubelli<sup>2</sup>, Luis Alberto Bertolino<sup>3</sup>

## RESUMEN

Como resultado del interés en utilizar y valorizar los residuos biomásicos provenientes de la industria del maní, se realizó el análisis de este material y la posibilidad de su utilización para la generación de gas de síntesis, que será utilizado en reemplazo del gas natural que actualmente alimenta los hornos de secado y blanchado de maní en una empresa del cluster manicero situado en la localidad de Las Junturas, Provincia de Córdoba. Para ello se utilizó un prototipo de gasificador downdraft que este grupo investigador tiene construido para realizar las pruebas necesarias y obtener los parámetros de funcionamiento adecuados. En base a este análisis se realizó el dimensionamiento y prediseño de la planta de gasificación necesaria para alimentar los hornos con gas de síntesis y mantener su potencia térmica.

---

1 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [jorge.vera@unc.edu.ar](mailto:jorge.vera@unc.edu.ar)

2 Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [mcarubelli@unc.edu.ar](mailto:mcarubelli@unc.edu.ar)

3 Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [luis.bertolino@unc.edu.ar](mailto:luis.bertolino@unc.edu.ar)

## INTRODUCCIÓN

El aumento de la población mundial y de sus necesidades de alimento, servicios, bienes de consumo y energía ponen a los países del mundo y a sus sociedades frente a grandes desafíos en los próximos años. En paralelo debemos abordar de forma seria las cuestiones relacionadas con el cambio climático que influye en las condiciones de vida y de producción, así como la utilización de combustibles fósiles que siguen siendo protagonistas en nuestra producción energética a pesar de ser contaminantes y limitados. Surge así la necesidad del uso sustentable de los recursos (tierra, agua, biodiversidad, ecosistemas) para mantener las capacidades y potencialidades de los sistemas productivos.

Sin duda las tecnologías e innovaciones relacionadas a la biología (asociadas a otras ciencias) serán cruciales en la necesidad de transitar a nuevas formas de producción en las que se logre un uso sustentable de los recursos naturales y se minimice o elimine el uso de combustibles fósiles y la generación de desechos.

En este contexto surge el concepto de bioeconomía como marco de referencia para el diseño e implementación de políticas de desarrollo productivo e innovación. La bioeconomía puede ser definida como una economía en la cual el consumo y la producción de bienes y servicios se basan en el uso directo y la transformación sostenible de recursos biológicos, como así también en el aprovechamiento de los desechos que se generan en los procesos de producción, transformación y consumo. La circularidad, productos y tecnologías en cascada y residuos cero son principios fundamentales en estas nuevas formas de producción, donde la biomasa es parte esencial de la producción de energía, combustibles, insumos industriales y materiales de distintos tipos.

Entre los muchos actores que forman parte de este escenario aparecen las biorrefinerías como plantas industriales en las que se obtienen energía y una gran diversidad de nuevos compuestos y reciclados a partir de materias primas de base biológica [1].

La biomasa representa un importante medio de almacenaje energético en forma de energía química que es susceptible de transformarse en otras formas de energía. Además de la materia lignocelulósica proveniente de la biomasa, se han comenzado a utilizar otras fuentes de recursos biomásicos, como ser las provenientes de la industria agroganadera, del papel, de los alimentos y de los procesos de tratamientos de residuos sólidos urbanos.

Argentina es un gran productor de residuos biomásicos: genera residuos forestales (restos de podas, despuntes, cortezas), residuos de la industria maderera (aserrín, viruta) y, en particular, enormes cantidades de residuos de la industria agropecuaria (cáscaras, rastrojos, carozos, estiércol, etc.). La mala disposición de estos residuos puede generar diferentes riesgos ambientales. Por ejemplo, las ramas y despuntes de frutales que quedan en los campos o las cortezas y ramas que quedan en las plantaciones de árboles para madera originan altos riesgos de incendios. Cuando la poda de frutales se realiza con fines sanitarios, debe ser recogida para evitar infecciones. En la industria de muebles o aserraderos la acumulación de aserrín y virutas genera contaminación atmosférica por particulado, proliferación de vectores y emisiones por descomposición, y riesgos de incendios. La acumulación de cáscaras en enormes volúmenes en las industrias agrícolas también tiene riesgos de incendios, como los ocurridos en las localidades cordobesas de General Cabrera en agosto del año 2013 [2] y en octubre del año 2016 [3] o el de la zona rural de Hernando en diciembre 2005 [4], todas con almacenamientos de cáscaras de maní.

La biomasa quemada a cielo abierto, emite cantidades de dioxinas y furanos [5-6], humos tóxicos y polución, con el riesgo de generar enfermedades respiratorias en poblaciones cercanas [7]. Con el aprovechamiento de residuos biomásicos a escala industrial en forma debida y controlada en instalaciones para la generación de energía, se mitiga el impacto ambiental en el entorno. Por otro lado, como las emisiones de CO<sub>2</sub> provienen de la biomasa que tiene un ciclo cerrado de emisión cero, el impacto ambiental por emisiones es positivo.

El concepto de que los residuos no son tales sino recursos que pueden ser utilizados en procesos posteriores es fundamental en la economía circular [8-9]. Los residuos biomásicos adquieren un rol central en la generación de energía y productos debido a múltiples factores: su producción es continua, son almacenables, su utilización disminuye la contaminación de suelos y aguas, promueve la creación de nuevos puestos de trabajo (en especial en zonas rurales) y moviliza inversiones, además de ayudar a reducir la emisión de gases contaminantes al diversificar la matriz energética. La disponibilidad de la biomasa está asociada a su posibilidad de recolección y facilidad de uso. La baja densidad energética de la biomasa determina que el consumo se realice en las proximidades de la zona donde ésta se encuentra disponible.

La disponibilidad potencial para usos energéticos de recursos biomásicos indirectos derivados de la agroindustria publicados en el año 2009 por el Departamento Forestal Dendroenergía de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación) muestran que en Argentina se generan 2,288 millones de toneladas

en base seca por año [10]. Dentro de estos recursos la industria manicera aportó en forma de cáscara de maní 180.011 toneladas en el año 2009, valor que al año 2018 asciende a una cantidad de 376.700 toneladas anuales [11].

En este contexto, Argentina ha ido transformando su matriz energética, comenzando a incorporar desde el año 2011 la generación eléctrica a partir de otras fuentes renovables. Y para ello ha establecido un ambicioso plan denominado “Plan de energías renovables en Argentina” (RenovAR), en sus rondas 1 - 1,5 - 2 y MiniRen o ronda 3, basándose en la ley 26.190 con el cual intentará cubrir un 20% del total del sistema de generación con esas fuentes renovables. Según datos del año 2017 se han instalado 157,7 MW de potencia eléctrica basados en biomasa, entre todas las tecnologías que están disponibles [12], aumentando en consecuencia la competitividad del medio rural en términos de localización industrial.

Existen variadas formas de generar energía a partir de la biomasa: mediante procesos físicos, como el prensado para la obtención de bioaceites combustibles, procesos químicos como la producción de bioetanol o la digestión anaeróbica con la cual se obtiene biogás, y procesos termoquímicos, como la combustión, pirólisis y gasificación. Pero hay una diferencia entre la quema y la gasificación de este material. Por un lado, la combustión requiere de cuidados por la deposición y ensuciamiento de las superficies del quemador y por la corrosión dada la naturaleza alcalina de la biomasa [13]. En cambio la gasificación separa el gas combustible de los metales pesados, los hidrocarburos y el alquitrán produciendo un gas capaz de generar una combustión limpia y no tóxica. Los metales pesados quedan en las cenizas y los hidrocarburos pesados en el alquitrán, que es fácilmente separable por condensación, y también transformados a otros gases combustibles, como  $H_2$ ,  $CH_4$ , si los hacemos pasar a través de un reformador catalítico.

En este trabajo presentamos el dimensionamiento y prediseño de una planta de gasificación del tipo downdraft para generar energía térmica a partir de la cáscara de maní, en una empresa de la Provincia de Córdoba (Maglione Hnos). El syngas generado en la planta será utilizado para alimentar los hornos de secado y blanchado (separación del tegumento que recubre al grano) del maní.

Para realizar el análisis y parametrización del proceso se realizaron estudios de la cáscara de maní y se utilizó el equipo piloto de gasificación diseñado y construido por nuestro grupo de investigación y desarrollo que entrega 100 KW de potencia térmica.

## GASIFICACIÓN DE BIOMASA

La gasificación de biomasa es un proceso termoquímico en el cual se transforma la biomasa en una mezcla de gases combustibles llamado gas de síntesis, syngas o gas pobre [14]. El proceso downdraft requiere el calor desarrollado en una combustión controlada mediante el suministro restringido de agentes de reacción que pueden ser aire, oxígeno y/o vapor de agua (o mezcla de ellos). El oxígeno aportado es menor que el necesario para la combustión estequiométrica de la biomasa. Se define la razón estequiométrica SR como el oxígeno utilizado en el proceso en relación al oxígeno requerido para una combustión completa. Existe amplia bibliografía que analiza el rendimiento del proceso de gasificación para diferentes razones estequiométricas, que van desde SR=0,1 a SR=0,4, siendo el valor de SR=0,3 (30% del oxígeno de una combustión completa) el más utilizado ya que para este valor hay un máximo en la producción de CO y en la energía química del gas [15-16].

El syngas generado en el proceso de gasificación está formado por una mezcla de gases donde predomina el N<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> (en porcentajes típicos de 49%, 20%, 15%, 10% y 2% respectivamente) [17], teniendo pequeñas variaciones en los porcentajes que dependen del tipo de biomasa utilizada, el tipo de gasificador, el agente de reacción y la cantidad de O<sub>2</sub> aportado al proceso. Los valores pueden ser obtenidos experimentalmente mediante cromatografía gaseosa o analíticamente mediante modelos estequiométricos y no estequiométricos, y dentro de estos últimos la técnica de minimización de la energía libre de Gibbs [18-19-20-21-22]. En esta mezcla de gases, el CO y el H<sub>2</sub> son combustibles, por lo que el syngas podrá utilizarse para generar calor en quemadores o para generar energía eléctrica en motogeneradores de combustión. La reconversión de un motogenerador para hacerlo funcionar con syngas solamente requiere la colocación de un mezclador apropiado que mantenga la relación aire/syngas correspondiente.

Los subproductos que se obtienen en la gasificación de biomasa son las cenizas, el biochar y el alquitrán. Las cenizas son los residuos sólidos inorgánicos y contienen principalmente silicio, aluminio hierro y calcio, pudiendo tener también pequeñas cantidades de magnesio, titanio, sodio y potasio. Gran parte de la producción de cenizas no proviene de la biomasa en sí misma, ya que en general ésta tiene un bajo contenido de minerales (con valores típicos menores al 3%, que puede llegar al 15% para la cáscara de arroz [23]) sino de impurezas y suciedad que se arrastran durante su recolección y traslado, como tierra, rocas etc. Son numerosos los estudios realizados en las últimas décadas para la reutilización de las cenizas de biomasa como suplemento para fertilizantes orgánicos e inorgánicos, enmiendas

de suelos forestales, y también para utilizarla en construcciones geotécnicas y procesos industriales [24].

El alquitrán es el subproducto no deseado generado en la gasificación. Este material es un líquido negro y muy viscoso que condensa en las zonas de baja temperatura. En los motores esto puede producir daños y taponamientos, por lo que es necesario removerlo. Existen técnicas para el lavado o filtrado de alquitranes del gas de síntesis, como por ejemplo la reforma catalítica que se discutirá en la sección 2.3. [25-26]

Otro subproducto generado es el biochar, formado por residuos carbonosos producidos por el calentamiento de la biomasa por encima de los 300°C en ausencia de oxígeno (esto ocurre en la zona de pirólisis del reactor) y su rendimiento y características dependen de las condiciones y los parámetros de operación en el proceso de gasificación y de la composición de la biomasa. El biochar generado en plantas de gasificación está recibiendo cada vez más atención debido a sus múltiples aplicaciones: como remediador de suelos, adsorbente de metales pesados y contaminantes orgánicos ambientales, en aplicaciones electroquímicas, como componentes de catalizadores y para almacenamiento de energía y gases, entre otras [27-28-29].

Los gasificadores pueden clasificarse en base al modo de contacto entre el gas y el combustible (en nuestro caso biomasa) y pueden ser de tres tipos: de lecho fijo, de lecho fluidizado y de lecho arrastrado.

En los gasificadores de lecho fluidizado y de lecho arrastrado el agente gasificante transporta las partículas de biomasa a través del reactor. En los primeros el combustible sólido granular se mantiene en estado fluidizado por el agente gasificante que circula en forma ascendente a una velocidad apropiada. Los de lecho arrastrado operan en isocorriente (el combustible y el agente gasificante viajan en igual dirección) y requiere un tamaño de partícula muy fino, ya que los tiempos de residencia en el reactor son muy cortos.

En los gasificadores de lecho fijo el combustible se apoya en una parrilla, y el lecho de biomasa va descendiendo a medida que se va gasificando. Existen tres tipos de gasificadores de lecho fijo: updraft (el agente gasificante viaja hacia arriba mientras el lecho desciende), downdraft (el agente gasificante ingresa al reactor a cierta altura de manera que el flujo de gas fluye hacia abajo) y cruzado (el agente gasificante ingresa al reactor a un lado y cruza horizontalmente el lecho mientras éste va descendiendo). En la sección 2.1 veremos con detalle los gasificadores downdraft.

## 1. Gasificador de Lecho Fijo Downdraft [13-16]

En términos de los procesos que ocurren dentro del reactor, podemos distinguir cuatro zonas diferentes que se muestran esquemáticamente en la figura 1 [30].

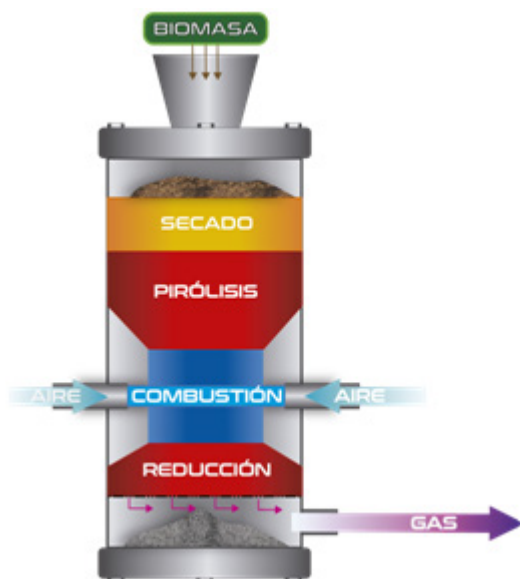


Figura 1: Esquema de un gasificador de lecho fijo downdraft.

La biomasa ingresa al reactor por la parte superior a través de una compuerta con sellos herméticos para asegurar que no ingrese aire ni salga gas en esta parte. El agente gasificante (aire, aunque puede ser  $O_2$  o vapor de agua) ingresa por los laterales por boquillas inyectoras generando la combustión de la biomasa, en la que llamamos **zona de combustión**. El intenso calor generado en esta zona hace que la biomasa en la zona superior se caliente y vaya secando desprendiendo humedad (**zona de secado**). En la zona entre el secado y la combustión, el intenso calor y la ausencia de oxígeno provocan la pirólisis de la biomasa generando gases ( $CO$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$ ), carbones pirolizados y alquitranes. La mayor parte de estos carbones y alquitranes producidos en la **zona de pirólisis** son combustionados luego en la zona de combustión a medida que el lecho va descendiendo, generando el calor necesario para la zona de pirólisis.

Luego de pasar por la zona de combustión el  $CO_2$  y  $H_2O$  generados pasan a través de los carbones a muy altas temperaturas donde son parcialmente reducidos en  $CO$  y  $H_2$ , incrementando la calidad del gas. Ésta es la denominada **zona de reducción**,

en la cual hay un importante descenso de la temperatura ya que el calor del gas se convierte en energía química.

Eventualmente no todo el carbón formado en la zona de pirólisis alcanza a combustión, por lo que en la parte inferior se podrán recolectar las cenizas y una carbonilla residual (el biochar), ambos productos aprovechables. El flujo de syngas generado pasa por el biochar y sale por la parte inferior del reactor, por lo que los alquitranes que no hayan sido craqueados en la zona de combustión podrán hacerlo en esta zona, sólo que será a menor temperatura (alrededor de los 800°C).

Las cenizas que son trasladadas junto al syngas deberán ser separados del flujo de gases. Primero se utiliza un proceso de filtrado inercial, un ciclón. Posteriormente se agrega un filtro seco de fibras para partículas. Para la extracción del alquitran presente en esta corriente gaseosa, se aplica una etapa de craqueo catalítico, que lo convierte en más hidrogeno que permite subir el poder calorífico del syngas.

La zona de combustión es la parte más importante del reactor, por lo que suele denominarse el corazón del reactor. En esta zona las boquillas inyectoras del agente gasificante están distribuidas circularmente y deberán ser un número impar para que el flujo de aire de una boquilla no afecte a la de la opuesta. Justo debajo de las boquillas la sección del reactor disminuye formando lo que llamamos la garganta del reactor. Esta constricción hace que todos los gases pasen a través de esta zona caliente reducida, dando así una máxima mezcla, una mínima pérdida de calor y un alto craqueo de alquitranes. Las temperaturas más altas del reactor se dan en esta zona, entre los 1200°C y 1400°C [31].

El flujo de aire en las boquillas será generado por un ventilador, cuyo caudal y velocidad debe calcularse y controlarse para que la cantidad de aire que ingresa sea el deseado. La cantidad de aire que maximiza el poder calorífico del syngas es el 30% del necesario para una combustión completa, por lo tanto primero se deben hacer los cálculos de aire necesario para la combustión de la biomasa.

Estos gasificadores procesan biomasa con tamaños relativamente uniformes (de tamaños no mayor a 5 cm de lado) y bajo nivel de humedad (menos del 20% de humedad). Esto permite un fácil descenso del lecho por gravedad a través de la garganta. La reducción del área en la garganta y las boquillas que sobresalen aumentan la probabilidad de la formación de bóvedas, con la subsecuente alta producción de alquitran ya que la biomasa no pirolizada cae en la zona de reacción, y también la formación de canales que pueden incluso generar la detención del proceso de gasi-

ficación ya que se detiene el descenso del lecho hacia la garganta. Por ello es común que los gasificadores downdraft tengan vibradores que sacuden el reactor cada cierto intervalo de tiempo para desarmar las posibles formaciones de bóvedas.

## 2. Reacciones de Gasificación

La biomasa que ingresa al gasificador está sometida a una serie de transformaciones debida a la temperatura durante su conversión, que básicamente se pueden agrupar en tres partes: (1) secado y devolatilización, (2) transformaciones secundarias (homogéneas y heterogéneas) de los volátiles emitidos por las partículas y (3) gasificación del carbonizado.

En el proceso de gasificación se remueve el oxígeno de la biomasa para incrementar su densidad energética. A medida que las relaciones H/C y O/C disminuyen, aumenta el poder calorífico del combustible aumentando su densidad energética.

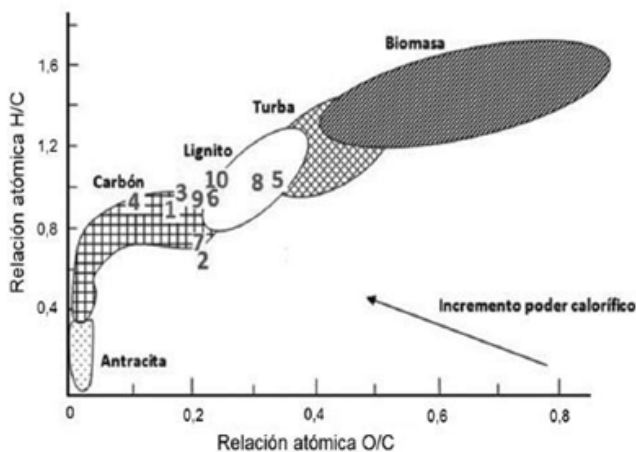


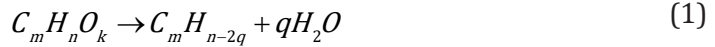
Figura 2: Clasificación de materiales carbonados según el diagrama de Von Krevelen.

Los combustibles pueden ordenarse tomando el criterio de Von Krevelen, que obtuvo el gráfico representado en la figura 2. Observamos que la flecha indica un incremento del poder calorífico a medida que disminuye la relación atómica O/C.

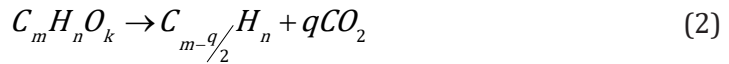
El mecanismo de remoción puede ser a través de la deshidratación o la descarboxilación [32]. Según vemos en la figura 2, mientras se remueve el oxígeno a través del  $\text{CO}_2$ , se incrementa la relación H/C del combustible y, por ende, el poder calorífico del material. De esta manera un beneficio positivo de los productos de la gasifica-

ción es que emiten menos gases de efecto invernadero cuando se combustionan posteriormente.

Deshidratación (remueve oxígeno a través de formación de agua):

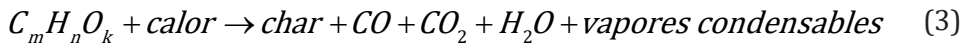


El proceso de descarboxilación (remueve oxígeno a través de formación de CO<sub>2</sub>)

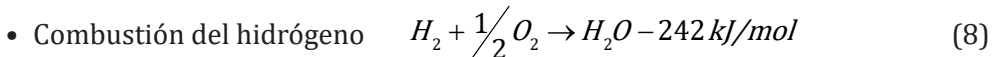
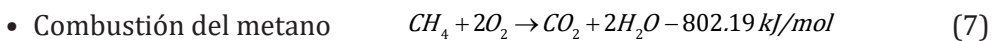
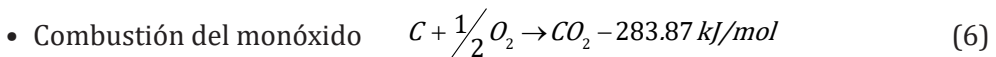
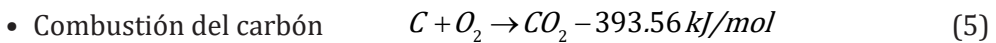
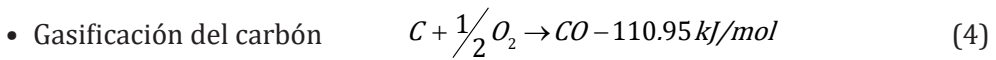


Los mecanismos de transformaciones químicas dependen de la zona del reactor por la que la biomasa está pasando. Comenzando desde la parte superior del equipo, al ingreso de la biomasa al reactor, se produce la evaporación del vapor de agua superficial.

Luego sigue la zona de pirólisis, donde la biomasa se separa en tres fases: gases (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O, alquitranes e hidrocarburos), líquidos (alquitranes, H<sub>2</sub>O, hidrocarburos pesados) y residuos carbonosos (biochar):

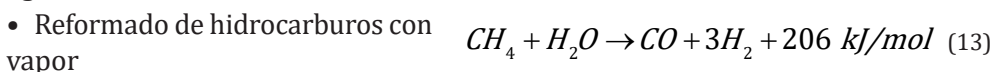
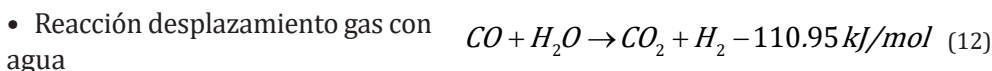
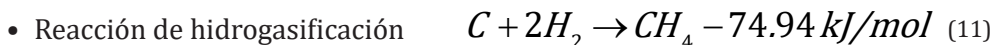
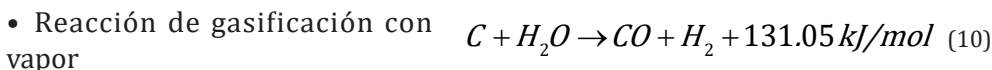
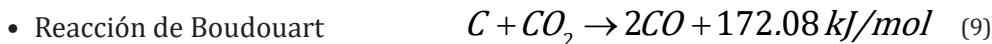


En la zona de combustión se craquean los alquitranes. Como la combustión es parcial el carbón presente se gasifica y se combustiona de acuerdo a:

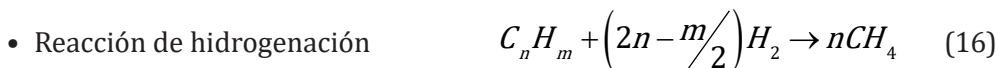
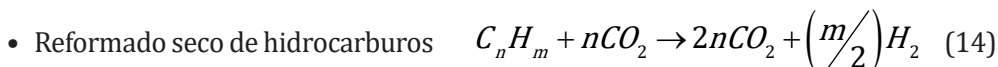


En el proceso de gasificación del carbonizado se aprovecha el calor sensible de los gases y del propio carbonizado para dar lugar a las reacciones de gasificación heterogéneas, de naturaleza endotérmica.

En la etapa de reducción, se generan los gases que finalmente formaran el syngas según:



Adicionalmente, existen otras reacciones de reformado, tanto heterogéneas como homogéneas, normalmente endotérmicas:



Las reacciones de gasificación (9) y (10) no alcanzan el equilibrio prácticamente en ninguna ocasión. La reacción WGSR (water-gas shift reaction) o desplazamiento de CO (4) determina la composición del gas de salida cuando se consigue una elevada descomposición en el seno del gasificador, pues en este caso la reacción se encuentra en la mayoría de las veces en equilibrio termodinámico. Con relación a esto, la operación a altas temperaturas (900°C) favorece la descomposición del vapor de agua y en consecuencia la aproximación al equilibrio de la reacción anterior.

La temperatura de gasificación es determinante en la composición del gas producto; si ésta es baja, el gas es rico en  $CH_4$ , debido a que las reacciones de metanación e hidrogenación (11) y (8) se ven favorecidas a bajas temperaturas. Asimismo, el gas presentará un alto contenido en alquitranes y aceites, ya que se produce la descomposición de la materia volátil en metano e hidrocarburos superiores a partir de la reacción de craqueo térmico (7). Si, por el contrario, la temperatura de operación es alta el contenido en  $CH_4$  del gas disminuye, enriqueciéndose este último

en  $H_2$  y  $CO$ . Con la temperatura, aumenta la velocidad de conversión del carbono, incrementándose la capacidad de tratamiento del gasificador, sin embargo, a costa de una disminución del poder calorífico del gas y un aumento del riesgo de sinterización de cenizas. Las reacciones de gasificación (Boudouard y gasificación con vapor) (9) y (10) se consideran que siguen el modelo de Langmuir-Hinselwood, siendo el paso controlante la desorción del complejo activo en los centros activos del residuo carbonoso. Bajo algunas condiciones de operación específicas, se puede asumir que la cinética de estas reacciones es de primer orden [33]. Dada la complejidad del proceso por las distintas temperaturas en cada región, tiempo de permanencia, interacción entre los distintos productos parciales, velocidades de reacción distintas, etc, no se llega nunca a una condición de equilibrio. No hay predominio de alguna de las reacciones anteriormente mencionadas, haciendo difícil de modelar el proceso. Para intentarlo, se adoptan dos caminos o metodologías para intentar resolver y obtener la composición de los gases resultantes, a saber: considerar al sistema en equilibrio o un proceso de no equilibrio [34]. Un método que ha dado resultados más que satisfactorios dentro de este último grupo y resulta un método relativamente sencillo de implementar, es el que se basa en la minimización de la energía libre de Gibbs [35-36].

### **3. Gasificador Piloto desarrollado y construido por nuestro equipo**

Nuestro equipo de trabajo ha diseñado, desarrollado y construido un equipo piloto de gasificación de lecho fijo tipo downdraft para ser operado con biomasa, que se muestra en la figura 3.

El equipo consta de un reactor cilíndrico con una compuerta superior con cierres herméticos por donde ingresa la biomasa, un intercambiador de calor, un ciclón, un recolector de cenizas y biochar, un reactor catalítico para limpieza de alquitranes, un ventilador y una antorcha.

La zona superior del reactor es la de secado, ya que la biomasa alcanza temperaturas entre  $150^{\circ}C$  y  $200^{\circ}C$ . A medida que la biomasa va descendiendo hacia la garganta, debajo de la cual hay una parrilla, pasa por una zona a alta temperatura (alrededor de  $500^{\circ}C$ ) donde piroliza.

El aire es soplado por un ventilador de manera que el equipo trabaja a presión positiva. El aire puede regularse manualmente y se precalienta antes de ingresar al reactor. La combustión se inicia a través de un tubo mediante un lanzallamas adecuado, que luego se cierra herméticamente.

En la parte inferior se encuentra un recipiente cerrado herméticamente donde se colectan las cenizas y el biochar formado. El gas de síntesis generado sale del reactor, pasa por un ciclón que colecta partículas que son depositadas en el recipiente de cenizas, y de allí continúa hasta un tubo toma muestras y una antorcha. El control y comando del equipo se realiza mediante un tablero dispuesto a tal fin.

El gasificador está diseñado para que opere a razón máxima de 30 Kg de biomasa por hora. Para los experimentos realizados con cáscaras de maní, se obtienen los siguientes parámetros:

- Caudal de syngas  $Q_{\text{syn}} = 60 \text{ Nm}^3/\text{h}$
- Poder calorífico del syngas  $\text{PCI} = 5800 \text{ KJ}/\text{m}^3$
- Potencia del equipo  $P = 100 \text{ KW}$



Figura 3: Foto del gasificador desarrollado y construido por nuestro equipo de investigación y desarrollo, indicando algunas de sus partes constructivas.

#### 4. Limpieza de gases

Los alquitranes se consideran la fracción condensable de los productos de gasificación orgánica y son en gran parte hidrocarburos aromáticos, incluido el benceno [37]. Son los subproductos de mayor molestia en el proceso de gasificación ya que al enfriarse el syngas éstos condensan pudiendo obstruir cañerías y filtros y dañar los motogeneradores ya que pueden obstruir las líneas de combustible y los inyectores. Estos residuos líquidos pueden eliminarse o minimizarse a valores aceptables mediante diferentes técnicas de reforma catalítica, craqueo o de lavado [38].

La reforma catalítica de estos residuos en un reactor de lecho granular permite la reducción o eliminación de los alquitranes, a la vez que aumenta la cantidad de H<sub>2</sub> en el gas de síntesis mejorando así su poder calorífico. El principio se basa en la gran superficie de contacto que ofrece el catalizador al flujo del fluido a tratar, logrando una gran eficiencia en el proceso de reforma catalítica. Por ello hemos elegido esta técnica de limpieza diseñando un reactor de reforma catalítica. El catalizador que elegimos es la dolomita, que se encuentra disponible en nuestra provincia de Córdoba. Para aumentar el poder catalizador del mineral, primero hay que activarlo y moler a tamaños adecuados [39].

El equipo completo consiste en un reactor conteniendo la dolomita activada, un intercambiador previo para aumentar la temperatura del gas de síntesis a reformar desde los 500°C al ingreso (temperatura con la que sale el syngas del gasificador) hasta los 800°C que requiere el proceso. Se aporta calor desde el exterior mediante un quemador del mismo gas de síntesis. Todo el equipamiento tiene una protección aislante para minimizar las pérdidas de calor del proceso. El gas ingresa con toda su carga de contaminante (alquitranes) sin particulado, y egresa del reactor limpio, con prácticamente nulo contenido de alquitrán.

Para poder realizar el diseño del reactor es necesario analizar la dependencia de la velocidad del fluido (en nuestro caso el syngas) en el lecho catalizador para poder estimar el tiempo de permanencia del gas en el lecho y así asegurar la transformación de los alquitranes. Esta velocidad depende de la caída de presión en el lecho, la viscosidad del gas, el espesor del reactor que contiene el catalizador y de propiedades del lecho como el tamaño de partícula, porosidad y área específica del lecho granular, la distribución de tamaños, la forma de las partículas e incluso el soporte del lecho que puede modificar la forma de empaquetarse [40]. En base a las ecuaciones que describen estas dependencias se determinó el tamaño del reactor que asegura la cantidad de dolomita necesaria para reducir en un 98% el contenido de alquitrán del caudal de syngas [41] y la pérdida de carga permitida.

Para hacer estos análisis se tomaron en cuenta parámetros de funcionamiento del gasificador downdraft fabricado por nuestro equipo (caudal de syngas  $Q_s = 60 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ) y datos de la dolomita que se consigue en la región (tamaño de partículas:  $1,2 \text{ mm} < \Phi < 1,9 \text{ mm}$ ). En este punto se hicieron simplificaciones: se consideró que el lecho está formado por partículas de igual tamaño cuando en realidad hay una distribución de tamaños, y se consideraron las partículas como esféricas.

Además, se estableció una pérdida de carga de  $\Delta P=250$  mm de columna de agua (2451 Pa), situación limitada por la presión estática del ventilador de impulsión de aire del sistema. Este factor es determinante a la hora de definir el espesor del lecho, ya que la caída de presión es inversamente proporcional a este espesor.

Con estas consideraciones se determinó la cantidad de dolomita necesaria y las dimensiones del reactor.

## 5. Gasificando cáscara de maní

Se han probado diferentes biomásas para gasificar en el equipo piloto de gasificación: aserrín, restos de podas (sólo la madera cortada en trozos, de diferentes árboles y de diferentes tamaños), marlos de choclo, cáscara de nueces, lechos de criaderos de pollos (también denominados cama de pollo, que es una mezcla de desechos formado por aserrín o cascara de maní y estiércol y heces de pollos) [42] y cáscara de maní. Esta última tiene buenas características para gasificar, como su alto contenido de carbono, baja humedad y muy bajo contenido de azufre y nitrógeno. Como aspecto negativo tiene su baja densidad a granel, que genera grandes volúmenes de almacenamiento. En la siguiente tabla mostramos datos promedios de cáscara de maní en Argentina [43].

Tabla 1: Propiedades físicas (a), análisis elemental (b) y análisis de cenizas (c) de la cáscara de maní de la provincia de Córdoba. Fuente: Prodeman S.A.

(a) Características físicas			(b) Análisis elemental base seca (%)		(c) Análisis de cenizas	
Poder calorífico superior	20222	KJ/kg	C	45,85	Contenido	3 a 5 %
Poder calorífico superior (tal cual recibido)	18003	KJ/kg	H	6,23	Granulometría	5 s 25 mm
Poder calorífico inferior	18284	KJ/kg	O	42,92	Temperatura de fusión	1100°C
Poder calorífico inferior (tal cual recibido)	15910	KJ/kg	N	0,1	Índice de erosión y aglutinamiento	4
Humedad promedio	11	%	S	0,1		
Densidad	80,90	kg/m <sup>3</sup>	Volátiles	62		

Como puede verse en la tabla, la cáscara de maní tiene una humedad baja, del 11% en promedio, por lo que es muy buena para gasificar en gasificadores de lecho fijo downdraft (que necesitan biomasa con humedad menor al 20%). También podemos ver que tiene un alto contenido de carbono que resulta en un poder calorífico algo

superior al de la madera (la madera tiene un poder calorífico alrededor de los 17000 kJ/Kg [44-45]), tiene bajo contenido de cenizas (menor al 5%) y muy poco contenido de azufre y nitrógeno).

El análisis elemental que realizamos a la cáscara de maní proveniente de la empresa Maglione Hnos. arrojó los siguientes resultados, muy similares a los presentados en la tabla anterior.

Tabla 2: Análisis elemental de cáscara de maní de la empresa Maglione Hnos empleada en la gasificación.

Análisis elemental base seca %	
C	44,1
H	6,6
N	2
S	< 0,1

Las cáscaras producen una buena gasificación (cualitativamente observamos que es desarrolla una llama sin humos ni hollín) y tiene como inconveniente la formación de canales de cáscara que pueden incluso interrumpir la gasificación si no se desarman. Las pruebas de gasificación en el equipo piloto muestran que el caudal máximo de cáscara de maní que se gasifica es de 30 Kg/h.

Se generan alrededor de un 10% de biochar y cenizas. El análisis elemental del biochar obtenido es el siguiente:

Tabla 3: Análisis elemental del biochar obtenido de gasificar cáscara de maní.

Análisis elemental biochar %	
C	67
H	5
N	1

El contenido de carbono del biochar puede variar de acuerdo a las condiciones de gasificación [46]. El carbono es el responsable de aumentar la superficie específica de los biocarbones, ya que juega un papel crítico en la construcción de sus estructuras porosas. Por lo tanto este biochar es un buen precursor de carbón activado, que se caracteriza por una alta porosidad y área de superficie específica, y por lo tanto alta capacidad de adsorción [47].

Para el caudal máximo de cáscara de maní de 30 Kg/h y una razón estequiométrica de RS=0,3 se espera obtener un syngas con las siguientes características:

Tabla 4: Cálculo de la composición molar del syngas que se obtiene de gasificar 30 Kg/h de cáscara de maní con una razón estequiométrica de SR=03.

Componente	Base húmeda (%)	Base seca (%)
CO	19,63	20,67
CO <sub>2</sub>	10,94	11,52
CH <sub>4</sub>	1,61	1,69
N <sub>2</sub>	40,00	42,12
H <sub>2</sub> O	5,04	---
H <sub>2</sub>	22,78	23,98

Se han caracterizado los gases obtenidos mediante cromatografía gaseosa, pero por falta de gases patrones para lograr individualizar resultados, solamente hemos podido obtener lo siguiente:

- Cantidad de CO<sub>2</sub>: 11.11%
- Mezcla de resto de gases (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CO): 88.28%

Si bien, por falta de gases patrones para cuantificar individualmente todos los gases obtenidos, se ha encontrado que los valores analizados de CO<sub>2</sub> y de la mezcla de los gases restantes, son similares a los obtenidos del modelado que se realizó a tal fin.

## PROYECTO DE BIORREFINERÍA EN LA EMPRESA MANICERA MAGLIONE HNOS

### 1. Situación actual de la región y la empresa

Argentina ocupa el noveno lugar en el mundo como productor de maní y, debido al bajo consumo interno, se exportan el 95% de la producción nacional, ya que el consumo local ronda apenas los 400 gramos por persona por año, cuando a nivel mundial es diez veces más alto.

La Provincia de Córdoba genera el 90% de la producción nacional radicando 23 de las 25 empresas maniseras del país. Entre las empresas maniseras hay pymes, cooperativas, compañías de capitales nacionales y algunas de capitales extranjeros. Hoy esta actividad involucra cerca de 12.000 puestos de trabajo (directos e indirectos) en más de 30 localidades cordobesas, siendo muchos los pueblos rurales de Córdoba donde la agroindustria manisera representa una fuente significativa de empleo.

La gasificación como modelo sustentable de biorrefinería para la transformación de la cáscara de maní en gas de síntesis

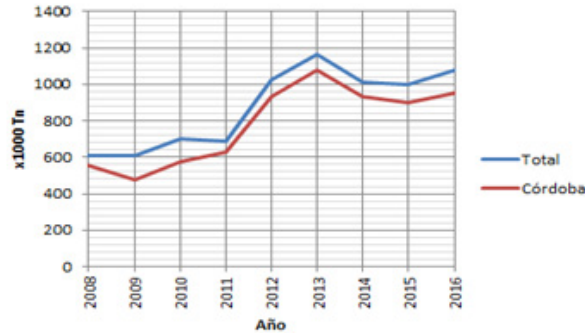


Figura 4: Producción de maní en Argentina entre los años 2008 y 2016 [48].

Fuente: Bolsa de Comercio de Rosario.

Muchos de los productores maniseros están asociados en cooperativas, las que poseen sus propias plantas industriales y sus propias operaciones de exportación, o bien mantienen convenios asociativos con empresas industriales. En este escenario tanto los productores primarios están integrados a la industria y a la exportación, como así también empresas fabricantes de maquinaria agroindustrial, laboratorios de control de calidad etc. por lo que se denomina a este complejo de productores y empresas el Cluster Manisero.

Alrededor del 30% de la cosecha de maní corresponde a cáscara o vaina del maní. Un promedio entre los años 2015 a 2018 arrojan un valor de 376.700 tn anuales de cáscara de maní, que es un residuo con un buen poder calorífico que puede ser usado como combustible para generación de energía. Algunas empresas o cooperativas utilizan la cáscara de maní para la generación de energía mediante calderas o por quema directa. Sin embargo aún no se ha utilizado en la región la tecnología de gasificación.

Tabla 5: Producción de maní y de cáscara de maní en la Argentina entre los años 2015 y 2018.

Fuente: Cámara Argentina del Maní.

Año comercial	Área		Rendimiento (en grano)	Oferta			Cantidad de cascara
	Sembrada	Cosecha-da		Stock inicial	Producción	Total	
	Hectáreas		Kg/Ha	Tn métricas (en granos)			Tn
2014/15	382.900	378.000	3	30.000	1.088.880	1.118.880	466.662
					1.555.542		
2015/16	385.000	337.500	2	97.880	794.920	892.800	340.680
					1.135.600		
2016/17	402.000	370.000	2	0	930.335	930.335	362.206
					1.292.541		
2017/18	423.000	423.000	2	0	689.691	689.691	337.176
					1.026.867		

La empresa Maglione Hnos y Cia S.A. se encuentra en la región central de la provincia de Córdoba, en la localidad de Las Junturas y pertenece al Cluster Manisero. Esta empresa procesa maní tanto de sus plantaciones como de agricultores externos.

La empresa genera alrededor de 1500 tn de cáscara de maní por año, que servirá para la gasificación y obtención del gas de síntesis que será utilizado para reemplazar el consumo de gas natural de los hornos de secado y blanqueo del maní.

La cáscara es almacenada en un terreno colindante al terreno donde está emplazada la empresa y hasta el momento parte de la cáscara es vendida a productores de ladrillos de la zona.

## 2. Adecuación de hornos

La empresa posee dos hornos de secado y blanqueo (separación del tegumento que recubre al grano de maní), que actualmente funcionan a gas natural (GN) y se convertirán a syngas. Cada horno tiene un quemador lineal de mezcla en tobera con pantallas estabilizadoras en vena de aire, o sea son de llama directa, y los gases de combustión entran en contacto con el producto. Esto nos da un condicionante sobre la calidad de gases efluentes que deben estar presentes en el proceso, por lo que debemos eliminar el particulado, evitar la generación de humos y hollín.

La adecuación consiste en obtener la equivalencia entre la utilización del gas natural y del syngas (a partir de su poder calorífico) para mantener la potencia en los hornos, y en adecuar los quemadores cambiando los picos inyectoros de gas y diámetro de las tuberías de alimentación de gas.

El consumo de gas natural fue obtenido de los registros de la empresa Maglione, y se presentan en el siguiente gráfico:

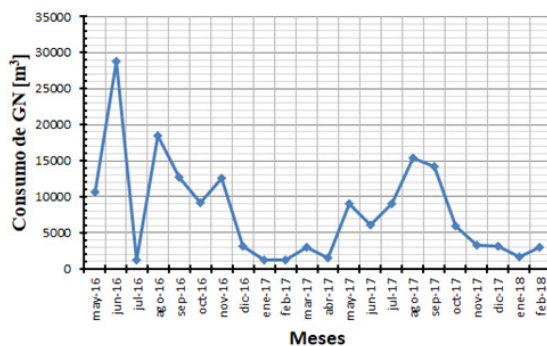


Figura 5: Consumo de gas natural de la empresa entre mayo de 2016 y febrero de 2018.  
Fuente: Empresa Maglione.

Del gráfico obtenemos que el consumo promedio del año 2017 fue de 6.079 m<sup>3</sup> de gas natural mensual y que el valor de consumo más alto ronda los 29000 m<sup>3</sup>, en junio de 2016. Lo que proponemos es reemplazar ese consumo de gas natural por el uso de gas de síntesis.

Para obtener el caudal equivalente de gas de síntesis para lograr la misma potencia térmica en los hornos se hace un análisis del poder calorífico de cada gas, los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6: Consumos de GN y Syngas de cada horno (elaboración propia)

Potencia termina de hornos		Poder calorífico			Consumos		
		GN	Syngas <sub>1</sub>	Syngas <sub>2</sub>	GN	Syngas <sub>1</sub>	Syngas <sub>2</sub>
Kcal/hr	KJ/hr	kJ/m <sup>3</sup>			Nm <sup>3</sup> /hr		
300.000	1.255.200	38.937	5.830	9.920	32,24	215,30	126,53
400.000	1.673.600				42,98	287,07	168,71
				Totales	<b>75,22</b>	<b>502,37</b>	<b>295,24</b>

Notas:

Syngas<sub>1</sub>: gasificación con aire

Syngas<sub>2</sub>: gasificación con vapor de agua

### 3. Proyecto de biorrefinería

Se construirá un galpón donde se instalarán los equipos del gasificador, cercano a la zona de almacenamiento de la cáscara (figura 6).



Figura 6: Planta Maglione Hnos y Cia S.A. con ubicación de planta gasificadora y tuberías.

Las instalaciones para el proceso serán las siguientes:

- 1- Las cáscaras se llevarán al playón de carga del equipo mediante palas cargadoras de la empresa. Las mismas serán colocadas debajo de un techo de protección.
- 2- A medida que se requiera, las cáscaras se volcarán en una tolva de recepción, que tendrá en su parte inferior un sistema de transporte mediante un tornillo sin fin para el movimiento de esta biomasa a la zona de carga superior del equipo gasificador.
- 3- Previo a la carga en el gasificador, la biomasa se seca en un horno secador rotativo, sientto alimentado con los gases de combustión provenientes del reformador catalítico. La temperatura de este secador será de 200°C a 400°C.
- 4- La tolva de carga superior consistirá en un cerramiento que tendrá dos clapetas de cierre: uno superior que se abre cuando llega material nuevo, y se cierra cuando se llene esta tolva, y uno inferior, que conecta esta cámara con el gasificador que se abre cuando esta cámara esté llena y se cierra cuando toda la biomasa haya caído hacia el gasificador, para evitar la fuga de gases del mismo.
- 5- El gasificador es autotérmico, es decir, una vez iniciada la combustión parcial de la biomasa en su interior, la sola inyección de aire a la relación elegida mantiene el proceso. Los gases de salidas salen con una carga de alquitrán y humedad. Los residuos sólidos son el biochar y cenizas que se extraen por la parte inferior. Parte del biochar se utilizará como filtro reformador colocado sobre la parrilla de cenizas dentro del gasificador.
- 6- El gas es filtrado mediante un filtro ciclónico, un filtro de tela filtrante de alta temperatura y un reformador catalítico. El contenido de alquitrán disminuye hasta valores por debajo de 2 gr/m<sup>3</sup> y el particulado se retiene hasta un 99,9 % para partículas 5 µm.
- 7- Finalmente el syngas se enfría por debajo de 80°C, asegurándose que no hayan quedado rastros de alquitrán en la corriente gaseosa.
- 8- En etapas intermedias se aprovecha los calores residuales de combustión del syngas para generar vapor de agua y ser aplicado como medio gasificante.

El esquema funcional del sistema se puede observar en el siguiente gráfico:

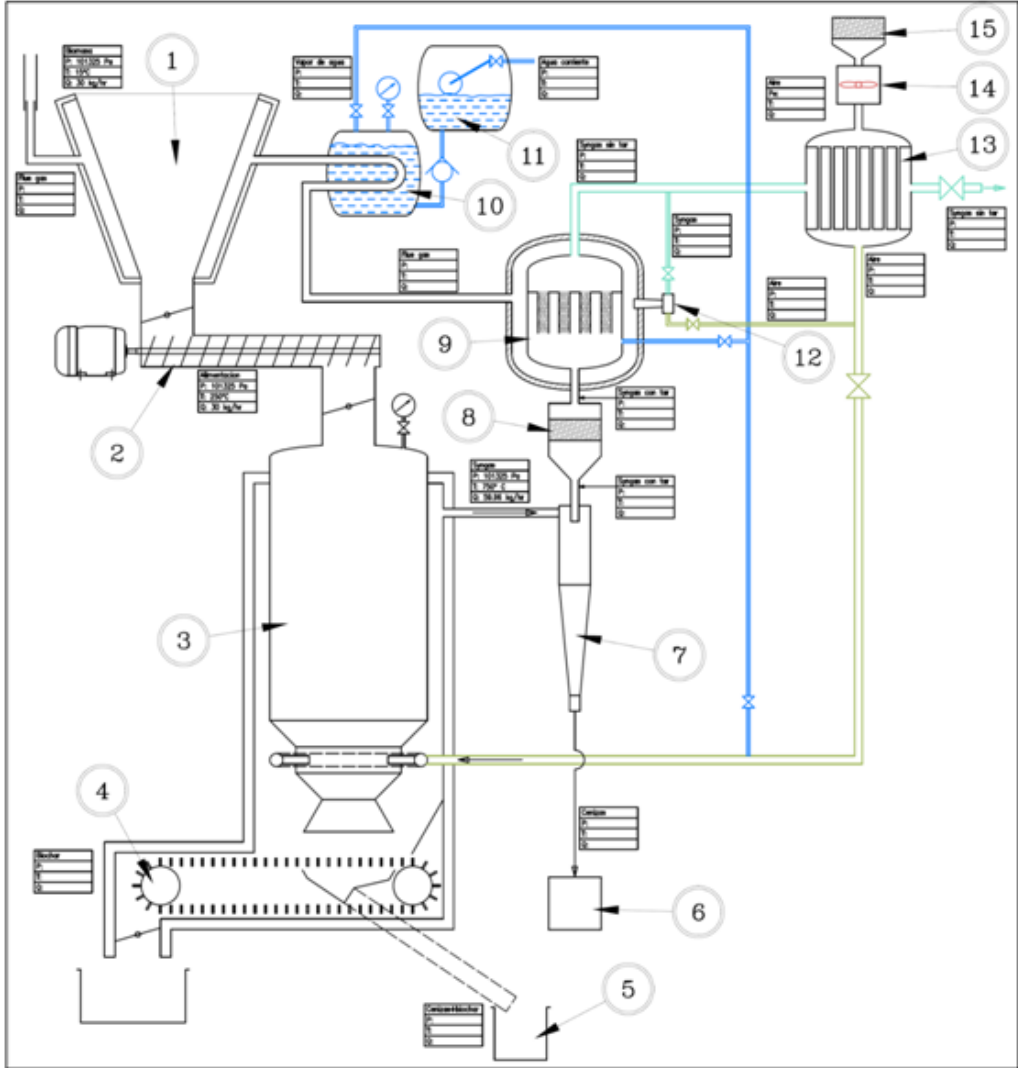


Figura 7: Esquema del proceso de gasificación propuesto.

Donde:

- |                            |   |                                   |
|----------------------------|---|-----------------------------------|
| 1) Tolva de carga          | 2) Alimentador por rosca sin fin                        | 3) Gasificador downdraft          |
| 4) Extractor de biochar    | 5) Extractor de cenizas                                 | 6) Cenicero                       |
| 7) Filtro ciclónico        | 8) Filtro de tela para partículas hasta 5 $\mu\text{m}$ | 9) Reformador catalítico          |
| 10) Vaporizador            | 11) Reserva de agua                                     | 12) Quemador                      |
| 13) Intercambiador gas-gas | 14) Unidad ventiladora                                  | 15) Filtro de partículas en aire. |

#### 4. Dimensionamiento de la planta de gasificación de maní.

Para el dimensionamiento del equipo gasificador, utilizamos los parámetros denominados *carga de hogar*  $B_h$  (*hearth load*), y *velocidad superficial*  $V_s$ :

$$B_h = \text{Volumen normales}_{\text{syngas}} / \text{Area transversal}_{\text{garganta}} \quad (17)$$

$$V_s = Q_{\text{syngas}} / \text{Area transversal}_{\text{garganta}} \quad (18)$$

Que nos dice cuanta producción específica de gas posee el equipo.

El concepto de carga del hogar  $B_h$  (*hearth load*) juega un importante rol en el dimensionamiento del hogar de un gasificador y generador de gas de síntesis. La carga del hogar es la cantidad de gas generador preparado, reducido a metros cúbicos normales por hora, dividido por el área de paso más pequeña en  $\text{cm}^2$  del hogar ( $\text{Nm}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$ ), o en unidades equivalentes. Por lo tanto, la carga del hogar es dimensionalmente una velocidad, aunque habitualmente se expresa como un numerador y un denominador. La velocidad imaginaria del gas preparado, en condiciones de temperatura de ambiente exterior, a través del área de paso más pequeña del hogar se denomina  $V_s$  (m/s). [49]

Un valor bajo de  $V_s$  causa condiciones relativamente pobres a la temperatura de proceso ( $600^\circ\text{C}$ ), produciendo mucho biochar (20-30%), gran cantidad de alquitrán sin quemar, y un syngas con alto contenido de hidrocarburos. Un alto valor de  $V_s$  causa una pirolisis muy rápida, produciendo menos del 10% de biochar y cenizas a  $1050^\circ\text{C}$  y gases calientes a  $1200$  a  $1400^\circ\text{C}$  en la zona de pirolisis flameante. Estos gases entonces reaccionan con el biochar y las cenizas remanentes para producir un contenido de alquitrán menos de  $1000^\circ\text{C}$ , 5-7% de biochar y cenizas y un syngas con menos energía. [50].

Los valores de referencia tomados de la bibliografía son las siguientes: para un gasificador Imbert con un diámetro de garganta de 150 mm, presenta un  $B_h=0.9 \text{ Nm}^3/\text{cm}^2\text{-hr}$  y un valor de  $V_s= 2.5 \text{ m/s}$  [50].

De esta manera la planta gasificadora tendrá dos equipos, cuyas dimensiones son las siguientes:

Tabla 7: Dimensiones de garganta de cada uno de los gasificadores para alimentar los hornos de blandeado.

Potencia horno (Kcal/hr)	Caudal necesario (Nm <sup>3</sup> /hr)	Bh	Área garganta (cm <sup>2</sup> )	Diámetro garganta (cm)	Consumo de cascara de maní (kg/hr)
300.000	215.30	0.9	239.22	<b>17.45</b>	<b>97.86</b>
400.000	287.07	0.9	318.97	<b>20.15</b>	<b>130.48</b>

Con estos cálculos se realizó el dimensionamiento de la planta de gasificación completa.

## CONCLUSIONES

Las cáscaras de maní provenientes de los campos cordobeses generan un gas de síntesis de buena calidad, prácticamente sin humo y al no contener azufre su combustión no genera gases azufrados. Su bajo contenido de humedad hace de esta biomasa un material óptimo para gasificar. En contraparte este material tiende generar escorias en la etapa de combustión y reducción, y bóvedas en la zona de secado, por lo cual es necesario implementar dispositivos para minimizar estas formaciones en los equipos gasificadores. La instalación de una planta de gasificación en la empresa productora de maní permitirá a la empresa reducir los residuos de cáscara de maní en alrededor de 700 tn por año, aprovechando la energía térmica generada en la combustión del syngas para el funcionamiento de los hornos de secado y blandeado, disminuyendo entonces el consumo de gas natural en alrededor de 50.000 m<sup>3</sup> anuales. El desarrollo local e implementación regional de esta tecnología es un ejemplo en el cambio paulatino de la matriz energética actual por otra que pretenda ajustarse a los Objetivos de Desarrollo Sustentable.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la buena voluntad de los directivos de la empresa Maglione Hnos y Cia S.A., cuyos aportes sirvieron para la confección de este proyecto de aplicación real. También agradecemos a la empresa Tool Store S.R.L, en cuyas instalaciones se llevaron a cabo tanto la fabricación del equipamiento como así también las pruebas y ensayos del proceso. Además, agradecemos a la Dra Laura Moyano y colaboradores del INFIQC del Departamento de Química Orgánica de la Facultad de Ciencias Químicas de la UNC por los datos y ensayos realizados tanto de la composición de gas, como de las características del biochar producido por el equipo.

## REFERENCIAS

- [1] DEMIRBAS, A. (2010) Biorefinery. In: *Biorefineries. Green Energy and Technology*. Springer, London. [https://doi.org/10.1007/978-1-84882-721-9\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-84882-721-9_3)
- [2] <https://www.lv16.com.ar/sg/nota/8644/incendio-de-cascara-de-mani-que-podria-durar-una-semana>
- [3] <https://www.telediariodigital.net/2016/10/un-incendio-de-cascaras-de-mani-alar-mo-a-cabrera/>
- [4] [http://archivo.lavoz.com.ar/2005/1208/regionales/nota377010\\_1.htm](http://archivo.lavoz.com.ar/2005/1208/regionales/nota377010_1.htm)
- [5] CHAGGER, H.K.; KENDALL, A.; McDONALS, A., et al. (1998) Formation of dioxin and other semi volatile organic compounds in biomass combustion. *Applied Energy* Vol. 60, Issue 2, June 1998, pp. 101-114.
- [6] PNUMA. (2005) Emisiones de dioxinas y furanos por quema indiscriminada de biomasa. Ginebra.
- [7] KULKHAMI, P.S.; CRESPO, J.; ALFONSO, C. (2008) Dioxin sources and current remediation technologies. A Review. *Environmental International* 34, pp.139-153.
- [8] WAUTELET, T. (2018) The concep of circular economy: its origins and its evolution. *Researchgate*. Working paper.
- [9] World Encomic Forum. (2014) Toward the circular economy: Acelerating the scale-up across global supply chains. Switzerland.
- [10] Departamento Forestal Dendroenergía de la FAO. Wisdom Argentina. (2009) Análisis del balance de energía derivada biomasa en Argentina.
- [11] CAM. Cámara Argentina del Maní. [www.camaradelmani.org.ar](http://www.camaradelmani.org.ar)
- [12] CAMMESA. "Informe anual 2017". [www.cammesa.com](http://www.cammesa.com)
- [13] DEMIRBAS, A. (2005) Potential applications of renewable energy sources, biomass combustion problems in boiler power systems and combustion related environmental issues. *Progress in energy and combustion science* 31, pp. 171-192.
- [14] BELGIORNO, V.; DE FEO, G.; DELLA ROCA, C., et al. (2002) Energy from gasification of solid waste. *Waste-Management* 23, pp. 1-15.
- [15] BOCCI, E.; SISINNI, M.; MONETI, M., et al. (2014) State of art of small scale biomass gasification power system: a review of the different typologies. *Energy Procedia* 45, pp. 247-256.
- [16] KAUPP, A.; Goss, J. (1984) [2006] Small scale gas producer. *Engine Systems*. Springer.

- [17] BOERRIGTER, H.; RAUCH, R. (2006) Review of applications of gases from biomass gasification. *ECN*. Netherland.
- [18] BUROGOHAIN, B.; MAHANTA, P.; MOHOLKAR, V. (2010) Thermodynamic optimization of biomass gasification for decentralized power generation and Fischer Tropsch. *Energy* 35, pp. 2557-2579.
- [19] ZAINAL, Z.A.; ALI, R.; LEAN, C., et al. (2001) Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy conversion and management* 42, pp. 1499-1515.
- [20] WANG, Y.; KINOSHITA, C.M. (1993) Kinetic model of biomass gasification. *Solar energy* 51-Nº 1, pp. 19-25.
- [21] GILTRAP, D.L.; MCKIBBIN, R.; BARNES, G.R.G. (2003) A steady state model of gas char reactions in a downdraft biomass gasifier. *Solar Energy* 74, pp. 85-95.
- [22] JARUNGTAMMACHOTE, S.; DUTTA, A. (2007) Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy* 32, pp. 1660-1669.
- [23] TILLMAN, D.A. (1978) *Wood as an Energy Resource*. New York Academic Press.
- [24] INSAM, H.; KNAPP, B.A. (2011) *Recycling of biomass ashes*. Springer. Berlin.
- [25] ANIS, S.; ZAINAL, Z.A. (2011) Tar reduction in biomass producer gas via mechanical, catalytic and thermal methods. A review. *Renewable and sustainable Energy reviews* 15, pp. 2355-2377.
- [26] DEVI, L.; PTASINSKY, K.; JANSSEN, F.J.J. (2003) A review of the primary measures for tar elimination in biomass gasification processes. *Biomass and Bioenergy* 24, pp. 125-140.
- [27] GIDDEY, S.; BADWAL, S.P.S.; KULKARNI, A., et al. (2012) A comprehensive review of direct carbon fuel cell technology. *Progress in Energy and combustion Science*. Vol. 18, pp. 360-399.
- [28] AHMAD, M.; RAJAPAKSHA, A.U.; LIM, J.E., et al. (2014) Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water. A review. *Chemosphere* 99, pp. 19-33.
- [29] HOUBEN, D.; EVRARD, L.; SONNET, P. (2013) Beneficial effect of biochar application to contaminated soils on the bioavailability of Cd, Pb and Zn and the biomass production of rapeseed. *Biomass and Bioenergy* 57, pp. 196-204.
- [30] DI BLASI, C. (2000) Dynamic behavior of stratified downdraft gasifier. *Chemical Engineering Science* 55, pp. 2931-2944.
- [31] REED, T.B.; DAS, A. (1988) *Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems*. Solar Energy Research Institute. Colorado.
- [32] BASU, P. (2012) *Biomass gasification, pyrolysis, and torrefaction. Practical design and theory*. Second edition. Elsevier. London.

- [33] BLAZIAK, W.; SZCEWCZYK, D.; LUCAS, C. (2002) Reforming of biomass waste into fuel gas with high temperature air steam. *Pyrolysis & gasification of biomass & waste*. Conference 30 september - 1 october 2002. Strasbourg, France.
- [34] BARUAH, D.; BARUAH, D. (2014) Modeling of biomass gasification: A review. *Renewable and sustainable energy reviews* 39, pp. 806-815.
- [35] KOUKKARI, P.; LAUKKANEN, I.; LIUKKONEN, S. (1997) Combination of overall reaction rate with Gibbs energy minimization. *Fluid phase equilibria* 136, pp. 345-362.
- [36] MENDIBURU, A.Z.; CARVALHO JR, J.; ZANZI, R., et al. (2014) Thermochemical equilibrium modeling of a biomass downdraft gasifier: Constrained and unconstrained non-stoichiometric models. *Energy* 71, pp. 624-637.
- [37] MILNE, T.A.; EVANS, R.J. (1998) Biomass gasifier tar: their nature, formation and conversion. *National Renewable Energy Laboratory*. NREL/TP570-25357.
- [38] AKUDO, C.; TERIGAR, B.G.; THEEGALA, C.S. (2012) Lowering gasifier tars and particulates using heated dolomite catalyst and particulate filter. *Scientific Research. Smart grid and renewable energy* 3, pp. 56-61.
- [39] DELGADO, J.; AZNAR M.P.; CORELLA, J. (1996) Calcined dolomite, magnesite, and calcite for cleaning hot gas from fluidized bed biomass gasifier with steam: life and usefulness. *Ind. Eng. Chem. Res.* 35, pp. 3637-3643.
- [40] RICHARDSON, J.F.; HARKER, J.H.; BACKHURST J.R. (2002) *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*. Vol. 2, 5 edition. Butterworth Heinemann.
- [41] VERA, J.E.; BERTOLINO L.E.; CARUBELLI, M., et al. (2017) Bases de diseño de un lecho granular para reforma catalítica del gas de síntesis generado en un gasificador downdraft. *IV Jornada del Departamento de Física FCEfYN - UNC*. Córdoba 23-24 noviembre 2017.
- [42] VERA, J.E.; ALMADA, N.; CARUBELLI, M., et al. (2018) La gasificación como alternativa de valorización energética de cama de pollo en Entre Ríos. *II Jornada Internacional de Ambiente y IV Jornadas Nacionales de Ambiente 2018*. UNICEN. Tandil.
- [43] PRODEMAN. (2015) *Experiencia regional en el uso de un subproducto industrial biomásico de origen agropecuario "Cáscara de Maní"*. Ponencia en General Cabrera, Córdoba. Octubre.
- [44] Phyllis database. [www.phyllis.nl](http://www.phyllis.nl)
- [45] CHANNIWALA, S.A.; PARIKH, P.P. (2002) A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels. *Fuel* 81, pp. 1051-1063.

- [46] HERNANDEZ, J.; LAPUERTA, M.; MONEDERO, E. (2016) Characterisation of residual char from biomass gasification: effect of the gasifier operating conditions. *Journal of cleaner production* 138, pp. 83-93.
- [47] LI, H.; DONG, X.; DA SILVA, E., et al. (2017) Mechanisms of metal sorption by biochars: biochar characteristics and modifications. *Chemosphere* 178, pp. 466-478.
- [48] Bolsa de Comercio de Rosario. (2017) *Anuario estadístico 2017*. Rosario, Santa Fe.
- [49] Anónimo (1979) *Generator Gas - The swedish experience from 1939-1945*. SERI/SP-33-140. Golden Colorado.
- [50] REED, T.B.; WALT, R.; ELLIS, S.; DAS, A.; DEUTCH, S. (1999) *Superficial velocity - The key to downdraft gasification*. Fourth Biomass Conference of the Americas.

# APLICACIÓN DE UN MODELO CINÉTICO DE CONSORCIOS METANOGÉNICOS PARA LA DEGRADACIÓN DE EFLUENTES LÁCTEOS PARA LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS UTILIZANDO BIORREACTORES UASB Y EGSB

Cristhian Carrasco<sup>1</sup>, John Vino<sup>1</sup>, Marcelo Clavijo<sup>1</sup>, María Teresa Álvarez <sup>2</sup>

## RESUMEN

El uso de biorreactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales de las industrias con alta carga orgánica presente, se ha incrementado por los altos rendimientos de remoción de materia orgánica (DQO) y por la eficiente producción de biogás como biocombustible. El presente estudio evaluó la aplicación de la tecnología de biorreactores anaerobios, UASB y EGSB, para el tratamiento de efluentes lácteos a escala laboratorio. En la primera parte se caracterizó el agua residual teniendo una concentración de carga orgánica promedio de 3 kg DQO/m<sub>3</sub>, posteriormente se obtuvieron mayores porcentajes de degradación y producción de biogás para el biorreactor EGSB con un tiempo de residencia de 3 meses. Con el modelo matemático ADM1, se ajustaron los parámetros realizando el análisis de sensibilidad, y validándose tanto teóricamente-experimentalmente llegando a una predicción de reducción de carga orgánica con una desviación porcentual de 6,5% y de 1,3% para la producción de biogás utilizando un biorreactor EGSB.

---

1 Instituto de Investigación y Desarrollo de Procesos Químicos (IIDEPROQ), Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Mayor de San Andrés, P.O. Box 12958, La Paz, Bolivia  
Email: [cristhian.carrasco@gmail.com](mailto:cristhian.carrasco@gmail.com)

2 Instituto de Investigaciones Fármaco Bioquímicas, Facultad de Ciencias Farmacéuticas y Bioquímicas (IIFB), Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

## INTRODUCCION

En la última década, la generación de biogás a través del uso de biorreactores anaerobios para el tratamiento de aguas residuales de las industrias y domésticas se ha incrementado significativamente debido a los altos rendimientos de remoción orgánica al compararlos con sistemas convencionales donde se requieren grandes superficies, uso de altas cantidades de agentes químicos y largos tiempos de retención hidráulica. La extensión de la matriz energética en la región de Latinoamérica, y más específicamente en Bolivia, han conllevado a poder producir “energía verde” proveniente de materias primas renovables como residuos lignocelulósicos o efluentes de aguas industriales, y donde actualmente se tienen políticas nacionales de implementación y desarrollo de tecnologías más amigables con el medio ambiente - como es el caso de los biocombustibles (i.e. bioetanol desde ley promulgada en el 2018). Fuera de las tendencias energéticas, los biorreactores no solo ofrecen la obtención de biocombustibles, sino de otros productos como el biól o abono orgánico - representando otro potencial económico desde el punto de vista de la biorefinería y su aplicación en la agricultura. Entre los biorreactores más utilizados en la actualidad para estos fines se tiene al UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) por sus siglas en inglés o conocido como RAFA (Reactor Anaerobio de Flujo Ascendente), este sistema fue desarrollado para el tratamiento de aguas residuales de varias industrias (Lettinga G., 1980). Las velocidades típicas ascensionales de los biorreactores UASB se encuentran en un rango de 0.5 a 1.0 m/h y capaces de tratar entre 10 y 15 kg Demanda Química de Oxígeno (DQO)/(m<sup>3</sup>·d) como parámetro de carga orgánica tratada, por lo que es considerado un reactor de alta tasa de tratamiento (i.e. no requerir de agitación mecánica), donde por su diseño muy simple y de bajo costo representa en su puesta en marcha un fácil mantenimiento. Siendo la característica más importante de este biorreactor de poder producirse *in situ* agregados granulares microbianos - los mismos que en función del tiempo van alcanzando altas actividades teniendo como resultado altos porcentajes de degradación con base al DQO entre 60 y 80% (van Lier, 1997). Fuera del UASB, el desarrollo del biorreactor EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) o Reactor de Lecho Granular Expandido representa otra alternativa de tratamiento y donde sus principales características es operar a mayores velocidades ascensionales que el UASB, entre 5 y 10 m/h, lográndose estas velocidades con una recirculación interna - mayor mezclado dentro del biorreactor provocando que las burbujas de biogás ascienden más rápidamente dentro del reactor. Estas características operativas logran generalmente lodos granulares con mayor sedimentabilidad y alta actividad microbiana tratando cargas orgánicas que oscilan entre 30 y 35 kg

DQO/(m<sup>3</sup>·d) (Chernicharo, 2007; Batstone, 2002). Con referencia a la teoría de granulación bacteriana en ambos biorreactores, UASB y EGSB, la misma es aun discutida por distintos autores (Yu Liu, 2003; van Lier, 1997), siendo que para su entendimiento general se tienen cuatro etapas donde actúan distintas fuerzas en su formación, como son la gravitacional, la de difusión, de van der Waals entre otras consideraciones importantes intervienen las del diseño operativo del biorreactor (i.e. hidrodinámica, temperatura, pH, porcentaje de nutrientes entre las más importantes); sinergia de masificación de consorcios microbianos; diferencia de tiempos de residencia y por último las características del efluente para la formación de biopelículas (Ghangrekar M.M., 1996).

Siendo que tanto la cinética y formación de gránulos bacterianos dependen de varios parámetros operativos incluyendo los genéticos y bioquímicos, la modelación matemática representa una herramienta para poder predecir el comportamiento del biorreactor y maximizar la producción de metano como biocombustible, fuente energética renovable que pueda utilizarse dentro del mismo proceso o en otros potenciales usos. El modelo de digestión anaeróbica (ADM1 - Anaerobic Digestion Model 1) es un modelo desarrollado y estructurado por (Batstone, 2002), donde el mismo puede ser utilizado para la degradación de sustratos complejos (por ejemplo compuesto por carbohidratos, lípidos, proteínas, azúcares, aminoácidos, ácidos grasos de cadena larga, ácidos grasos volátiles, aniones y cationes), e incluye también los múltiples pasos que describen los procesos bioquímicos y fisicoquímicos que se encuentran en el proceso anaeróbico. En el caso de sustratos heterogéneos, como el estiércol líquido, se debe realizar una caracterización detallada, razonable y apropiada del líquido alimentado, determinando la distribución proporcional de carbohidratos, lípidos, proteínas y constituyentes inertes. Además en el mencionado modelo considera que todos los procesos extracelulares bioquímicos son de primer orden de reacción; sinergias de distintos grupos de bacterias tanto acidogénicas, acetogénicas, y metanogénicas; el efecto de inhibiciones producidas por el pH, ausencia de nitrógeno disponible, y amoníaco e hidrogeno disuelto.

El presente trabajo muestra la utilización y validación teórica-experimental del modelo ADM1 para la predicción del comportamiento de un biorreactor previamente seleccionado, con base a la comparación de eficiencias entre el UASB y EGSB, teniendo como criterios importantes - una mayor producción de metano como biocombustible y una alta tasa de degradación de DQO utilizando un sustrato complejo (efluente proveniente del sector lácteo), realizándose todas las pruebas experimentales y modelación a escala laboratorio.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### 1. CARACTERÍSTICAS FISICOQUÍMICAS DEL AGUA RESIDUAL

Las muestras compuestas de agua residual fueron tomadas del sedimentador de la empresa láctea “Flor de Leche SRL” (La Paz, Bolivia) teniendo como referencia de muestreo horarios históricos de producción de dicha compañía. La caracterización fisicoquímica del agua residual se realizó en los laboratorios del IIDEPROQ y el IIFB siguiendo la cadena de custodia de muestreo (NB64002, 2005) y con base a métodos estandarizados y descritos en (APHA, 2005). Los resultados de dicho análisis son mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Características fisicoquímicas del agua residual de Flor de Leche SRL

Parámetros	Máximos	Mínimos	Promedio
Temperatura (°C)	16,0	10,8	12,4
pH	6,6	5,25	5,8
Conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	912	453	730
Sólidos Disueltos Totales (ppm)	660	325	524
Salinidad (ppm)	495	158	381
Grasas (mg/mL)	0,7	0,0	0,3
DQO (mg/L)	3776	439	2066
Densidad (g/mL)	1,04	1,03	1,04
Viscosidad (20°C) (kg/ms)	$9,86 \times 10^{-4}$	$9,88 \times 10^{-4}$	$9,85 \times 10^{-4}$

### 2. CARACTERÍSTICAS DEL INÓCULO

Los lodos semi-líquidos fueron extraídos de los biodigestores de la Estación Experimental de Choquenaira (Viacha, La Paz) en coordinación con la Facultad de Agronomía (UMSA). Donde previo a la caracterización se procedió a separar los sólidos inertes con una malla de 0,5 mm. Se determinó el contenido de Sólidos Volátiles (SV) y Sólidos Totales (ST) por los métodos descritos en (APHA, 2005); obteniéndose un valor de Sólidos Volátiles 14180 mg/L y la relación de SV/ST igual a 0,62. Para este trabajo se utilizó la medida SV en vez de SSV (Sólidos Suspendidos Volátiles) y ST para estimar la cantidad de biomasa presente en el biorreactor con base a las referencias de (Chernicharo, 2007; Eckenfelder, 1989).

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE TRATAMIENTO (ESCALA LABORATORIO)

Para la realización del trabajo se utilizaron dos biorreactores, UASB y EGSB, ambos de un volumen útil de 2 y 1,5 L, respectivamente. Las características técnicas del UASB y EGSB fueron un diámetro de 52,9 mm con una relación de altura:diámetro (cm/cm) igual a 18 y de un diámetro de 60,0 mm con una relación de altura:diámetro igual a 23, respectivamente. Ambos sistemas poseían varias válvulas para la extracción de muestras de lodo puestas a diferentes alturas, y para el cálculo de la biomasa producida dentro de los biorreactores fue estimado usando un promedio ponderado con base a estudios previos de (Chernicharo, 2007). Cada sistema estaba compuesto por una bomba peristáltica para mantener constante el caudal de entrada en los biorreactores. A su vez se tuvo un sistema de captación de biogás acoplado a su deflector tanto para el UASB y EGSB, donde con base a su tiempo de residencia se comparó la máxima producción de biogás y degradación en ambos sistemas. La instalación del sistema EGSB de detalla en la siguiente Figura 1.

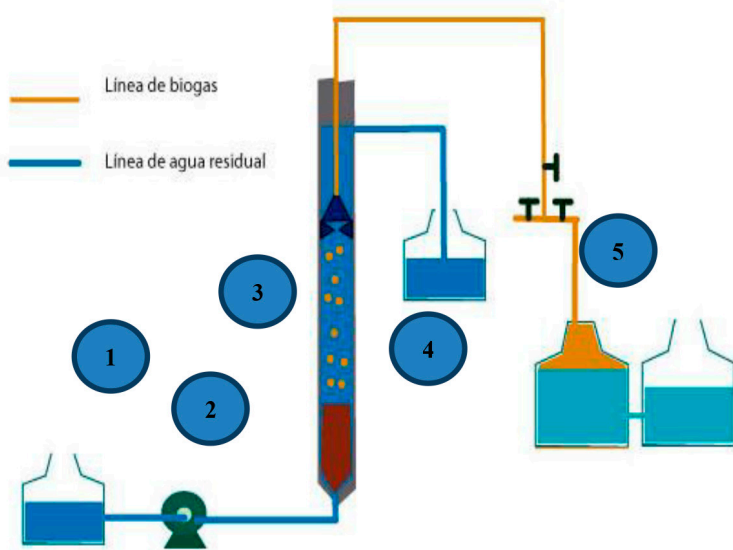


Fig. 1 Diagrama esquemático del sistema de tratamiento utilizando el biorreactor EGSB. (1) Recipiente del efluente no tratado; (2) Bomba peristáltica; (3) biorreactor EGSB; (4) Colector de efluente tratado; (5) Sistema de contrapresión para la captación de biogás.

En la puesta en marcha en ambos biorreactores se consideraron dos criterios importantes: la tasa de carga orgánica (Organic Loading Rate – OLR) y la tasa de carga del lodo (Sludge Loading Rate – SLR), bajo las relaciones recomendadas por (Ghangre-

kar M.M., 1996). En este trabajo se utilizaron un ORL de 0,5 kg DQO/(m<sup>3</sup>·d); un SLR de 0,16 kg DQO/(kg SV·d) y con un tiempo de retención de 24 h para el arranque de ambos sistemas UASB y EGSB a una temperatura ambiente de 20°C. Luego se aumentó gradualmente la carga orgánica (efluente lácteo) logrando que la estabilidad del pH se encuentre entre 6,8-7,2 (es decir no se requiera la adición de aditivos). Los rangos para el aumento gradual de la carga orgánica fueron de 1,5; 3 y 5 kg DQO/(m<sup>3</sup>·d), en días de operación de 20, 40 y 60 para cada carga orgánica respectivamente (Shuangjiang, 1993).

#### 4. CONSIDERACIONES DEL MODELO ADM1

Con base a estudios previos (Batstone, 2002), se consideró en la modelación del biorreactor que obtenga mayor producción de biogás, tomando en cuenta los balances másicos en la fase líquida, material particulado (formación de gránulos), balance de cationes y aniones, y finalmente en la fase gaseosa (se detallan en el Apéndice 1). Además de considerar las reacciones cinéticas-bioquímicas, equilibrio acido-base, y procesos de inhibición más relevantes. Los valores de entrada para el modelo utilizado en el presente trabajo fueron considerados con base a los análisis fisicoquímicos del efluente (sustrato), tomando en cuenta las relaciones estequiométricas como se muestra en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Valores de entrada del modelo ADM1 en kg DQO/m<sup>3</sup> (\*)

Azúcares	3,808
Proteínas	0,386
Lípidos	0,0665
Ácido Valérico	0,1225
Ácido Propiónico	0,1225
Ácido Butírico	0,1225
Ácido Acético	0,1225

(\*) Temperatura de 298,15 K; Presión de 495 mmHg (La Paz, Bolivia);

Volumen de Fase Gaseosa de 300 mL y un Tiempo de Retención Hidráulica (TRH) de 24 horas.

El modelo matemático ADM1 se resolvió utilizando la herramienta de software MATLAB R2015b (v8.6).

#### 5. PRUEBA HIDRODINÁMICA

Para la realización de las pruebas de estímulo-respuesta en el biorreactor EGSB se trabajó con un trazador iónico, cloruro de litio, además de la uti-

lización de un conductivímetro de alta sensibilidad. Se inyectó el trazador con un flujo de 1.5 L/d para un tiempo de retención hidráulico (TRH) promedio de 24 horas. Las mediciones se realizaron de forma continua siendo para la determinación de concentración del trazador el ajuste de una curva patrón linealizada.

## 6. MÉTODOS ANALÍTICOS

La producción de biogás fue medido diariamente mediante toma de muestras proveniente del sistema de captación de gases – el mismo consta de un botellón con agua para la recolección de gases, el volumen de gas del botellón fue transferido a una columna graduada con agua para determinar volumen desplazado (agua dentro del sistema recolector de gases) y fue regulado a un pH = 2 para que el CO<sub>2</sub> del biogás no sea absorbido en el agua. Los caudales de biogás fueron expresados a una temperatura de 20°C y una presión de 495 mmHg (presión atmosférica de la ciudad de La Paz, Bolivia). Tanto el metano y el dióxido de carbono fueron analizados por Cromatografía Gaseosa (Shimadzu GC14B, Japón) compuesto por un detector TCD y una columna Carboxen-1010m×0,53 mm (Supelco, USA). También se analizaron la Demanda Química de Oxígeno (DQO), Sólidos Totales (ST), Sólidos Volátiles (SV), Nitrógeno Kjeldahl y Grasas con base a los procedimientos estándar de (APHA, 2005).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 1. ETAPA DE INICIO

Previo a la alimentación del efluente en los biorreactores, se sedimentaron por gravedad las grasas y otros sólidos presentes obteniéndose una remoción efectiva del 75%, y posteriormente se diseñó el medio de cultivo con base en estudios previos (Shuangjiang, 1993; Lettinga G., 1980; Hulshoff, 1989). Las concentraciones promedio del sustrato fueron constantes – 3300 mg DQO por litro y 14,18 kg Sólidos Volátiles por metro cúbico, necesarios para el arranque de ambos biorreactores, UASB y EGSB. Se monitoreo por dos meses los siguientes parámetros: pH, DQO, producción de metano, flujos de alimentación continuos del efluente en ambos biorreactores.

## 2. SELECCIÓN DEL BIORREACTOR

Después de los dos meses de funcionamiento se hizo la comparación evolutiva de bioprocesos de ambos reactores en cinco etapas: Arranque (I), Feed-batch (II), Arranque (III), Crecimiento (IV) y Maduración (V) para una misma alimentación, tal como se observa en la Fig. 2. La selección se la hizo en la etapa inicial de crecimiento con base a la masificación microbiana (i.e. características físicas de los gránulos formados). Y para la selección del biorreactor para la modelación y validación - se calculó el porcentaje de remoción de materia orgánica (DQO) más eficiente como se observa en la Fig. 3, donde se obtuvieron rendimientos superiores de remoción al 90% de DQO para el biorreactor EGSB después de los 60 días de inoculación de los consorcios microbianos en condiciones operativas previamente mencionadas. El rendimiento máximo de remoción de DQO para el UASB fue del 76% en la cuarta etapa del bioproceso, siendo un factor importante la variación del pH en la tercera etapa a comparación del EGSB, donde no se observó estos cambios durante el desarrollo experimental. La ventaja comparativa de los resultados del EGSB versus UASB, son posiblemente al mezclado más eficiente de transferencia de masa “granulo-efluente” debido a las dimensiones del diseño del EGSB (Hulshoff, 1989). Con base a los resultados mencionados se seleccionó al biorreactor EGSB para poder obtener mayores rendimientos de biogás como energía alternativa con base a la validación tanto teórica como experimental del modelo ADM1.

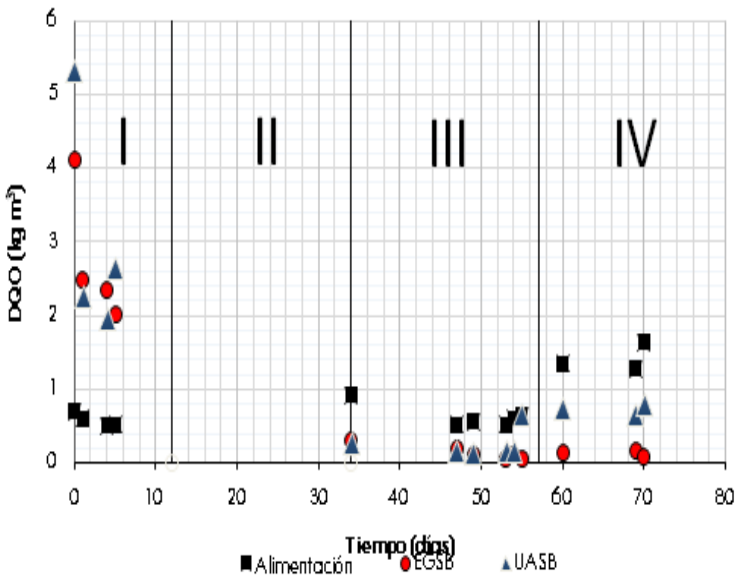


Fig. 2 Carga orgánica de alimentación y salida en biorreactores UASB y EGSB (etapa inicial)

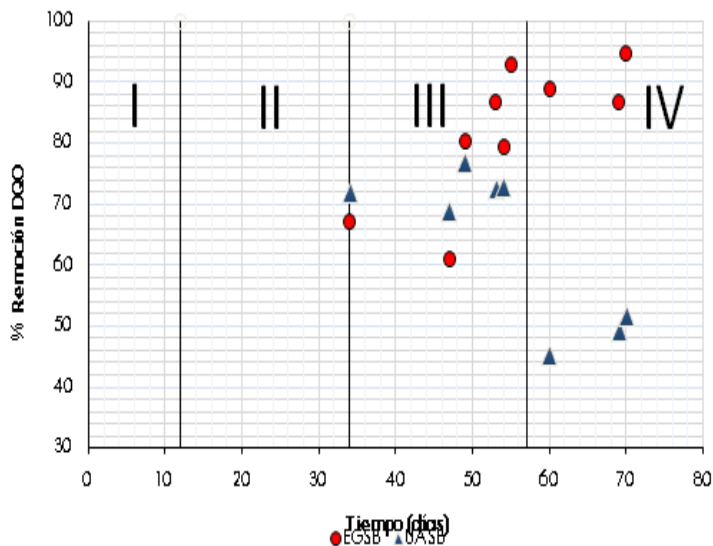


Fig. 3 Rendimiento de remoción materia orgánica (DQO) en los biorreactores UASB y EGSB

### 3. PRODUCCIÓN DE METANO EN EL BIORREACTOR EGSB

El biorreactor EGSB siguió operando durante otros tres meses hasta lograr una remoción efectiva del 70% de carga orgánica en el agua residual de la empresa (fase III) – variación de cargas orgánicas de alimentación en el biorreactor. Para la modelación se controlaron y monitorearon los parámetros operativos del biorreactor EGSB, así mismo la evaluación hidrodinámica, siendo necesarios los mismos para obtener rangos que puedan utilizarse y compararse con el modelo ADM1. Los resultados se observan en la siguiente Tabla 3. Se fue incrementado la carga orgánica hasta llegar a un valor máximo de 5 kg/(m<sup>3</sup>·d), en la modelación se redujo esta carga a 3 kg/(m<sup>3</sup>·d) debido a que se obtuvo mayor presencia de gránulos en el biorreactor – especialmente cuando se alcanzó un tiempo de residencia de 57 días (fase III).

Tabla 3. Parámetros operativos en las cinco etapas del biorreactor EGSB

Fase	Arranque (I)	Feed-batch (II)	Arranque (III)	Crecimiento (IV)	Maduración (V)
Periodo de operación (días)	1-11	12-34	34-57	57-91	91-124
Temperatura promedio (°C)	20	30	20	20	20
Influente DQO (mg/L)	500-700	926-1500	560-650	1352-4044	4974-2986
Efluente DQO (mg/L)	4119-2015	-	110-46	150-1523	1801-956

Aplicación de un modelo cinético de consorcios metanogénicos para la degradación de efluentes lácteos para la producción de biogás utilizando biorreactores UASB y EGSB

Remoción DQO (%)	-	-	80-93	87-62	64-68
OLR (kg DQO/m <sup>3</sup> d)	0,5-0,7	0,92-1,50	0,56-0,65	1,35-1,52	4,97-2,99
TRH (h)	24	24	24	24	24
Producción de biogás (L/d)	-	0,085-1,1	0,14-0,86	0,19-0,99	0,99-2,4
Producción de metano (%)	-	-	40-67	52-69	77

Una vez alcanzado en el biorreactor EGSB, una mayor granulación microbiana (i.e. mayor actividad metanogénica), una estabilidad del pH (6.8-7.2), y una mayor adaptación de la materia orgánica (3 kg/(m<sup>3</sup>·d)) con base a una mayor transferencia gránulo-efluente (Lettinga G., 1980; Hulshoff, 1989), se pudieron obtener mayores porcentajes de reducción de DQO (valores promedio del 90%) desde la fase IV y por ende mayores rendimientos de producción de metano (fases IV y V), tal como se observa en la Fig. 4 – alcanzando valores superiores de 2,4 litros de metano por día o valores promedio de 0,4 kg de metano por kg de DQO removido del efluente. Otros estudios previos han demostrado rendimientos similares para este tipo de biorreactores EGSB y utilizando efluentes del sector lácteo, validando los resultados experimentales alcanzados en el presente estudio (Zhang D., 2011; Saleh M.M.A., 2004; Mortezaei Y., 2018; Zhan C., 2017).

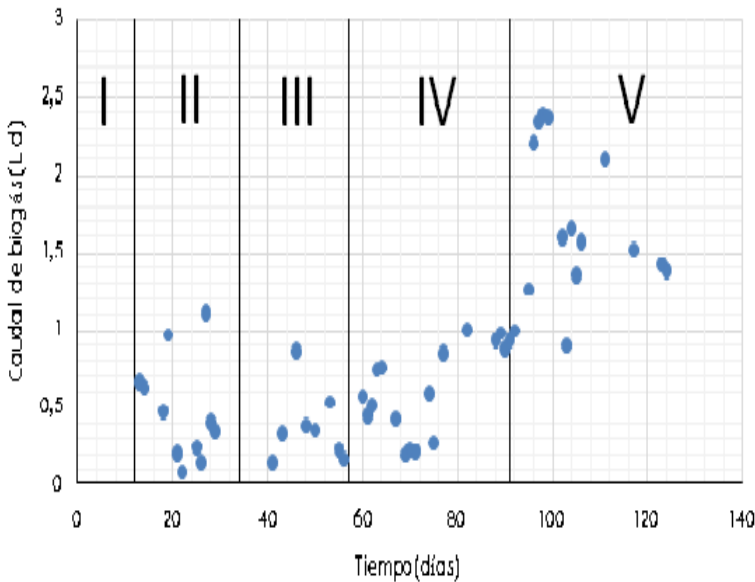


Fig. 4 Producción histórica de biogás en el biorreactor EGSB

#### 4. AJUSTE Y CALIBRACIÓN DEL MODELO

Con base en análisis previos en otros estudios (Fuentes M., 2011), se consideraron dos tipos de parámetros que deben calcularse para el ajuste del modelo: (a.) los parámetros que se pueden medir y no se informan en las fuentes originales; y (b.) parámetros empíricos relacionados con la cinética y el transporte de biomasa en el reactor EGSB con base a los análisis de sensibilidad y predicción. Para la calibración del modelo ADM1 se utilizó una concentración de entrada promedio de 5 kg DQO/m<sup>3</sup>, obteniéndose los siguientes datos como se observan en la Tabla 4. La desviación porcentual obtenida de los datos teóricos versus los datos experimentales fue del 6,5%.

Tabla 4. Datos experimentales para la calibración del modelo ADM1

Día	DQO salida (kg DQO/m <sup>3</sup> )	pH	Caudal de biogás (L/d)
96	1,801	7,20	2,21
97	1,750	7,23	2,34
98	1,765	6,90	2,40
111	1,756	7,40	2,10

Del análisis hidrodinámico con el trazador, se determinó que el biorreactor EGSB seguiría un comportamiento de dos reactores de mezcla completa en serie con volúmenes iguales. Con estos datos y con la simulación en MATLAB, se consideró que en la fase gaseosa - la generación de biogás se produciría en ambos reactores como si estuvieran conectados en paralelo. Con los datos de la Tabla 2, se utilizaron para considerar cuatro ácidos grasos volátiles en el modelo ADM1, considerándose siete consorcios microbianos (i.e. con una actividad metanogénica promedio de 0,89 mmol CH<sub>4</sub>/g SV·día), concentración de lodos producidos en el biorreactor, siendo que con estos dos últimos parámetros se obtiene la relación de concentración aproximada de cada consorcio. Con base a estos análisis se tienen las respuestas en el modelo ADM1 - consumo de macromoléculas (hidrolisis) y su transformación a ácidos grasos volátiles (acetogénesis) (ver Fig. 5).

Aplicación de un modelo cinético de consorcios metanogénicos para la degradación de efluentes lácteos para la producción de biogás utilizando biorreactores UASB y EGSB

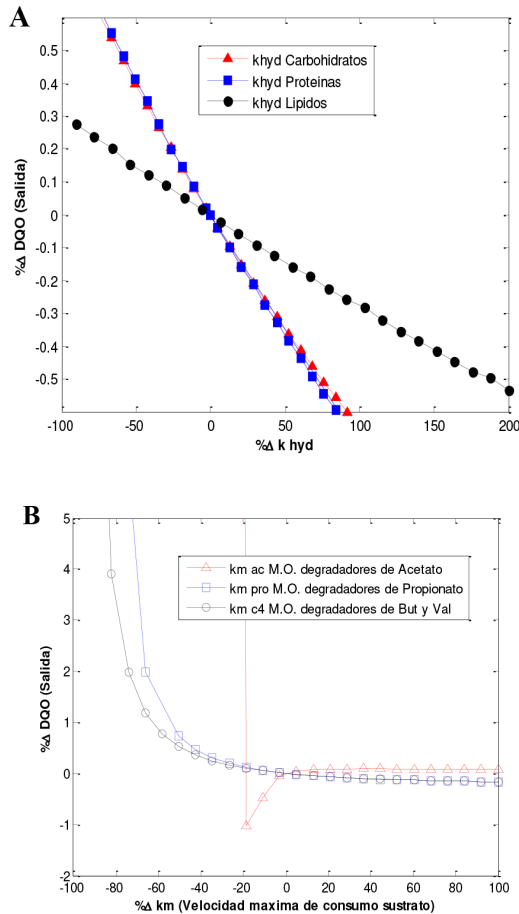


Fig. 5 A. Respuesta de la variación de las constantes de hidrólisis para carbohidratos, lípidos y proteínas; B. Respuesta a la variación de  $k_m$  para M.O. metanogénicos y acetogénicos

Según (Silva F, 2009), la equivalencia de 1,4 gramos de DQO equivalen a 1,0 gramos de SV, siendo necesario expresar la concentración de la biomasa en unidades compatibles con el modelo. Considerando el reactor como dos reactores ideales, teniendo el perfil de concentración de lodos se determina que la concentración inicial para cada consorcio en el primer reactor en serie es 1,352 kg DQO por  $m^3$ , y para el segundo reactor es 0.04448 kg DQO por  $m^3$ . Una vez que se calibra el modelo los valores de las concentraciones de los consorcios se las reemplaza como condiciones iniciales para volver a realizar la calibración. Otras condiciones iniciales y de entrada como constantes cinéticas y de disociación fueron tomadas por recomendación de los autores del ADM1 (Batstone, 2002). Con estos ajustes mencionados, se valida el modelo como se observa en la Fig. 5.

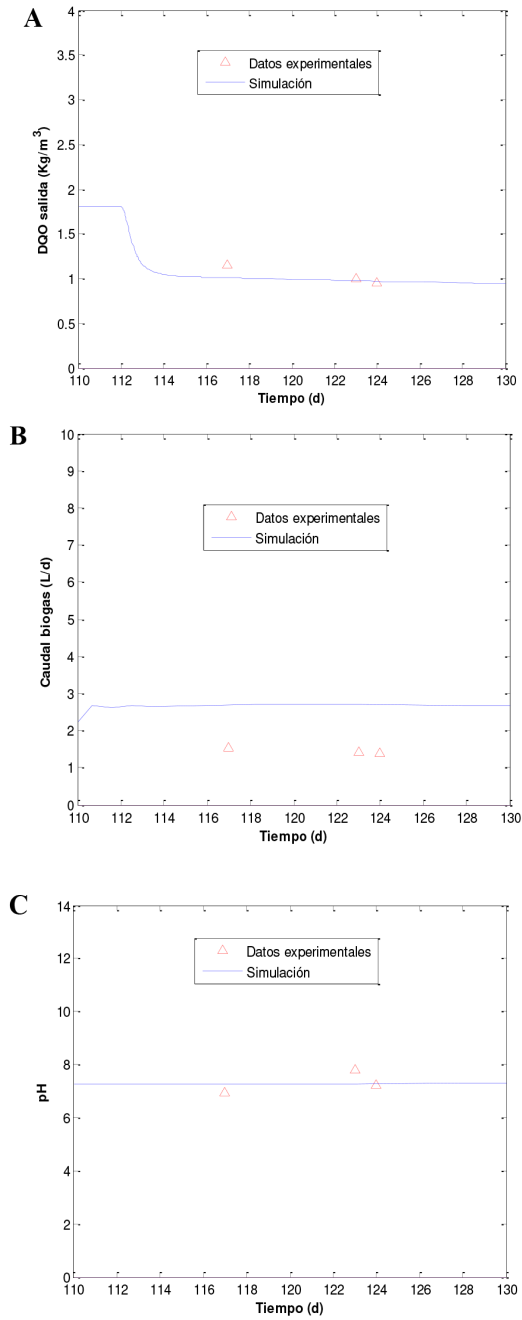


Fig. 6 Resultados de validación del modelo ADM1 en el biorreactor EGSB:  
A. Validación para el DCO; B. Validación para el caudal de biogás; C. Validación para el pH.

Los resultados respecto al DQO demuestran ajustes con una desviación estándar de 0.195 kg DQO/m<sup>3</sup> con una carga orgánica de 3 kg DQO/m<sup>3</sup> a partir del día 112 como tiempo de residencia del EGSB, siendo que en general que la desviación estándar porcentual para cada parámetro; DQO, biogás, y pH; se obtuvieron desviaciones de 6,5; 1,5 y 0,6% respectivamente, siendo que con la aplicación del modelo ADM1 se puede predecir la cantidad de biogás a producir siendo necesario el valor inicial de DQO, para un pH donde la variación en referencia a la composición del sustrato (previamente diseñado) permanezca estable durante todo el bioproceso.

## CONCLUSIONES

Se realizó la modelación del biorreactor EGSB utilizando el modelo ADM1, resolviendo las ecuaciones diferenciales por el software MATLAB/Simulink, este se calibró inicialmente con datos experimentales y posteriormente se validó. Los resultados de la modelación predicen el comportamiento de la carga orgánica de salida (DQO) con una desviación estándar porcentual del 6.5%. Con base a los estudios de revisión bibliográfica y del trabajo hecho en la modelación utilizando el ADM1, dicho modelo es robusto pudiendo predecir comportamientos de biorreactores anaerobios bajo diferentes escenarios principalmente de composición de alimentación, tasa de alimentación, características de la biomasa microbiana, pH del reactor y concentración de algunos inhibidores en estado transitorio y estado estacionario.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen el apoyo financiero de la Fundación Suiza SWISSCONTACT, la cooperación sueca ASDI y a la empresa Flor de Leche SRL.

## REFERENCIAS

- [1] APHA. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, DC: American Public Health Association 21sted.
- [2] BATSTONE, D. K. (2002). *Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)*. London: IWA.
- [3] CHERNICHARO, C. A. (2007). *Anaerobic Reactors*. London: IWA Publishing.
- [4] ECKENFELDER JR., W.W. (1989). *Industrial Water Pollution Control*. Singapore: McGraw-Hill.

- [5] FUENTES M., S. N. (2011). A coupling model for EGSB bioreactors: Hydrodynamics and anaerobic digestion processes. *Chemical Engineering and Processing*, 50, pp. 316-324.
- [6] GHANGREKAR M.M., A. S. (1996). Experience with UASB reactor star-up under different operating conditions. *Water Science & Technology*.
- [7] HULSHOFF, P. (1989). *The phenomenon of granulation of anaerobic sludge*. Wageningen: Ph.D. thesis, Wageningen University.
- [8] LETTINGA G., V. N. (1980). *Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment*. Biotechnology. Bioengineering.
- [9] MORTEZAEI Y., A. T. (2018). High-rate anaerobic digestion of yogurt wastewater in a hybrid EGSB and fixed-bed reactor Optimizing through response surface methodology. *Process Safety and Environmental Protection*, 113, pp. 255-263.
- [10] NB64002, N. B. (2005). *Calidad de Agua - Muestreo de Efluentes Industriales*. Bolivia: IBNORCA.
- [11] SALEH M.M.A., M. U. (2004). Anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment. *Eighth International Water Technology Conference*. Alexandria, Egypt: IWTC8.
- [12] SHUANGJIANG, L. (1993). Population dynamics on anaerobic sludge granulation in UASB reactors. Beijing: *Journal of Environmental Sciences*.
- [13] SILVA F., N. H. (2009). Modelling of anaerobic treatment of evaporator condensate(EC) from a sulphite pulp mill using the IWA anaerobic digestion model no. 1 (ADM1). *Chemical Engineering Journal*, Volume 148, Issues 2-3, pp. 319-326.
- [14] VAN LIER, J. R. (1997). High rate anaerobic wastewater treatment under psychrophilic and thermophilic conditions. *Water Science & Technology*.
- [15] YU LIU, H.-L. X.-F. (2003). *Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanked reactor*. Singapore: Elsevier.
- [16] ZHAN C., W. A. (2017). Effect of parameters on anaerobic digestion EGSB reactor for producing biogas. *10th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning* (pp. 205, 3749-3754). Jinan, China: Procedia Engineering.
- [17] ZHANG D., C. Y. (2011). A New Process for Efficiently Producing Methane from Waste Activated Sludge: Alkaline Pretreatment of Sludge Followed by Treatment of Fermentation Liquid in an EGSB Reactor. *Environmental Science and Technology*, 45 (2), pp 803-808.

## APÉNDICE 1

Ecuaciones de balance de masa la fase líquida

$$\frac{dS_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{su,in} - S_{su}) + \rho_2 + (1 - f_{fa,li}) \rho_4 - \rho_5 \quad (1)$$

$$\frac{dS_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{aa,in} - S_{aa}) + \rho_3 - \rho_6 \quad (2)$$

$$\frac{dS_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} \cdot (S_{fa,in} - S_{fa}) + f_{fa,li} \cdot \rho_4 - \rho_7 \quad (3)$$

$$\frac{dS_{va}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} \cdot (S_{va,in} - S_{va}) + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{va,aa} \cdot \rho_6 - \rho_8 \quad (4)$$

$$\frac{dS_{bu}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} \cdot (S_{bu,in} - S_{bu}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{bu,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{bu,aa} \cdot \rho_6 - \rho_9 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{pro}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} \cdot (S_{pro,in} - S_{pro}) + (1 - Y_{su}) \cdot f_{pro,su} \cdot \rho_5 + (1 - Y_{aa}) \cdot f_{pro,aa} \cdot \rho_6 + \\ & (1 - Y_{c4}) \cdot 0.54 \cdot \rho_8 - \rho_{10} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{ac}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{ac,in} - S_{ac}) + (1 - Y_{su}) f_{ac,su} \rho_5 + (1 - Y_{aa}) f_{ac,aa} \rho_6 + (1 - Y_{fa}) 0.7 \rho_7 + \\ & (1 - Y_{c4}) 0.31 \rho_8 - (1 - Y_{c4}) 0.8 \rho_9 + (1 - Y_{pro}) 0.57 \rho_{10} - \rho_{11} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \frac{dS_{h2}}{dt} = & \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{h2,in} - S_{h2}) + (1 - Y_{su}) f_{h2,su} \rho_5 + (1 - Y_{aa}) f_{h2,aa} \rho_6 + (1 - Y_{fa}) 0.3 \rho_7 + \\ & (1 - Y_{c4}) 0.15 \rho_8 - (1 - Y_{c4}) 0.2 \rho_9 + (1 - Y_{pro}) 0.43 \rho_{10} - \rho_{12} - \rho_{T,8} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{dS_{ch4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{ch4,in} - S_{ch4}) + (1 - Y_{ac}) \rho_{11} + (1 - Y_{h2}) \rho_{12} - \rho_{T,9} \quad (9)$$

$$\frac{dS_{IC}^*}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{IC,in} - S_{IC}) - \sum_{j=1}^{19} \left( \sum_{i=1-9,11-24} C_i v_i \rho_j \right) - \rho_{T,10} \quad (10)$$

$$\frac{dS_{IN}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{IN,in} - S_{IN}) - Y_{su} N_{bac} \rho_5 + (N_{aa} - Y_{aa} N_{bac}) \rho_{12} + (N_{bac} - N_{xc}) \sum_{i=13}^{19} \rho_i + (N_{xc} - f_{xl,xc} N_I - f_{sl,xc} N_I - f_{pr,xc} N_{aa}) \rho_1 \quad (11)$$

$$\frac{dS_I}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (S_{I,in} - S_I) + f_{sl,xc} \rho_1 \quad (12)$$

Más específicamente la sumatorio del balance de carbono inorgánico

$$\sum_{j=1}^{19} \left( \sum_{i=1-9,11-24} C_i Y_{i,j} \rho_j \right) = \sum_{k=1}^{12} S_k \rho_k + S_{13} (\rho_{13} + \rho_{14} + \rho_{15} + \rho_{16} + \rho_{17} + \rho_{18} + \rho_{19})$$

Donde

$$s_1 = -C_{xc} + f_{sl,xc} C_{sl} + f_{ch,xc} C_{ch} + f_{pr,xc} C_{pr} + f_{li,xc} C_{li} + f_{xl,xc} C_{xl}$$

$$s_2 = -C_{ch} + C_{su}$$

$$s_3 = -C_{pr} + C_{aa}$$

$$s_4 = -C_{li} + (1 - f_{fa,li}) C_{su} + f_{fa,li} C_{fa}$$

$$s_5 = -C_{su} + (1 - Y_{su}) (f_{bu,su} C_{bu} + f_{pro,su} C_{pro} + f_{ac,su} C_{ac}) + Y_{su} C_{bac}$$

$$s_6 = -C_{aa} + (1 - Y_{aa}) (f_{va,aa} C_{va} + f_{bu,aa} C_{bu} + f_{pro,aa} C_{pro} + f_{ac,aa} C_{ac}) + Y_{aa} C_{bac}$$

$$s_7 = -C_{fa} + (1 - Y_{fa}) 0.7 C_{ac} + Y_{fa} C_{bac}$$

$$s_8 = -C_{va} + (1 - Y_{c4}) 0.54 C_{pro} + (1 - Y_{c4}) 0.31 C_{ac} + Y_{c4} C_{bac}$$

$$s_9 = -C_{bu} + (1 - Y_{c4}) 0.8 C_{ac} + Y_{c4} C_{bac}$$

$$s_{10} = -C_{pro} + (1 - Y_{pro}) 0.57 C_{ac} + Y_{pro} C_{bac}$$

$$s_{11} = -C_{ac} + (1 - Y_{ac}) C_{ch4} + Y_{ac} C_{bac}$$

$$s_{12} = (1 - Y_{h2}) C_{ch4} + Y_{h2} C_{bac}$$

$$s_{13} = -C_{bac} + C_{xc}$$

Balance de másico para material particulado

$$\frac{dX_{xc}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{xc,in} - X_{xc}) - \rho_1 + \sum_{i=13}^{19} \rho_i \quad (13)$$

$$\frac{dX_{ch}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}} (X_{ch,in} - X_{ch}) + f_{ch,xc} \rho_1 - \rho_2 \quad (14)$$

$$\frac{dX_{pr}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{pr,in} - X_{pr}) + f_{pr,xc}\rho_1 - \rho_3 \quad (15)$$

$$\frac{dX_{li}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{li,in} - X_{li}) + f_{li,xc}\rho_1 - \rho_4 \quad (16)$$

$$\frac{dX_{su}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{su,in} - X_{su}) + Y_{su}\rho_5 - \rho_{13} \quad (17)$$

$$\frac{dX_{aa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{aa,in} - X_{aa}) + Y_{aa}\rho_6 - \rho_{14} \quad (18)$$

$$\frac{dX_{fa}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{fa,in} - X_{fa}) + Y_{fa}\rho_7 - \rho_{15} \quad (19)$$

$$\frac{dX_{c4}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{c4,in} - X_{c4}) + Y_{c4}\rho_8 + Y_{c4}\rho_9 - \rho_{16} \quad (20)$$

$$\frac{dX_{pro}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{pro,in} - X_{pro}) + Y_{pro}\rho_{10} - \rho_{17} \quad (21)$$

$$\frac{dX_{ac}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{ac,in} - X_{ac}) + Y_{ac}\rho_{11} - \rho_{18} \quad (22)$$

$$\frac{dX_{h2}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{h2,in} - X_{h2}) + Y_{h2}\rho_{12} - \rho_{19} \quad (23)$$

$$\frac{dX_I}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(X_{I,in} - X_I) + f_{xl,xc}\rho_1 \quad (24)$$

Balance de masa para cationes y aniones

$$\frac{dS_{cat+}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(S_{cat+,in} - S_{cat+}) \quad (25)$$

$$\frac{dS_{an-}}{dt} = \frac{q_{in}}{V_{liq}}(S_{an-,in} - S_{an-}) \quad (26)$$

## Ecuaciones de la fase gaseos

$$\frac{dS_{gas,h2}}{dt} = -\frac{S_{gas,h2} \cdot q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,8} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad (27)$$

$$\frac{dS_{gas,ch4}}{dt} = -\frac{S_{gas,ch4} \cdot q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,9} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad (28)$$

$$\frac{dS_{gas,co2}}{dt} = -\frac{S_{gas,co2} \cdot q_{gas}}{V_{gas}} + \rho_{T,10} \cdot \frac{V_{liq}}{V_{gas}} \quad (29)$$

$$q_{gas} = k_p (P_{gas} - P_{atm}) \quad (30)$$

$$P_{gas} = p_{gas,h2} + p_{gas,ch4} + p_{gas,co2} + p_{gas,h2o} \quad (31)$$

## **PARTE II**

# **EFICIENCIA ENERGÉTICA**

# CONSUMO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

Néstor F. Ortega<sup>1</sup> 2, Alejandro R. Ratazzi<sup>1</sup>, Juan M. Moro<sup>1</sup>

## RESUMEN

En este capítulo, se analizan diferentes parámetros que influyen en la cantidad de energía consumida en un edificio. Se desarrollan distintos aspectos vinculados a este consumo, como la forma del edificio, los cerramientos perimetrales, la arquitectura de la envolvente, su ubicación, etc. Además, se presentan estudios energéticos de viviendas, desarrolladas por diferentes autores, en las que se examinan los parámetros antes mencionados. Todo el análisis se lleva a cabo de acuerdo al marco de las normas IRAM, vigentes en Argentina y en relación con las normas internacionales vigentes sobre eficiencia energética. Por otro lado, se estudian varias herramientas para evaluar la sostenibilidad de las construcciones, como es el caso de LEED, BREEAM y CASBEE. Las mismas, se basan en las normas, reglamentos y métodos de construcción del país de origen, por ello, estos métodos de evaluación son analizados y comparados con respecto a la ponderación de los indicadores que tienen en cuenta el uso de la energía, que son los de mayor peso relativo. Además, se analiza su aplicabilidad en Argentina, teniendo en cuenta las características de las edificaciones típicas de las diferentes regiones del país, razón por la cual, este análisis se puede extrapolar a otros países de Sudamérica, con condiciones similares.

---

1 Instituto de Ingeniería, Dep. de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur - CIC.

2 Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

Mail: [nfortega@criba.edu.ar](mailto:nfortega@criba.edu.ar), [alejandro.ratazzi@uns.edu.ar](mailto:alejandro.ratazzi@uns.edu.ar), [juan.moro@uns.edu.ar](mailto:juan.moro@uns.edu.ar)

## INTRODUCCIÓN

Los edificios están construidos para que los seres humanos puedan llevar a cabo sus diversas actividades en un entorno adecuado, de manera eficiente, segura y con confort térmico. En su funcionamiento, y dependiendo de una serie de características, los edificios consumen diferentes cantidades de energía. En este capítulo, se revisan y analizan los diferentes parámetros de un edificio que afectan al consumo de energía. Esencialmente, los parámetros de un edificio que influyen en el consumo de energía se pueden agrupar en cuatro grandes bloques, que están obviamente interconectados: ubicación y uso operativo, arquitectura, superficie externa del edificio y ventilación.

La ubicación y el uso operativo de un edificio -su propósito- es la primera consideración clave de un análisis energético. Por ejemplo, un edificio construido para una instalación industrial, tiene características y demandas radicalmente diferentes que un edificio para uso residencial. La ubicación (zonas rurales o urbanas), la geografía y el clima también afectarán a las necesidades energéticas.

Para considerar los aspectos arquitectónicos del edificio, se debe analizar: forma, orientación, asoleamiento, las particularidades de la ubicación y todo lo relacionado con las costumbres, tipo y tiempo de uso del edificio, también afectan al uso de la energía. Cambiar la forma de un edificio puede reducir el consumo de energía en una zona del edificio, pero puede aumentarlo en otra. También hay desarrollos recientes tanto en el sector de la construcción verde, como en la corriente principal, que se revisarán en este capítulo. Diferentes materiales se pueden utilizar en el diseño de los edificios, con capacidad de aislamiento variable. Por ejemplo, se viene registrando un uso cada vez mayor de la madera. También se han observado progresos en el uso de la construcción con fardos de paja, materiales recuperados y de desecho, construcción de tierra, techos verdes, etc.

La superficie externa de un edificio -la cáscara o la piel- es una barrera entre el entorno exterior, que puede variar en sus condiciones hidrotérmicas, para tener un ambiente interior estable y cómodo. Esta superficie debe actuar como un moderador del clima interior, utilizando energía para mantener en una condición apropiada los ambientes, especialmente, durante las temperaturas extremas en cada una de las temporadas.

Se utilizan dos términos para describir el movimiento del aire dentro y fuera del edificio: infiltración y ventilación. Además, el calor de un edificio se pierde a través de tres fenómenos físicos: conducción, convección y radiación, por medio de la piel del edificio. La conducción es el proceso de transferencia de calor a través de las

partes sólidas de la envolvente externa. La conducción se hace mucho más difícil en materiales de baja densidad, donde las moléculas están más separadas. Para reducir las pérdidas de calor de en las fachadas del edificio, a través de la conducción, el edificio necesita estar bien aislado, y esto depende de las propiedades de los materiales utilizados. El rendimiento térmico de todo el tejido del edificio, será mejor cuando todos los elementos del edificio tengan un valor  $U$  similar.

La convección es el mecanismo de transferencia de calor a través de gases. El aire se calienta cuando está en contacto con una superficie más caliente. Este aire caliente se volverá menos denso y se elevará a través de la superficie, llevando energía con él. Si esta corriente de aire entra en contacto con una superficie que es más fría que ella misma, entonces el calor se transferirá del aire a la superficie. Es por este mecanismo que el calor se transfiere hacia y desde superficies en contacto con el aire y a través de cavidades en paredes o en los sistemas de doble acristalamiento.

La radiación no requiere de materiales sólidos ni aire, para que se lleve a cabo el intercambio de calor. El intercambio de radiación térmica tiene lugar entre las superficies de un cuerpo caliente y un cuerpo frío. En base a estos conceptos, en este capítulo se estudiará el cerramiento perimetral de viviendas, se analizará el aislamiento que proporcionan los diferentes tipos de paredes, los tipos de materiales de los cerramientos y/o ventanas, el suelo, los techos y todo lo que tenga contacto con el exterior, considerando los puentes térmicos que puedan existir.

La ventilación es otro elemento clave, en términos del uso de energía del edificio. Una fuente de aire fresco, es un requisito para todos los edificios. Proporciona oxígeno para respirar diluye y desplaza los contaminantes, como el olor corporal y el dióxido de carbono metabólico, evita la condensación eliminando la humedad, mantiene los edificios frescos, eliminando el exceso de calor y permite que los aparatos de combustión funcionen de forma segura. Sin embargo, la ventilación también elimina aire caliente, lo que representa una pérdida de calor para el edificio.

Se tendrán en cuenta diferentes modelos energéticos, en los que se estudia el comportamiento energético de los edificios, con variaciones de los aspectos mencionados. Este capítulo también vincula los métodos de construcción, materiales y desarrollos recientes, enmarcados en las Normas IRAM, vigentes en Argentina, así como con otras normas internacionales, relacionadas con la eficiencia energética, que están en vigencia.

A nivel internacional, se han desarrollado diversas herramientas para evaluar la sostenibilidad de edificios, como LEED, BREEAM y CASBEE. La mayoría de estas herramientas se basan en normas, reglamentos y métodos de construcción del país donde se originaron. Estos métodos de evaluación se compararán a través de sus características. Los sistemas de clasificación LEED conforman un programa voluntario, destinado a medir objetivamente lo sostenible que es un edificio, en varias áreas clave: impacto en el sitio y la ubicación, eficiencia del agua, eficiencia energética, selección de materiales y calidad ambiental interior. BREEAM reconoce y refleja el valor de los activos de mayor rendimiento, a lo largo del ciclo de vida del entorno construido, desde la materialización de la nueva construcción, hasta sus instalaciones y su renovación. CASBEE evalúa el rendimiento ambiental de los edificios y su entorno construido. Estas herramientas, que se originan en países desarrollados, no siempre dan una respuesta adecuada a los problemas de las ciudades medianas y grandes de Argentina, y de la mayor parte de América Latina. Por esta razón, se analizará su aplicabilidad en Argentina, teniendo en cuenta las características de las viviendas más típicas de las diferentes regiones, con distintas condiciones climáticas. Dada la variedad de climas regionales de Argentina, este análisis puede ser aplicable en otros países de América del Sur, con similares condiciones.

## LOCACIÓN Y USO DEL EDIFICIO

La energía utilizada para calentar o enfriar un edificio se pierde por dos formas distintas, pérdidas de calor de la piel exterior del edificio y pérdidas de calor por la ventilación del mismo. Las ecuaciones (1) y (2) muestran las variables involucradas en la determinación de las tasas de pérdida de calor de la fachada y la ventilación. Algunas de los términos son constantes, determinados por la forma de construcción de la fachada, mientras que otras son variables, dependientes del clima externo [1][2].

$$Q_f(\dot{r}) = \sum (U_x A_x) \Delta T \quad (1)$$

$$Q_v(\dot{r}) = \frac{1}{3} n V \Delta T \quad (2)$$

donde el área de la superficie expuesta es ( $A$ ), el volumen ( $V$ ) y la temperatura interna son constantes. Los dos primeros términos están determinados por la forma de construcción, el último por los servicios de la construcción que funcionan para mantener una temperatura interna constante. En cuanto a las variables afectadas por el clima, se puede encontrar que la tasa de ventilación aumenta a medida que

aumenta la velocidad del viento. La diferencia de temperatura ( $\Delta T$ ), entre el interior y el exterior, aumenta a medida que baja la temperatura externa, y el valor U de las paredes de mampostería aumenta cuando se incrementa la exposición al viento y a la lluvia. Cada uno de estos incrementos resultará en una mayor tasa de pérdida de calor.

## 1. MACROCLIMA Y MICROCLIMA

El clima es impulsado por variaciones en la energía depositada en la tierra por el sol. Este patrón se repite anualmente y, como consecuencia, las variables climáticas, incluyendo la temperatura, la velocidad y la dirección del viento, la intensidad solar y la humedad, se pueden predecir, cada año con un grado razonable de precisión.

Para entender mejor esta sección, se analizarán la diferencia entre condición climática y clima. Las condiciones climáticas son las condiciones meteorológicas que prevalecen en un momento determinado: velocidad del viento, dirección del viento, insolación, temperatura del aire, humedad relativa y precipitación. El clima, por otro lado, es un conjunto estadístico de datos, basados en registros meteorológicos, tomados a lo largo de registros realizados durante varios años. Por ejemplo, la dirección dominante del viento en diciembre, en la ciudad de Bahía Blanca (Prov. Buenos Aires, Argentina), es en la dirección norte - sur. Esto da una valiosa información para hacer una buena predicción, estadísticamente hablando, de la dirección del viento en diciembre, pero en realidad, en un día dado de diciembre, el viento puede soplar de cualquier otra dirección.

Los procesos físicos que dictan el macroclima se pueden modificar a escala local, mediante variaciones en la topografía. Por ejemplo, la presencia de costas, valles, bosques densos o colinas interactúan con el clima general de la región y causan variaciones locales. Los edificios y otras características discretas pueden modificar aún más el clima local mediante la canalización del viento, la captura solar y el eclipse. Estas variaciones crean una pequeña región de condiciones climáticas claramente diferentes conocidas como el microclima.

Las montañas actúan como barreras de viento y pueden obstaculizar el sol, particularmente en los amaneceres y atardeceres. Dentro de una ciudad, hay una isla de calor, donde la temperatura es más alta que en áreas cercanas a la ciudad, esto es atribuible a la absorción de calor por las estructuras hechas por los seres humanos. Los espejos de agua influyen en la humedad ambiental y el almacenamiento de calor, por lo que las temperaturas son menos extremas.

## 2. EMPLAZAMIENTO DE UNA CONSTRUCCIÓN Y LA RELACIÓN CON EL CONSUME DE ENERGÍA

Es muy importante considerar el edificio y su relación con el sitio para minimizar el efecto del clima en el consumo de energía. Se puede destacar cuatro áreas de conocimiento que nos permiten relacionarnos y mejorar el efecto del clima en los edificios.

En primer lugar, se puede analizar el clima y la pérdida de calor. El viento, la lluvia, la intensidad solar y la temperatura externa tienen un efecto directo sobre la pérdida de calor o la tasa de ganancia de un edificio. Comprender los diferentes procesos de pérdida de calor relacionados con el clima es de importancia fundamental. En segundo lugar, cabe mencionar la variedad del clima con la ubicación. El conocimiento del sitio, a través de la supervisión local o datos de la oficina meteorológica, permitirá el reconocimiento de las variables climáticas extremas que tienen en cuenta la situación. Por último, resulta interesante analizar cómo se puede diseñar el paisaje para minimizar los efectos del clima y crear un microclima y cómo se puede diseñar el tejido del edificio y su forma para actuar como moderador climático.

## 3. TEMPERATURA EXTERIOR

El consumo de energía de calefacción está directamente relacionado con la diferencia entre las temperaturas internas y externas. Cuanto menor sea la temperatura exterior, mayor será la diferencia de temperatura entre el interior y exterior y mayor será la tasa de pérdida de calor. Cabe acotar que hay dos parámetros geográficos que influyen en la temperatura exterior, ellos son: la altitud y la latitud.

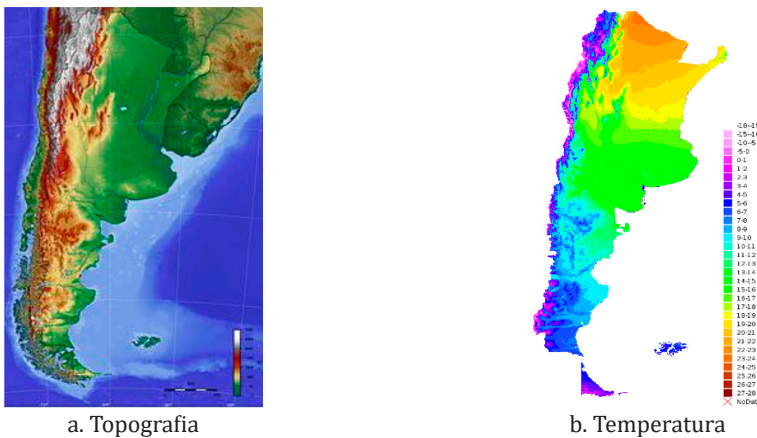


Figura 1. Mapas de Argentina.

La figura 1.a muestra la altitud en cada región de Argentina, mientras que en la figura 1.b se puede ver un mapa de las temperaturas medias, donde se aprecia que las temperatura descenden con el incremento de la altura sobre el nivel del mar. Esto se ilustra con más precisión en la tabla 1, que muestra las temperaturas medias registradas durante el año 2018, en diferentes ciudades de la Argentina, estos datos fueron proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional [3].

Tabla 1. Promedio de temperaturas registradas en 2018.

Ciudad	Promedio Temp. Max. °C	Promedio Temp. Min. °C
Jujuy	20,9	16,4
Tucuman	22,7	18,1
Buenos Aires	22,9	11,0
Comodoro Rivadavia	23,5	10,2
Ushuaia	8,6	6,0

Por otra parte, se registran variaciones locales de las temperaturas, que escapan a estas reglas generales. Por ejemplo, debido al efecto de las corrientes marinas cálidas, la absorción de energía solar puede crear islas cálidas, y las depresiones en la tierra experimentan temperaturas exteriores más bajas, que la media debida al aire frío se acumula en ellas.

Uno de los efectos térmicos de la radiación solar, que es importante en el consumo de energía, es el efecto del calentamiento en el aire externo al edificio, que también puede contribuir a la calefacción del edificio. Otro componente importante, relacionado con la radiación solar, es la luz del día, que se introduce en los edificios por las ventanas y puede compensar parte de las necesidades de iluminación eléctrica. En la figura 2 se puede ver dos mapas de las temperaturas medias en el mes enero (verano) y junio (invierno) de Argentina [4].

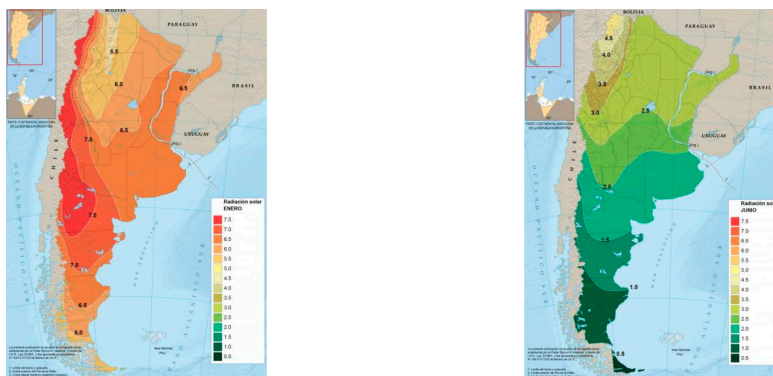


Figure 2. Mapa de temperaturas de Argentina.

Dependiendo de las temperaturas externas y sus variantes durante el día, las necesidades de calefacción se analizan en invierno, con la posibilidad que las heladas se produzcan por la noche o, en climas más extremos, incluso la presencia de nieve. En verano, no sólo la temperatura durante el día es importante, sino también se puede presentar una interesante amplitud térmica, que puede hacer la noche fresca. En conjunto, esto hará necesario entregar más o menos consumo de energía y descubrirá si se trata de un clima, en el que el problema principal es la calefacción o refrigeración, para considerarlo en el patrón de las instalaciones de acondicionamiento térmico.

Argentina tiene un gran potencial para el desarrollo de la energía solar. Las regiones andinas y subandinas, desde Jujuy hasta Neuquén, tienen un gran potencial para el desarrollo de esta fuente de energía. Por ejemplo, en San Juan se encuentra la planta solar fotovoltaica Ullúm, que genera unos 38 mil MWh / año.

Por otro lado, la Puna y la Quebrada de Humahuaca también tienen niveles significativos de radiación. Actualmente, se están realizando estudios para desarrollar un parque solar en la zona de Hornaditas, con un potencial aproximado de 24 mil MWh / año.

#### 4. ASOLEAMIENTO

Es importante tener un buen acceso de los rayos del sol sobre el edificio. Para lograr esto, se debe evitar el eclipse de objetos altos, como colinas, árboles o edificios al sur del sitio. Es importante tener en cuenta el diagrama de trayectoria del sol (figura 3).

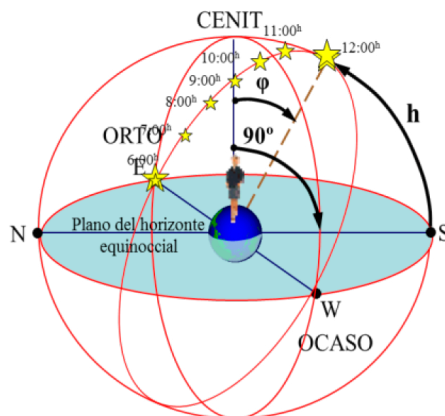


Figure 3. Recorrido de sol en el cielo.

Dependiendo de la ubicación del sol, se debe ver si hay posibles obstáculos que intercepten la radiación solar. Estos obstáculos pueden ser, por ejemplo, árboles, edificios cercanos o una montaña en el entorno. Dependiendo de la época del año, esto puede ser beneficioso (en verano), o negativo (en invierno). Debido a que el sol tiene una trayectoria más baja en invierno, es más común que haya obstáculos cercanos que puedan proyectar una sombra sobre la construcción.

## 5. VIENTO

Argentina es un país con una topografía muy cambiante. La figura 4 muestra la velocidad media anual del viento a 50 m sobre el suelo. Las altas velocidades del viento a menudo se experimentan en la cima de las cordilleras, en las regiones costeras y en lagos y campos. El viento se ralentiza por la fricción cuando pasa sobre terreno accidentado y, debido a esto, las velocidades del viento tienden a ser más bajas en el interior y las situaciones urbanas en cualquier lugar dado la velocidad del viento aumenta con la altitud.

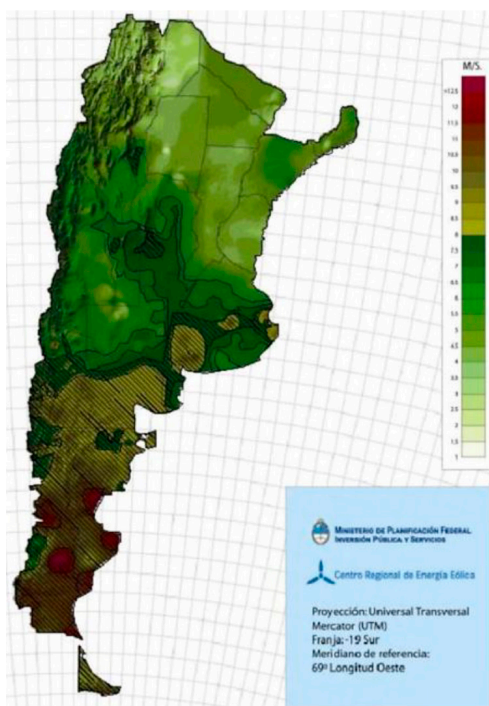


Figure 4. Promedio anual de velocidades del viento (altura: 50 m) de Argentina.

La topografía local también afectará a la velocidad del viento. Por ejemplo, el viento se canalizará a través de un valle o entre edificios altos. En esta situación, el mismo volumen de aire está tratando de pasar a través de un espacio pequeño; su velocidad debe aumentar para mantener el flujo. El viento tiene dos características, velocidad y dirección. Ambos afectan a las pérdidas de calor por ventilación. La dirección del viento tiene dos efectos. En primer lugar, su dirección influye en la temperatura. Debido a esto, la dirección predominante del viento tendrá una fuerte influencia en la temperatura del aire de infiltración, que entra en el edificio. En segundo lugar, la dirección del viento determina en qué elevaciones actúa la diferencia de presión. Si estas elevaciones contienen aberturas, como puertas, ventanas, las grietas o las entradas de servicio, a continuación, la infiltración se llevará a cabo más fácilmente.

La influencia del viento en un edificio se relaciona con su entorno. Si la construcción está en un valle, el impacto del viento será probablemente mucho menor que si estuviera en la cima de una colina (figura 5). Dentro de una ciudad, los edificios cercanos se pueden considerar con criterios similares a estas características geográficas, aunque en este caso, los cambios son más abruptos y, por ejemplo, suele haber suficiente turbulencia en las proximidades de un edificio alto, por lo que es habitual modelos a escala para analizar los efectos en el medio ambiente.

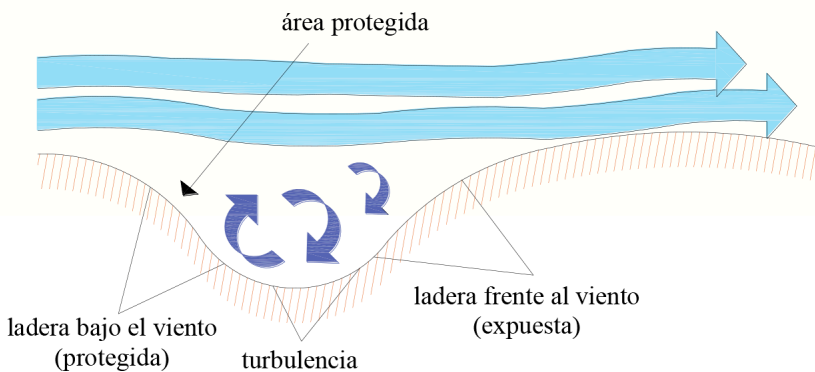


Figure 5. Influencia del viento considerando la topografía.

En el caso que la dirección principal del viento golpee sobre una pared ciega, sin aberturas, será más difícil que se infiltre y el efecto de la velocidad del viento en la pérdida de calor, será menos severo. Cuando el viento golpea a un edificio, crea una diferencia de presión entre los lados a barlovento y sotavento. Esto empuja el aire frío en el edificio y extrae el aire caliente por el otro lado (derecha de la figura 6). La energía utilizada para calentar el aire interno del edificio se pierde parcialmente.

Esta pérdida se incrementa, a medida que aumenta la velocidad del viento. Lo mismo sucede con la presión que se produce en todo el edificio.

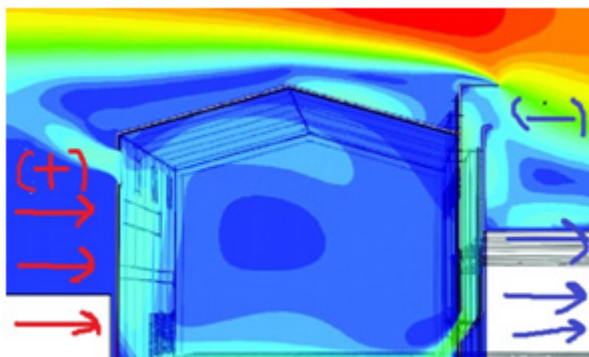


Figure 6. Influencia del viento sobre la temperatura externa e interna de un edificio [2].

En el caso que la dirección principal del viento golpee una pared ciega, hay una capa de aire unida por la fricción a las superficies externa de todos los elementos del edificio. Esta capa de aire adicional, se suma a la resistencia térmica de la pared, la que está dentro del edificio, se conoce como resistencia de la superficie interior ( $R_{si}$ ). La que está en la superficie exterior, se denomina como resistencia de la superficie exterior ( $R_{so}$ ).

La magnitud de  $R_{si}$  depende de la orientación que tenga la superficie, vertical u horizontal, debido a que esto afecta al movimiento convectivo de la capa, depende de la emisividad y de la capacidad de absorción de la superficie. Estas resistencias son la capacidad de la superficie para emitir y absorber la radiación térmica, respectivamente. Como es de suponer,  $R_{so}$  también se ve afectada por las condiciones climáticas externas. Si la superficie está expuesta al viento, la capa de aire será barrida y la resistencia térmica que se agrega al elemento se perderá.  $R_{so}$  sólo aporta un pequeño porcentaje de la resistencia térmica total de una pared. Por ejemplo, un muro de valor  $U = 0,35 \text{ W / m}^2\text{K}$  tiene solo 1,75% proporcionado por la resistencia de la superficie exterior, pero para elementos con un alto valor  $U$ , como acristalamiento simple con un valor  $U$  de  $5 \text{ W / m}^2\text{K}$ ,  $R_{so}$  contribuye con el 20% del total.

## 6. MEDIDAS DE PAISAJISMO PARA REDUCIR LA VELOCIDAD DEL VIENTO

La superficie de un lugar influye directamente en la velocidad del viento. Cuanto más rugosa sea la superficie, mayor será la resistencia y el efecto de ralentización. Se puede utilizar vegetación gruesa para reducir la velocidad del viento al plantar hi-

leras de árboles, llenos de arbustos alrededor del tronco, para reducir la velocidad del viento hasta la altura de los árboles.

La eficacia de un cortavientos depende de su permeabilidad. La permeabilidad es una medida de la facilidad con la que el aire puede pasar a través de la protección contra el viento. La figura 7 muestra el impacto de las barreras con diferente permeabilidad al viento y sus respectivas sombras aerodinámicas [5].

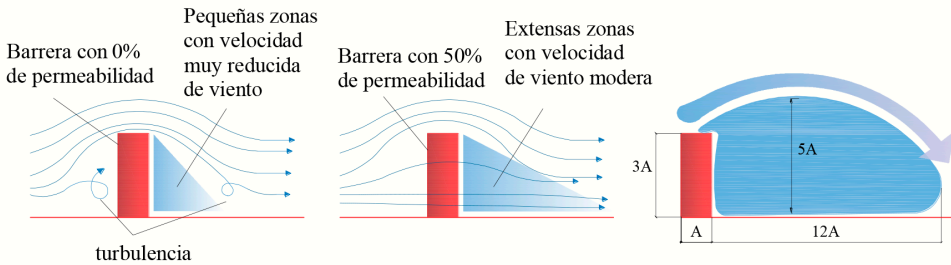


Figura 7. Afectación al viento de barreras arquitectónicas con diferente permeabilidad.

Hay mejoras en las fachadas disponibles que reducen la tasa de infiltración a todas las velocidades del viento. Estas técnicas generalmente son:

- Sellar la envolvente del edificio, para eliminar cualquier ruta de infiltración dentro y fuera del edificio;
- Posicionar cuidadosamente las aberturas, para evitar la dirección predominante del viento;
- Las puertas de entrada principales no deben estar en caras opuestas del edificio, ya que esto permitiría que el aire de infiltración pasara fácilmente a través del edificio de zonas de alta a baja presión;
- Las entradas no deben colocarse en las esquinas de los edificios, ya que las velocidades del viento serán mayores en esos lugares, a medida que el aire se mueve alrededor del edificio.

## 7. INFILTRACIÓN Y VENTILACIÓN

Una fuente de aire fresco es un requisito vital para todos los edificios. Proporciona oxígeno para respirar, diluir y desplaza contaminantes, como olores corporales y dióxido de carbono metabólico, previene la condensación, eliminando la humedad, mantiene los edificios fríos eliminando el exceso de calor y permite que los aparatos de combustión funcionen de forma segura. Desafortunadamente, la ventilación

también elimina el aire caliente, del interior, lo que representa una pérdida de calor en el edificio [6] [7].

Se utilizan dos términos para describir el movimiento del aire dentro y fuera de un edificio; Infiltración y ventilación. La filtración es el movimiento natural del aire a través de grietas, vacíos y elementos porosos de la envolvente del edificio. El movimiento del aire es impulsado por las diferencias de presión creadas por el viento y el edificio de flotabilidad de aire caliente. La ventilación puede ser “natural”, cuando se trata del movimiento del aire a través de aberturas en la fachada construida específicamente para ese propósito debido a las diferencias de presión del anillo que se producen naturalmente, o “mecánica”, cuando se impulsa por los ventiladores a través de aberturas con tuberías. La AII de estos procesos a menudo se conoce simplemente como “ventilación.” El calor perdido a través de la infiltración y ventilación se conoce como pérdida de calor a través de la ventilación.

La velocidad con la que el aire entra y sale de un edificio, se conoce como la tasa de ventilación. Esto se puede medir en litros de aire fresco por segundo (1/seg), o en ambientes muy particulares, como un número de reenovaciones de aire por hora (Ac/h). Este es el número de veces que el aire en una habitación es completamente, reemplazado por aire fresco cada hora.

La figura 8 muestra los beneficios de realizar reducciones en la tasa de ventilación. A 0,5 ca/h (cambios de aire/hora) la tasa de pérdida de calor de ventilación, es poco más de un tercio de la tasa de pérdida de calor de la fachada exterior.

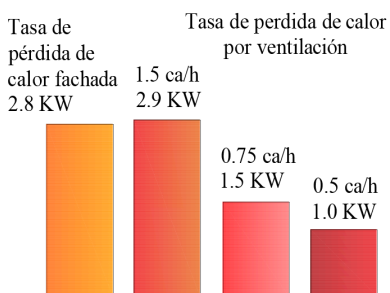


Figure 8. Tasa de pérdida de calor de fachada exterior y ventilación.

Una baja tasa de infiltración puede tener muchas ventajas más allá de reducir las pérdidas de calor que estos incluyen:

- Evitar las molestias térmicas derivadas de corrientes de aire;
- Evitar la entrada de polvo y gases de contaminación en el edificio;

- Asegurar el correcto funcionamiento de los sistemas de ventilación mecánica OJ;
- En climas calurosos, puede evitar el sobrecalentamiento al mantener el aire caliente afuera;
- Reducir la capacidad y, por lo tanto, el coste de cualquier sistema de calefacción y refrigeración.

## 8. INFILTRATION

El aire entra y sale de un edificio de muchas maneras, por este motivo, una característica con implicancias térmicas significativa de los materiales, es su porosidad. Por otro lado, son relevantes los espacios libres que se producen entre el suelo y la pared y alrededor de las ventanas y puertas. Por último, esta propiedad tiene relación con el uso del edificio y está relativamente fuera del control del diseñador del edificio, debido a que tiene que ver con la apertura de puertas y ventanas.

El aire dentro de los edificios es generalmente más cálido que el aire exterior, debido a las ganancias de calor del sistema de calefacción o fuentes casuales. El aire caliente es menos denso que el aire frío, por lo que el aire adentro del edificio es menos denso que el exterior. El aire adentro del edificio tenderá a subir y, a medida que lo hace, crea una baja presión de aire en relación con el exterior. A medida que el aire caliente sale del edificio en el alto más nivel, la presión interna más baja atrae al aire frío fresco en el edificio, a través de aberturas en la envolvente. Esta diferencia de presión se denomina ventilación de apilamiento, ya que se requiere una diferencia de altura (figura 9).

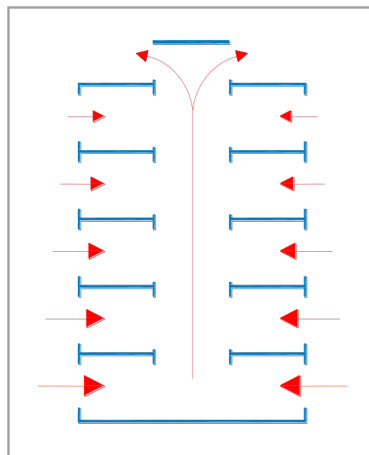


Figura 9. Sistema de ventilación vertical.

## FORMA Y FUNCIÓN

La forma interna y externa de un edificio tiene un impacto significativo en su consumo de energía. Esta sección describe el efecto de la forma externa, en el consumo de energía de un edificio.

Una de las primeras decisiones, en cuanto al diseño de una vivienda, es proyectarla de modo que la forma externa sea la consecuencia de la ubicación de los diferentes ambientes, obteniendo una vivienda con un suelo bastante desintegrado o adaptándola. La ubicación y forma de los entornos para tratar de minimizar la superficie externa de la casa, de tal manera que se alcanza un diseño compacto (figura 10). Esta segunda opción reduce los costos de construcción, requiere terrenos más pequeños, por lo que las casas en terrenos estrechos (en áreas urbanizadas, con altas densidades de población) están dentro de este grupo y teniendo una superficie externa más pequeña, el consumo de energía se reduce. Es importante aclarar que la estética del edificio debe ser cuidada y vale la pena aumentar un poco la superficie del edificio, en el procedimiento parlamentario para mejorar la estética del mismo.



a) Casa no compacta.



b) Casa compacta.

Figura 10. Tipologías de formas de edificaciones.

En el diseño arquitectónico es conveniente utilizar los lugares adyacentes a la casa (garaje, taller, etc.) que, habitualmente, tienen temperaturas interiores **más bajas que el resto del hogar, como un tampón térmico**, para reducir las diferencias de temperatura entre los ambientes de uso regular y el exterior. Cuando se proyecta una casa construida sobre los muros divisorios del predio, las casas vecinas cumplen este propósito, así como no es conveniente entrar desde el exterior directamente al ambiente de uso habitual, sino hacerlo a una recepción de proporciones más pequeñas, que sirve para atenuar las diferencias de temperatura [8-11].

Al comparar las áreas superficiales de cuatro edificios de igual superficie en planta, simplemente con diferentes diseños de la planta, se identificará cómo la forma y el tamaño de un edificio tienen una gran influencia sobre sus pérdidas de calor. En esta comparación se considera que la parte superior de las habitaciones, las ventanas y toda el área de la planta, son los mismos, en los cuatro casos se tiene que:

*Cuadrado*, cuando se combina con su altura, esta forma representa la superficie más pequeña, para un volumen determinado. Una esfera obtiene la relación real del área de superficie, con el volumen más pequeño, pero esta forma no es habitualmente utilizada en viviendas, por una cuestión de particidad.

*Rectangular*, la planta cuadrada se estira en un ángulo recto. La anchura del edificio se reduce y la longitud se extiende. Esto ha dado lugar a un aumento del 4% en el área de la pared, en comparación con el cuadrado, como se muestra en la tabla 2.

*Cruz*, esta forma es muy complicada y resulta en un aumento del 35% en el área de las paredes externas.

*Bungalow*, este es un edificio de una planta. Esta forma se traduce en una reducción del 25% en el área de la pared, mientras que el suelo y el techo se han duplicado en tamaño.

La tabla 2 muestra la superficie total de cada caso estudiado y las compara con el edificio de planta cuadrada, que se tomó como caso de referencia. En la tabla 3 se puede ver que los planos alargados, transversales y los bungalows tienen 4, 20 y 29% más de superficie, respectivamente, que la casa de planta cuadrada.

El aumento de superficies de muro externo no significa necesariamente que habrá un aumento en la tasa de pérdida de calor, ya que diferentes superficies tienen diferentes valores de transmitancia térmica (valores  $U$ ). Esto se puede ver en la tabla 2. Al comparar las superficies externas relativas (tabla 3) y la cáscara externa ponderada relativa, se puede observar, las pérdidas de calor reales son inferiores a lo que se sugiere simplemente observando los aumentos en la superficie total. En particular, los bungalows han visto una mejora considerable entre el aumento de la superficie total y el incremento de la pérdida de calor. Esto se debe a que el aumento de área más alto se registra en el techo y este tiene la transmisión térmica más baja de todos los elementos.

Table 2. Diferentes tipos de plantas en edificios.

Tipo de Planta	Área de los elementos (m <sup>2</sup> )		
	Muros	Planta	Techo
Cuadrado	129	49	49
Rectángulo	137	49	49
Cruz	174	49	49
Bungalow	97	98	98

Table 3. Área total de los cuatro tipos de plantas de edificios.

Tipo de Planta	Superficie total (m <sup>2</sup> )	Superficie relativa al Cuadrado
Cuadrado	227	1,00
Rectángulo	236	1,04
Cruz	272	1,20
Bungalow	295	1,29

Table 4. Factores de pérdida de calor para los cuatro tipos de plantas de edificios.

Tipo de Planta	Pérdida de calor (W/k)	Pérdida de calor relativa al Cuadrado
Cuadrado	128	1,00
Rectángulo	131	1,03
Cruz	148	1,16
Bungalow	148	1,23

La conclusión es que cualquier desviación de una planta cuadrada y forma cúbica, dará lugar a mayores pérdidas de calor de la piel exterior del edificio. Sin embargo, la magnitud de estas pérdidas se puede reducir añadiendo aislamiento a los elementos, que han aumentado en el área.

## CARACTERÍSTICA DE LOS MATERIALES DE UNA VIVIENDA

En el diseño de una vivienda, es muy importante tener en cuenta la habitabilidad hidrotérmica [12]. El acondicionamiento hidrotérmico es esencial para alcanzar niveles adecuados de confort térmico, manteniendo la salud de los habitantes, y deshacerse de los efectos creados por la condensación de humedad y manteniendo la energía.

El movimiento del flujo de calor no se puede evitar, pero si su paso se puede ralentizar, mediante la colocación de un aislamiento adecuado o con la inercia térmica de

los materiales. Físicamente, siempre habrá un flujo de calor de un cuerpo de temperatura más alta a uno más bajo, hasta lograr un equilibrio entre las temperaturas de ambos. En los edificios, esta diferencia de temperatura se refiere, principalmente, al aire interior y al aire exterior, registrado en diferentes momentos del día. El intercambio de calor entre cuerpos de diferentes temperaturas puede ser llevado a cabo por los siguientes mecanismos: Convección, Radiación y Conducción.

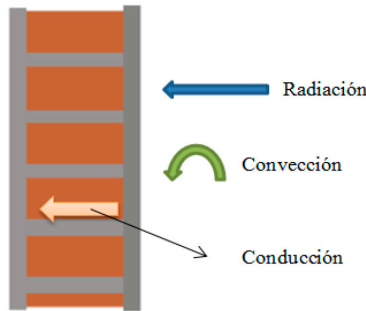


Figure 11. Mecanismos de transferencias de calor.

La *convección* es el mecanismo de transferencia de calor a través de gases. El aire en contacto con una superficie más caliente, se volverá menos denso y subirá a la superficie, arrastrando energía. Si este aire se encuentra con una superficie más fría, entonces el calor se transferirá del aire a la superficie. Es por este mecanismo que el calor se transfiere hacia y desde las superficies en contacto con el aire y a través de cavidades en las paredes o en los sistemas de doble acristalamiento.

El coeficiente de convección se obtiene en función de la orientación de la superficie y la dirección del flujo de calor. Si la superficie es horizontal, el flujo puede ser ascendente o descendente. En superficies verticales, el flujo de calor actuante siempre es horizontal.

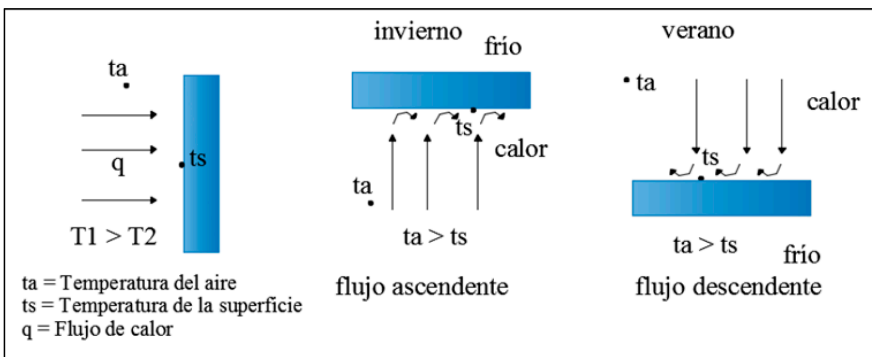


Figure 12. Flujo de calor horizontal y vertical.

*Radiación:* Todo cuerpo con una temperatura superior a 0 oK, emite radiación en forma de ondas electromagnéticas. La cantidad de energía emitida dependerá de la temperatura del cuerpo. La radiación puede ocurrir a través del vacío o a través del aire.

En particular, resulta interesante estudiar la radiación que proviene del sol, cuyo espectro de ondas cubre, principalmente, ondas ultravioletas, ondas de luz visibles e infrarrojas. La radiación terrestre, es decir, la producida por los cuerpos que están en contacto con la superficie de la tierra, es onda larga. Las superficies de los cuerpos también deben ser consideradas, porque determinan la capacidad de emitir, absorber y reflejar la energía. Las propiedades de estas superficies se evalúan con dos coeficientes: Coeficiente de absorción ( $\alpha$ ) y Coeficiente de Emisión ( $\epsilon$ ).

*Coeficiente de absorción ( $\alpha$ ):* Cuando una determinada radiación golpea un cuerpo opaco, parte de la radiación se absorbe y otra parte se refleja. Este coeficiente es el cociente entre la radiación absorbida por la superficie y la que afectó al cuerpo, su valor es en la mayoría de los materiales igual al coeficiente de emisión ( $\epsilon$ ) para radiaciones de longitud de onda similar.

*Coeficiente de Emisión ( $\epsilon$ ):* Es la relación entre las radiaciones emitidas por un cuerpo de una determinada superficie, sobre la cual un cuerpo negro podría emitir a su misma temperatura. Haciendo un balance de radiaciones se tiene que:

$$\text{Radiación incidente} = \text{Radiación absorbida} + \text{Radiación reflejada} \quad (3)$$

La *conducción* existe entre dos cuerpos en contacto o partes de los mismos cuerpos. Si se analiza un cuerpo en el que su espesor es mínimo, en comparación con el resto de sus dimensiones, y tiene dos planos paralelos a diferentes temperaturas, se produce un flujo de calor desde el donde están las temperatura más alta hacia donde son inferiores. Este flujo es proporcional a la diferencia de temperatura ( $t_1 - t_2$ ), a la conductividad del material ( $\alpha$ ) e inversamente proporcional al espesor del material atravesado por donde pasa el flujo. El estudio de la conducción de calor se lleva a cabo en “estado estacionario”, es decir, el flujo es invariable o constante, al igual que su temperatura.

El efecto invernador es la calefacción que se presenta en una habitación con aberturas acristaladas, que recibe radiación solar, a través de ellas, pero no permite que la radiación (paredes, suelo, etc.) abandone el ambiente. Actúa como una trampa de calor, donde el calor del sol se acumula y se retiene. Esto sucede porque la longitud

de onda de la radiación es mayor que la infrarroja y no puede salir del ambiente a través de las superficies acristaladas.

Para lograr edificios con bajo consumo de energía, se deben seleccionar elementos constructivos que minimicen la transferencia de calor y mantengan el calor dentro del edificio. Esto sólo se puede lograr si se tiene un método para comparar las propiedades de transferencia de calor, de los diferentes tipos de elementos empleados en la construcción.

La norma [13] se utiliza para comparar las propiedades de la conducción de calor de diferentes materiales. Para que esta comparación sea adecuada, se requiere de una serie de condiciones, bajo las cuales se lleva a cabo la evaluación de los materiales. El parámetro básico es la conductividad térmica ( $k$ ) del material, que es una medida de la tasa de conducción de calor, a través de un metro cúbico de material, para una diferencia de temperatura de 1 K, a través de dos caras opuestas. Las mediciones se llevan a cabo en muestras de material, colocados en una celda de ensayo. Cuatro lados de la muestra están aislados, un lado del material se calienta y se mide la velocidad del flujo de calor a través de la muestra, utilizando sensores de temperatura. Algunos valores típicos de conductividad térmica se muestran en la tabla 5. Cuanto mayor sea el valor de la conductividad térmica, mayor será la velocidad con la que fluye el calor a través del material. La tabla también muestra que, en general, la conductividad térmica aumenta con el incremento de la densidad.

La conductividad térmica es esencial para comparar diferentes materiales, pero se basa en un cubo de 1 metro, para espesores de construcción reales se utiliza el término resistencia térmica ( $R$ ) ( $m^2K/W$ ). Esta es una medida de la capacidad de un espesor real de material para resistir el paso del calor; se basa en la conductividad térmica y el espesor del material utilizado en la construcción.

Tabla 5. Valores de conductividad térmica de distintos materiales.

Material	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Conductividad Térmica ( $k$ ) (W/m <sup>2</sup> K)
Pizarra	2700	1,90
Arenisca	2100	1,30
Ladrillo maquinado	2300	1,00
Ladrillo común	1790	0,72
Yeso	1570	0,53
Panel de yeso	960	0,16
Madera de pino	500	0,14

Block liviano	400	0,08
Alfombra	186	0,06
Fibra de vidrio	12	0,04
Lana mineral	25	0,04
Polietileno expandido	16	0,03

La resistencia térmica ( $R$ ) se determina utilizando la fórmula matemática:

$$R = l/k \left( m^2 K/W \right) \quad (4)$$

donde:

$l$  es el espesor del material (m)

$k$  es la conductibilidad térmica ( $W/m^2K$ )

Por ejemplo, la resistencia térmica de 50 mm (0,05 m) de poliestireno expandido ( $k$  a  $0,033 W/m^2K$ ) es:

$$\frac{0.05}{0.033} = 1.5 \frac{m^2 k}{W} \quad (5)$$

Para minimizar la pérdida de calor en los edificios, el valor de la resistencia térmica debe ser lo más grande posible. A partir de la fórmula anterior, se puede asegurar que esto se alcanza, ya sea aumentando el espesor del material o diluyendo el valor de la conductividad térmica ( $k$ ).

Es importante tener en cuenta que los espacios de aire están presentes en muchos componentes estructurales. En una pared con una cámara de aire, este espacio vacío tiene por finalidad evitar el paso de la lluvia de las caras externas a las internas, pero también proporciona resistencia al movimiento térmico. Las resistencias al flujo de calor son causadas por capas fijas de aire unidas a las superficies internas y externas del elemento por fricción, a esto se conoce como resistencia de la superficie interna  $R_{si}$ , existiendo también, la resistencia de la superficie exterior  $R_{so}$ . La transferencia de calor a través de las capas de aire se produce debido a la convección y a la radiación. De ello, se deduce que la magnitud de la resistencia térmica depende de la emisividad de la superficie y de la dirección del flujo de calor (horizontal o vertical).

## 1. EJEMPLO DE CÁLCULO PARA OBTENER EL VALOR $U$

Un peso importante, en el cálculo de la envolvente externa de los edificios, lo tienen los puentes térmicos [14]. Un puente térmico es un camino de mayor conductividad térmica, a través de otra capa que tiene una menor conductividad térmica. Ejemplos de esto son las uniones de mortero, a través de un bloque liviano (baja densidad) y por ende, buen aislante. Otro ejemplo es un perno de madera utilizado para montar placas de plástico que interrumpen el aislamiento entre ellas. Cuando se suma la transmisión de calor a través de estos puentes térmicos, puede encontrarse que constituyen una proporción significativa de cada metro cuadrado de la superficie y, por lo tanto, deben tenerse en cuenta al calcular el valor  $U$ , de cualquier elemento.

En Argentina, la norma que indica como se analizan los puentes térmicos es la norma IRAM 11065 [14]. Como ejemplo, se puede tener un muro de mampostería (figura 13), con una columna de hormigón en su interior (rayado). Se denomina a  $k_{mo}$  transmitancia térmica de la pared opaca y  $k_{pt}$  a la transmitancia de la sección que contiene la columna, donde aparece un puente térmico, debido a la mayor conductividad térmica del hormigón.

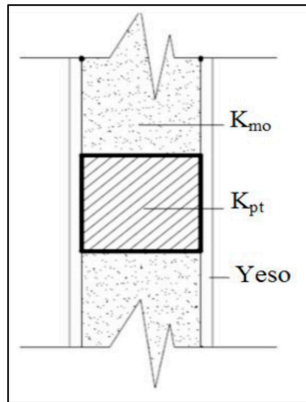


Figure 13. Detalle de un puente térmico standard.

La Norma acepta el término puente térmico, siempre que:

$$\frac{k_{pt}}{k_{mo}} \leq 1,5 \quad (6)$$

con una distancia entre las secciones, donde hay puentes térmicos mayor a 1,70 m. (Por ejemplo, columnas cada 3,00 m). Si esa distancia es inferior a 1,70 m, solo se permite el puente térmico si:

$$\frac{k_{pt}}{k_{mo}} \leq 1,35 \quad (7)$$

Otro aspecto a tener en cuenta es que  $k_{pt}$  debe determinarse siguiendo la línea de máxima transmitancia térmica, desde el exterior al interior (figura 14). Conviene que esta línea no sea recta, como se muestra en los diagramas de la figura 14, para disminuir la transmisión de calor, por el puente térmico.

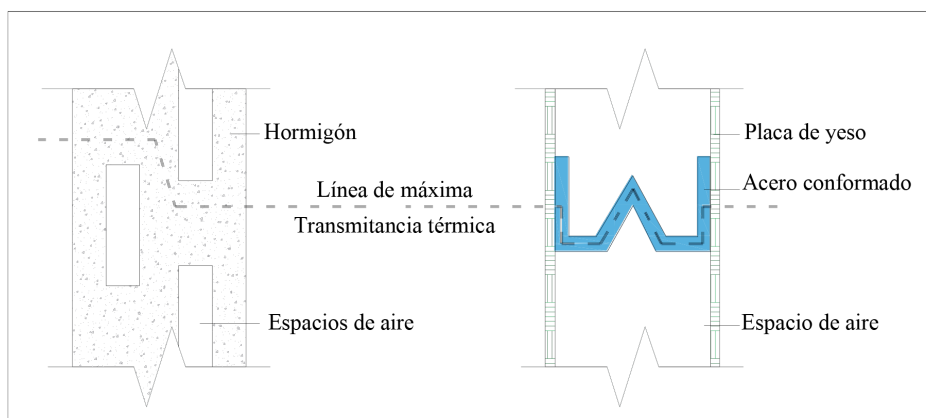


Figure 14. Línea de máxima Transmitancia Térmica.

El método utilizado para calcular el valor  $U$  de los elementos, considerados como puentes térmicos repetidos, implica la consideración de los siguientes pasos:

- Identificar todas las trayectorias de flujo de calor a través del elemento,
- Calcular el límite de resistencia superior ( $R_{upper}$ ),
- Calcular el límite de resistencia inferior ( $R_{lower}$ ),
- Calcular la resistencia total ( $R_T$ ) de la pared, a partir de:

$$R_T = \frac{R_{upper} + R_{lower}}{2} \quad (8)$$

Cálculo del valor  $U$  del muro, por medio de la ecuación:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (W/m^2 K) \quad (9)$$

El cálculo del valor  $U$  se ilustra mediante un ejemplo [15], que corresponde a un muro doble, con una pared de ladrillos macisos, al exterior, una cámara de aire y un muro interior de blocks huecos, con un aislamiento térmico dentro de la cavidad, como se muestra en la figura 15.

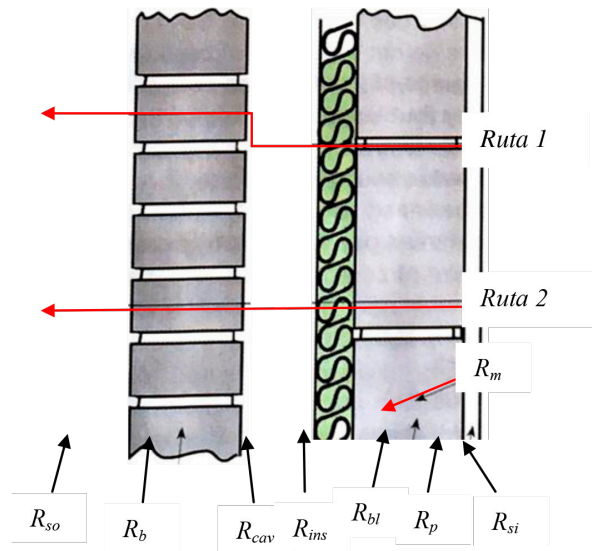


Figure 15. Corte del muro con las resistencias

### 1.1. Identificación de todas las rutas de flujo de calor a través del muro

La figura indica las dos rutas posibles que el calor puede tomar mientras fluye a través del elemento. Tenga en cuenta que la conductividad térmica del ladrillo y el mortero son similares y por lo tanto se puede considerar como una capa homogénea. Las trayectorias en términos de resistencia térmica según lo determinado en la figura 15 y la tabla 6 son:

$$\text{Ruta 1 } (R_1) = R_{st} R_p R_m R_{ins} R_{cav} R_b R_{so}$$

$$\text{Ruta 2 } (R_2) = R_{st} R_p R_m R_{ins} R_{cav} R_b R_{so}$$

La Ruta 1 tiene una pérdida del 10 %, mientras que la Ruta 2 representa, aproximadamente, un 90 % del total de pérdida de todo el muro.

Table 6. Características de materiales, en términos de impedancia térmica.

Capas	Espesor (m)	Conductibilidad Térmica (W/mK)	Resistencia Térmica (m <sup>2</sup> k/W)
Superficie Rsi			0,123
Yeso Rp	0,015	0,46	0,033
Mortero Rm (Ruta 1)	0,105	0,12	0,875
Block Rbl (Ruta 1)	0,105	0,19	0,553
Aislación Rins	0,075	0,03	2,500
Aire Rcav			0,180
Ladrillo Rb	0,105	0,73	0,144
Superficie Rso			0,060

## 1.2. Cálculo del límite superior de la resistencia

El límite de resistencia superior se calcula utilizando:

$$R_{upper} = 1 / ( F_1 / R_1 + F_2 / R_2 ) \quad (10)$$

donde:

$F_1$  = área fraccionada de la Ruta 1

$F_2$  = área fraccionada de la Ruta 2

$R_1$  = total de la resistencia térmica de la Ruta 1

$R_2$  = total de la resistencia térmica de la Ruta 2

A continuación se determina la resistencia total de las dos rutas, sumando las resistencias individuales que figuran en la tabla anterior.

$$R_1 = 0,123 + 0,033 + 0,875 + 2,5 + 0,180 + 0,144 + 0,060$$

$$R_1 = 3,92 m^2 k/W$$

$$R_2 = 0,123 + 0,033 + 0,553 + 2,5 + 0,180 + 0,144 + 0,060$$

$$R_2 = 3,59 m^2 k/W$$

Luego se calcula el límite de resistencia superior, sustituyendo los valores conocidos en la ecuación (10), anterior:

$$R_{upper} = 1 / ( 0,1 / 3,92 + 0,9 / 3,59 )$$

$$R_{upper} = 3,62 m^2 k/W$$

### 1.3. Cálculo del límite inferior de la resistencia

El límite de resistencia inferior se calcula añadiendo la resistencia térmica de cada capa. Sin embargo, la capa punteada se considera en términos de las áreas fraccionarias de cada material. Así que para la ruta de bloque/mortero:

$$R_{bl/m} = 1 / (F_{bl} / R_{bl} + F_m / R_{2m}) \quad (11)$$

$$R_{bl/m} = 1 / (0,9 / 0,553 + 0,1 / 0,875)$$

$$R_{bl/m} = 0,574 m^2 k/W$$

Ahora se determina el límite de resistencia más bajo utilizando la resistencia de la capa de bloque/mortero:

$$R_{lower} = R_{st} + R_p + R_{bl/m} + R_{ins} + R_{cav} + R_b + R_{so} \quad (12)$$

$$R_{lower} = 0,123 + 0,033 + 0,574 + 2,500 + 0,180 + 0,144 + 0,060$$

$$R_{lower} = 3,61 m^2 k/W$$

### 1.4. Cálculo del valor U del elemento

El valor  $U$  es determinado usando la siguiente ecuación:

$$U = 2 / (R_{upper} + R_{lower}) \quad (13)$$

$$U = 2 / (3,62 + 3,61)$$

$$U = 0,28 W/m^2 k$$

Si hay espacios con aire, dentro del muro analizado, o partes metálicas penetrando en la capa del aislamiento, que crean más de un 3% de aumento en el valor  $U$ , será necesario realizar más correcciones al valor  $U$ . Se puede ver, en este ejemplo, que los límites de resistencia superior e inferior son casi los mismos. Un efecto mucho mayor se notará cuando se tenga un puente térmico en la capa de aislamiento.

## NORMAS IRAM

En los párrafos siguientes, se verá la aplicación de las normas IRAM de acondicionamiento térmico en la construcción de viviendas.

La Norma IRAM 11549 [16] introduce al vocabulario técnico, propio del aislamiento de edificios. Por su parte, la Norma IRAM 11601 [17] describe las propiedades térmicas de los materiales de construcción y método de cálculo de la resistencia térmica total ( $R_T$ ) o su inversa, la Transmisión Térmica Total ( $k$ ). La Norma IRAM 11603 [18] presenta la clasificación bioambiental de la República Argentina. Como ejemplo, se puede ver las descripciones establecidas por reglamento para cada zona de la Provincia de Buenos Aires. Teniendo en cuenta los diferentes climas, el asoleamiento, los vientos predominantes y las jurisdicciones que cubren cada una de ellas. La Provincia de Buenos Aires (ubicada en el centro de la Argentina) está compuesta por 2 zonas climáticas y sus respectivas subzonas: Zona III a, Zona III b, Zona IV c y Zona IV d. Las características de estas zonas se explican en la Norma IRAM 11603 [18] que proporciona recomendaciones para su aplicación.

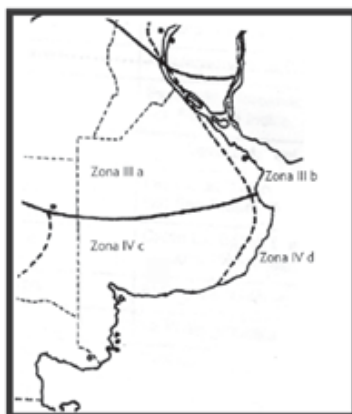


Figure 16. Zonas climáticas de la Prov. de Buenos Aires, Argentina.

Es importante para el análisis, controlar los vientos utilizando criterios de protección adecuados. Una de las características más relevantes de la zona marítima, es que contiene un alto grado de humedad relativa, por lo que se deben tomar las precauciones necesarias para evitar la condensación. Las amplitudes térmicas son pequeñas durante todo el año. Se recomienda una protección solar eficiente durante todo el verano. La zona de transición, Zona IV c en nuestro ejemplo, se extiende desde áreas de amplitudes térmicas mayores a menores. Para latitudes superiores a  $30^\circ$ ,

la orientación óptima es NO-N-NE-E. Para latitudes inferiores a 30º, la orientación óptima es NO-N-NE-E-SE.

La Norma IRAM 11604 [19] proporciona directrices para la verificación de sus condiciones hidrotérmicas, ahorro de energía en calefacción, coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor, su cálculo y los valores límite. Por su parte, la Norma IRAM 11605 [14] detalla el aislamiento térmico de los edificios, las condiciones de vida dentro de los edificios y los valores máximos admisibles de transmitancia térmica en recintos opacos. Parte de esto, ya se detalló en párrafos anteriores.

La Ley 13059 [20], dictada por la Cámara de Diputados de la Provincia de Buenos Aires, introduce las mínimas aislaciones recomendadas en las Normas IRAM. El objetivo de esta Ley es establecer las condiciones de acondicionamiento térmico requeridas en la construcción de los edificios, para contribuir a una mejor calidad de vida de la población y la reducción del impacto ambiental, a través del uso racional de la energía. Esta ley es aplicable a todas las construcciones públicas y privadas destinadas al uso humano (vivienda, escuelas, industrias, hospitales, entre otros) que se construyan en el territorio de la provincia de Buenos Aires, e indica que deben tener un correcto aislamiento térmico, de acuerdo a diferentes condiciones: características de los materiales a utilizar, orientación geográfica de la construcción y otras condiciones determinadas en su reglamentación.

## **HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE LA SUSTENTABILIDAD EDILICIA, FORTALEZAS Y LIMITACIONES PARA SUD AMÉRICA**

En este punto se presentan distintos sistemas de evaluación de la sustentabilidad edilicia, con el fin de compararlos, poniendo especial atención en lo referente a la eficiencia en el uso de la energía. Estos sistemas están basados en normativas, recomendaciones y métodos de construcción propios del país de origen, no siendo adecuados para cuantificar la situación ambiental, en función de la realidad de Argentina y, en general, de los países de Sud América.

La mayoría de los métodos de evaluación de la sustentabilidad edilicia, que están originados en los países desarrollados, tienden a enfocarse en cuantificar solo aspectos ambientales, sin embargo, no suelen considerar las cuestiones sociales y económicas [21] [22]. En cambio, en la mayoría de los países en vías de desarrollo, existe un interés en el uso de la construcción y las industrias relacionadas, como herramientas para la generación de empleos, es decir, que posean connotaciones

sociales y económicos, por lo que surge la demanda de establecer criterios de sustentabilidad, que respondan a esta situación.

A nivel internacional, existen diversas herramientas de evaluación, entre ellas se destacan: LEED (Leadership in Energy & Environmental Design) [23] desarrollada en USA, BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology) [24] en el Reino Unido, VERDE [25] en España, CEPAS (Comprehensive Environmental Performance Assessment Schemes) [26] en Hong Kong, y CASBEE (Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency) [27] en Japón. En esta parte del capítulo se analizarán tres de estas herramientas, con el fin de establecer cuál de ellas es la más adecuada para evaluar la sustentabilidad edilicia, analizando ventajas y desventajas, considerando la situación de Argentina y de Sud América, en general.

## 1. METODOLOGÍAS ANALIZADAS

Se profundizará el análisis de las herramientas: BREEAM, LEED y VERDE, que son las más difundidas en América Latina. Como se podrá ver, estas herramientas analizan similares dimensiones, dentro de las que no se verán en profundidad, se puede decir que CASBEE no tiene en cuenta la incidencia del transporte, ni de los residuos, mientras que CEPAS es la que posee un mayor número de dimensiones, otorgando cierta importancia a los aspectos sociales y económicos, pero por su estructura, se hace muy difícil realizar una comparación, de las ponderaciones, con las otras herramientas.

### 1.1. BREEAM

La metodología BREEAM se basa en la ponderación de una serie de ítems obtenidos, a partir del cumplimiento de ciertos objetivos. Se puede aplicar a distintos tipos de construcciones existentes o nuevas, viviendas, barrios, etc. Estos criterios se agrupan en categorías, que se las puntúa. Cuanto mayor puntaje obtienen, más sustentable será la construcción. La calificación final se da con letras, que varían entre A y G. Considera ciertos requerimientos mínimos que son de cumplimiento obligatorio, y otros criterios, que permiten incluir medidas innovadoras, que no están explícitamente incluidas. La evaluación se realiza en distintas fases de la construcción: diseño, construcción, mantenimiento, acondicionamiento, restauración, etc. En cada edificio se evalúan diez categorías: gestión, salud y bienestar, energía, transporte, agua, materiales, residuos, uso del suelo, ecología, contami-

nación e innovación. Estas categorías se reducen a ocho, en el caso de proyectos urbanísticos: clima, energía, comunidad, diseño del lugar, ecología, transporte, recursos, economía y edificios.

La ponderación de las categorías analizadas se puede ver en la Tabla 1, donde la categoría que posee mayor importancia es la “Energía”, con un 18% de la ponderación total. Las dos categorías que le siguen con mayor peso son: gestión, y salud y bienestar, que están orientadas a las mejoras en las condiciones sociales y económicas de los habitantes del edificio, ponderan los residuos, individualizando las estrategias destinadas a su almacenamiento, recolección y tratamiento. [24] [28]

## 1.2. LEED

El método de certificación LEED se sustenta en un sistema de puntuación, basado en satisfacer criterios específicos de sustentabilidad. Además, se asignan puntos por innovación en el diseño y por prioridad regional. Tal que, en función del puntaje obtenido por el edificio estudiado, adjudicándole, como base, una certificación simple y en la medida que mejora su performance, la certificación ascenderá a: Silver, Gold o Platinum, que es la máxima.

En la Tabla 7 se presentan las categorías de evaluación de LEED y la ponderación relativa de las mismas. Se aprecia que ninguna categoría supera el 35%, hay una dispersión de las ponderaciones, mayor que en BREEAM. La categoría que posee mayor peso es Energía y la de menor importancia es el Uso del Agua. [23] Cada categoría es evaluada considerando aspectos ambientales, sociales y económicos, dando una mayor importancia a los ambientales. Le asigna bastante peso a la Calidad Ambiental Interior, considera más sustentable liberar superficie del terreno, favoreciendo la construcción vertical y le da poca importancia, a la gestión de los residuos, entre otras características que posee.

En la dimensión Energía y Atmósfera, en LEED se tuvo en cuenta que los diseños deben cumplir con los requerimientos mínimos del Standard ASHRAE 90.1-2007, en lo referente al uso eficiente de la energía, para ello, se debe demostrar que el proyecto en estudio realiza un porcentaje de ahorro energético, que va desde el 12% al 48% o más, en comparación a un diseño considerado como base, que cumple con este estándar. Por otra parte, se debe asegurar un adecuado comportamiento de los sistemas del edificio, no solo inicialmente, sino también a largo plazo. [29]

### 1.3. Verde

El sistema VERDE, cuantifica la reducción de los impactos ambientales del edificio y su emplazamiento, mediante indicadores que ponderan las estrategias de diseño y factores de rendimiento. De cada impacto generado, se pondera su extensión, duración e intensidad. Para evaluar los impactos, se basa en la política ambiental española y en datos relativos a indicadores de sostenibilidad. [25]

VERDE se sustenta en estimar la reducción de impactos del edificio a evaluar, en relación a los impactos producidos por un edificio de referencia, a lo largo de su vida útil. El edificio de referencia, es un edificio estándar que cumple estrictamente las exigencias mínimas, fijadas por la reglamentación y por la experiencia práctica. Los impactos analizados son los siguientes: cambio climático, pérdida de la fertilidad del suelo, pérdida de vida acuática, emisiones de compuestos foto-oxidantes, cambios en la biodiversidad, agotamiento de recursos no renovables, disponibilidad de agua potable, generación de residuos no peligrosos, confort para los usuarios, etc. [30] En este sistema, existe una importante diferencia entre las ponderaciones relativas de sus categorías.

En la tabla 1 se presenta un cuadro ponderando las distintas categorías, se observa que en Energía y Atmósfera se concentra más del 42% del total de los puntos, situación que parece excesiva, mientras que sumadas las tres categorías con menor peso, llegan apenas al 24%. El análisis de impactos se centra en la etapa de construcción del edificio. En la etapa de uso del edificio, no se incorporan los aspectos de mantenimiento, que son primordiales en el ciclo de vida del edificio, para obtener condiciones aptas de habitabilidad.

En lo que respecta a la Energía y Atmósfera, se estudian los siguientes ítems: uso de energía no renovable incorporada en los materiales de construcción, uso de energías no renovable en el transporte de los materiales de construcción, consumo de energía no renovable durante la fase de uso, demanda y eficiencia de los sistemas, demanda de energía eléctrica en la fase de uso, producción de energía renovable en la parcela, emisiones de sustancias foto-oxidantes en procesos de combustión y emisiones de sustancias que reducen el ozono estratosférico, se puede asegurar que se pondera de una manera bastante amplia, los distintos aspectos que abarca esta categoría.

## 2. COMPARACIÓN ENTRE LOS DIFERENTES MÉTODOS DE EVALUACIÓN

Resulta atrayente y necesario comparar las tres herramientas creadas para la evaluación de la sustentabilidad (LEED, BREEAM y VERDE) y analizar la importancia relativa asignada a cada una de las dimensiones (tabla 7), para tratar establecer el énfasis que pone cada herramienta, como base para estudiar su aplicación en nuestra región. Para poder realizar estas comparaciones, se deben agrupar esas dimensiones en áreas temáticas, realizando un análisis más general, en virtud que los indicadores empleados por cada norma, no son exactamente iguales, sino que hay una equivalencia entre ellos.

Tabla 7. Dimensiones contenidas en cada método y su peso relativo (%) [30].

Dimensiones	BREEAM		LEED		GREEN	
Uso del suelo	9,5	24,5	14	28	3,8	7,5
Transporte	8		12		1,8	
Residuos	7		2		1,9	
Materiales	12	22,5	12	22	19,2	33,1
Agua	10,5		10		13,9	
Energía	18	27,5	33	35	38,4	42,8
Contaminación	9,5		2		4,3	
Calidad ambiental interior	14	14	15	15	13,8	13,8
Aspectos sociales y económicos / Gestión	11,5	11,5	-	-	2,8	2,8

Se observa como BREEAM mantiene un cierto equilibrio en la ponderación de cada área, siendo la que menos relevancia le da al ítem uso de la energía. En cambio, las herramientas LEED y VERDE, presentan una gran variación en la importancia asignada a las distintas dimensiones, siendo las cuestiones relacionadas con la Energía las de mayor peso, mientras que en segundo lugar, para LEED se encuentra el Uso de Suelo y para VERDE, Materiales.

## 3. PROBLEMAS AMBIENTALES EN LATINOAMÉRICA

Como es sabido, actualmente, el crecimiento demográfico y por ende, urbano de las ciudades se está produciendo a un ritmo acelerado en todo América Latina, siendo la segunda región más urbanizada del planeta. Según las Naciones Unidas, el crecimiento de la tasa de urbanización fue del 41%, en 1950 y ascendió al 79%, en 2010.

Se considera que, de continuar esta tendencia en los próximos 20 años, la mayoría (90%) de la población latinoamericana residirá en ciudades [31].

Se está observando que Latino América, en general, presenta un cierto cambio de tendencia, para reconfigurar su manera de crecer. Hace unos años, las grandes ciudades eran las protagonistas centrales de una expansión acelerada. Actualmente, a pesar de que sus grandes metrópolis siguen teniendo un importante peso en la región (por ejemplo, Buenos Aires, Ciudad de México, San Paulo, entre otras), las ciudades intermedias son las que poseen las mayores tasas de crecimiento. Por ello, se puede asegurar que esta manera de crecimiento urbano, genera enormes retos para muchas ciudades intermedias de Sud América.

En los últimos años, el desarrollo urbano en Sud América, como en muchos otros países en vías de desarrollo, presenta una serie de problemáticas comunes, ellas son: [32] [33]

- Dificultades por el acceso a la tierra;
- La vivienda financiada por los estados nacionales es escasa, no siempre tiene un diseño apropiado, en muchos de los casos, un mismo diseño es empleado en distintos microclimas, dentro del país y las viviendas suelen estar deficientemente localizadas;
- Rápido deterioro de las zonas periurbanas, que crecen sin una adecuada planificación del uso del suelo, habitualmente, este crecimiento es bajo la presión inmobiliaria, que solo pretende aumentar su rentabilidad;
- Falencias en el acceso a los servicios de agua potable, que abastezcan en calidad y cantidad (durante todo el año) cumpliendo estándares internacionales;
- Importante falencia de redes cloacales, lo que origina contaminación de los cursos de agua que atraviesan las ciudades y a los acuíferos subterráneos.
- Dificultades para resolver la gestión de los residuos sólidos urbanos y de los efluentes industriales;
- La contaminación del aire como consecuencia de la falta de uso de tecnologías adecuadas y de control, sobre las emisiones industriales y la proveniente del tránsito;
- Desastres de origen natural (inundaciones, sismos, deslizamientos de suelos, etc.), por un mal uso del suelo. Se originan debido a la ocupación no planificada y no controlada del suelo, en lugares de alto riesgo o en otros, donde el riesgo se ve potenciado, debido al cambio climático global;
- Desinversión pública en el transporte, que se pone en evidencia en la medida que las ciudades crecen;
- Impactos ambientales generados a consecuencia de la pobreza urbana, el alto grado de hacinamiento (a escala urbana y dentro de las viviendas), etc.

Los desafíos de nuestra sociedad pasan por lograr un crecimiento armónico, planificado y sustentable. Por lo tanto, del uso de estas herramientas para medir la sustentabilidad edilicia y urbana puede ser muy interesante para mejorar la gestión y calidad de los servicios públicos, seguridad para sus habitantes, protección del ambiente, generación permanentemente de empleos y capacidad de adaptarse y responder ante el cambio climático [34] [35].

#### 4. APLICABILIDAD DE LAS HERRAMIENTAS EN LATINOAMÉRICA

De acuerdo al estudio de metodologías de evaluación de la sustentabilidad descritas anteriormente, que son desarrolladas e implementadas en países con estándares de vida superiores a los sudamericanos, se puede decir que si se aplican estas herramientas, exactamente como fueron creadas, no logran dar una respuesta adecuada a las necesidades que se desprenden de las problemáticas propias de las ciudades intermedias y grandes, de Sud América. No obstante, muchos de los criterios utilizados en estas metodologías, provenientes de otros países, podrían ser tomadas como punto de partida o referencia, para luego desarrollar herramientas de evaluación propias, más adecuadas al actual contexto de la región. Teniendo en cuenta nuestra realidad, es evidente que deben tener un peso relativo mayor las dimensiones relacionadas con: la gestión de los residuos, la contaminación y los indicadores que ponderen los aspectos sociales y económicos. Esto se debe a que en Sud América estas problemáticas tienen una mayor relevancia, que en los países desarrollados. La consideración del impacto que genera el transporte debería ser más importante, teniendo en cuenta la extensión de países, tales como: Argentina, Brasil o Chile, y el excesivo uso del transporte por carretera, que es el menos eficiente y, además, genera una importante contaminación. En este ítem, se considera que la ponderación dada a LEED es bastante buena, para los tres países antes mencionados, probablemente, por ser una metodología proveniente de USA, país muy extenso.

Por otra parte, debería tener una menor ponderación relativa los indicadores que cuantifican la Calidad del Aire Interior, debido a que en un sector importante de Sud América, no está muy difundido el uso de revestimientos y accesorios internos, con posibilidad de emisión de compuestos orgánicos volátiles (COV) y al uso masivo de pinturas al agua, por ejemplo, en Argentina. En la mayor parte de las construcciones realizadas en Sud América, aún es mayoritario el uso de materiales tradicionales, donde hay pocos elementos que pueden tener emisiones de COV. [30] Desgraciadamente, tampoco está difundido el uso masivo de aberturas con alta hermeticidad, que disminuye las renovaciones del aire inte-

rior. En las regiones de nuestro continente, donde el clima, es templado o cálido (las zonas más densamente pobladas), hay hábitos de ventilar naturalmente los ambientes, todo esto disminuye drásticamente la posibilidad que se presenten inconvenientes en la calidad de aire interior. Otra dimensión que podría tener un menor peso relativo, que en VERDE, es la Energía, debido a que hay abundantes reservas de distintos tipos de energías y, no obstante, el peso relativo, deberá estar relacionado con la medición o no del servicio público y los cuadros tarifarios existentes.

Es interesante comentar que no parece ser una buena solución la adopción de un mismo método de medición de la sustentabilidad en las edificaciones, que se pueda aplicar directamente de un país a otro, mientras existan realidades sociales, económicas y hasta de tecnologías de construcción, muy distintas. Es importante acotar que, es preferible medir deficientemente la sustentabilidad, a no medirla. Los modelos de medición deberán ser flexibles, teniendo en cuenta las particularidades climáticas y usos constructivos, de las distintas regiones de cada país.

Así como la sociedad evoluciona, las herramientas para medir la sustentabilidad edilicia y en otros aspectos, deben adaptarse, para ser adecuadas herramientas de las políticas públicas, relacionadas con la gestión ambiental.

## **MODELIZACIÓN ENERGÉTICA DE UNA VIVIENDA**

Se realizó un análisis energético de una vivienda de planta simple, a través de la modelación con el software Energy Plus, con la finalidad de determinar la influencia de distintas variables de diseño, ya explicadas previamente.

Sobre un diseño sencillo, de una vivienda de 50 m<sup>2</sup> (figure 17) de superficie, ubicada en la ciudad de Buenos Aires, se plantearon tres casos de análisis para determinar la influencia relativa de cada una de estas variantes. Los mismos se detallan a continuación:

*CASO 1:* Construcción tradicional Argentina (figura 17-a)

Muros: Ladrillo hueco 18 cm de espesor, con revoques exterior e interior.

Cubierta: Chapa ondulada con aislante térmico (2 cm) y terminación de machimbre.

Ventanas: carpintería de aluminio con vidrio simple.

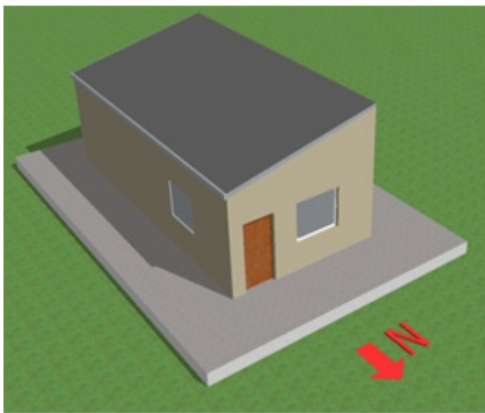
*CASO 2:* Construcción tradicional Argentina con mejoras de aislación (figure 17-b).

Muros: muro doble, dos muros de Ladrillo hueco 15 cm aislados con polietileno expandido (5 cm) y un aislante hidrófugo (polietileno 200 micrones), revoques en la cara externa e interna de la vivienda.

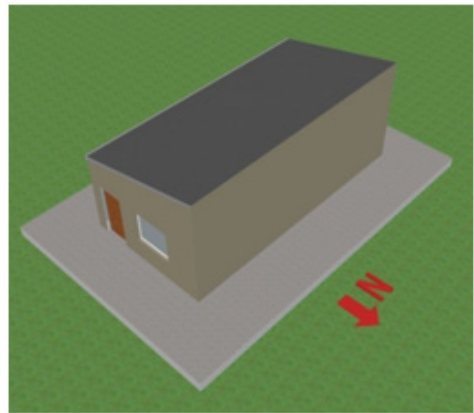
Cubierta: Chapa ondulada con aislante térmico (2 cm), terminación de machimbre, lana de vidrio (2 cm) y placa de yeso.

Ventanas: carpintería de aluminio con vidrio doble

CASO 3: Vivienda del Caso 1 con orientación del ingreso hacia el Este (figura 17-b).



a) Orientación Norte



b) Orientación Este

Figura 17. Esquemas de casas modeladas.

Como resultado de la modelación se obtuvieron las siguientes demandas energéticas por componente, en invierno (tabla 8 and figura 2) y en verano (tabla 9 and figura 3).

Tabla 8. Demanda energética por calefacción (KWh/m<sup>2</sup>).

	Muro exterior	Techo	Radiación solar	Transmisión por ventanas
Caso 1	19,49	65,97	35,06	-3,83
Caso 2	12,76	29,87	29,64	-0,18
Caso 3	17,47	57,5	39,29	-3,37

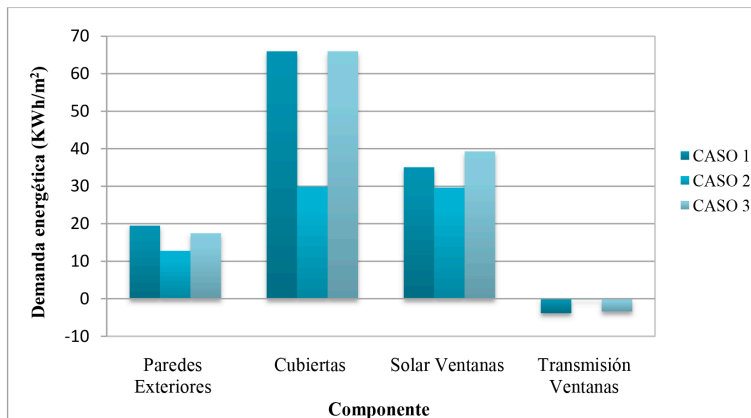


Figura 18. Demanda energética por calefacción (invierno).

Tabla 9. Demanda energética por refrigeración.

	Muro exterior	Techo	Radiación solar	Transmisión Ventanas
Case 1	-6,45	-5,75	14,34	-2,37
Case 2	-3,23	-3,31	12,28	-1,55
Case 3	1,60	-13,43	11,82	-2,45

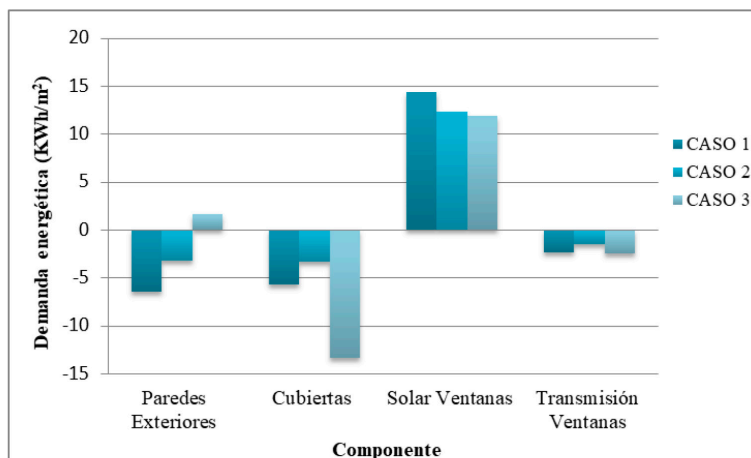


Figure 19. Demanda energética por refrigeración (verano).

Para los casos analizados, el análisis de resultados brinda la siguiente información:

- En invierno, la demanda energética en muros exteriores materializados con doble tabique y aislación térmica (Caso 2), marca una clara disminución en la demanda energética (34,5%) respecto al muro tradicional, mientras que en el Caso 3, donde se incrementa la exposición al sol del muro con mayores dimensiones, la demanda energética de calefacción disminuye (10,4%) debido a que esa condición genera un aporte de calor superior al de la orientación del Caso 1, y por lo tanto la demanda energética de calefacción disminuye;
- Lo mismo ocurre con la demanda energética de la cubierta en invierno, presentando aquella con mayor aislación (Caso 2), una importante disminución en la demanda energética (54,7%) respecto la cubierta con menor aislación, mientras que en el Caso 3, donde se incrementa la exposición al sol de la cubierta, la demanda energética de calefacción disminuye (12,8%) debido a que esa condición genera un aporte de calor superior al de la orientación del Caso 1;
- La incorporación de vidrios dobles en las aberturas (Caso 2), genera una disminución en la demanda energética por calefacción en invierno del orden del 25% respecto al vidrio simple (Caso 1) y del 14,3% en la demanda energética de refrigeración en verano;
- La influencia de las características de las cubiertas en la demanda energética total es muy superior a la influencia de la demanda energética de los muros y las aberturas;
- Analizando la demanda energética total, generada por las tres variantes analizadas, a lo largo de un año, se puede observar que las aislaciones incorporadas en muros, cubierta y aberturas generaron una disminución del 34,5%. Con estos porcentajes de ahorro, y de acuerdo al costo actual de la energía doméstica, la implementación de estas mejoras, podría ser factible de amortizar en plazos razonables.

## REFLEXIONES FINALES

En este capítulo se puede ver una recopilación de recomendaciones y algunos estudios, relacionados con el consumo de energía en edificios. Esta problemática no es una cuestión sencilla, pero siguiendo estas recomendaciones se puede obtener un proyecto sustentable, que contemple la ubicación y las condiciones climáticas del sitio y otras recomendaciones que son específicas de cada diseño y de la selección

de los materiales a emplear. Esto permite asegurar que no se puedan emplear los mismos o muy similares diseños, en diferentes lugares geográficos.

Considerando los métodos existentes para la evaluación de la sostenibilidad de las construcciones, se puede decir que BREEAM es una herramienta interesante y resulta ser la más adecuada, para ser utilizada en América del Sur, no obstante, es conveniente que el peso comparativo del transporte se aumente, en los países *más extensos (como Argentina y Brasil)* y podría ser conveniente, disminuir la ponderación de la calidad ambiental interna.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Departamento de Ingeniería y a la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur de Argentina y al CIC-Prov. Buenos Aires por el apoyo dado para desarrollar las investigaciones contenidas en este capítulo.

#### REFERENCIAS

- [1] Building Resear Establishment. BRE digest 350 (1990) Climate and Site Development Part 3: Improving Microclimate Through Design. P6 HMSO.
- [2] STANDEVEN, M.; COHEN, R. AND BORDASS, W. (1996) PROBE 3: Cheltenham & Gloucester Chief Office, BSJ 31-34, *Building Services Journal*, pp. 31-31.
- [3] Servicio Meteorológico Nacional (2019) Argentine, <https://www.smn.gob.ar/>
- [4] Fundación YPF - Educar (2019) *Galería de mapas de los recursos energéticos de la Argentina*, <http://energiasdemipais.educ.ar/fuentes-de-energia-potencial/>
- [5] COOK, N. J. (1986) *Designers guide to wind loading of building structures. Part 1*. United States.
- [6] MORGAN, C. (2006) Design and detailing for airtightness, *SEDA Design Guides for Scotland*, <https://www.seda.uk.net/>
- [7] BORDASS, W. (2000) Envelope Airtightness, *The Architects Journal*, pp. 48-51.
- [8] BURBERRY, P. (1978) *Building for energy conservation*, Architectural Press, London.
- [9] BUNN, R. (2003) Sustainable building services in developing countries: the challenge to find “best-fit” technologies, *Sustainable building and construction*.

- [10] FUTCHER, J. A.; KERSHAW, T. AND MILLS, G. (2013) Urban form and function as building performance parameters, *Building and Environment*, vol. 62, pp. 112-123.
- [11] RATTI, C.; BAKER, N. AND STEEMERS, K. (2005) Energy consumption and urban texture, *Energy and Buildings*, vol. 37, 7, pp. 762-776.
- [12] Instituto de la Vivienda, (2003) *Acondicionamiento Hygrotermico de los edificios: Manual de la Ley 13059*, Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- [13] Norma IRAM 11625, (2000) *Aislamiento térmico del edificio. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Verificación del riesgo de condensación del vapor de agua superficial e intersticial en las cámaras centrales de las paredes exteriores, pisos y cubiertas del edificio en general*, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- [14] Norma IRAM 11605, (2004) *Puentes térmicos*, Instituto Argentina de Racionalización de Materiales.
- [15] The Building Regulations - Part L, IES Virtual Environment, (2002 Edition).
- [16] Norma IRAM 11549, (2002) *Aislamiento trmico de edificios*. Instituto Argentina de Racionalización de Materiales.
- [17] Norma IRAM 11601, (2002) *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo, Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. Instituto Argentina de Racionalización de Materiales.
- [18] Norma IRAM 11603, (2012) *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*, Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- [19] Norma IRAM 11604, (2002) *Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites*. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales.
- [20] Ley 13059, (2010) *Acondicionamiento térmico en la exigibles en la construcción de los edificios*, Instituto de la Vivienda de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- [21] COLE, R. J. (2005) Building environmental assessment methods: Redefining intentions and roles, *Building Research and Information*, vol. 33, pp. 455-467.
- [22] COOPER, I. (1999) Which focus for building assessment methods – environmental performance or sustainability?, *Building Research and Information*, vol. 27, pp. 321-331.
- [23] LEED, (2009) *New Construction and Major Renovations Rating System*. USGBC Member. Updated 2013, <http://www.usgbc.org/leed>

- [24] BREEAM, (2015) *Manual Técnico BREEAM ES*. Updated 2017, [www.breeam.es](http://www.breeam.es)
- [25] VERDE, (2015) *Guía para los Evaluadores Acreditados. NE Residencial y Oficinas*. <http://www.gbce.es/pagina/certificacion-verde>
- [26] CEPAS, (2006) *Comprehensive Environmental Performance Assessment Scheme for Buildings Application Guidelines*, <http://www.bd.gov.hk/english/documents/index CEPAS.html>
- [27] CASBEE, (2014) *Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency. Technical Manual*. <http://www.ibec.or.jp/CASBEE/english/>
- [28] DOAN, D. T.; GHAFARIANHOSEINI, A.; NAISMITH, N.; ZHANG, T.; GHAFARIANHOSEINI, A. AND TOOKEY, J.A. (2017) Critical comparison of green building rating systems, *Building and Environment*, vol. 123, pp. 243-260.
- [29] MACÍAS, M. Y GARCÍA NAVARRO, J. (2010) Metodología y herramienta VERDE para la evaluación de la sostenibilidad en edificios, *Informes de la Construcción*, vol. 62, 517, pp. 87-100.
- [30] RUMI, L.; MONTERO, M. C. Y ORTEGA, N. F. (2018) Sustentabilidad edilicia. Comparación de métodos de evaluación y su aplicabilidad en Argentina, *Revista Argentina de Ingeniería*, vol. 6, 12, pp. 138-145.
- [31] RAMOS SANZ, A. (2009) Trasfondo teórico, confusiones y adaptaciones lejanas de los métodos de evaluación de la sustentabilidad. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 13, pp. 35-46.
- [32] VAPÑARSKY, C. Y GOROJOVSKY, N. (1990) *El crecimiento urbano en la Argentina*. Grupo Editor Latinoamericano-IIED. Buenos Aires.
- [33] FERNÁNDEZ, R. + T.I.P.U. (2003) *Arquitectura y Ciudad: Del Proyecto al Eco-Proyecto*. Editorial Juan O’Gorman, pp. 42-45, Buenos Aires.
- [34] FERNÁNDEZ, R. (2005) *Ciudades Urbanas, Ausencia de modernidad y apogeo de la postplanificación*, <http://www.dialnet.unirioja.es/download/articulo/2230694>
- [35] ONU-Habitat. (2012) *Estado de las Ciudades de América Latina y el Caribe, Rumbo a una nueva transición urbana*; Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. <http://www.unhabitat.org/HS/053/12S>

# AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO: UMA APLICAÇÃO BUSCANDO A ECONOMIA DE ENERGIA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE AR-CONDICIONADO EM EDIFICAÇÕES DE ALTA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Antonio Faria Neto<sup>1</sup>, Inácio Bianchi<sup>1</sup>, Francisco Antonio Lotufo<sup>1</sup>,  
Frédéric Wurtz<sup>2</sup>, Benoit Delinchant<sup>2</sup>

## RESUMO

O conforto térmico é um conceito subjetivo que descreve o estado mental de uma pessoa em termos da sua sensação de calor ou de frio. O conforto térmico é influenciado por fatores ambientais e pessoais. Seu indicador mais comumente utilizado é a temperatura do ar, mas diferentes seres humanos podem sentir sensações diferentes para uma mesma temperatura em um mesmo ambiente. Assim, este trabalho apresenta um método para avaliar a sensação térmica humana, baseado no fato de que o ser humano é o melhor sensor do seu próprio conforto térmico. O método proposto emprega tratamento estatístico em respostas obtidas por entrevistas feitas aos ocupantes do ambiente cuja temperatura é controlada, o método não apresenta a necessidade de medições das grandezas preconizadas por outros, e tampouco do conhecimento das características das vestimentas dos ocupantes. Utiliza uma escala de 21 pontos adaptada da escala ASHRAE de 7 pontos. Os dados coletados por intermédio desta escala são analisados por meio da ANOVA a fim de se detectarem variações estatisticamente significativas na percepção térmica média do grupo. Em

---

1 Universidade Estadual Paulista – UNESP. Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil. Mial: [inacio.bianchi@unesp.br](mailto:inacio.bianchi@unesp.br)

2 Universidade de Grenoble – Grenoble INP – G2Elab, 21 Avenue des martyrs, CS 90624, 38031, Grenoble, CEDEX 1, France

se constatando a diferença entre as percepções, aplica-se o teste de Tukey para que se possa identificar entre quais temperaturas as sensações térmicas são diferentes. O método foi aplicado a um experimento onde se procurava determinar se o uso combinado de ventilador com aparelhos de ar condicionado poderia levar a um consumo menor de energia. Mostrou-se que o uso de ventilador diminuiu a sensação térmica de calor dos ocupantes e concluiu-se que quando se faz o uso combinado dos dois dispositivos pode-se ajustar o termostato do condicionador de ar (atuando como refrigerador) cerca de 2 °C acima da temperatura desejada, sem prejuízo ao conforto térmico dos ocupantes do ambiente, diminuindo o consumo de energia. Mesmo considerando o consumo do ventilador, a economia líquida de energia pode ser bem significativa, dependendo do número de horas de utilização e do número de instalações.

## INTRODUÇÃO

Segundo a Agência de Saúde, Segurança e Meio Ambiente do Reino Unido (HSE) [1], o conforto térmico descreve o estado mental de uma pessoa em termos da sua sensação de calor ou de frio [1]. Ou seja, diz-se que um indivíduo está termicamente confortável se a sensação experimentada por ele não for nem de frio, nem de calor. Do contrário, diz-se que o indivíduo está termicamente desconfortável.

Sabe-se que a sensação térmica é fortemente impactada pela combinação de fatores ambientais (temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, etc.) com fatores pessoais (vestimenta, metabolismo, etc.). Portanto, o conforto térmico é uma questão de percepção e, portanto, varia de indivíduo para indivíduo, devendo ser avaliado integrando-se os fatores ambientais e pessoais [2- 4].

Assim, por exemplo, o conforto térmico proporcionado por um determinado ambiente a seus ocupantes não pode ser avaliado simplesmente medindo-se a temperatura ambiente, mas pode-se dizer que o máximo em conforto térmico, para aquele grupo de pessoas, naquele momento, ocorre a uma determinada temperatura, que é aquela que satisfaz a maioria do grupo [1].

Uma vez que a percepção de conforto térmico é subjetiva e sujeita, como se viu, a fatores ambientais e pessoais, é difícil traduzi-la em números. Contudo, a Sociedade Americana de Engenheiros de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE) [4] criou uma escala, variando de -3 a +3, para medir a sensação térmica das pessoas (-3 muito frio, 0 neutro, e +3 muito quente).

A fim de melhorar a captura da sensação térmica das pessoas, diferentes índices, combinando a escala ASHRAE com os fatores ambientais e pessoais, foram criados ao longo dos anos, tais como: o Voto Médio Estimado (PMV) e a Porcentagem Estimada de Insatisfação (PPD) [2- 5].

Embora esses índices aumentem a precisão na captura da sensação térmica dos indivíduos, eles requerem a medição de várias grandezas o que, algumas vezes, pode ser um inconveniente. Levando-se em consideração que o ser humano é o melhor sensor para o conforto térmico, este artigo propõe que este seja avaliado por meio de entrevistas utilizando-se uma versão modificada da escala de ASHRAE, sem o concurso de medidas adicionais.

O método convencional de controle dos sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado é feito com base apenas na temperatura ambiente, Fig.1 (a), sem qualquer vinculação com o conforto térmico da maioria dos ocupantes do recinto. Esta nova proposta permitirá que o ser humano seja inserido na malha de controle, “human in the loop”, Fig. 1 (b), tornando mais eficiente o uso da energia elétrica sem prejuízo para o conforto das pessoas.

É bastante legítima a preocupação com a eficiência energética nos sistemas de conforto térmico uma vez que eles são responsáveis por aproximadamente 40% do consumo total das edificações comerciais e públicas. As edificações residências, comerciais e públicas representam quase 50% da carga total do sistema elétrico, e são responsáveis por aproximadamente 40% do total das emissões de CO<sub>2</sub> [6 - 10].

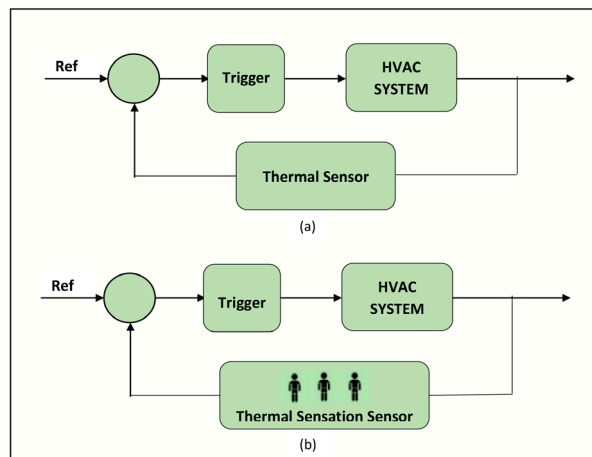


Fig. 1 Métodos de controle do sistema de aquecimento, ventilação e ar condicionado.

## A ESCALA DE SENSAÇÃO TÉRMICA

De acordo com a ASHRAE [4], a sensação de conforto térmico pode ser avaliada por meio de uma escala variando de -3 (muito frio) a +3 (muito quente). No entanto, este capítulo utiliza uma escala linear variando de -10 (muito frio) a +10 (muito quente), como ilustrado na Fig. 2, que é uma extensão da escala ASHRAE. Esta extensão dá ao respondente mais graus de liberdade para expressar sua sensação térmica.

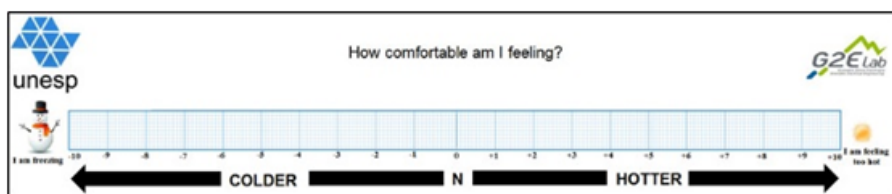


Fig. 2 Escala usada para a captação da sensação térmica.

Os respondentes são convidados a marcar na escala o valor que melhor exprime sua sensação térmica. É importante mencionar que o valor neutro desta escala (N) indica que o respondente se encontra termicamente confortável.

## O MÉTODO PROPOSTO

De modo a explicar o procedimento para a análise dos dados provenientes do questionário aplicado aos ocupantes de um recinto, para a avaliação do conforto térmico, considere um experimento hipotético [11], no qual três ocupantes (A, B e C) de um escritório são convidados a medir sua própria sensação térmica a cada grau Celsius de elevação da temperatura. Trata-se de um ambiente controlado onde a temperatura varia de 21 a 30°C.

### 1. MATRIZ EXPERIMENTAL

Após os dados serem coletados por meio da escala apresentada na Fig. 2, eles são armazenados numa matriz denominada matriz experimental [12], como ilustrado na Fig. 3.

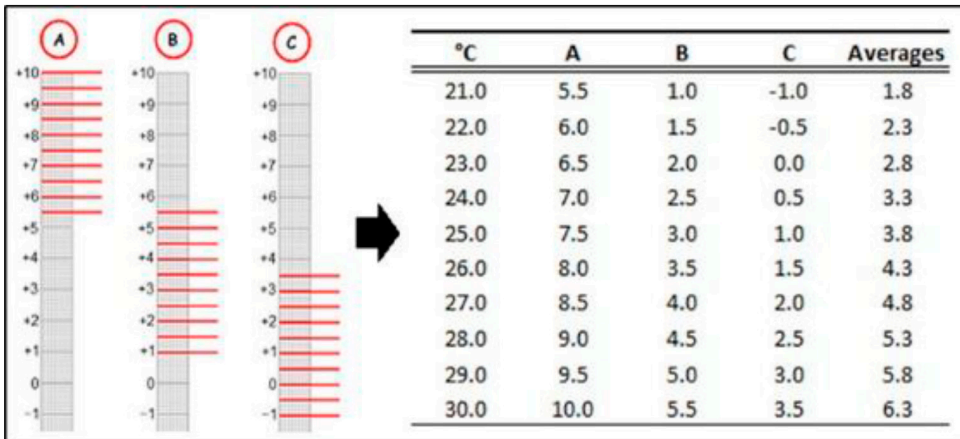


Fig. 3 Dados capturados pela escala de sensação térmica transferidos para a matriz experimental.

A matriz experimental armazena a sensação térmica dos respondentes individualmente, bem como o valor médio para cada grau Celsius. É possível observar que a sensação térmica varia de pessoa para pessoa e como todos os ocupantes estão sujeitos às mesmas condições ambientais, tais como temperatura, umidade relativa do ar, brisas, etc. Pode-se estabelecer que a sensação térmica varia diretamente com a temperatura, como determina o senso comum.

## 2. ANÁLISE DE VARIÂNCIA

O exame da Fig. 3 permite concluir que a sensação térmica média de um grupo de indivíduos depende diretamente da temperatura ambiente, mas não permite concluir a variação mínima da temperatura capaz de influenciar sensação térmica média, e vice-versa. Portanto, para saber se, de fato, houve uma variação na sensação térmica média será necessário um certo formalismo matemático, isto é, a igualdade das sensações médias deve ser testada de acordo com o teste de hipóteses representado por (1).

$$\begin{cases} H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_{10} \\ H_1 : \mu_i \neq \mu_j \end{cases} \quad (1)$$

Onde,  $H_0: \mu_1 = \mu_2 \dots \mu_{10}$  é chamada de hipótese nula, e estabelece que as sensações térmicas médias,  $\mu_i$ , para os dez níveis de temperatura são iguais;  $H_1: \mu_i \neq \mu_j$  é chamada de hipótese alternativa, e estabelece que pelo menos um par de médias é diferentes [12].

O procedimento apropriado para o teste de igualdade de várias médias é a análise de variância (ANOVA), a qual indica se a hipótese nula deve ser, ou não, rejeitada.

Observando-se mais atentamente a Fig. 3, nota-se que as sensações térmicas reportadas são tão distintas entre si que parece que os respondentes estão usando escalas diferentes, de modo que a variância das respostas para cada linha da matriz experimental se torna maior do que a variância entre linhas, o que impede de se determinar se as médias das sensações térmicas estatisticamente diferem de linha para linha ou se as diferenças são devidas apenas aos erros amostrais. A Tabela 1 resume os resultados da ANOVA para a matriz experimental apresentada na Fig. 3.

Tabela 1- ANOVA para a matriz experimental da Fig. 3

Source of variation	Sum of	Degrees of	Mean	$F_o$	$F_{critical}$	P-value
	Squares	Freedom	Square			
Between-Treatments	61.875	9	6.875	0.620301	2.392814	0.796774
Error (within-treatments)	221.6667	20	11.08333			
<b>Total</b>	283.5417	29				

Conforme mencionado no parágrafo anterior, a variância entre as linhas da matriz (6.88) é menor do que o erro (11.08), ou seja, não é possível afirmar se as diferenças entre as médias das sensações térmicas são devidas à temperatura ou aos erros amostrais.

Este problema pode ser contornado substituindo-se as percepções reportadas por seus respectivos z-scores, conforme indicado na Tabela 2.

Tabela 2 – Z-scores para as sensações térmicas capturadas na matriz experimental da Fig. 3.

°C	A	B	C	Averages
21.0	-1.5	-1.5	-1.5	-1.5
22.0	-1.2	-1.2	-1.2	-1.2
23.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8
24.0	-0.5	-0.5	-0.5	-0.5
25.0	-0.2	-0.2	-0.2	-0.2
26.0	0.2	0.2	0.2	0.2
27.0	0.5	0.5	0.5	0.5
28.0	0.8	0.8	0.8	0.8
29.0	1.2	1.2	1.2	1.2
30.0	1.5	1.5	1.5	1.5

A semelhança das percepções dos indivíduos fictícios A, B e C se deve ao fato de que o intervalo de amostragem (variação entre as temperaturas) é o mesmo, o que mostra que este procedimento padroniza as escalas. A Tabela 3 apresenta o resumo da análise de variância para os dados da Tabela 2, conforme descrito em [12].

Tabela 3- ANOVA para a matriz experimental da Tabela 2.

Source of variation	Sum of	Degrees of	Mean	$F_o$	$F_{critical}$	P-value
	Squares	Freedom	Square			
Between-Treatments	27	9	3	$\rightarrow \infty$	2.392814	$\rightarrow 0$
Error (within-treatments)	0	20	0			
<b>Total</b>	27	29				

O objetivo da ANOVA é identificar se a variabilidade da variável resposta é devida à variável experimental (Temperatura) ou aos erros estatísticos. A coluna Sum of Squares representa a variabilidade na resposta devido à variação da temperatura, ou na nomenclatura da área, entre tratamentos (Between-Treatments) e a variabilidade introduzida na resposta pelos erros amostrais (Error within-treatments). No caso do exemplo acima, como os dados da Tabela 2 são fictícios, após sua padronização resultou-se em um caso particular onde não há erro experimental (Error within treatment = 0) e toda variabilidade da resposta é devida ao tratamento, isto é, à variação da temperatura (Between Treatments = 27). A coluna Degrees of Freedom define da forma usual os graus de liberdade do experimento, ou seja, há 10 níveis para a temperatura, portanto o número de graus de liberdade entre tratamentos deve ser  $10 - 1 = 9$ . De forma análoga, há 30 pontos experimentais, portanto, o número de graus de liberdade total deve ser  $30 - 1 = 29$ . Dentro de cada tratamento há 3 réplicas, que são representadas pelos três indivíduos, então o grau de liberdade dentro de cada tratamento deve ser  $3 - 1 = 2$ , como houve 10 níveis de temperatura, ou seja, 10 tratamentos diferentes, o número de graus de liberdade envolvendo os tratamentos deve ser igual a  $2 \times 10 = 20$ . A coluna Mean Square significa a parcela da variância devida aos tratamentos e ao erro experimental, é o quociente da variabilidade pelo grau de liberdade, isto é, a variância associada aos tratamentos é  $27/9 = 3$  e a variância associada ao erro é  $0/20 = 0$ . Portanto, de forma análoga à análise considerando a variabilidade a variância devida ao erro não contribui para a variância da variável resposta, de modo que se pode concluir que a resposta é fortemente afetada pela variável temperatura.

Segundo [12] pode-se provar que os quocientes SUM of SQUARES (Between Treatments)/ MEAN SQUARE (Between Treatments) e SUM of SQUARES (within treatments)/ MEAN SQUARE (within treatments) são variáveis aleatórias independentes.

temente distribuídas de acordo com a distribuição chi-quadrado. Portanto, a fim de se estabelecer um parâmetro numérico, ou seja, uma estatística para o teste de hipóteses estabelecido em (1), pode-se demonstrar [12], que não há evidências estatísticas para se rejeitar a hipótese nula se a relação  $F_o = \text{MEAN SQUARE (Between Treatments)} / \text{MEAN SQUARE (within treatments)}$  for menor do que um valor denominado crítico  $F_{CRITICAL}$ , o qual é tabelado em função dos graus de liberdade apresentados na Tabela 3 e do nível de significância estatística que se queira atribuir ao teste, que neste caso foi de 5%. Nota-se que neste caso, como MEAN SQUARE (within treatments) é nulo, o valor de  $F_o$  tende ao infinito, o que sugere que a hipótese nula,  $H_o$ , (igualdade das médias) deve ser refutada, portanto aceitando-se que a média das sensações térmicas são diferentes para cada temperatura.

O *P-Value* é uma outra forma de se analisar a significância estatística do teste, com base em  $F_o$  calcula-se o seu valor, de modo que quanto menor, maiores os indícios estatísticos de que a hipótese nula deve ser rejeitada. Quanto maior o valor de  $F_o$  menor será o *P-value* associado. Assim, como  $F_o$  tende ao infinito o *P-value* associado tende a zero.

Portanto, a ANOVA provou que há diferenças entre as percepções médias, mas não especifica quais médias diferem entre si. Os métodos usados para detectar essas diferenças são conhecidos como métodos de comparações múltiplas. O mais popular entre eles, e que, portanto, será usado nas análises seguintes, é o teste de Tukey [12].

### 3. TESTE DE TUKEY

Todos os métodos de comparações múltiplas comparam todas as médias entre si par a par, conforme o teste de hipóteses (2)

$$\begin{cases} H_0: \mu_i = \mu_j \\ H_1: \mu_i \neq \mu_j \end{cases} \text{ for all } i \neq j \quad (2)$$

O teste de Tukey é o método mais utilizado por ser simultaneamente rigoroso e de fácil aplicação. Ele faz uso da amplitude estudentizada [12]. O teste de Tukey declara que duas médias são estatisticamente diferentes se o valor absoluto da diferença entre elas exceder uma diferença mínima significativa calculada conforme (3).

$$T_{\alpha} = q_{\alpha} \sqrt{\frac{MSe}{n}} \tag{3}$$

Onde,

$T_{\alpha}$  = diferença mínima de Tukey para que duas médias sejam diferentes

$q_{\alpha}$  = é o valor tabelado da amplitude estudentizada

$MSe$  = variância estimada do erro, proveniente dos resultados da ANOVA

$n$  = tamanho da amostra ou número de réplicas

No caso deste experimento hipotético, após a padronização das leituras da escala, o erro experimental é zero, portanto todas as médias são estatisticamente diferentes entre si.

#### 4. FLUXO PROCEDIMENTAL DAS ANÁLISES

A Fig. 4 resume todo o procedimento experimental da coleta à análise dos dados.

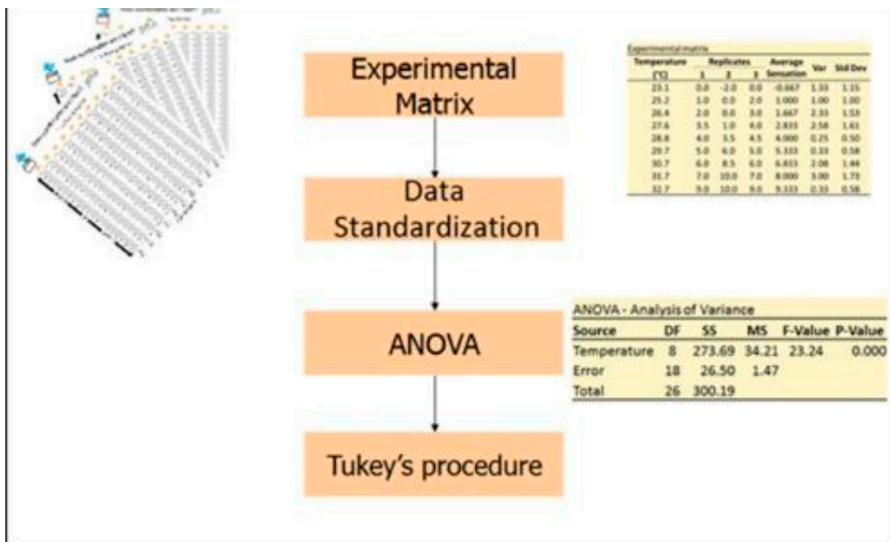


Fig. 4 Fluxograma da coleta à análise de dados.

## UM ESTUDO DE CASO: O EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE VENTILADORES NO CONFORTO TÉRMICO

Trata-se de um experimento projetado para estudar o potencial de economia de energia elétrica trazido pelo uso combinado de ventiladores com condicionadores de ar. Este experimento foi realizado em um pequeno escritório com três ocupantes (uma mulher e dois homens) durante dois dias normais de trabalho. Durante o experimento, a temperatura do escritório foi aumentada lentamente em 10 °C e, a cada grau Celsius, os ocupantes eram convidados a avaliar sua sensação térmica utilizando a carta ilustrada na Fig. 5.

No primeiro dia do experimento não se fez uso de ventiladores. No segundo dia o ventilador operou durante todo o período em que se realizou o experimento. O objetivo era verificar se a sensação térmica mudou de uma situação para a outra. A Fig. 6 ilustra como o experimento foi desenvolvido.

Obviamente a brisa produzida pelo ventilador não alcançou todos os participantes da mesma maneira, mas as diferenças foram compensadas pelo tratamento estatístico da sensação térmica capturada dos participantes.

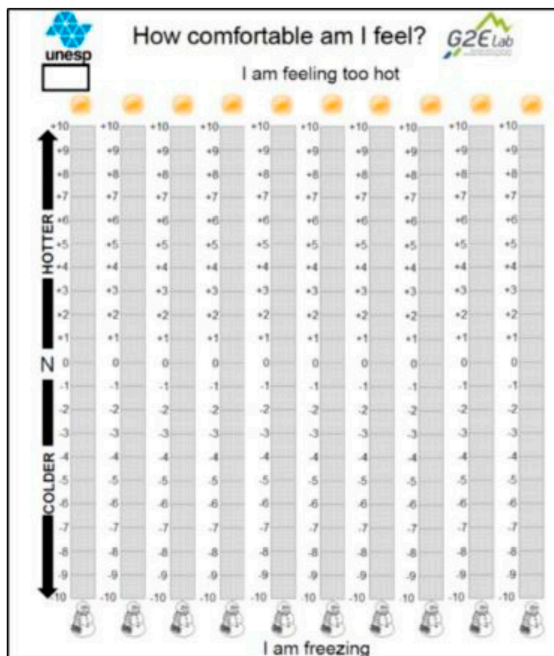


Fig. 5 Instrumento de medida utilizado para capturar a sensação térmica.

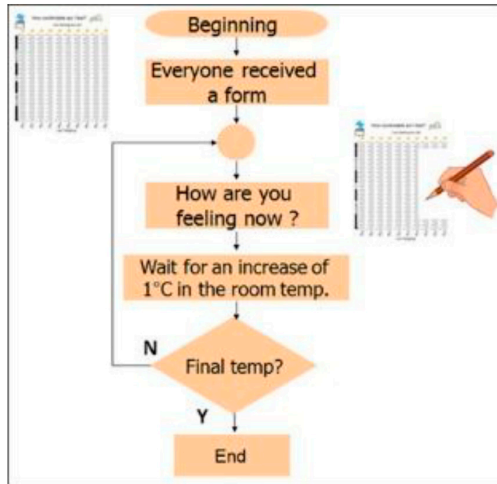


Fig. 6 Fluxograma da realização do experimento.

## 1. RESULTADOS

A Tabela 4 apresenta a matriz experimental do primeiro dia (ventilador desligado). Pode-se observar que a sensação térmica dos participantes diferiu bastante entre si. A sensação térmica média dos participantes aumenta com a temperatura, mas é importante verificar se as diferenças entre as médias são estatisticamente significativas. Para tanto, faz-se necessário o emprego da ANOVA, cujos resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 4 - Matriz experimental do primeiro dia do experimento

First-day (fan-off) - Raw Data					Standardized Data				
Temperature	Replicates			Averages	Replicates			Averages	
	A	B	C		A	B	C		
23.1	0.0	-2.0	0.0	-0.7	-1.4	-1.3	-1.7	-1.47	
25.2	1.0	0.0	2.0	1.0	-1.1	-0.9	-0.9	-0.97	
26.4	2.0	0.0	3.0	1.7	-0.7	-0.9	-0.6	-0.73	
27.6	3.5	1.0	4.0	2.8	-0.2	-0.7	-0.2	-0.36	
28.8	4.0	3.5	4.5	4.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.06	
29.7	5.0	6.0	5.0	5.3	0.3	0.4	0.2	0.29	
30.7	6.0	8.5	6.0	6.8	0.6	0.9	0.6	0.71	
31.7	7.0	10.0	7.0	8.0	1.0	1.3	0.9	1.06	
32.7	9.0	10.0	9.0	9.3	1.7	1.3	1.7	1.53	

Tabela 5 – ANOVA para a matriz experimental do primeiro dia do experimento

Source of variation	Sum of	Degrees of	Mean	$F_0$	$F_{critical}$	P-value
	Squares	Freedom	Square			
Between-Treatments	23.424	8	2.928	91.433	2.510	0.0000
Error (within-treatments)	0.576	18	0.032			
<b>Total</b>	24.000	26				

Note que a variância entre tratamentos (2.93) é maior do que a variância estimada do erro (0.03), indicando que há evidências estatísticas para rejeitar  $H_0$  do teste de hipóteses (1). Em outras palavras, há, no mínimo, duas médias diferentes, embora não se saiba quais. Para que se possa saber quais diferem entre si é necessário efetuar a comparação pareada das médias segundo o teste de Tukey. A Fig. 7 ilustra o resultado do teste de Tukey para a matriz experimental da Tabela 4.

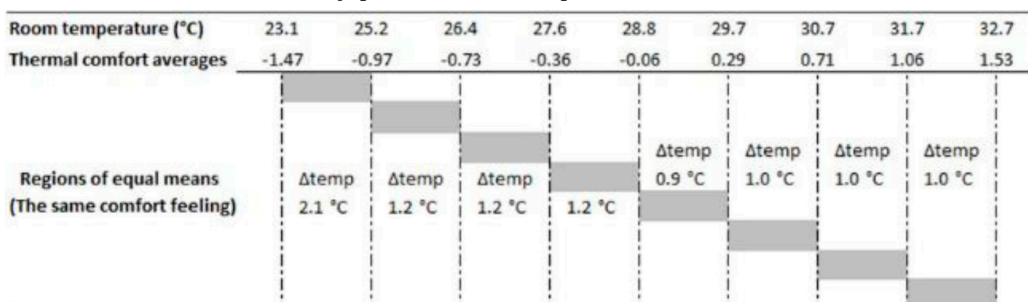


Fig. 7 Comparação pareada realizada pelo teste de Tukey para a matriz experimental da Tabela 4

Dentro das regiões acinzentadas as médias das sensações térmicas podem ser consideradas iguais do ponto de vista estatístico. Por exemplo, não há diferença estatisticamente significativa entre -1.47 e -0.97; entre -0.97 e -0.73 e assim por diante, o que equivale a dizer que a elevação de 1 °C não é suficiente para se alterar a percepção de calor. Observando-se todo o experimento pode-se concluir que, na média, a sensação térmica dos ocupantes daquele escritório aumenta a cada 1.2 °C se o ventilador estiver inoperante.

A Tabela 6 apresenta a matriz experimental para o segundo dia de experimento, ou seja, com o ventilador em operação. Observa-se que o participante C atingiu o máximo da escala (ou o máximo da sensação de calor) 3 °C antes dos demais. A sensação máxima de calor experimentada pelo participante A é aproximadamente a metade dos demais participantes.

Tabela 6 - Matriz experimental do segundo dia do experimento

Second-day (fan-on) - Raw Data					Standardized Data				
Temperature	Replicates			Averages	Replicates			Averages	
	A	B	C		A	B	C		
23.4	0.0	2.0	-4.0	-0.7	-1.9	-2.0	-1.6	-1.85	
25.4	1.5	4.5	0.0	2.0	-0.8	-0.8	-0.8	-0.80	
26.5	1.5	5.9	2.0	3.1	-0.8	-0.1	-0.5	-0.45	
27.6	2.5	6.0	1.0	3.2	0.0	-0.1	-0.7	-0.24	
28.6	2.5	6.4	3.0	4.0	0.0	0.1	-0.3	-0.05	
29.8	3.0	6.5	7.0	5.5	0.4	0.2	0.5	0.35	
30.9	3.5	7.0	10.0	6.8	0.8	0.4	1.1	0.76	
31.8	4.0	8.0	10.0	7.3	1.1	0.9	1.1	1.04	
32.6	4.0	9.2	10.0	7.7	1.1	1.5	1.1	1.24	

O exemplo do que foi feito para a Tabela 4, será necessário proceder a ANOVA dos resultados da Tabela 6. Os resultados da ANOVA mostram que há diferenças estatisticamente significativas entre as médias.

Tabela 7 - ANOVA para a matriz experimental do segundo dia do experimento

Source of variation	Sum of	Degrees of	Mean	$F_0$	$F_{critical}$	P-value
	Squares	Freedom	Square			
Between-Treatments	22.960	8	2.870	49.678	2.510	0.0000
Error (within-treatments)	1.040	18	0.058			
<b>Total</b>	24.000	26				

Os resultados do teste de Tukey para a matriz experimental da Tabela 6 são apresentados na Fig. 8.

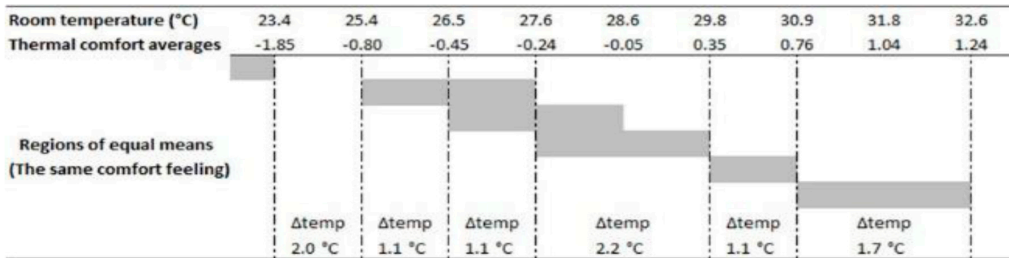


Fig. 8 Comparação pareada realizada pelo teste de Tukey para a matriz experimental da Tabela 6

Pode-se observar que entre 25.4 e 27.6 °C ( $\Delta = 2.2$  °C) a sensação térmica média, estatisticamente, não varia. O mesmo ocorre para os intervalos entre 26.5 e 28.6 °C ( $\Delta = 2.1$  °C); para 27.6 -- 29.8 °C ( $\Delta = 2.2$  °C) e para 30.9 -- 32.6 °C ( $\Delta = 1.7$  °C). Portanto, pode-se dizer que a sensação térmica aumenta, em média, a cada 2.1 °C quando o ventilador está operando no recinto. Portanto, como o ventilador diminui a sensação de calor dos ocupantes do recinto, pode-se inferir que o seu uso combinado com um condicionador de ar permitiria que o termostato deste último fosse ajustado em um valor mais elevado (cerca de 2 °C), diminuindo o consumo de energia, sem prejuízo para o conforto térmico dos ocupantes do escritório.

Considerando-se uma hora de trabalho de um condicionador de ar de 9000 BTU/h, modelo split com inversor, eficiência energética de 3,54, vazão de 540 m<sup>3</sup>/h e potência de ventilação de 30 W [13], estima-se que a elevação de 2 °C em seu termostato resulte na redução de 130 Wh em seu consumo de energia [14]. A potência nominal do ventilador usado neste experimento é de 60 W, levando, portanto, a uma economia de energia de 70 Wh.

É preciso ressaltar que esses resultados são apenas indicativos do potencial de redução do consumo de energia que se pode alcançar com o uso combinado de ventilador/condicionador de ar. Este experimento traz apenas resultados preliminares que sugerem investigações mais detalhadas, uma vez que foi executado em apenas dois dias e com apenas três pessoas. Para resultados mais completos seria necessário um período maior de experimentação com números diferentes de participantes dos dois gêneros.

## CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou um procedimento para avaliar a sensação térmica do ser humano baseado apenas em entrevistas, sem a necessidade de medições das grandezas preconizadas por outros métodos e tampouco do conhecimento das características das vestimentas do grupo de indivíduos sob análise. Este procedimento utiliza uma escala de 21 pontos, baseada na escala ASHRAE de 7 pontos. Os dados coletados por intermédio desta escala devem ser analisados por meio da ANOVA a fim de se detectar variações estatisticamente significativas na percepção térmica média do grupo. Em se constatando a diferença entre as percepções este procedimento sugere a aplicação do teste de Tukey para que se possam identificar entre quais temperaturas as sensações térmicas são diferentes.

A fim de ilustrar a aplicação do método ele foi aplicado a um experimento onde se procurava determinar se o uso combinado de ventilador com condicionador de ar poderia levar a um consumo menor de energia. Mostrou-se que, de fato, o uso de ventiladores diminui a sensação térmica de calor. Portanto, em que pese as deficiências do experimento, concluiu-se que quando se faz o uso combinado dos dois dispositivos pode-se ajustar o termostato do condicionador de ar cerca de 2 °C acima da temperatura desejada, sem prejuízo do conforto térmico dos ocupantes do recinto, diminuindo o consumo de energia. Mesmo considerando o consumo do ventilador, a economia líquida de energia pode ser bem significativa, a depender do número de horas de utilização e do número de instalações.

## REFERÊNCIAS

- [1] Health and Safety Executive. The Six Basic Factors. Disponível em: <<http://www.hse.gov.uk/temperature/thermal/factors.htm>> Acesso em: agosto de 2016.
- [2] DANCA, P.; VARTIRES, A.; DOGEANU, A. (2016) An overview of current methods for thermal comfort assessment in vehicle cabin, *Energy Procedia*, 85 162-169.
- [3] KUMAR, A.; SINGH, I. P.; SUD, S. K. (2010) An approach towards development of PMV based thermal comfort smart sensor, *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, Vol. 3, no. 4, pp. 621-641, December.
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 55-2013, *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, Atlanta, USA, 2013.
- [5] FANGER, P.O. (1980) Proposed Nordic standard for ventilation and thermal comfort, in: *Proc. Int. Conf. On Building Energy Management*.
- [6] SCHIMIDT, D. (2009) Low Exergy Systems for High-Performance Buildings and Communities, *Energy and Buildings*, V.41 (3), pp 331-336, March.
- [7] GRAHAM, C. I. (2014) High-Performance HVAC, *National Institute of Build Sciences*. <https://www.wbdg.org/resources/hvac.php>
- [8] HOYT, T.; ARENS, E.; ZHANG, H. (2014) Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings, *Building and Environment*, September.
- [9] LEE, H. J.; RUPPERT, K.C.; PORTER, W.A. (2012) Energy Efficient Homes: Ceiling Fans Department of Family, Youth and Community Sciences, *Florida Cooperative Extension Service*, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, Florida Energy Systems Consortium (<http://floridaconserves.org>).
- [10] MIIMU, A. (2013) Comparison of human thermal models, measured results and questionnaires, *Proceedings of BS2013: 13th Conference of International Building Performance Simulation Association*, Chambéry, France, august 26-28.

- [11] BIANCHI, I.; FARIA NETO, A.; DELINCHANT, B.; WURTZ, F.; ALABRACH, S. (2015) Energy saving using ceiling fans in environmental comfort systems, in: *Third ELECON Workshop*.
- [12] MONTGOMERY D. C. (2013) *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed., John Wiley & Sons.
- [13] HITACHI, (2013) *Condicionador de Ar Split Hi-Wall com inversor*, Manual de Instalação e Operação, Hitachi Ar Condicionado do Brasil, 44p.
- [14] BORGNAKKE, K.; SONNTAG, R. E. (2009) *Fundamentos de Termodinâmica*, 7a. Ed. 426p. Edgard Blucher, São Paulo.

# **ANÁLISE DE MEDIÇÕES DE POTÊNCIA EM MEDIDORES BIDIRECIONAIS SUBMETIDOS A CARGAS NÃO LINEARES**

Daniel J. B. S. Sampaio<sup>1</sup>, Jader V. Nascimento P.<sup>1</sup>, N. Athula Kulatunga<sup>2</sup>

## **RESUMO**

O incremento constante do interesse do consumidor por preservação ambiental e energia limpa, o avanço tecnológico e redução do custo da tecnologia para uso em geração distribuída e o crescente custo da energia elétrica gerada pelas chamadas fontes convencionais, potencializa em todo mundo uma demanda cada vez maior de sistemas de micro e mini geração por parte dos consumidores, fazendo com que este tipo de cliente passe a ser cada vez mais representativo para as concessionárias de energia elétrica. Neste contexto, a micro e mini geração de energia baseada em energia solar torna-se cada vez mais popular no mundo e com enorme potencial para o Brasil, já que o país conta com níveis de irradiação solar superiores aos de países europeus como Alemanha e Itália, nos quais a geração baseada em energia solar já é amplamente disseminada, e também devido a participação da energia solar na matriz energética brasileira ser de apenas 0,25%, segundo a ANEEL. Diversos casos de reclamações por parte de consumidores têm sido relatados em todo mundo devido a discrepâncias entre as medições realizadas pelos medidores presentes nos sistemas de geração fotovoltaicos instalados e as realizadas pelos medidores instalados pelas concessionárias ou ainda entre a potência estimada de geração e a real medida pela concessionária. Este trabalho pretende mostrar que o sistema atual de aferição utilizado nos medidores, apesar de atenderem aos requisitos dos órgãos reguladores, não resistem a uma análise detalhada quando se trata, como na quase maioria das

---

1 Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus Guaratinguetá - Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, 12516-410, Guaratinguetá-SP, Brasil.

2 Purdue University Northwest – Engineering Technology Department - 2200 169th Street, Hammond, IN 46323, USA.

instalações atuais, de cargas não lineares e de dispositivos inversores, cuja resposta a este tipo de carga não é conhecida, podendo levar a erros que podem lesar tanto o consumidor como a concessionária, trazendo insegurança técnica, de confiança, e jurídica na relação.

## INTRODUÇÃO

Presenciamos nos últimos anos um contínuo avanço tecnológico acompanhado de uma redução significativa do custo da tecnologia para o consumidor final. O incremento constante do interesse do consumidor por preservação ambiental e energia limpa, esse avanço tecnológico e uma redução do custo da tecnologia para uso em geração distribuída acompanhado de um crescente custo da energia elétrica gerada pelas chamadas fontes convencionais, potencializa em todo mundo uma demanda cada vez maior de sistemas de micro e mini geração por parte dos consumidores, fazendo com que este tipo de cliente passe a ser cada vez mais representativo para as concessionárias de energia elétrica. Neste contexto, a micro e mini geração de energia baseada em energia solar torna-se cada vez mais popular no mundo e com enorme potencial para o Brasil, já que o país conta com níveis de irradiação solar superiores aos de países europeus como Alemanha e Itália, nos quais a geração baseada em energia solar já é amplamente disseminada, e também devido a participação da energia solar na matriz energética brasileira ser de apenas 0,25%, segundo a ANEEL [1].

Garantir o fornecimento adequado, com transparência na qualidade de energia fornecida e nas tarifas de energia contratadas é uma das exigências deste novo panorama energético com geração distribuída. Dessa forma os medidores de energia utilizados pelas concessionárias para tarifação dos usuários passaram a ter um papel cada vez mais importante nessa relação concessionária - usuário e tiveram que evoluir e incorporar novas funções. Devido ao avanço da eletrônica de potência, aumentou-se o uso de equipamentos eletrônicos e não lineares, que geram distorções harmônicas na forma de onda da corrente elétrica que afetam a forma de onda da tensão elétrica. Atualmente, diversos casos de reclamações por parte de consumidores têm sido relatados em todo mundo devido a discrepâncias entre as medições realizadas pelos medidores presentes nos sistemas de geração fotovoltaicos instalados e as realizadas pelos medidores instalados pelas concessionárias ou ainda entre a potência estimada de geração e a real medida pela concessionária [2][3][4][5].

Pretende-se mostrar que o sistema atual de aferição utilizado nos medidores, apesar de atenderem aos requisitos dos órgãos reguladores, não resistem a uma análise

detalhada quando se trata, como na quase maioria das instalações atuais, de cargas não lineares e de dispositivos inversores cuja resposta a este tipo de carga não é conhecida, podendo levar a erros que podem lesar tanto o consumidor como a concessionária, trazendo insegurança técnica, de confiança, e jurídica na relação.

## DISTORÇÕES HARMÔNICAS E MEDIDORES ELETRÔNICOS

Alguns conceitos iniciais como distorção harmônica, potência de distorção que altera o cálculo convencional do fator de potência e o medidor eletrônico em si, com suas partes e classe de exatidão, são importantes para avaliação da potência medida pelos medidores eletrônicos em instalações com cargas não lineares.

Distorções harmônicas são distorções nas tensões ou correntes senoidais, com uma frequência múltipla da frequência da rede elétrica, também chamada de frequência fundamental, no Brasil, 60 Hz. Estas distorções harmônicas podem ser geradas, por exemplo, por cargas não lineares, apresentando este comportamento na corrente elétrica exigida para seu funcionamento. Esta corrente distorcida, ao passar pela resistência dos condutores, transmite estas distorções harmônicas para a tensão, podendo impactar outros equipamentos.

O nível de distorção harmônica na tensão e corrente pode ser quantificado com base no emprego da Série de Fourier. De acordo com a série de Fourier, qualquer função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões, composta por um valor médio, de um valor senoidal (ou cossenoidal) na frequência fundamental e valores senoidais (ou cossenoidais) com frequência múltipla da frequência fundamental (harmônicas)[6]. Um sinal de tensão periódico pode então ser expresso pela Equação 1.

$$V(\omega t) = V_0 + V_{1m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2m\acute{a}x} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{nm\acute{a}x} \text{sen}(n\omega t + \varphi_n) \quad (1)$$

Sendo:

$V(\omega t)$  – Sinal de tensão periódico [V]

$V_0$  – Nível médio de tensão [V]

$V_{nm\acute{a}x}$  – Tensão de pico do componente harmônico de ordem n [V]

$\omega$  – Velocidade angular [rad/s]

t – tempo [s]

$\varphi_n$  – Deslocamento angular da tensão de ordem n [rad]

O nível da distorção harmônica é geralmente quantificado pela taxa de Distorção Harmônica (total ou individual, de tensão ou corrente). A Equação 2 apresenta o cálculo da Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) e a Equação 3 mostra o cálculo da Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI).

$$DHTV = \sqrt[2]{\frac{\sum_{h>1}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad (2)$$

$$DHTI = \sqrt[2]{\frac{\sum_{h>1}^{h_{m\acute{a}x}} I_h^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \cdot \sqrt{2} \quad (3)$$

Sendo:

$V_h$  – Valor eficaz da tensão na ordem  $h$

$V_1$  – Valor eficaz da tensão na frequência fundamental

$I_h$  – Valor eficaz da corrente na ordem  $h$

$I_1$  – Valor eficaz da corrente na frequência fundamental

$h$  – Ordem da componente harmônica

As equações 4 e 5 apresentam os cálculos para a Distorção Harmônica Individual de Tensão (DIHV) e Corrente (DIHI), respectivamente. No sistema elétrico de potência, geralmente consideram-se as distorções harmônicas de até 50ª ordem, desprezando as demais.

$$DIHV = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

$$DIHI = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (5)$$

A Tabela 1 mostra os valores máximos permitidos de Distorção Harmônica de Tensão Total para sistemas de distribuição primária e transmissão, conforme as normas IEEE 519 e os Procedimentos de Distribuição ANEEL, módulo 8 [7]. Observa-se que são toleradas distorções totais de até 10% nas redes de distribuição secundária.

Tabela 1. Níveis máximos permitidos de distorção harmônicas e componentes para tensões em sistemas de distribuição e transmissão de energia elétrica – ANEEL 2010

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
>25	1,5	1	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

O fator de potência é o parâmetro que indica o quanto da potência total é utilizado para realizar trabalho, portanto, quanto mais próximo do valor unitário, melhor. Com a resolução 414 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) passou-se a exigir que as instalações consumidoras devam apresentar fator de potência mínimo de 0,92. A Equação 6 apresenta a equação geral para o cálculo do fator de potência.

$$FP = \frac{P}{S} \tag{6}$$

Sendo:

FP - Fator de potência

P – Potência elétrica ativa (W)

S – Potência elétrica aparente (VA)

Em um sistema isento de harmônicos, tem-se:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{7}$$

Sendo:

S – Potência elétrica aparente (VA)

P – Potência elétrica ativa (W)

Q - potência reativa (VAr)

Em instalações com a presença de distorções harmônicas, surge uma nova componente na potência aparente, a chamada potência de distorção, o cálculo do fator de potência passa a ser então representado pela Equação 8.

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \cdot \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{50} I_n^2}} = FP_D \cdot FP_H \quad (8)$$

Sendo:

$I_1$  - corrente fundamental

$I_n$  - componentes harmônica de corrente de n-ésima ordem

$FP_D$  - Fator de potência de deslocamento ( $FP_D = \cos \varphi$ )

$FP_H$  - Fator de potência da distorção harmônica

Com esta componente adicional, o triângulo de potências deixa de existir, dando lugar à uma forma tridimensional, denominada “tetraedro de potências”, como ilustrado na Figura 1 [8].

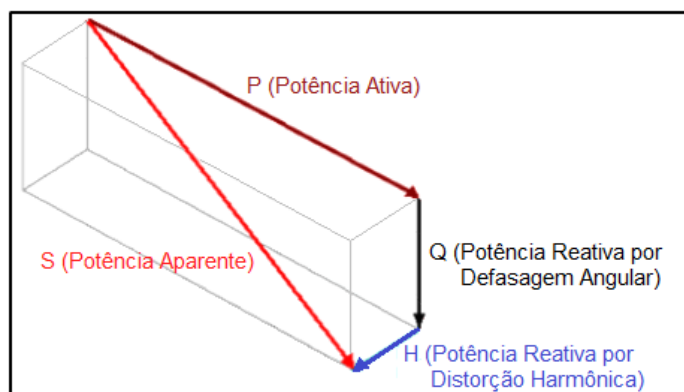


Figura 1. Tetraedro de Potências.

O medidor eletrônico é um dispositivo formado basicamente por circuitos integrados dedicados à medição da energia elétrica consumida. São regulamentados pela

NBR 14519 [9], pela portaria INMETRO nº 431/2007 [10] e pelo módulo 5 do PRO-DIST-ANEEL [11]. A Figura 2, mostrada na forma de diagrama de blocos, apresenta os sistemas básicos de um medidor do tipo eletrônico.

Os transdutores de tensão e corrente são sensores capazes de converter as grandezas elétricas medidas de forma instantânea em um sinal que será posteriormente processado. A potência instantânea  $p(t)$  (Equação 9) será a tensão instantânea  $v(t)$  multiplicada pela corrente instantânea  $i(t)$ .

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \tag{9}$$

Expandindo a Equação 9, temos que a tensão e corrente instantâneas são dadas pelas Equações 10 e 11, respectivamente:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \alpha) \tag{10}$$

$$i(t) = I_m \text{sen}(\omega t + \beta) \tag{11}$$

Sendo:

$V_m$  – Valor de pico da tensão [V]

$I_m$  – Valor de pico da corrente [A]

$\omega$  – Velocidade angular [rad/s]

$\alpha$  – Ângulo de deslocamento da tensão [rad]

$\beta$  – Ângulo de deslocamento da corrente [rad]

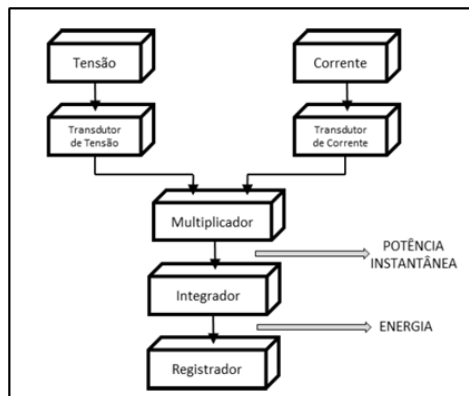


Figura 2. Diagrama de blocos de um medidor eletrônico de energia elétrica.

Fonte: O SETOR ELÉTRICO (2011).

A potência instantânea  $p(t)$  [W] é representada pela Equação 12:

$$p(t) = V_m I_m \text{sen}(\omega t + \alpha) \cdot \text{sen}(\omega t + \beta) \quad (12)$$

A energia consumida é calculada através da integração da potência no tempo, conforme a Equação 13:

$$e(t) = \int_0^t p(t) dt = \int_0^t v(t) \cdot i(t) dt \quad (13)$$

Os medidores eletrônicos de energia elétrica em uso possuem as classes de exatidão mostradas na Tabela 2, regulamentados através do Regulamento Técnico Metrológico (RTM) de acordo com a Portaria INMETRO nº 431/2007. Os medidores mais utilizados no Brasil, no âmbito residencial, são das classes A e B, apresentando exatidão de 1% a 2%. Ainda de acordo com a Portaria INMETRO nº 431/2007, os únicos ensaios previstos nos medidores eletrônicos com presença de distorções harmônicas são denominados “ensaios adicionais”, que envolvem 10% de distorção harmônica individual de tensão e 40% de distorção harmônica individual de corrente, somente para o 5º harmônico. Os principais ensaios dos medidores se resumem ao ensaio com fator de potência unitário (resistivo), fator de potência 0,8 (capacitivo) e fator de potência 0,5 (indutivo). Não estão contemplados nesta norma ensaios com cargas eletrônicas e não-lineares que geram distorções diferentes do 5º harmônico.

Tabela 2. Classe de exatidão dos medidores de energia de acordo com INMETRO.

Classe de exatidão dos medidores de energia	
A	2,00%
B	1,00%
C	0,50%
D	0,20%

## MATERIAIS E MÉTODO UTILIZADO

Foram utilizados nos experimentos dois medidores eletrônicos, sendo um trifásico bidirecional e um bifásico unidirecional, aferidos e cedidos gentilmente pela concessionária de energia local, ambos classe B, com nível de exatidão de 1%. A fonte de alimentação de tensão utilizada nos experimentos foi uma fonte de tensão programável da empresa Pacific Power Source Inc., modelo AMX-345 [12], mostrada na Figura 3(a), na qual é possível progra-

mar o perfil de tensão com harmônicos de até 50ª ordem, permitindo que uma variedade de condições de energia e transientes sejam aplicados aos dispositivos em teste enquanto se mede e analisa os parâmetros desejados do sistema. Para se ter cargas lineares e não lineares, foi utilizado um banco de cargas de iluminação com lâmpadas vapor de mercúrio, fluorescentes tubulares, LED e incandescentes, mostrado na Figura 3(b). Este banco de cargas está ligado a um painel elétrico capaz de realizar a comutação entre bancos de cargas diferentes sendo este painel alimentado pela saída da fonte programável. Como referência para as medições foi utilizado um analisador de potência e qualidade de energia elétrica da marca Fluke, modelo 435, que foi instalado juntamente aos medidores eletrônicos de energia elétrica.



(a)



(b)

Figura 3. (a) Fonte de tensão programável AMX-345. (b) Banco de cargas de iluminação

Os testes foram realizados utilizando sinais com três composições diferentes: onda senoidal (sem distorção), onda IEC 77A classe 2 (DHTV 14,4%) e onda quadrada (DHTV 38,6%). A onda IEC 77A classe 2 foi escolhida por ser uma onda padronizada para testes envolvendo distorções harmônicas de tensão e sua característica é apresentada na Tabela 3. A onda quadrada foi escolhida para avaliar o comportamento dos medidores de energia elétrica operando em condições extremas de distorção harmônica.

Como foram analisados dois medidores de energia elétrica, sendo um medidor bifásico e outro medidor trifásico, as cargas utilizadas nos experimentos foram sempre equilibradas, a fim de se estabelecer uma relação de comparação entre as medições

dos medidores eletrônicos e do analisador Fluke 435, que tem a capacidade de armazenar os dados totais de energia do sistema trifásico.

Tabela 3. Caracterização da onda IEC 77A classe 2

Ordem harmônica	Nível do harmônico (%)	Deslocamento angular (°)
1	100	0
3	6	0
5	8	0
7	7	0
11	7	0
13	6	0
DHTV = 14,4%		

As medições foram realizadas da mesma forma que as concessionárias de energia elétrica realizam, ou seja, foram anotados os valores iniciais registrados pelos medidores, e após um período de 7 dias, foram coletados os valores finais registrados. Com isso, bastou-se subtrair o valor final do valor inicial de cada medidor para se obter a energia registrada naquela medição. O analisador usado como referência registra a totalização para o período, sem necessidade de cálculo. Foi utilizado em cada experimento somente um mesmo tipo de lâmpada como carga, colocadas de forma equilibrada nas fases e com potência entre 250W e 300W por fase, variando conforme o tipo de lâmpada utilizada.

O erro percentual de medição foi calculado utilizando-se a equação 14.

$$\varepsilon(\%) = \frac{E_1 - E_{REF}}{E_{REF}} \cdot 100 \quad (14)$$

Sendo:

$E_1$  – Energia elétrica medida pelo medidor eletrônico analisado.

$E_{REF}$  – Energia elétrica medida pelo analisador usado como referência.

## RESULTADOS

Foram realizados os experimentos para cada um dos quatro tipos diferentes de carga: lâmpadas vapor de mercúrio, fluorescentes tubulares, LED e incandescentes. Após a realização dos experimentos, os resultados foram analisados para determinar o

erro percentual dos medidores, tomando como referência os dados apresentados pelo analisador de rede Fluke 435, como mostrado anteriormente.

Os valores percentuais dos erros obtidos com as cargas lâmpadas incandescentes (carga resistiva), fluorescentes, vapor de mercúrio e LED, são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 4, 5, 6 e 7.

Tabela 4. Resultados obtidos com lâmpadas incandescentes como carga

Forma de onda da tensão da fonte	Erro para carga: Lâmpadas Incandescentes		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	0,98%	0,79%	0,05%	0,51%	-0,9844
IEC 77A CLASSE 2	3,46%	-2,02%	14,06%	14,22%	-0,9839
QUADRADA	7,50%	-1,88%	29,59%	30,18%	-0,9841

Tabela 5. Resultados obtidos com lâmpadas fluorescentes como carga.

Forma de onda da tensão da fonte	Erro para carga: Lâmpadas Fluorescentes		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	7,28%	-1,28%	0,08%	12,73%	-0,9554
IEC 77A CLASSE 2	-0,54%	-4,31%	13,88%	35,26%	0,9400
QUADRADA	-23,40%	-8,81%	29,56%	55,68%	0,8921

Tabela 6. Resultados obtidos com lâmpadas Vapor de Mercúrio como carga.

Forma de onda da tensão da fonte	Erro para carga: Lâmpadas Vapor de Mercúrio		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	-8,61%	-11,56%	0,08%	2,93%	0,7832
IEC 77A CLASSE 2	-11,28%	-12,45%	14,45%	60,38%	0,6921
QUADRADA	-22,64%	-27,43%	33,54%	289,81%	0,2245

Tabela 7. Resultados obtidos com lâmpadas LED como carga.

Forma de onda da tensão da fonte	Erro para carga: Lâmpadas LED		Distorção Harmônica		FP
	Medidor trifásico	Medidor bifásico	DHTV	DHTI	
Senoidal	14,78%	-5,79%	0,09%	9,78%	-0,8638
IEC 77A CLASSE 2	14,33%	-7,27%	14,49%	35,70%	-0,8402
QUADRADA	236,32%	-42,48%	29,76%	89,60%	-0,6004

Analisando-se os resultados do uso de lâmpadas incandescentes como cargas alimentadas por uma onda senoidal, ambos os medidores apresentaram erros dentro de sua classe de exatidão, ou seja, dentro do esperado para medidores homologados

e aferidos. Com o aumento do DHTV e DHTI, o medidor trifásico tem um aumento no erro positivo, significando que o medidor eletrônico apresentou um valor de medição maior que o apresentado pelo analisador usado como referência. Já o medidor bifásico teve um erro negativo na faixa de 2%, significando que o medidor eletrônico apresentou um valor de medição menor que o apresentado pelo analisador usado como referência. Vale observar que o valor do fator de potência ficou estável em -0,98 nos três casos.

Com o uso de lâmpadas fluorescentes como carga, o aumento da DHTV e DHTI causou uma pequena diminuição no fator de potência. O medidor trifásico obteve erro maior que o esperado para onda senoidal mas aceitável para forma de onda IEC Class 2. Já para forma de onda quadrada o medidor apresentou um valor de medição 23,4% menor que o apresentado pelo analisador usado como referência. Já o medidor bifásico apresentou um erro negativo crescente com o aumento da DHTV e DHTI.

Já com o uso de lâmpadas vapor de mercúrio como carga, o aumento da DHTV e DHTI causou uma grande diminuição no fator de potência para forma de onda quadrada. Tanto o medidor trifásico quanto o medidor bifásico apresentaram erros negativos crescentes com o aumento da DHTV e DHTI.

Finalmente com o uso de lâmpadas LED como carga, sendo esta não linear e uma tendência de uso nos dias atuais, o medidor trifásico apresentou um valor de medição maior que o apresentado pelo analisador usado como referência, chegando a um valor de 236,32% de erro para a condição considerada extrema que é o caso da onda quadrada. Por sua vez, o medidor bifásico apresentou valores de medição menores que os apresentados pelo analisador usado como referência, chegando a -42,48% no caso da onda quadrada. Vale destacar que o fator de potência no experimento com onda quadrada ficou em -0,6.

## CONCLUSÕES

Este capítulo apresentou uma avaliação de possíveis erros de medição em um medidor eletrônico bidirecional trifásico e um medidor unidirecional bifásico em configurações com diferentes tipos de carga, englobando cargas lineares e não lineares, e diferentes níveis de distorção harmônica na tensão de alimentação, controlada por uma fonte de tensão programável. Estes medidores são regulamentados e homologados no Brasil pelo INMETRO, onde são submetidos a ensaios sob condições quase ideais, ou seja, formas de onda de tensão e corrente senoidais e sem abranger cargas

não lineares, não refletindo assim a atual realidade do sistema de distribuição de energia elétrica do país. Essa modificação nas características das cargas utilizadas nos diversos setores da sociedade, citando como exemplo a iluminação à LED, acarretam no aumento significativo do nível de distorção harmônica de correntes e tensões nas redes de distribuição de energia elétrica, fazendo com que o desempenho dos dispositivos presentes no sistema, incluindo-se os medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, sejam afetados, resultando, como mostrado neste capítulo, em possíveis erros no registro do consumo de energia, podendo levar a erros que podem lesar tanto o consumidor como a concessionária, trazendo insegurança técnica, de confiança, e jurídica na relação. Sendo assim, é necessário que as discussões correntes se transformem rapidamente em uma atualização da portaria INMETRO com relação a homologação de medidores eletrônicos de energia elétrica ativa, incluindo ensaios obrigatórios com distorções harmônicas e cargas não lineares.

## REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Banco de Informações de Geração – Matriz de Energia Elétrica*. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>>. Acesso em 27 Jul. 2019.
- [2] KEYER, C.; LEFERINK, F. (2017) Conducted interference on smart meters. In: *Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI)*, 2017 IEEE International Symposium on. IEEE, p. 608-611.
- [3] KIRCHHOF, J., KLEIN, G., (2009) EMV - Grenzwertlücke – Wechselrichter stört Zähler, 24. *Symposium Photovoltaische Solarenergie*, Bad Staffelstein.
- [4] LEFERINK, F.; KEYER, C.; MELENTJEV, A. (2016) Static energy meter errors caused by conducted electromagnetic interference, *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, v. 5, n. 4, p. 49-55.
- [5] ——— (2016) Runaway energy meters due to conducted electromagnetic interference. In: *Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*, 2016 International Symposium on. IEEE, p. 172-175.
- [6] FLANDOLI, F. *Harmônicas*. (2017) Disponível em: <<http://www.eletricistaconsistente.com.br/pontue/fasciculos/6-qualidade-da-energia-eletrica/harmoniccas/>>. Acesso em: 10 out. 2018.

- [7] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2010) Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – *PRODIST: módulo 8 – qualidade de energia elétrica*. Brasília, 2010. 62 p.
- [8] BERTULUCCI SILVEIRA, C. (2017) *Legislação na Distribuição e Correções*. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/fator-de-potencia-legislacao-distribuicao-correcoes/>> Acesso em: 11 nov. 2018.
- [9] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1997) *NBR 14.519: medidores eletrônicos de energia elétrica (estáticos)* – especificação. Rio de Janeiro, 23 p.
- [10] INMETRO. (2007) *Portaria nº 431: medidores eletrônicos de energia elétrica*. Duque de Caxias, 60 p.
- [11] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. (2017) Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – *PRODIST: módulo 5 – sistemas de medição*. Brasília, 31 p.
- [12] PACIFIC POWER. *Datasheet AMX-345*. Disponível em: <[https://pacificpower.com/Resources/Documents/345AMX\\_Datasheet.pdf](https://pacificpower.com/Resources/Documents/345AMX_Datasheet.pdf)> Acesso em: 02 set. 2018.

# MICRORREDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES CON HIBRIDACIÓN DE FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLES Y ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA. DISEÑO, GESTIÓN DE LA ENERGÍA Y CONTROL\*

Sergio Junco<sup>1</sup>, Javier M. Cabello<sup>1</sup>, Daniel Alba<sup>1</sup>, Joaquín Ezpeleta<sup>1</sup>, Juan Tomassini<sup>1</sup>

## RESUMEN

Este capítulo ofrece una presentación de las microrredes eléctricas inteligentes (MREI) que incluyen fuentes renovables y almacenadores, en ambos casos de distinta naturaleza energética – es decir MREI híbridas – y discute diversas problemáticas vinculadas con su diseño, la gestión de la energía y el control de los flujos de potencia en las mismas. Asimismo, presenta la línea de investigación y desarrollo que sobre este tema se despliega en el LAC-FCEIA-UNR. En particular se describe la MREI híbrida en desarrollo en el laboratorio, denominada REI-LAC, cuyo objetivo inicial consiste en estudiar experimentalmente y a escala una gran variedad de problemas que se suscitan en estas redes, en muchos casos nuevos en relación con los sistemas eléctricos tradicionales, entre los que se destacan el dimensionamiento global y relativo de sus componentes, la gestión energética, el control en tiempo real del flujo de potencia multidireccional, la regulación de tensión y/o frecuencia, la distribución de cargas, etc., así como soluciones a los mismos ya disponibles y nuevos métodos para su aplicación en redes reales.

---

\* Artículo presentado el 18/12/2018.

<sup>1</sup> LAC, Laboratorio de Automatización y Control; Escuela de Ingeniería Electrónica; Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura; Universidad Nacional de Rosario. Nuevo Edificio de Ingeniería, CUR, Centro Universitario Rosario. Riobamba 245 bis, S2000EKE, Rosario, Argentina.

{sjunco,jcabello,alba,ezpeleta,tomajuan}@fceia.unr.edu.ar

## INTRODUCCIÓN

En el concepto de MREI se articulan varios otros que surgen como respuesta a problemas intrínsecos a los sistemas convencionales de provisión de energía eléctrica, y a problemas externos a ellos relacionados con el agotamiento de los recursos energéticos fósiles y la conveniencia/necesidad de explotar recursos renovables y limpios en el marco de criterios y políticas de desarrollo sustentable [1].

Dejando atrás sus orígenes en el siglo XIX como usinas eléctricas localizadas en los centros de consumo, los sistemas eléctricos de potencia convencionales evolucionaron en el transcurso del siglo XX hacia sistemas donde prepondera la generación masiva centralizada en sitios donde abunda el recurso energético primario (en centrales hidroeléctricas, centrales térmicas (nucleares, a gas o a carbón), grandes granjas eólicas y solares fotovoltaicas, etc.), generalmente muy alejados de los grandes nodos de consumo, lo que requiere el transporte de la energía eléctrica vía largas líneas de transmisión en alta tensión (LT-AT) hasta los dichos nodos, donde luego se suministra a los usuarios –sean estos industriales, residenciales, de servicios, institucionales, comerciales, etc.– a través del sistema de distribución (SD) en baja tensión [2].

Estos sistemas de potencia constituyen las más grandes redes creadas por la ingeniería, sólo detrás de la red Internet en complejidad y extensión. La red de EEUU, por ejemplo, consta de aproximadamente 20.000 generadores, 600.000 km de LT-AT y una capacidad instalada de 1 Teravatio (TW) [3]. No obstante la operación segura y buena calidad de servicio que han alcanzado las redes más desarrolladas del mundo, con buena regulación de frecuencia y niveles de tensión en toda la red, gran confiabilidad (en Japón, p. ej., se registran niveles de indisponibilidad del servicio del orden de 4 minutos por año –excluyendo el accidente de Fukushima de la estadística–), su expansión, necesaria para satisfacer la siempre creciente demanda, está afectada por una serie de problemas intrínsecos si se la emprende con las características arriba descriptas. El más prohibitivo son los exorbitantes costos de construcción de las LT-AT, inversiones insoslayables en el marco convencional ya que en todo el mundo las LT existentes están al límite de su capacidad de transporte. Un problema muy importante en términos de costos de operación son las pérdidas (disipación) de energía en las LT y las estaciones transformadoras necesarias en ambos extremos de las mismas: para elevar tensión a la salida de los generadores y para bajarla en los centros de carga. Por otra parte, estas enormes inversiones están ociosas la mayor parte del tiempo, lo que demanda un costo del servicio más elevado para amortizarlas. Tomando el ejemplo de la red de EEUU ya mencionada, su producción anual

de energía eléctrica es del orden de los 4.250TWh, apenas el 50% de su capacidad energética instalada de 8.760TWh [3].

La generación distribuida (GD) constituye una alternativa a la solución convencional para ampliar la capacidad de suministro de energía eléctrica evitando los altos costos de instalación y pérdidas en LT mencionadas [4]. La GD refiere a conjuntos descentralizados y modulares de equipos de generación y almacenamiento en un rango de unos pocos kilovatios hasta una decena de megavatios– pequeño en relación con los niveles de potencia que maneja un macrosistema interconectado–, que conectados en red alimentan cargas (usuarios) en sus proximidades. Estos sistemas de GD pueden funcionar autónomamente (aislados) o conectados al SD (ya que manejan niveles bajos de tensión) a través de un punto de interconexión común a toda la red (PCC, por *Point of Common Coupling* en inglés), caso en el que son vistos por el SD como una entidad única. Si bien en muchos casos la generación en GD recurre a combustibles fósiles (turbinas de gas o, típicamente grupos motogeneradores Diesel), estos sistemas son una oportunidad inmejorable para la inclusión de fuentes de energía renovables (biomasa, biogás, solar fotovoltaica, eólica, geotermal, etc.), así como de equipos de almacenamiento de distintas tecnologías (baterías electroquímicas, baterías de H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> o H<sub>2</sub>/aire (pila de combustible de hidrógeno), ultracapacitores, volantes de inercia, tanques de agua elevados, etc.) [5], lo que está sucediendo a un ritmo cada vez mayor en todo el mundo, vertiginoso en algunas latitudes. Esto viene a solucionar uno de los mayores problemas externos que afectan a muchas centrales convencionales: su dependencia de combustibles fósiles, cuyas reservas en muchos casos están próximas a agotarse, y son indeseables vista la necesidad de reducir la contaminación ambiental, muy especialmente las emisiones de CO<sub>2</sub> y su impacto en el efecto invernadero [1-6].

El sistema de potencia convencional posee tres características distintivas que, imperativamente, deben ser reformuladas en presencia de una alta penetración de sistemas de GD en la matriz energética eléctrica: i) la unidireccionalidad del flujo de potencia desde los centros de generación hacia los de consumo; ii) la centralización de su gestión; y iii) el dictado de dicha gestión obedeciendo pura y exclusivamente a los requerimientos variables de una demanda no controlada [2].

En efecto, un grupo GD puede no sólo absorber energía del SD, ya que para no perder energía renovable (gratuitamente) disponible y aprovechar la capacidad instalada, conviene inyectar el exceso de generación en el SD y/o almacenarlo hasta que sea requerido, lo cual pide multidireccionalidad del flujo de potencia tanto al interior del GD como en su interconexión con el SD vía el PCC. También se requiere gestión des-

centralizada, localizada en cada red y planificada según predicciones de producción y consumo de energía, y coordinada con el administrador del SD. Finalmente, una de las formas en que el (administrador del) GD puede lograr el balance de potencia en su interior, y/o cumplir con sus compromisos con el SD, es controlando la demanda (disminuyéndola a través de cortes o distribución en diferentes bandas horarias, por ejemplo) [7]. Lograr todo esto requiere el despliegue de sistemas de medición y procesamiento de variables críticas en todo el sistema eléctrico a los fines de tomar acciones de supervisión y control en tiempo real sobre el mismo.

La solubilidad tecnológica de este problema la ofrece el concepto de smart grid o red eléctrica inteligente, una profundización de las acciones que vienen desarrollándose e implementándose desde hace ya varias décadas para mejorar la confiabilidad, seguridad y eficiencia de los sistemas de potencia vía la recolección de datos y su procesamiento digital en tiempo real como base para decidir acciones de supervisión y control sobre la red. Muy sumariamente una smart grid puede definirse como una red eléctrica equipada con una capa de procesamiento digital y comunicación que a través del procesamiento de la información obtenida con sensores instalados en la misma permita la gestión planificada y el control en tiempo real de la generación, el almacenamiento y el consumo de la energía y del flujo multidireccional de la potencia [8-9-10-11]. Este concepto aplica tanto a los macrosistemas de interconexión como a redes en niveles inferiores de potencia, particularmente en el nivel de los SD y en redes de GD.

Los grupos de GD equipados con una capa inteligente que las convierte en smart grids, con alta penetración de energías renovables de fuentes eólica y solar fotovoltaica y con inclusión de almacenadores de energía de distintas tecnologías, son las MREI híbridas consideradas en este capítulo, tanto en operación autónoma como en interconexión con los SD.

## **MICRORREDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES Y ALMACENADORES MULTITECNOLÓGICOS.**

El plan de I+D desarrollado en el LAC tiene por objetivo general la obtención de nuevos métodos de diseño sistémico (decisión de la arquitectura y dimensionamiento), de optimización de la gestión y de control en tiempo real de MREIs alimentadas por generación solar-fotovoltaica y eólica, provistas de almacenadores de energía (considerándose particularmente baterías electroquímicas y de  $H_2/O_2$ ,  $H_2$ /aire, supercapacitores y volantes de inercia), funcionando tanto aisladas como conectadas al SD.

Además del valor científico-técnico intrínseco de los resultados que pueda aportar este proyecto, con él se espera coadyuvar, en base al dominio científicamente fundado y experimentalmente consolidado de los conocimientos, métodos y tecnologías derivados del mismo, a las iniciativas públicas de promoción del aprovechamiento de las energías renovables en la provisión de energía eléctrica en los órdenes nacional (p. ej., programa RENOVAR en la Argentina), regional (p. ej., programa PROSUMIDORES en la provincia de Santa Fe) y local, mediante la transferencia y la vinculación tecnológica con el medio. A estos efectos, se desarrolla en el LAC la MREI experimental que se describe en la sección siguiente. Por otra parte, y con los mismos objetivos, el LAC participa como miembro de la red temática internacional de grupos de investigadores y empresas denominada MEIHAPER-CYTED (Microrredes Eléctricas Inteligentes Híbridas con Alta Penetración de Energías Renovables), un consorcio del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo ([https://www.cyteted.org/?q=es/detalle\\_proyecto&un=931](https://www.cyteted.org/?q=es/detalle_proyecto&un=931)).

La disponibilidad de la energía solar y eólica es intermitente y aleatoria, con las siguientes características y consecuencias sobre las MREIs:

- **Baja previsibilidad:** Si bien la previsión en el corto plazo (1 día / horas) es bastante precisa, las predicciones estacionales o incluso interanuales, necesarias para el diseño de las MREIs y sus expansiones y la programación de su operación, son poco precisas.
- **Fluctuantes:** La presencia de variaciones rápidas afectando a una gran cantidad de generadores trae aparejada grandes complicaciones para el operador de la red que debe ser capaz de compensar las correspondientes variaciones de generación.
- **No programables:** Debido a la disponibilidad instantánea no almacenable del recurso energético, esta generación no puede adaptarse al perfil de consumo como se hace con generadores convencionales, es decir, no es “despachable”.
- **No garantizadas:** Al no poder garantizarse la disponibilidad del recurso energético, no se puede definir con anticipación el perfil de generación.
- **Limitación de servicios auxiliares:** Si bien ambos tipos de generación permiten en cierta medida controlar la potencia reactiva inyectada, no pueden contribuir por sí solas a otros servicios de red como la regulación de frecuencia o el desplazamiento temporal de cargas.
- **Incapacidad de regulación intrínseca (sin acciones de control) de la frecuencia:** Los sistemas eólicos y fotovoltaicos están controlados por convertidores electrónicos de potencia (CEP) que tienen una respuesta muy rápida en comparación con la asociada a la inercia rotante de los generadores sincrónicos, característica que favorece de manera natural la estabilidad de la frecuencia en los sistemas eléctricos convencionales. A medida que aumenta la penetración de generación

eólica y solar y se sacan de servicio generadores rotantes, la inercia del sistema disminuye aumentando su sensibilidad ante perturbaciones y desequilibrios entre generación/consumo.

En este sentido la inclusión de sistemas de almacenamiento de energía en las MREIs con generación solar fotovoltaica y/o eólica es un recurso esencial para lograr el necesario balance de potencia en las redes y simultáneamente asegurar el máximo aprovechamiento del recurso energético [12]. En redes con altos niveles de prestaciones se debe recurrir a un mix de distintas tecnologías de almacenadores, dado que estos están sujetos a solicitaciones de muy variada intensidad (potencia, corriente) y con grandes diferencias de tiempos de respuesta [13].

Los problemas de dimensionamiento, gestión y control a resolver se abordan con uso intensivo de modelos matemáticos, de manera integrada o simultánea (en oposición al diseño secuencial tradicional) a fin de satisfacer especificaciones referidas a (i) los perfiles de consumo a los cuales debe responder la red; (ii) los criterios a optimizar en términos de servicios de la red al SD (compensación de reactivo, alisamiento, recorte de picos de potencia, quita total o parcial de carga (load shedding), seguimiento de trayectorias de referencia); (iii) las restricciones a satisfacer (p. ej., aseguramiento de valores mínimos/máximos de potencia intercambiada con la red).

Las distintas características de las fuentes renovables y de los sistemas de almacenamiento de las MREIs, conjuntamente con la pluralidad de objetivos que éstas deben satisfacer (las especificaciones de desempeño mencionadas) conducen a problemas difíciles en términos de procesamiento de la información, ligados a las siguientes tres dimensiones de complejidad:

- a) complejidad estática, debida a la cantidad de elementos a tratar (modelar, dimensionar, gestionar), debido a la multiplicidad de fuentes, cargas y almacenadores presentes.
- b) complejidad dinámica, ligada a la dispersión de modos, ya que en estas redes coexisten desde los modos ultrarrápidos ligados a las dinámicas eléctrico-electrónicas (milisegundos) hasta los lentos asociados a los ciclos de cargas/descarga de baterías, por ejemplo, y extremadamente lentos ligados a los ciclos ambientales (ciclo solar diurno y ciclos estacionales).
- c) complejidad computacional, determinante de la velocidad de convergencia de los algoritmos de optimización que suelen necesitar un gran número de evaluaciones de los modelos de dimensionamiento y de gestión, incrementados si se integran aspectos de robustez o incertidumbre de modelos.

Las investigaciones sobre nuevos métodos de diseño sistémico para decidir la arquitectura, composición y dimensionamiento de las MREIs articuladas con la optimización de la gestión energética produjeron los resultados resumidos a continuación.

## 1. DIMENSIONAMIENTO Y ESTRATEGIAS DE GESTIÓN

Se caracterizaron los Dispositivos Almacenadores de Energía (DAE) mediante la definición de su Área de Operación Segura (AOS) en el plano Energía-Potencia (EP), que sintetiza sus capacidades exhibiendo gráficamente las regiones donde la excursión de su Estado de Energía (EdE) interna vs. las potencias máximas (de carga y de descarga) admisibles (para cada EdE) garantizan su funcionamiento seguro [15]. Esta caracterización de dispositivos permite comparar tanto elementos de una misma familia, p.ej. en Figura 1, como de distintas familias tecnológicas. Se determinaron teóricamente sobre modelos matemáticos las AOS de dispositivos de distintas tecnologías comunes y relevantes para las MREIs: baterías de LiIon, ultra- o supercapacitores (SC) y baterías de  $H_2/O_2$ . Los resultados fueron validados experimentalmente sobre baterías LiIon -Mottcell- y SC-Maxwell 16V 58F. Estos estudios evidenciaron claramente la naturaleza energética de las baterías (de ambas tecnologías, pero más aún de la  $H_2/O_2$ ) y la naturaleza de potencia de los SC. Dado que ciertas características de los DAEs pueden ser muy disímiles, se introdujo el concepto de AOS-específica. De manera equivalente al diagrama de Ragone [14], donde las distintas soluciones son caracterizadas según la disponibilidad máxima de energía a una descarga de potencia activa constante expresadas en términos de potencia-específica (potencia por unidad de masa) y energía-específica (energía por unidad de masa), el AOS-específica se obtiene dividiendo el AOS original por un parámetro especificante. Si al igual que en el diagrama de Ragone se elige la masa como parámetro especificante, se obtienen AOS específicas por masa y se puede comparar las capacidades de EP que aporta cada tecnología por unidad de masa. La elección de este parámetro suele ser propicio para el diseño de sistemas eléctricos móviles (VEH, aviones o barcos). Sin embargo, otros parámetros pueden ser seleccionados tal como el costo de inversión, volumen, emisiones de  $CO_2$  durante su ciclo de vida, contenido energético, entre otros. La especificación del AOS vuelve más útil la comparación entre los distintos dispositivos.

Los DAE se integran en las MREIs bajo la forma de un arreglo o Sistema de Almacenamiento de Energía (SAE). Siguiendo en el plano EP, se desarrolló un método de dimensionamiento de SAEs que consiste en equiparar las capacidades de EP del SAE (AOS) y la demandada por el sistema. La primera etapa consiste en caracterizar los

DAE según su AOS con los beneficios que se acaban de describir. Posteriormente, el perfil de potencia demandado al almacenador es relacionado con el área que ocupa en el plano EP obteniendo una trayectoria y un polígono envolvente asociado (síntesis del perfil demandado). Se demostró que AOS de un SAE compuesto por  $n_{DAE}$  DAEs es igual al AOS del DAE escalado  $n_{DAE}$  veces. Es por ello que el dimensionamiento se reduce a encontrar el número  $n_{DAE}$  de tal manera que su AOS contenga el polígono en el plano EP generado por el perfil de potencia de demanda elegido, Figura 1b. El algoritmo de búsqueda implementado es extremadamente simple, rápido y puede integrarse fácilmente en un bucle de optimización de gestión/dimensionamiento [15].

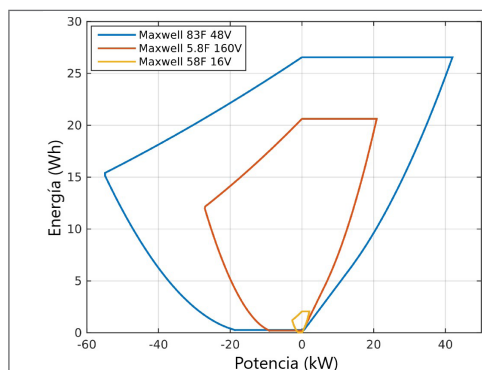


Figura 1a. AOS en el plano energía-potencia para 3 SC Maxwell.

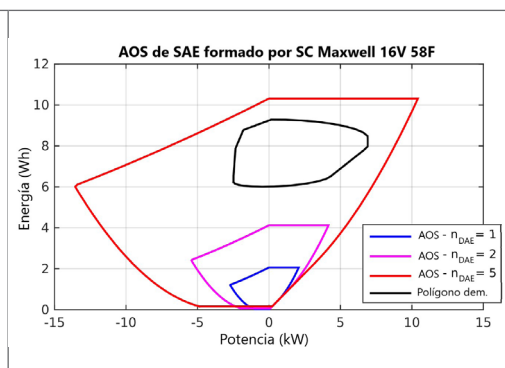


Figura 1b. AOS de 3 SAE compuestos por SC y síntesis del perfil demandado + en el plano Energía-Potencia.

La separación de las etapas de caracterización, de síntesis del perfil demandado y de dimensionamiento *per se* permite agregar fácilmente una nueva tecnología de almacenador o cambiar la estrategia de gestión en estudio y reutilizar parte de los resultados ya obtenidos. La incorporación de un nuevo DAE sin cambiar la estrategia de gestión, p.ej., un dispositivo de un nuevo fabricante, requiere únicamente calcular el AOS del nuevo DAE y dimensionar el SAE (cálculo de  $n_{DAE}$ ) sin que la trayectoria y el polígono demandado se vean afectados. Adicionalmente, en la síntesis del perfil de demanda se pueden comparar y analizar distintas estrategias de gestión independientemente del DAE seleccionado. Tanto áreas críticas, patrones recurrentes y así también cercanía a los límites de funcionamiento son fáciles de visualizar en el plano EP, donde también se pueden evaluar estrategias de gestión en SAE Híbridos. Se observa que el dimensionamiento con este método está sujeto a verificación posterior ya que la estrategia de gestión energética utilizada para calcular la potencia demandada al SAE no puede depender de su tamaño ni de sus variables de estado ya que, en esta instancia, todavía no se encuentra dimensionado. Por esta razón las trayectorias del almacenador son aproximadas considerando un rendimiento cons-

tante de carga/descarga y, una vez el SAE dimensionado, se calculan las verdaderas trayectorias verificando la correcta operación [15].

Se desarrolló una metodología de emulación física a escala, o físico-simulada (parte del sistema se emula físicamente, mientras otra parte acoplada a la primera se simula en tiempo real usando técnicas HIL -Hardware-In-the-Loop-), basada en semejanza dimensional, que permite a los diseñadores de una MREI emular cualquier elemento de ella (generadores, almacenamiento, cargas, CEP, sistema de gestión de energía, etc.), o la red completa, realizando un escalado no sólo en potencia sino también temporal para así acortar los tiempos de ensayo [16-17]. Esta metodología requiere modelos matemáticos precisos, lo que indujo a rever el modelo de Baterías LiIon de Tremblay-Dessaint (ampliamente usado en la bibliografía) [18], con un resultado que permite mejorar su desempeño, en términos de la estimación de su tensión, y resolver un problema de inhomogeneidad dimensional del modelo original, resultado importante a la hora de escalar modelos sin aumentar la complejidad del mismo. Adicionalmente, se propusieron nuevos métodos de estimación paramétrica que pueden ser usados en ambos modelos (original o mejorado) para mejorar sus desempeños [19].

Este procedimiento de escalado se aplicó al estudio experimental de una MREI constituida por los emuladores de un generador eólico, un SAE con baterías de  $H_2/O_2$ , un SAE con de Baterías LiIon y los convertidores electrónicos de potencia asociados a los tres elementos anteriores, más un Sistema de Gestión de Energía. Entre las varias conclusiones obtenidas de estos estudios se destaca la imposibilidad de emular físicamente modelos de sistemas o componentes en los cuales intervienen parámetros intensivos, para lo cual su emulación físico-simulada (vía HIL empleando fuentes y cargas electrónicas controladas y programables) ofrece una solución. Es el caso de las Baterías LiIon, donde un término con dependencia temporal impide el escalado manteniendo la semejanza mediante arreglos de baterías, lo que impide comprimir el tiempo de ensayos. Con el escalado HIL de esta parte de la MREI se resolvió el problema, lográndose estudiar experimentalmente el comportamiento de 48 horas del sistema original en tan solo 48 minutos.

Con estos métodos se realizaron estudios teóricos y experimentales sobre hibridaciones de una MREI de fuente eólica con arreglos de SAEs mono- y multi-tecnológicos (baterías  $H_2/O_2$  ó LiIon en el primer caso, y ambas en el segundo), que -en base a la caracterización específica de los SAE en términos de costo de inversión- permitieron realizar un análisis económico de las distintas implementaciones asumiendo un período determinado de utilización (10 años en el caso estudiado).

## 2. CONTROL DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA

Los convertidores electrónicos de potencia (CEP) son los componentes clave en las MREI ya que permiten direccionar de manera controlada los flujos de potencia entre las fuentes, las cargas y los almacenadores, adaptando los parámetros eléctricos (tensión en el caso de corriente continua, tensión y frecuencia en el caso de alterna) entre los subsistemas que interconectan, y posibilitando la estabilización del comportamiento global del sistema y el logro del desempeño especificado al mismo. Son los encargados de lograr que en el nivel físico de la red se cumplan las consignas que instante a instante generan las estrategias de gestión energética en un nivel jerárquico superior de procesamiento de la información en la misma. Una parte importante de las actividades del LAC, dentro de este y otros proyectos, se dedica a las investigaciones de algoritmos de control de los CEPs. Clásicamente se recurre a estructuras de lazos en cascada (mayoritariamente sólo con justificaciones *heurísticas* basadas en argumentos de separación de horizontes temporales y sin pruebas de estabilidad) con algoritmos PI simples en cada lazo y ocasionalmente compensación *feedforward* de perturbaciones medibles [20]. Si bien suelen usarse modelos dinámicos no-lineales (con grados de agregación acorde a los horizontes de tiempo considerados), esto se hace normalmente a los efectos de verificar mediante simulación el comportamiento de las estrategias de gestión, y no para el propio diseño en sí mismo, el que recurre muy frecuentemente a modelos estáticos, estacionarios y, cuando dinámicos, muy simplificados y a menudo linealizados [20]. La conjunción del empleo de estos enfoques suele resultar insatisfactoria en relación con las especificaciones de transferencia de energía, especialmente en lo que hace a la discriminación entre sus modos rápidos y lentos, en particular durante fuertes transitorios de carga o cuando se comanda una respuesta dinámica rápida. Las causas de estas deficiencias: por un lado, en este tipo de transitorios las alinealidades se ponen fuertemente de manifiesto, por lo que el diseño en base a modelos linealizados es insuficiente. También lo son la regulación indirecta y descentralizada de la transferencia de potencia a través de controladores de tensión y/o corriente, y las limitaciones de la regulación PI, en ocasiones por problemas de implementación digital de los controladores, pero a menudo en un nivel conceptual (independiente de la implementación). Para superar estas deficiencias, en el plan desarrollado se formularon y resolvieron sobre modelos no-lineales promediados de convertidores conmutados descritos con los formalismos Bond Graph (BG) [21] y Port-Hamiltonian Systems (PHS) [22] de representación energética de los sistemas físicos.

Dado que la parte más desarrollada de la REI-LAC está interconectada sobre un bus o barra de continua, se abordaron problemas de control de las tres clases más comunes de CEPs DC-DC: los convertidores Buck (reductor), Boost (elevador) y Buck-Boost (reductor-elevador), asumiendo cargas lineales y no-lineales. Se resolvieron problemas de regulación y seguimiento de referencias con rechazo de perturbaciones, aspecto esencial ya que los CEPs en una MREI están sujetos a perturbaciones tanto del lado de la alimentación como de la carga (distinción irrelevante en el caso de los CEPs bidireccionales). Desde un punto de vista teórico se formularon problemas de estabilización, asintótica para el caso no perturbado y estabilidad ISS (Input-to-State Stability) o, al menos, estabilidad iISS (integral-Input-to-State Stability) [23], en relación con las entradas de perturbación, que representan el efecto de toda la red sobre cada uno de los CEPs. Los resultados obtenidos se comunicaron en la serie de trabajos: [24-25-26-27].

## **REI-LAC: LA MREI EXPERIMENTAL DEL LABORATORIO DE AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

En el Laboratorio de Automatización y Control (LAC) de la FCEIA-UNR, se diseñó una MREI híbrida, denominada REI-LAC, con el objetivo inicial de estudiar experimentalmente y a escala problemas de dimensionamiento global y relativo de componentes, gestión energética, control en tiempo real del flujo de potencia multidireccional, regulación de tensión y/o frecuencia, distribución de cargas, etc., así como soluciones ya disponibles y nuevos métodos para su aplicación en redes reales. Se trata de una red híbrida en varios sentidos, ya que tiene elementos de distinta naturaleza: paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas (físicamente emuladas) como fuentes de energía renovable; dos líneas eléctricas, una de continua (300 VCC) y una de alterna (3x380 VCA, 50 Hz); y baterías electroquímicas, un volante de inercia y un banco de supercapacitores como almacenadores de energía. Entre las principales cargas, también de distinta naturaleza, se cuenta un conjunto de cargas lineales RLC conmutables en pasos discretos de potencia, y cargas no lineales constituidas principalmente por variadores de velocidad y otros equipos alimentados con CEPs.

El diseño se hizo enteramente en el LAC, estando el desarrollo, la construcción y/o el montaje de la mayoría de los componentes de la red, principalmente los CEP controlados asociados a las fuentes y los almacenadores de energía, a cargo de alumnos del último año de la carrera de Ingeniería Electrónica en el marco de la actividad curricular Proyecto Final, bajo la dirección de miembros del Laboratorio.

En las subsecciones siguientes se presentan la estructura general de la red, tanto en su parte de potencia como de comunicación; una descripción de los subsistemas que la componen; un conjunto de resultados de ensayos ilustrativos del desempeño logrado en subsistemas ya implementados; una evaluación del estado actual y las perspectivas de su desarrollo y proyección futura.

## 1. ESTRUCTURA GENERAL DE LA RED REI-LAC

La Figura 2 presenta la disposición general proyectada de la REI-LAC, que incluye sistemas de comunicación entre los convertidores, y gestión y control en diferentes niveles. Se la muestra organizada en cuatro capas jerárquicas, desde la inferior (Nivel 0, Campo) con generadores, almacenadores, cargas y los CEP asociados que controlan los flujos de energía, hasta la de supervisión en el más alto nivel (Nivel 3), pasando por las intermedias de control (Nivel 1) y operación (Nivel 2).

Los equipos están en dos recintos, los de menor potencia en el LAC-7, compartido con gabinetes de I+D y espacios de docencia experimental, y los de mayor potencia en el LAC-8, restringido a equipamiento que puede conllevar riesgo eléctrico y/o mecánico. Se observa en el LAC-7 la barra de CC y en el LAC-8 la de CA. Abajo a la derecha se muestra la línea de CA del edificio, que alimenta algunas cargas (por fuera de la REI-LAC) y los dos emuladores de turbinas eólicas descritos en la sección siguiente. Los niveles de comunicación están en desarrollo, así como los componentes del Nivel 0 representados en líneas de trazos, parte de la expansión a la configuración final.

En el LAC-7 se observa la línea CC a la que aportan energía los paneles solares (a través de un convertidor *boost* con una potencia nominal de 1,5 kW) y un generador asincrónico (vía un rectificador PWM de 1,5 kW). El generador es impulsado por un emulador de turbina eólica, otra máquina asincrónica, en este caso controlada por un variador de velocidad comercial con un esquema de control vectorial que copia las características en el eje de una turbina eólica.

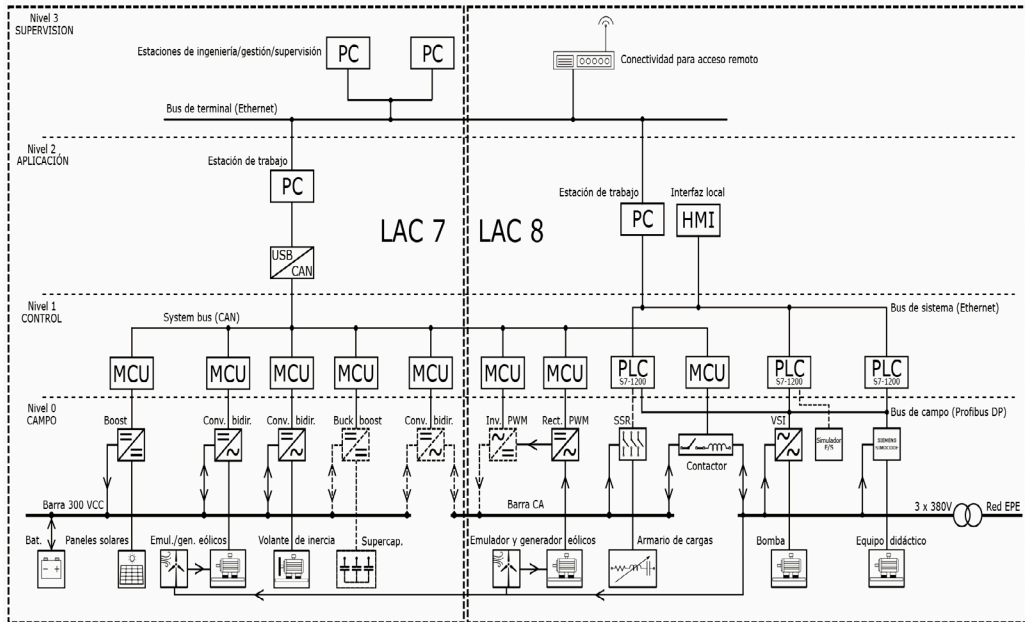


Figura 2. Diagrama esquemático de la REI-LAC (los elementos en líneas de trazos se encuentran en desarrollo).

Sobre la misma línea de CC se conecta de forma directa un banco de baterías, que funciona como almacenador de energía primaria de la red y fija su tensión de CC. Del mismo modo, se conecta, vía una máquina asincrónica y un CEP bidireccional, un volante de inercia que toma o aporta a la red en horizontes de tiempo cortos (del orden de los segundos) de acuerdo con un algoritmo de gestión energética. Por último, se prevé también la conexión (a través de un convertidor de tipo *buck-boost*) de un banco de supercapacitores que consuma o aporte a la red en horizontes de tiempo muy cortos (del orden de los milisegundos).

Un CEP de 3 kVA, en etapa final de desarrollo, conectará la línea de CC a la de CA trifásica (380 V+N) en el LAC-8, que alimenta un armario de cargas trifásicas RLC variables a pasos. Adicionalmente, se cuenta con un segundo emulador de turbina, de 22 kW, que mueve un generador sincrónico sin escobillas de 20 kVA dotado de un rectificador PWM a su salida. Un inversor de 20 kVA (en construcción) alimentado desde el rectificador anterior conectará su salida a línea interna de alterna trifásica (380 V+N) que, a su vez, podrá conectarse a la red comercial a través de un dispositivo microcontrolado de sincronización y conexión.

## 2. SUBSISTEMAS COMPONENTES

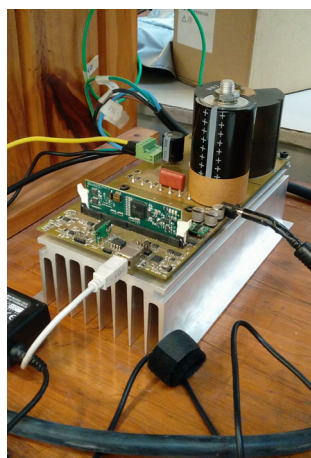
Se detallan aquí las características técnicas de cada uno de los subsistemas reseñados en la sección precedente.

### 2.1. Arreglo de paneles solares y convertidor boost

La Figura 3 muestra los dos conjuntos de 8 celdas en serie, que proveen una tensión máxima de vacío de aproximadamente 150 V y una corriente máxima de aproximadamente 4 A cada uno. Se observa también un convertidor con topología clásica de boost trifásico, pero con las inductancias bobinadas sobre un mismo núcleo, que conecta a las celdas con la línea de CC, adapta tensión y corriente, y controla la condición de carga de la batería.



a



b

Figura 3. Paneles solares y convertidor boost DC-DC.

La lógica de control, implementada en un microcontrolador TMS320F28335 (MCU-TI) de Texas Instruments [28], consiste básicamente en un regulador interno de corriente de entrada, cuya consigna se obtiene de uno de varios reguladores en paralelo que se relevan en función de las condiciones de servicio (reguladores de tensión de entrada, corriente por las baterías y tensión de salida). A su vez, el regulador de tensión de entrada obtiene su consigna de un bloque que realiza un seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) [29] del arreglo de paneles. Así, el convertidor procura extraer en todo momento la máxima potencia disponible en los paneles y, en una situación de servicio normal, es el regulador de tensión de entrada el que se encuentra activo. Sin embargo, si se supera alguna de las magnitudes limitadas (corriente por las baterías o tensión de salida), el regulador correspondiente releva al de tensión

de entrada. Por último, la consigna de corriente de entrada del regulador interno se limita para evitar que se supere la corriente nominal del convertidor.

## 2.2. Emulador de turbina de 2 HP y generador asincrónico

Una máquina asincrónica de 2 HP alimentada por un variador de velocidad comercial y un sistema de control convenientemente diseñado permiten el funcionamiento del conjunto como emulador de una turbina eólica (TE). El generador asincrónico es una máquina de 2 HP impulsada por el emulador (ver Figura 4) y conectada a la línea de CC a través de un rectificador PWM. Tanto este convertidor como los identificados más adelante como CEP-LAC, se basan en un diseño de convertidor multipropósito desarrollado en el LAC [30]. El control por campo orientado (FOC, [31]) del rectificador, implementado en un MCU-TI, permite diferentes modos de servicio, incluyendo el MPPT [32] de la TE emulada, con opción de degradación en caso de exceso de generación

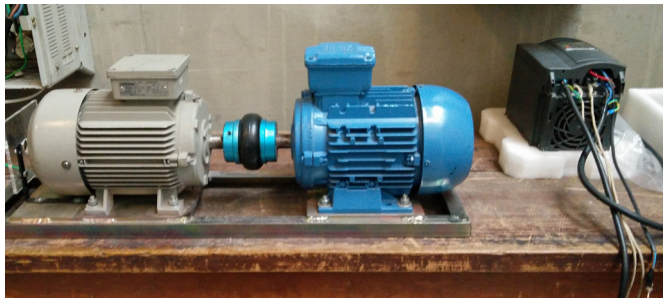


Figura 4. Tándem (2 HP) de Turbina Eólica emulada y Generador Asincrónico.

## 2.3. Almacenador de energía con volante de inercia

Este equipo, mostrado en la Figura 5, está compuesto por un motor de inducción de 1,5HP conectado a la barra de CC a través de un CEP-LAC controlado. El control FOC del sistema permite almacenar energía en el volante de inercia y devolver energía a la barra CC ante sobrecargas de potencia relativamente altas por períodos cortos, evitando que el banco de baterías se vea sometido a solicitudes de altas corrientes instantáneas.

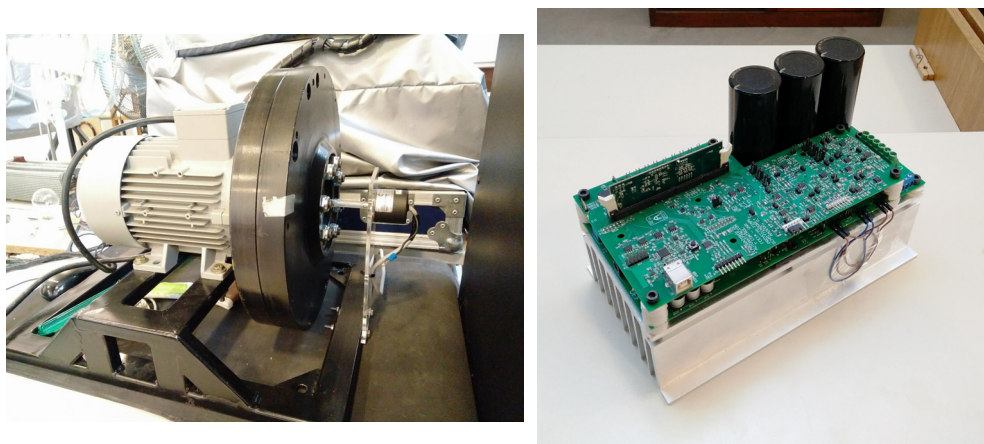


Figura 5. Volante de Inercia (izq.) y electrónica de alimentación y control (der.).

#### 2.4. Banco de baterías.

El banco de baterías (Figura 6, izquierda) fija la tensión de la barra de CC y está constituido por 22 baterías libres de mantenimiento conectadas en serie para obtener una tensión entre 300V a plena carga y 240V a fin de descarga.

#### 2.5. Emulador de turbina de 30 HP, generador sincrónico e inversor de 20 kVA

El emulador está compuesto por un motor asincrónico de 30HP, visible a la derecha en la Figura 7. El convertidor que lo alimenta (Figura 6, derecha) se construyó vía el *revamping* de un variador de velocidad comercial mediante el reemplazo de la placa de control original por una con control FOC (basada en la placa CEP-LAC) implementado sobre un MCU-TI. El control permite la emulación estática y dinámica de una turbina eólica. También se incluyen otros fenómenos propios de la turbina, como el efecto de la altura sobre la velocidad del viento (*wind shear*) y la interferencia de la torre sobre la que se instala la turbina (*tower shadow*). Acoplado al eje del emulador de turbina hay un generador sincrónico tipo *brushless* cuya excitación se controla de manera de emular un generador de imanes permanentes y cuya salida se controla con un rectificador PWM (aquí también basado en el diseño multifuncional ya mencionado) para alimentar una barra intermedia de continua de tensión nominal 600VCC [34]. A esta barra se conectará próximamente un inversor de 20kVA (actualmente en etapa de diseño) en una configuración *back-to-back* con el rectificador PWM. Luego de dicha conexión, será el inversor el que regule la tensión de continua de la barra intermedia, en tanto que el rectificador PWM implementará una estrategia de seguimiento del punto de máxima potencia (MPTT) de manera de extraer la máxima potencia disponible en la turbina emulada.



Figura 6. Banco de baterías (izq.) y CEP del emulador de TE de 30 HP (der.).

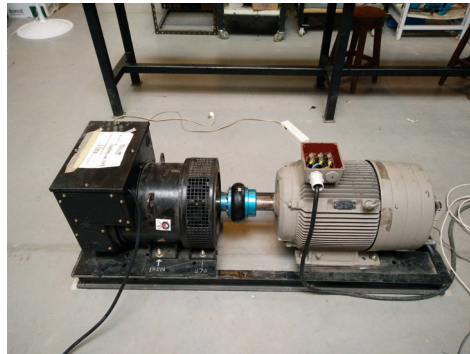


Figura 7. Tándem de emulador de TE de 30 HP y Generador Síncrono 20 kVA.



Figura 8. Armario de cargas: PLC y módulos de control (izq.); 2 fases (centro) con relés estado sólido y cargas capacitivas e inductivas; resistencias (arriba).

## 2.6. Armario de cargas RLC trifásicas programables

La red trifásica interna cuenta con un banco de cargas controlables que permite realizar ensayos de desempeño del sistema de control de la red bajo distintas configuraciones de carga. Este banco, que se muestra en la Figura 8, cuenta con 5 resistencias, 5 capacitores y 5 inductancias por fase. La carga resistiva máxima es de 3200 W por fase y se puede dividir con pasos de 1600 W, 800 W, 400 W, 200 W, 100 W y 50 W por fase. Análogamente, las cargas capacitivas e inductivas máximas son de 3200 VA en cada caso, con pasos de 1600 VA, 800 VA, 400 VA, 200 VA, 100 VA y 50 VA. La conmutación se hace con relés de estado sólido comandados a través de un PLC.

## 2.7. Inversor trifásico de interfaz de 3 kVA

Se trata de una implementación de 3 kVA del CEP trifásico ya mencionado desarrollado en el LAC, que cuenta con salida aislada, de acuerdo a lo requerido por normas de generación distribuida. Este convertidor, actualmente en período de montaje, permitirá el intercambio de potencia bidireccional entre la barra de CC y la línea interna de 3x380V+N.

## 2.8. Sistemas de Comunicación de la REI-LAC

La red de comunicaciones en desarrollo está basada en un protocolo *ad hoc* derivado del protocolo Controller Area Network (CAN) [33]. Esta red, bautizada LACAN, tiene como objetivo interconectar los dispositivos que conforman la REI-LAC para fines de control, supervisión y gestión. El proyecto es transversal e incluye el hardware de la red; el firmware de los microcontroladores involucrados en la red y el software para interactuar con la red y gestionarla.

A nivel de hardware, la red consiste en un bus lineal con una impedancia característica de 120  $\Omega$  (par trenzado) y resistencias de terminación del mismo valor. Asimismo, cada dispositivo de potencia de la red cuenta con transeptores CAN que actúan como interfaz entre las señales de la red y los MCU-TI que controlan a cada uno de los dispositivos.

A nivel de firmware, el MCU de cada dispositivo implementa el procesamiento de mensajes entrantes y salientes del protocolo, así como su dependencia del estado actual del dispositivo y su efecto sobre el mismo. En particular, el protocolo contempla actualmente mensajes de estado, de error, de mando, de consulta y de control de la comunicación, entre otros.

A nivel de software, se contempla el desarrollo, en una PC de escritorio, de la unidad central desde la cual se pueda gestionar la red en su conjunto de manera automática o semiautomática de acuerdo con programas o estrategias de gestión predefinidos. Esencialmente, la tarea del gestor sería determinar, de acuerdo con estrategias definidas, las consignas de generación, almacenamiento y (si corresponde) consumo de los distintos dispositivos de la red.

### 3. ENSAYOS

#### 3.1. Ensayos sobre los paneles solares y el CEP boost con baterías

En la Figura 9 se muestra un ensayo básico del convertidor boost. Este se encuentra conectado al bus de 300 V de continua junto con el banco de baterías y una carga resistiva como únicos componentes adicionales de la red. La carga es de magnitud reducida, de manera que hay exceso de potencia disponible en los paneles y esta se utiliza para cargar las baterías. En la figura se observa (aprox. a los 3500 s) el cambio entre la situación de carga a corriente constante (donde el mando del convertidor está en manos del regulador de corriente de las baterías) y la de carga a tensión constante (donde el mando está en manos del regulador de tensión de salida).

#### 3.2. Ensayos sobre el emulador de TE de 2 HP y generador asincrónico

En la Figura 10 se muestra un ensayo simple para validar el algoritmo MPPT del convertidor que controla el generador asincrónico. En este ensayo, se realizan cambios al parámetro de velocidad del viento del emulador de turbina eólica (que se manifiestan como un cambio en la curva par-velocidad que este emula en el eje). El controlador del generador responde cambiando la velocidad de giro hasta encontrar el nuevo punto de máxima potencia. Vale la pena destacar que, como se utiliza un algoritmo MPPT del tipo perturbación y observación (P&O) [32], el generador no necesita conocimiento previo sobre las características de la turbina ni información sobre la velocidad actual del viento.

#### 3.3. Ensayos sobre el generador eólico 20kVA

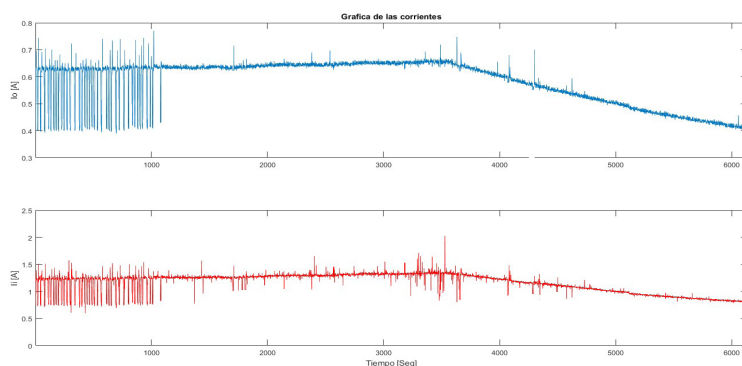
Dentro de los ensayos realizados sobre el generador eólico, se destaca el control de corriente de excitación del generador para emular el comportamiento de un generador de imanes permanentes, la distorsión de la forma de onda de la corriente antes

de aplicar modulación PWM vectorial y la respuesta del control de tensión del bus sometido a un escalón de carga de 4 kW.

### 3.4. Ensayos sobre el volante de inercia

Las gráficas de la Figura 11 muestran la respuesta de la red, reducida al volante de inercia, el banco de baterías y una carga resistiva, ante un escalón de carga de 4 A y ante un pulso de 4 A durante 300 ms. En el primer caso, se observa que el volante evita cambios abruptos y suaviza las evoluciones de la tensión del bus y la corriente de las baterías hacia el nuevo valor de régimen. En relación con el pulso, se observa una reducción de aproximadamente 75% en la variación de la corriente de las baterías y la tensión del bus. También se muestra cómo los volantes recuperan lentamente su velocidad de giro luego de entregar energía para compensar las perturbaciones introducidas. Más detalles en [35].

(a)



(b)

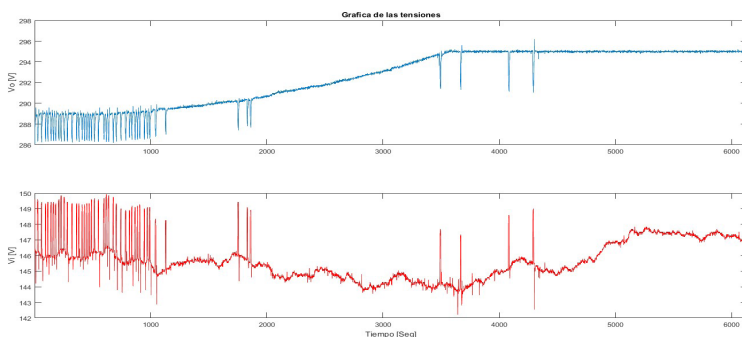


Figura 9. Ensayo de carga de las baterías a través del convertidor *boost*. Se muestran las corrientes de salida y de entrada (sup. e inf. (a), resp.) y las tensiones de salida y entrada (sup. e inf. (b), resp.)

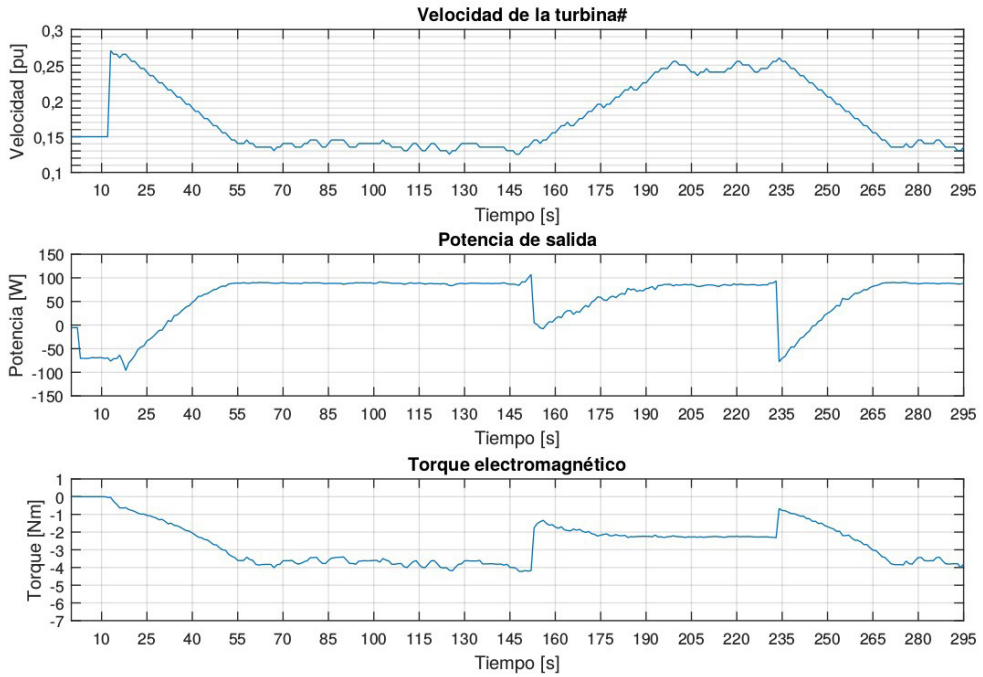
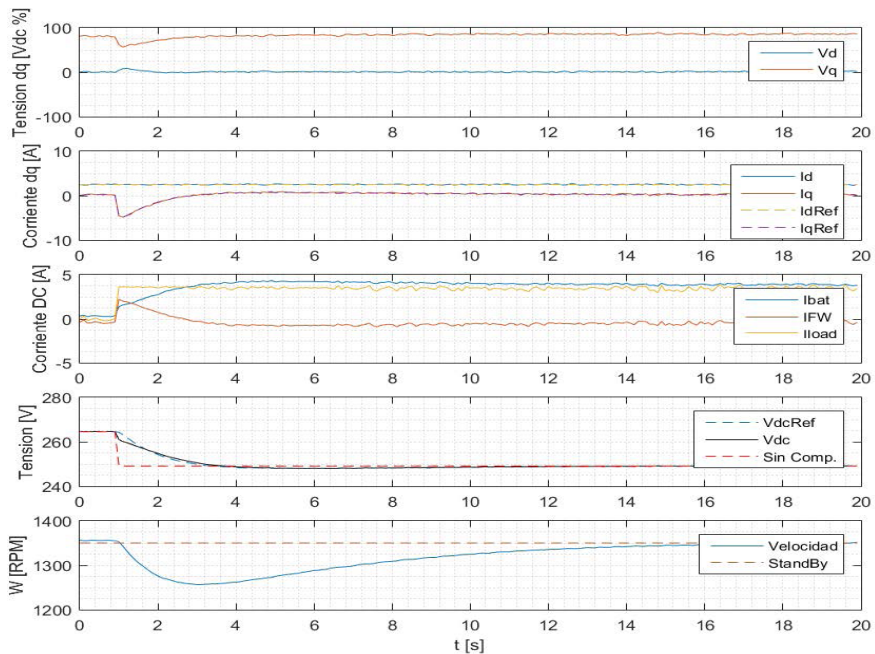


Figura 10. Ensayo del algoritmo de MPPT del generador asincrónico ante condiciones variables de viento.



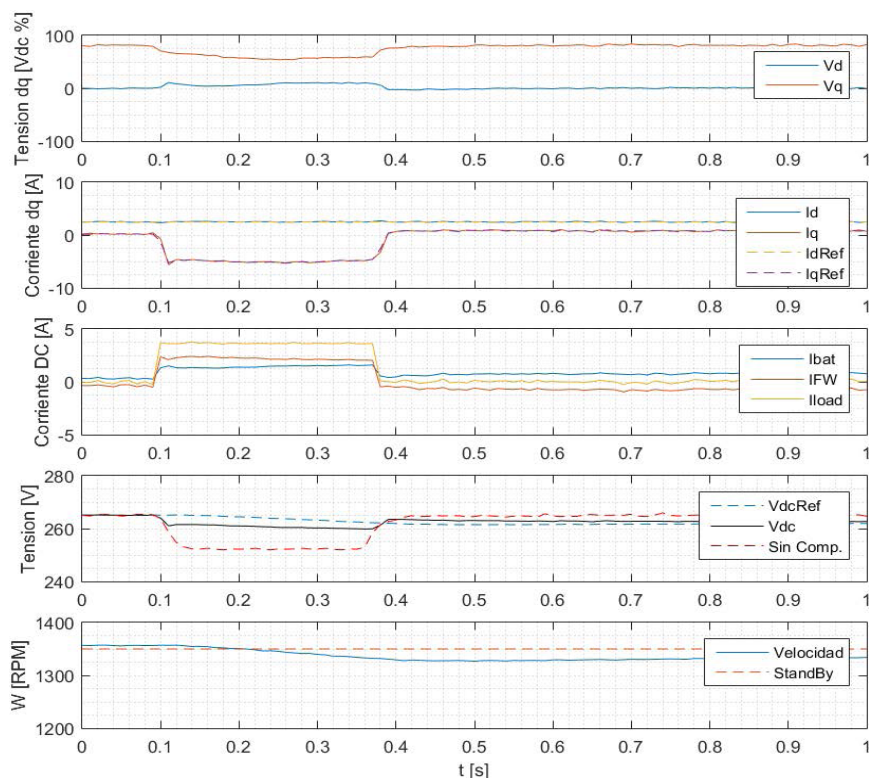


Figura 11. Reducción de picos de tensión en el DC-bus y corriente por las baterías por la presencia del volante de inercia. Carga: arriba, pulso de corriente; abajo, escalón.

$I_{d,q}$ : corrientes directa y en cuadratura en la máquina eléctrica del volante.  $I_{FW}$ ,  $I_{bat}$ ,  $I_{load}$ : corrientes del CEP del volante, de la batería y de la carga en el nodo de interconexión.  $V_{dc}$  y  $V_{Sin Comp.}$ : tensiones en el bus, con y sin la presencia del volante de inercia.

### 3.5. Evaluación del estado y perspectivas de la REI-LAC.

La MREI presentada cuenta con una variedad interesante de fuentes de energía, métodos de almacenamiento y topologías de convertidores. Combina además distintos niveles y tipos de tensión (300 y 600 VCC, y 3x380 VCA, aislada de la red comercial o conectada a ella). Todo lo anterior la hace ideal para estudiar experimentalmente y a escala métodos para resolver problemas de gestión energética y control en redes reales, así como analizar problemas de selección de arquitectura, topología y dimensionamiento de las redes.

Por otro lado, vale la pena destacar que todo el firmware y buena parte del hardware utilizado en la red se desarrolló internamente en el Laboratorio de Automatización

y Control (LAC), por lo que el código fuente, los diagramas de cableado y la mayoría de los diagramas de circuito están disponibles para consultar, reutilizar y mejorar. Esto constituye un recurso invaluable en el marco de las carreras de grado que se dictan en la Facultad y actividades de investigación, y ofrece una flexibilidad transversal en cada etapa de diseño y fabricación de los componentes y su integración en la red. La red se encuentra en evolución permanente y varios grupos desarrollan actualmente trabajos en el LAC, entre los que se cuentan los siguientes: Aplicación de métodos de control por pasividad al control del convertidor *boost* asociado a los paneles solares. Desarrollo del software de comunicación en la red LACAN que comunica los convertidores. Estudio de métodos de gestión energética de la red. Programación de una interfaz gráfica en un entorno de PC para la interacción con la REI-LAC a través de la red de comunicación LACAN. Trabajos de montaje y cableado para mejorar las condiciones de comodidad y seguridad en la operación de la red. Montaje y conexión del inversor de 3 kVA. Desarrollos de software aplicado al control del inversor y su conexión a la red de distribución.

Finalmente, se señala que, una vez consolidada como red experimental, se espera ampliarla y modificarla para utilizarla como suministro de energía eléctrica al edificio que alberga al LAC. Esto conllevará el agregado de más paneles fotovoltaicos, una turbina eólica como reemplazo de las emuladas, y un grupo motogenerador diesel como respaldo para el caso de déficit de generación renovable y almacenamiento.

## CONCLUSIONES

El proyecto de I+D aquí reportado es un ejemplo exitoso de integración en una institución universitaria pública de iniciativas de docentes-investigadores con contribuciones de alumnos de posgrado en el desarrollo de las investigaciones, y de alumnos avanzados de grado en la implementación de sistemas experimentales de laboratorio, en torno a un proyecto motivador para sus ejecutores y social y, económicamente relevante por sus posibles impactos en la sociedad, sostenido en un largo plazo y financiado con fondos del sistema público de ciencia y técnica, más algunos aportes privados.

La decisión de acompañar las investigaciones con la implementación de una red experimental es clave para que el laboratorio domine todas las tecnologías relevantes para el despliegue de las MREIs y pueda convertirse en un actor impulsor de su implementación práctica vista la importancia que se observa tendrán en el futuro

inmediato de los sistemas de provisión de energía eléctrica. En efecto, las microrredes eléctricas inteligentes híbridas aparecen como la opción más conveniente de generación distribuida para lograr los diversos objetivos de modernización y optimización de las operaciones de las redes, incluyendo la alta penetración de generación renovable y almacenamiento distribuidos, el fomento de la participación de la demanda (*demand response*) en pos de estos objetivos vía la reducción o el desplazamiento del consumo para aligerar la carga al sistema de distribución en las horas pico, la disponibilidad on-line de información exhaustiva de la red para su planificación y control, preservando al mismo tiempo la seguridad cibernética, entre otros aspectos.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a las siguientes instituciones por el financiamiento indicado en cada caso: al FonCyT por los proyectos PICT-2008-650 y PICT-2012-2471; a la UNR por los proyectos PID-UNR 1ING573 y de Vinculación Inclusiva 2017 “Red Eléctrica Inteligente experimental con fuentes renovables solar fotovoltaica y eólica y almacenadores de energía”; al consorcio MEIHAPER-CYTED por el apoyo a la participación en la Reunión Presencial Anual 2018 en Itaipú, Brasil, y a la Reunión Argentina en Río Cuarto, que posibilitaron enriquecer la visión global de los autores sobre este tema en Iberoamérica. Se agradece además a los numerosos alumnos de Ingeniería Electrónica de la FCEIA que participaron en el desarrollo de la REI-LAC. J. M. Cabello y J. Tomassini agradecen al CONICET por la beca doctoral recibida.

#### REFERENCIAS

- [1] GHONIEM, A.F. (2011) Needs, resources and climate change: clean and efficient conversion technologies, *Progress in energy and combustion science*, vol. 37, no 1, pp. 15-51.
- [2] PÉREZ-ARRIAGA, I.J.; RUDNICK, H.; ABBAD, M.R. (2018) 1 Electric Energy Systems: An Overview, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*, pp. 1.
- [3] MAREELS, I. (2018) Grid Futures: A Control Point of View, *Plenary session of 26<sup>o</sup> CONGRESO ARGENTINO DE CONTROL AUTOMÁTICO (AADECA 2018)*. Buenos Aires, Noviembre.
- [4] CELLI, G., PILO, F.; PISANO, G.; CICORIA, R.; IARIA, A. (2004) Meshed vs. radial MV distribution network in presence of large amount of DG, *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, pp. 709-714.

- [5] YELETI, S.; FU, Y. (2010) Impacts of energy storage on the future power system, *Proc. North American Power Symp (NAPS)*, pp 1-7, Septiembre.
- [6] ROCKSTRÖM, J.; GAFFNEY, O.; ROGELJ, J.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SCHELLNHUBER, H. (2017) A roadmap for rapid decarbonization, *Science*, vol. 355, no 6331, pp. 1269-1271.
- [7] LU, D. AND FRANCOIS, B. (2009) Strategic framework of an energy management of a microgrid with a photovoltaic-based active generator, *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric Drives Joint Symposium, ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on*. IEEE, pp. 1-6.
- [8] BAGHERIAN, A. AND TAFRESHI, S.M.M. (2009) A developed energy management system for a microgrid in the competitive electricity market, *PowerTech, 2009 IEEE Bucharest*, pp. 1-6.
- [9] COLSON, C.M. AND NEHRIR, M.H. (2009) A review of challenges to real-time power management of microgrids, *Power Energy Society General Meeting. PES 09*. IEEE, pp. 1-8.
- [10] POTTER, C.W.; ARCHAMBAULT, A. AND WESTRICK K. (2009) Building a smarter smart grid through better renewable energy information, *Power Systems Conference and Exposition. PSCE 09. IEEE/PES*, pp. 1-5.
- [11] PALIZBAN, O.; KAUHANIEMI, K. AND GUERRERO, J.M. (2014) Microgrids in active network management-Part I: Hierarchical control, energy storage, virtual power plants, and market participation, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 36, pp. 428-439.
- [12] ROBLES, M.D.; KIM, J.S.; SON, H. (2017) Capacity firming for wind generation using one-step model predictive control and battery energy storage system, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, vol. 12, no 5, pp. 2043-2050.
- [13] PALIZBAN, O.; KAUHANIEMI, K. (2016) Energy storage systems in modern grids-Matrix of technologies and applications, *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pp. 248-259.
- [14] RAGONE, D.V. (1968) Review of battery systems for electrically powered vehicles, *SAE Technical Paper*.
- [15] Cabello, J.M.; Roboam, X.; Junco, S.; Turpin, C. (2018) Direct sizing and characterization of Energy Storage Systems in the Energy-Power plane, *Mathematics and Computers in Simulation*.
- [16] CABELLO, J.M.; ROBOAM, X.; JUNCO, S.; BRU, E.; LACRESSONNIERE, F. (2017) Scaling Electrochemical Battery Models for Time-Accelerated and Size-Scaled Experiments on Test-Benches, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no 6, pp. 4233-4240.

- [17] VARAIS, A., ROBOAM, X.; LACRESSONNIERE, F.; TURPIN, C.; CABELLO, J.M.; BRU, E.; PULIDO, J. (2018) Scaling of wind energy conversion system for time-accelerated and size-scaled experiments, *Mathematics and Computers in Simulation*.
- [18] TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.A. (2009) Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications, *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, no 2, pp. 289-298.
- [19] CABELLO, J.M.; BRU, E.; ROBOAM, X.; LACRESSONNIERE, F.; JUNCO, S. (2015) Battery dynamic model improvement with parameters estimation and experimental validation, *Proc. 8th Int. Conf. Integrated Modeling Anal. Appl. Control Autom.*, pp. 63-70.
- [20] TEODORESCU, R.; LISERRE, M. AND RODRÍGUEZ, P. (2011) *Grid Converters for PV & Wind Power Systems*: Wiley.
- [21] KARNOPP, D.; ROSENBERG, R. AND MARGOLIS, D. (2012) *System Dynamics*, 5th Ed.: Wiley.
- [22] ORTEGA, R. VAN DER SCHAFT, A. MAREELS, A. AND MASCHKE, B. (2001) Putting energy back in control, *IEEE Control Systems Magazine*, 21(2), pp. 18-33.
- [23] SONTAG, E. (2008) Input to state stability: Basic concepts & results, *Nonlinear & optimal control theory*, pp. 163-220.
- [24] JUNCO, S.; NACUSSE, M.; TOMASSINI, J. (2016) Robust Stabilization of DC-DC Converter via Bond-Graph Prototyping. *Proc. Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2016)*. Larnaca, Chipre. Sept.
- [25] TOMASSINI, J.; DONAIRE, A.; JUNCO, S. (2017) A novel Port-Hamiltonian based design of stabilizing controller for DC-DC buck converter. *Procs. 10th Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2017)*. Barcelona, Spain, pp. 61-68, Sept.
- [26] TOMASSINI, J.; DONAIRE, A.; JUNCO, S.; PEREZ T. (2017) A port-Hamiltonian approach to exponential stabilisation and disturbance rejection of a DC-DC buck converter with a nonlinear load, *Control Conference (ASCC), 11th IEEE. Asian*, pp. 132-137.
- [27] TOMASSINI, J.; DONAIRE, A.; JUNCO, S. (2018) Energy- and flatness-based control of DC-DC converters with nonlinear load. *Procs. 11th Int. Conf. on Integrated Modeling and Analysis in Applied Control and Automation (IMAACA 2018)*. Budapest, Hungary, pp. 34-42, Sept.
- [28] Texas Instruments, Inc. TMS320F2833x/23x Digital Signal Controllers. Disponible en <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28235.pdf>. Consultado el 01/09/2018.

- [29] KILLI, M.; SAMANTA, S. (2015) Modified perturb and observe MPPT algorithm for drift avoidance in photovoltaic systems, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62(9), pp. 5549-5559.
- [30] AMOEDO, P.; SCHMITTENDORF, E.; ALBA, D.; VAZQUEZ, A. (2016) Convertidor multi-propósito con aplicación en redes híbridas inteligentes de generación eléctrica a partir de fuentes renovables”, en ORELLANO, E. (Ed.), *Ciencia y Tecnología 2016 en la UNR*.
- [31] GABRIEL, R.; LEONHARD, W.; NORDBY, C.J. (1980) Field-Oriented Control of a standard AC Motor Using Microprocessors *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-16, no. 2, pp.186-192, marzo.
- [32] ABDULLAH, M.; YATIM, A.; TAN, C.; SAIDUR, R. (2012) A review of MPPT algorithms for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 3220-3227.
- [33] Bosch GmbH. CAN protocol, application and technical summary. Disponible en <http://www.bosch-semiconductors.com/ip-modules/can-ip-modules/can-protocol/>. Consultado el 01/09/2018.
- [34] MORZÁN, R.; QUINTERO, N.; ASAD, G.; DÓRDOLO, L.; ALBA D. AND JUNCO, S. (2018) Development of a 20KVA Wind-Generator System with a 30HP emulated Wind Turbine. *Simposio Iberoamericano en Microrredes inteligentes con Integración de Energías Renovables (SiMMIER) 2018*, Foz do Iguacu, 2 y 4 de octubre.
- [35] MORETTI, F.; RIFF, E.; CABELLO, J. (2018) Desarrollo e implementación de un sistema de almacenamiento de energía basado en volante de inercia con aplicaciones en una red eléctrica inteligente. *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica (CIDEL) 2018*, Buenos Aires, 24-26 de septiembre.

# **PLAN DE USO RESPONSABLE DE LA ENERGÍA EN LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE (UNNE), ARGENTINA: AUDITORÍAS ENERGÉTICAS EN EL CAMPUS RESISTENCIA**

Hugo Daniel Zurlo<sup>1</sup>, Tatiana Karenina Yakimchuk<sup>2</sup>

## **RESUMEN**

En Argentina, dentro del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía de 2007, se creó el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía en Edificios Públicos, que propone a los organismos del Poder Ejecutivo Nacional acciones para disminuir el consumo energético. En consecuencia, la UNNE presentó en 2016 su Plan de Uso Responsable de la Energía. Este trabajo presenta la metodología, resultados y conclusiones obtenidos de la etapa 2 del Plan, llamada “Auditorías Energéticas” y realizada en las Facultades del Campus Resistencia. El objetivo fue estudiar el desempeño energético de sus edificios y definir recomendaciones que reduzcan su consumo de energía.

La metodología adoptada se basa en lo propuesto por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética para edificios de educación superior. Consta de tres fases: levantamiento de datos, contabilidad energética e identificación de medidas de mejora de la eficiencia. En la Fase I se elaboró un protocolo de auditoría, se presentó la propuesta ante las autoridades, se realizaron encuentros con el personal y relevamientos por locales. En la Fase II se hizo un análisis de las facturas de electricidad y un estudio

---

1 Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) – Av. Las Heras 727 – CP 3500 – Resistencia, Chaco, Argentina - hzurlo@gmail.com

2 Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) – Av. Las Heras 727 – CP 3500 – Resistencia, Chaco, Argentina - tatiana.yakimchuk@ymail.com

mediante analizador de redes de la potencia eléctrica activa consumida en las facultades del Campus.

En la Fase I se detectó que, del total de la energía consumida anualmente en los edificios auditados, el 55% corresponde a equipos de climatización. Asimismo, se observó que el 43% de la energía consumida se destina al funcionamiento de las aulas, siendo este el tipo de recinto de mayor incidencia en el total. La Fase II reveló un gasto mensual de energía eléctrica que promedia los 29.000kWh/mes en cada Facultad. Además, se observó que existen picos de consumo diario de potencia activa que pueden alcanzar hasta los 80kW, y que incluso en días de nula actividad sigue existiendo un gasto base de alrededor de 10kW. En la Fase III se propusieron indicadores que permitan medir el consumo energético en función de parámetros conocidos, el número de alumnos y los metros cuadrados de superficie cubierta. Asimismo, se propusieron recomendaciones de orden técnico, procedimental y normativo que involucran a toda la comunidad académica.

## INTRODUCCIÓN

En el año 2007, mediante el Decreto N°140 del Poder Ejecutivo Nacional [1], se declaró de interés y prioridad nacional el uso racional y eficiente de la energía y se aprobaron los lineamientos del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PRONUREE), cuyo objetivo es contribuir y mejorar la eficiencia energética de los distintos sectores consumidores de energía del país. Dentro de esta misma iniciativa se implementó el Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía en Edificios Públicos (PROUREE), que propone a los organismos dependientes del Poder Ejecutivo Nacional una serie de acciones de corto, mediano y largo plazo para contribuir con la disminución del consumo de energía en los edificios que de ellos dependen. En consecuencia, la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) propuso en el año 2016 su propio Plan de Uso Responsable de la Energía (PURE), aprobado mediante Resolución N°972 del Consejo Superior [2]. Esta Resolución considera que es importante y urgente la necesidad de implementar acciones concretas que permitan disminuir el consumo energético por principios y convicciones ambientales, como así también la necesidad de cumplir con leyes y normativas en vigencia y de reducir gastos económicos. El PURE se fundamenta en dos hechos: las acciones nacionales e internacionales que ya se están llevando a cabo para el logro de una mayor eficiencia energética y la preservación del ambiente; y la disminución de los subsidios del sector energético, que catalizó un proceso de toma de conciencia sobre el real costo de la energía y la necesidad de cuidarla y preservarla.

El PURE abarca todos los campus dependientes de la Universidad, como así también a todos sus institutos, y se estructura en seis etapas. El presente trabajo da cuenta de la metodología, los resultados y las propuestas de mejora en la eficiencia resultantes de la Etapa 2, Auditorías Energéticas (AE), realizadas particularmente en el Campus UNNE de la ciudad de Resistencia, provincia del Chaco.

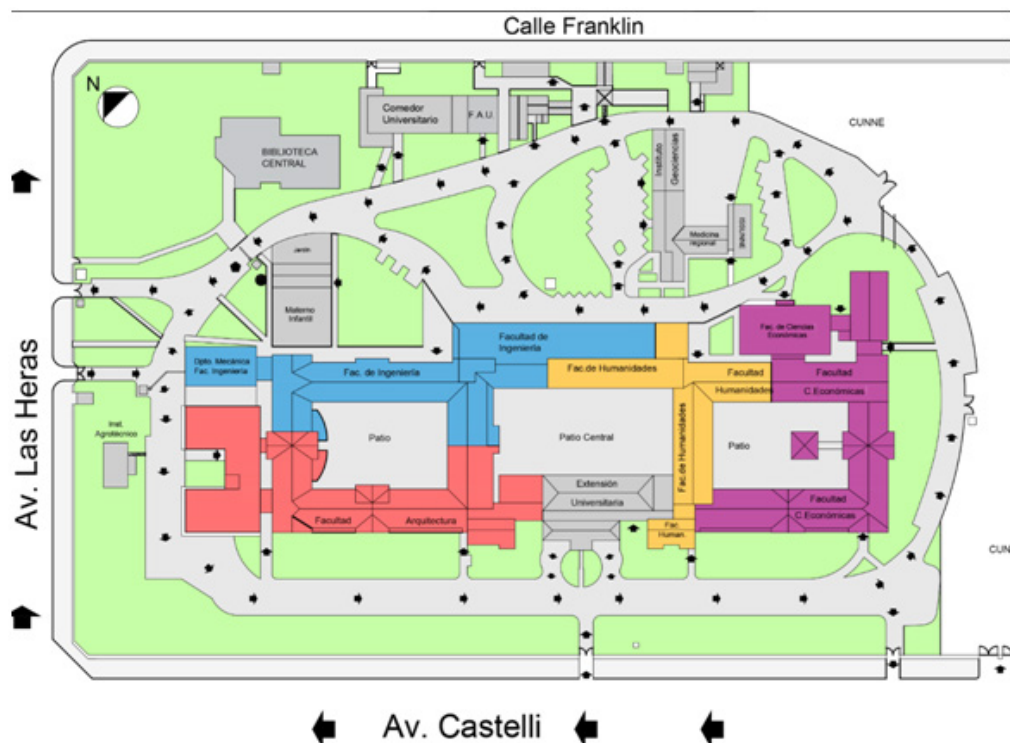


Figura 1. Planimetría del Campus UNNE en la ciudad de Resistencia.

La norma ISO 50002 del año 2014 [3] indica que una auditoría energética es un análisis sistemático del uso y consumo de energía dentro de un ámbito definido, con el fin de identificar, cuantificar e informar sobre las oportunidades para mejorar el desempeño energético. Ese ámbito puede tratarse de un edificio, un equipamiento, un sistema o un proceso. Otra expresión utilizada de manera equivalente es “diagnóstico energético”. En este trabajo, ese ámbito es el Campus UNNE (figura 1) localizado en el centro-sur de la ciudad de Resistencia, en un área urbana de densidad media.



Fotografías 1 y 2. A la izquierda, edificio que data de la década del 50 y aún conserva sus características tecnológico-constructivas originales, a la derecha, ampliación terminada en el año 2001.

El edificio principal se erigió originalmente a fines de la década de 1950 como un Hogar Escuela y en 1957 se convirtió en sede de la Universidad en esta ciudad. Corresponde a una tipología proyectual prototípica de la época, conocida vulgarmente como “estilo californiano”, caracterizada por tener mampostería de ladrillos macizos comunes revocada a la cal y pintada de colores claros, techo inclinado con estructura de entramado de madera maciza y cubierta de tejas coloniales, y galerías perimetrales o porches con arcadas (fotografía 1). A lo largo del tiempo, acompañando el proceso de crecimiento de la comunidad y oferta académica, se han sucedido distintas ampliaciones del edificio original. Las últimas, realizadas a principios del siglo XXI, se caracterizan por tener estructuras prefabricadas de hormigón armado, mamposterías de ladrillos huecos con cámara de aire, grandes carpinterías de aluminio, y techos planos de losa de hormigón armado prefabricada (fotografía 2). Dentro del Campus y alrededor del edificio principal existen otros edificios de menores dimensiones que alojan Institutos, Centros, la Biblioteca Central, etcétera.

## DESARROLLO

La norma internacional ISO 50002 define los requerimientos mínimos que conlleven la identificación de las oportunidades de mejora del desempeño energético, sin embargo, no existe en la actualidad una normativa a nivel nacional que estandarice estos requerimientos. Por esta razón, la metodología adoptada se basa en lo propuesto por la Agencia Chilena de Eficiencia Energética [4] para edificios de instituciones de educación superior. Esta Institución de orden público-privado establece las siguientes fases:

-Fase I – Levantamiento de datos. Consiste en realizar el registro de toda la información necesaria para conocer qué hay en la instalación y cómo funciona. Incluye el estudio de la envolvente arquitectónica. Para este trabajo, además de los datos provenientes del relevamiento de los edificios (en el que se utilizaron planillas específicamente confeccionadas para tal fin), se incluyeron otros recabados mediante documentación técnica, consultas al personal no docente y consultas a fabricantes y vendedores de equipos.

-Fase II – Contabilidad energética. Consiste en analizar el comportamiento energético del establecimiento, supervisar el flujo de energía e identificar debilidades para luego seleccionar medidas de mejora adecuadas. En este trabajo, este análisis incluyó el estudio de los consumos mensuales de energía eléctrica para un período de 12 años (2006-2017), utilizando como insumo las facturas de electricidad de cada edificio. Además, también se incluyó el análisis de la potencia eléctrica diaria consumida en los sectores mediante analizador de redes Lutron modelo DW-6095 colocado en la entrada de la conexión a la red de distribución. Solo se analizó la energía eléctrica, ya que no existen consumos relevantes mediante otras fuentes de energía.

-Fase III – Identificación y cálculo de medidas de mejora de eficiencia energética (MMEE). Consiste en identificar las principales MMEE para iluminación, climatización, etcétera. Así, en esta fase se calcula el porcentual de mejora del desempeño energético y el ahorro de costos derivado de la implementación de las MMEE. Para este trabajo, en esta fase se establecieron indicadores de consumo y recomendaciones a las autoridades encargadas de la ejecución de las siguientes etapas del PURE.

Para llevar a cabo las AE se tomó la unidad de estudio (Campus) y se la dividió en sectores (las Facultades e Institutos). Estos, a su vez, se subdividieron en recintos (aulas, oficinas, etcétera). Los sectores inspeccionados en las AE fueron: la Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU), la Facultad de Ingeniería (FI), la Facultad de Ciencias Económicas (FCE) y la Facultad de Humanidades (FH). Haber optado por un estudio focalizado exclusivamente en las Facultades responde su uso intensivo y extensivo. Representan todas las tipologías constructivas y funcionales y son una representación fehaciente de la complejidad de la unidad de estudio. Asimismo, de las cuatro Facultades se inspeccionaron íntegramente dos, la FAU y la FI. En cuanto a la FCE y la FH, las inspecciones se llevaron a cabo en “locales testigos” (recintos representativos del sector), ya que aquellos de iguales características funcionales, tecnológicas y espaciales poseen un comportamiento energético similar.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan a continuación los resultados obtenidos en cada una de las fases, por lo que cada fase mencionada de la metodología posee su respectivo apartado.

### 1. LEVANTAMIENTO DE DATOS

En el relevamiento se encontraron artefactos para iluminación, para acondicionamiento térmico, para calentamiento de alimentos y de agua para beber (estos últimos ubicados especialmente en áreas de acceso común), para refrigeración de alimentos y bebidas (encontrados particularmente en oficinas) y para tareas de oficina y áulicas (computadoras, proyectores, etcétera). Para obtener la cantidad de energía que consumen al día y al año, fue preciso establecer la cantidad de horas de uso diarias y la cantidad de días al año que se los utiliza, siendo este último un valor que resulta de restar los días de receso, fines de semana, feriados y días no laborables. La figura 2 resulta de sumar los datos recabados en las cuatro facultades, tanto para un día tipo como para todo el año.

■ Iluminación ■ Equipos ■ Climatizaciór.

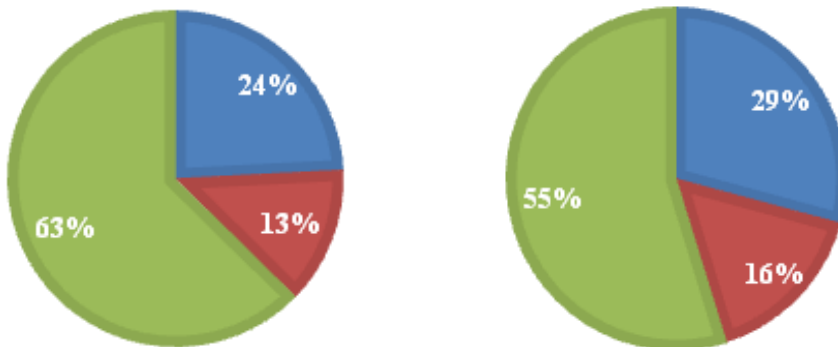


Figura 2. Incidencia porcentual de cada tipo de artefacto en el consumo diario (izquierda) y anual (derecha) de energía de la unidad de estudio.

Se observa que en un día tipo (esto es, un día con actividades áulicas y administrativas normales) existe un importante gasto energético por causa del uso intensivo de aires acondicionados, un gasto moderado pero reducible de energía para iluminar,

y una incidencia menor de los equipos de oficinas, aulas, etcétera. Cuando analizamos los datos a escala anual, vemos que la incidencia del gasto por climatización disminuye, ya que entra en consideración los días del período invernal en los que no se utilizan estos equipos.

En la figura 3 se presentan el consumo diario y el anual de la unidad de estudio (es decir, de la sumatoria de edificios inspeccionados), seccionados no por artefacto, sino por tipo de recinto. A tales efectos, los recintos fueron categorizados según su función: las áreas comunes (sanitarios, pasillos, halles, bares), las aulas y talleres, los departamentos y laboratorios, las oficinas y recintos que les sirven de apoyatura, y las bibliotecas de cada facultad. Vemos que las aulas y talleres demandan el 43% de la energía que se consume diariamente, igual porcentaje que las oficinas, departamentos y laboratorios combinados.

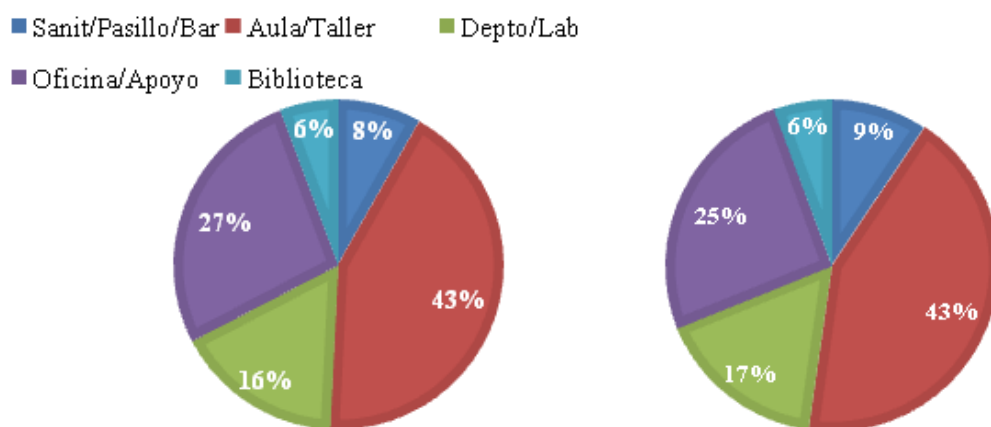


Figura 3. Incidencia porcentual de cada tipo de recinto en el consumo diario (izquierda) y anual (derecha) de energía de la unidad de estudio.

Por otro lado, para el estudio de la envolvente se calculó la transmitancia térmica de muros y techos, denominada K y medida en  $W/m^2K$ . Se utilizó el método presentado en la norma IRAM 11601 [5]. Luego se los comparó con los valores máximos de transmitancia térmica de cerramientos opacos para condiciones de verano y para invierno, según IRAM 11605 [6]. De acuerdo a estas normativas, la envolvente de la unidad de estudio posee una mala calidad de aislación térmica, ya que la mayoría de sus elementos o solo alcanzan el nivel de aislación

mínimo (nivel C) o ni siquiera logran alcanzar ese nivel (tabla 1). Dada nuestra zona bioambiental, caracterizada por un clima cálido la mayor parte del año, el problema a resolver ante una envolvente de estas características consiste en evitar las ganancias de calor que provienen del exterior. También se estudió el comportamiento térmico de las carpinterías, y se las clasificó de acuerdo a la norma IRAM 11507-4 [7]. En este caso, tampoco se observa un buen comportamiento aislante, ya que dos de las tres tipologías de carpintería encontrados cuadran dentro de la categoría “no clasificable”, que significa un nivel de aislación térmica muy bajo.

Tabla 1. Transmitancia térmica de muros, techos y carpinterías del Campus Resistencia.

Envolvente	Características K W/m <sup>2</sup> K		Verano		Invierno	
			Clasificación según IRAM	K W/m <sup>2</sup> K	Clasificación según IRAM	
Muros	Mampostería de ladrillos comunes con revoque completo en ambas caras		1,87	Nivel C	1,87	Nivel C
	Mampostería doble de ladrillos comunes y huecos con cámara de aire		0,96	Nivel C	0,96	Nivel C
Techos	Inclinados	Tejas coloniales con estructura de madera y cielorraso independiente	1,29	No cumple Nivel C	1,77	No cumple Nivel C
		Chapa galvanizada con estructura metálica	1,06	No cumple Nivel C	1,14	No cumple Nivel C
	Planos	Losa de viguetas pretensadas y ladrillos huecos con cielorraso aplicado a la cal	1,41	No cumple Nivel C	1,56	No cumple Nivel C
		Losa pretensada con tejuelines tipo sombrilla	0,48	Nivel B	0,52	Nivel B
Carpinterías	Con vidrio incoloro común		5,82	No clasificable	5,82	No clasificable
	Con vidrio incoloro común y cortina de madera (cerrada)		2,79	K <sub>4</sub>	2,79	K <sub>4</sub>
	Con vidrio incoloro común y cortinas internas		5,00	No clasificable	5,00	No clasificable

## 2. CONTABILIDAD ENERGÉTICA

Las figuras 4 a 7 presentan el consumo eléctrico mes a mes para el período 2006-2017 de cada una de las unidades académicas estudiadas. Aquí se observa que, en todos los casos, existen picos de consumo coincidentes con los meses de inicio y finalización de clases y valles de consumo coincidentes con los meses de receso invernal y estival. Además, se observa un claro descenso en el consumo energético de Facultad de Humanidades en torno al año 2013, año en el que, de acuerdo a los datos recabados en la Fase I, se produjo un importante cambio de tecnología en iluminación (reemplazo de lámparas de bajo consumo por las de tecnología LED).

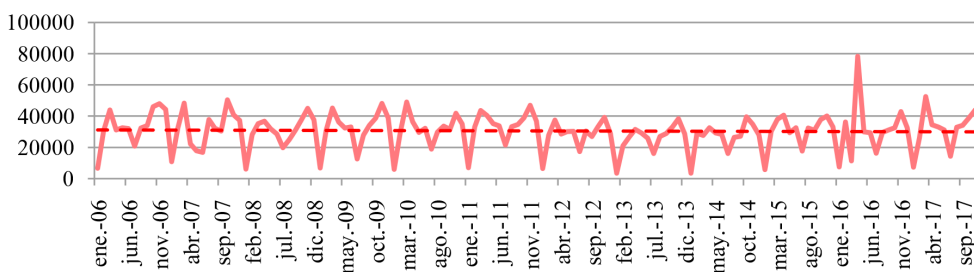


Figura 4. Consumo de energía eléctrica de la FAU, en kWh/mes, período 2006-2017.

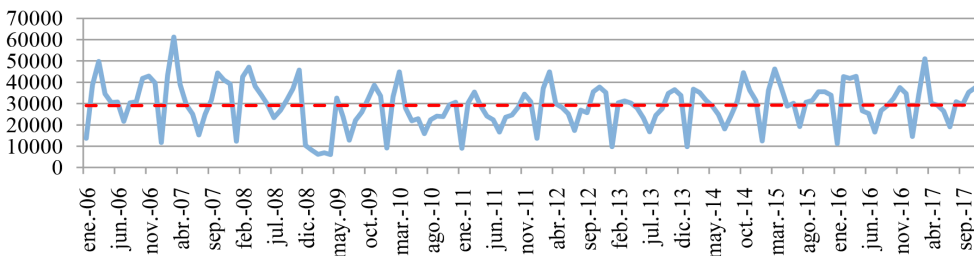


Figura 5. Consumo de energía eléctrica de la FI, en kWh/mes, período 2006-2017.

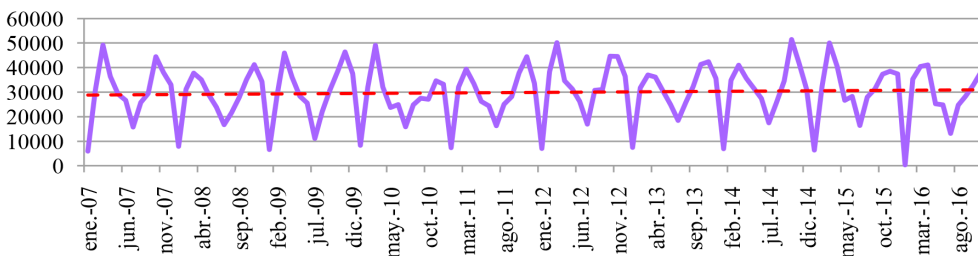


Figura 6. Consumo de energía eléctrica de la FCE, en kWh/mes, período 2006-2017.

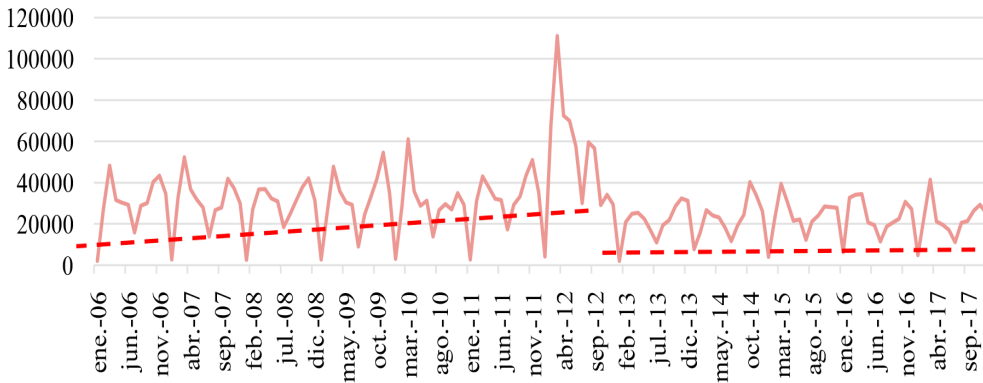


Figura 7. Consumo de energía eléctrica de la FH, en kWh/mes, período 2006-2017.

La tabla 2 presenta los valores de consumo en estos picos y valles y los promedios mensuales y anuales para este período, sea individualizados por facultad, sea del total que resulta de sumar cada unidad académica.

Tabla 2. Consumo promedio de energía eléctrica en cada facultad y en toda la unidad de estudio, en kWh, período 2006-2017.

Promedios	FAU	FI	FCE	FH	TOTAL	Mes de recurrencia
Mensual	30.576,88	29.208,58	27.451,77	28.864,38	116.101,61	
Anual	366.922,50	350.503,00	359.371,25	346.372,5	1.423.169,25	
Pico inicio de clases	44.936,67	43.684,67	43.930,42	47.303,917	179.855,677	marzo/abril
Pico fin de clases	43.695,83	38.835,00	42.170,00	40.500,333	165.201,163	octubre/no-viembre
Valle verano	6.394,17	11.290,00	6.547,08	3.747,17	27.978,42	enero
Valle invierno	17.338,33	17.739,17	16.028,75	14.670	65.776,25	julio

A diferencia de la energía eléctrica, la potencia eléctrica fue medida diariamente en períodos concretos y relativamente cortos de tiempo durante los meses de mayo a julio de 2017, con el objetivo de conocer cómo varía dentro de una misma jornada y a lo largo de una semana tipo, el comportamiento energético de determinado edificio. Las figuras 8 a 10 presentan el comportamiento en una semana en tres de

las cuatro unidades académicas auditadas. Se remarca que el jueves medido en la FAU fue feriado, de allí que no tenga picos de consumo como las demás facultades.

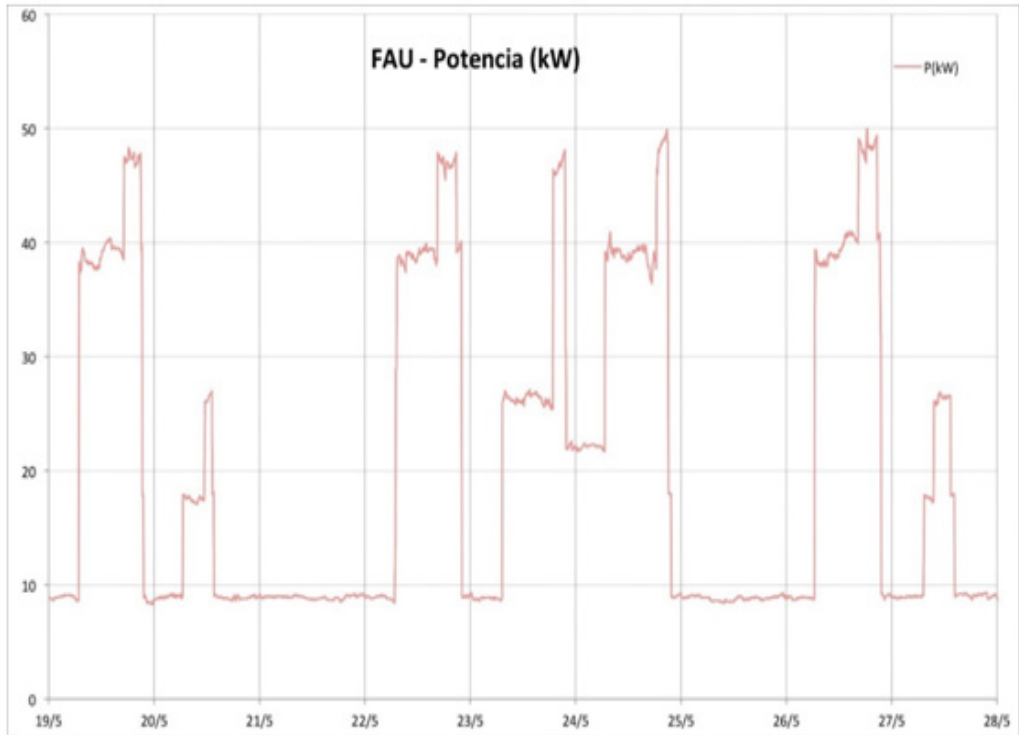


Figura 8. Consumo de potencia eléctrica en la FAU, en kW, en una semana.

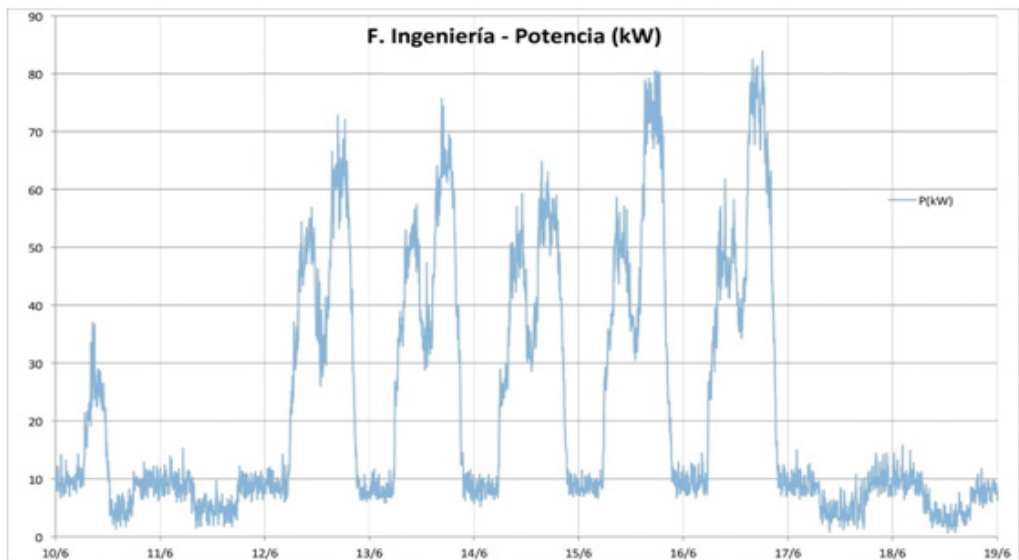


Figura 9. Consumo de potencia eléctrica en la FI, en kW, en una semana.

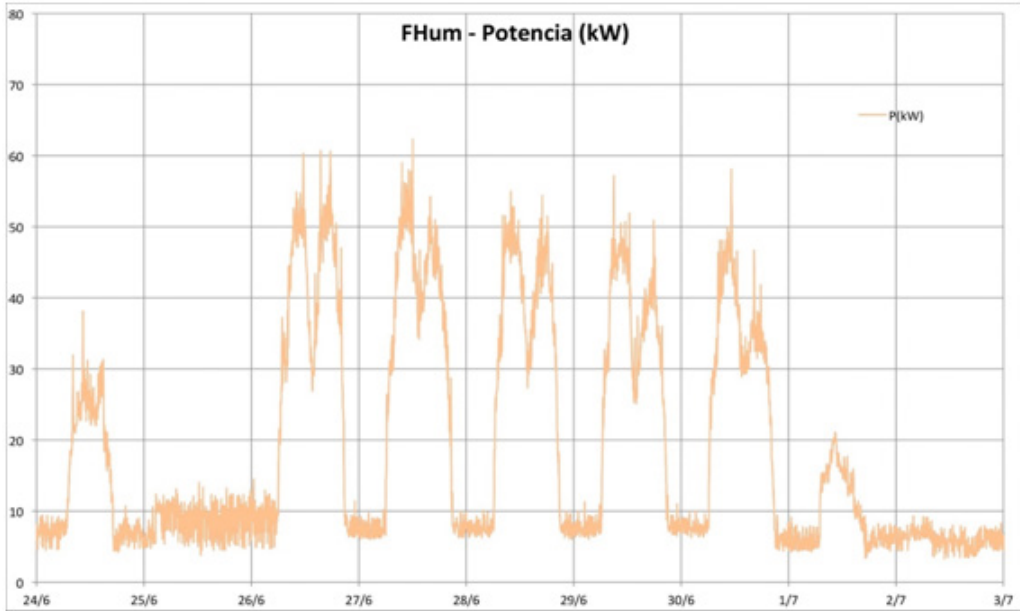


Figura 10. Consumo de potencia eléctrica en la FH, en kW, en una semana.

Incluso durante las noches (cuando se presume que no hay actividad en ninguna facultad) y en días domingo existe un consumo base de potencia que fluctúa y puede superar los 10kW; los días sábado existe un consumo pequeño concentrado en horas del mediodía, que significa un uso moderado de los edificios; en los días hábiles se alcanzan picos de potencia por la mañana y por la tarde, coincidentes con los dos turnos en que se dictan clases en estas facultades. Sin embargo, dependiendo de la facultad que se evalúe, el mayor pico puede ocurrir en horario matutino o vespertino e ir creciendo o decreciendo a lo largo de la semana. Por ejemplo, la FI consume mayor potencia eléctrica en horas de la tarde, y va en aumento con el correr de la semana hasta alcanzar picos de potencia en torno a los 80kW los días viernes. Además, tanto en la FI como en la FH la transición entre un pico y un valle se hace de manera progresiva, mientras que en la FAU el inicio y fin del pico de consumo es brusco, tal y como lo evidencian las líneas prácticamente verticales y no segmentadas que grafican su consumo.

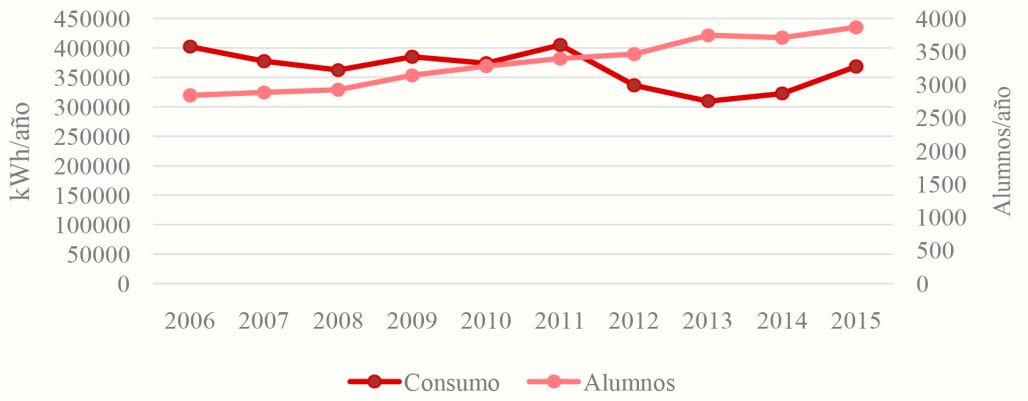
La existencia de un consumo de energía o potencia eléctrica de base cuando no están desarrollándose actividades dentro de las facultades (en la noche, en períodos de receso, etc.), significa que estas unidades académicas desti-

nan parte de su presupuesto a pagar energía derrochada. Incluso si se asume que existen artefactos que por motivos de seguridad o funcionamiento no pueden ser desconectados, su sola existencia no justifica el consumo de base presentado. En función de estos datos y de los recabados mediante consultas al personal, es evidente que existen artefactos que podrían ser desconectados para evitar el derroche en períodos de inactividad. Solo apagarlos en los recesos representaría un ahorro energético y monetario para todas las unidades académicas. Es decir, se trata de una acción que no requiere de inversión inicial, ya que solo responde a cambios de hábito y a la fijación de normas internas respecto a cuándo encender o apagar un determinado equipo para que consuma lo menos posible.

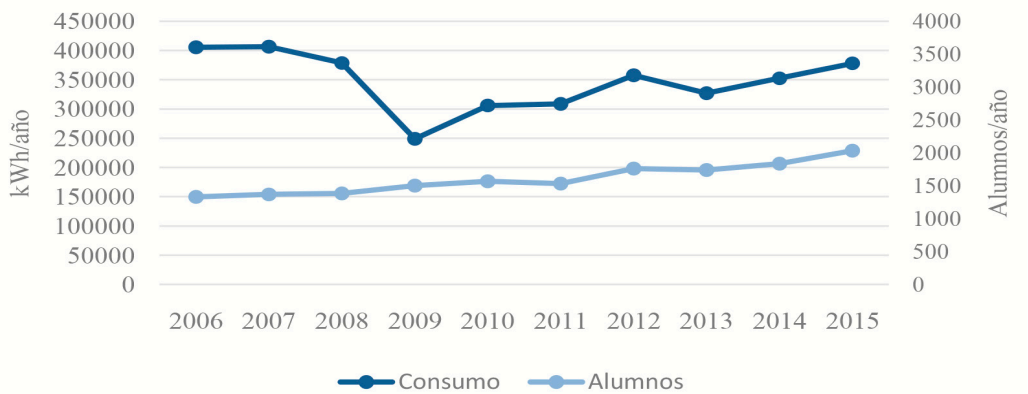
### 3. MEDIDAS DE MEJORA DE EFICIENCIA ENERGÉTICA

Para poder medir de ahora en más las variaciones en el consumo producidas por las medidas de mejoras como la enunciada sección precedente, es preciso definir indicadores de consumo para cada unidad académica. Son un parámetro a tener en cuenta a la hora de identificar, cuantificar e informar sobre las oportunidades para mejorar el desempeño energético. Son la línea de base que muestra la realidad de cómo se consume energía. Individualizarlos por facultad responde a la autonomía que cada unidad académica posee a la hora de manejar su presupuesto o de optar por determinadas medidas de mejoras. Además, que cada unidad académica conozca su comportamiento energético y cómo mejorarlo, alentaría la sana competencia entre ellas, persiguiendo cada una el objetivo de reducir al mínimo su consumo.

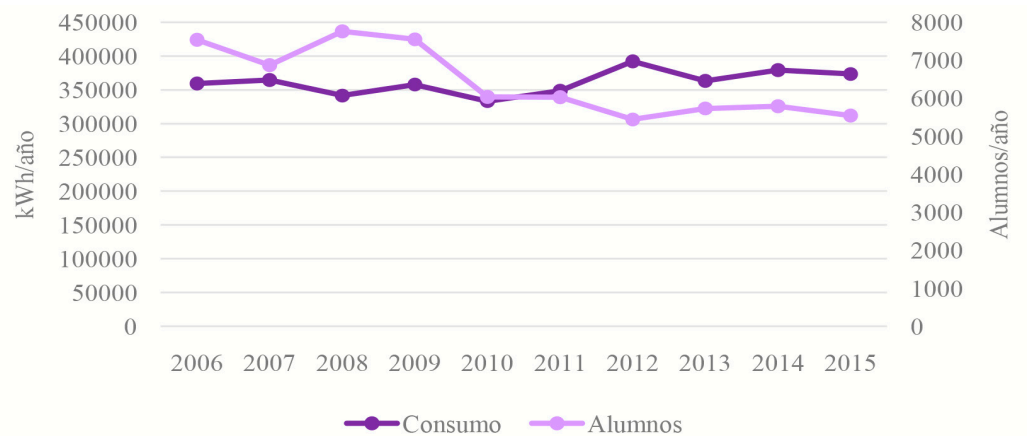
Para diseñar los indicadores, se seleccionaron dos parámetros: el número de alumnos presenciales que aloja cada facultad del Campus UNNE de Resistencia, y la superficie cubierta que poseen sus edificios. Para el caso del indicador de consumo por alumno, se consultaron las estadísticas disponibles en el sitio web de la UNNE [8], que tienen registros de la cantidad total de alumnos de 2006 a 2015, por carrera y por facultad. Obtenidos estos datos, se realizó una comparación entre el comportamiento energético durante ese período y el flujo de alumnos presenciales en cada unidad académica, tal y como lo reflejan las figuras 11 a 14.



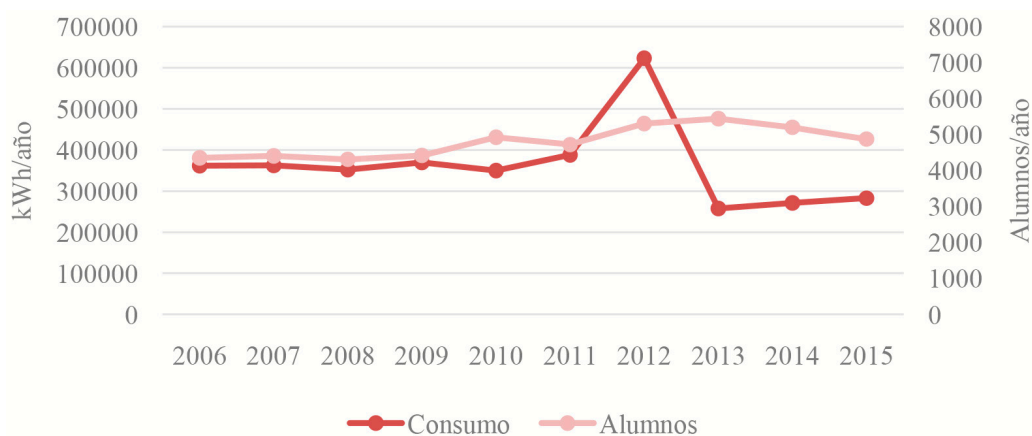
Figuras 11. Evolución en el alumnado (alum/año) y en el consumo (kWh/año) en la FAU, período 2006-2015.



Figuras 12. Evolución en el alumnado (alum/año) y en el consumo (kWh/año) en la FI, período 2006-2015.

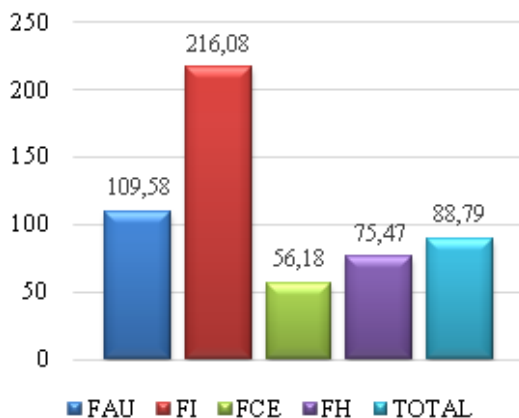


Figuras 13. Evolución en el alumnado (alum/año) y en el consumo (kWh/año) en la FCE, período 2006-2015.



Figuras 14. Evolución en el alumnado (alum/año) y en el consumo (kWh/año) en la FH, período 2006-2015.

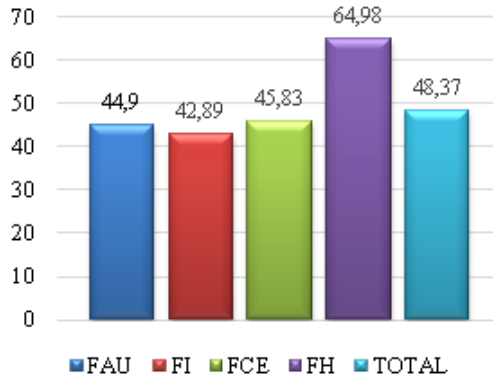
En la figura 15 se observa que por cada facultad se obtienen indicadores de consumo por alumno bastante dispersos.



Figuras 15. Consumo anual medio por alumno, en kWh/per/año, período 2006-2015.

El número de alumnos es un valor dinámico, crece y decrece año tras año. Por su parte, la superficie cubierta es un valor que solo varía en ciclos medibles en décadas, por lo tanto, podría considerarse un valor estático, sobre todo si consideramos el mismo período del punto anterior, 2006-2015, en el que no se registraron ampliaciones considerables de superficie cubierta en ninguna facultad. En la figura 16 se presentan los valores del indicador de consumo por metro cuadrado de superficie cubierta. A diferencia del indicador basado en el alumnado, aquí se observan valo-

res más próximos entre sí. La FH, que posee la menor superficie cubierta del grupo, posee un indicador mayor, lo que significa un uso más intensivo de sus instalaciones.



Figuras 16. Consumo anual medio por metro cuadrado de superficie cubierta, en kWh/m<sup>2</sup>/año, período 2006-2015.

Es importante mencionar que luego de analizar el comportamiento energético y las cifras sobre alumnos presenciales de cada unidad académica, no se observó correlación entre el aumento o disminución del consumo energético y el aumento o disminución del número de alumnos cursantes. Si bien sería necesario contar con datos estadísticos del personal docente y no docente que concurre regularmente para obtener un indicador por persona y no solo por alumno, el indicador por alumno revela que no podemos atribuir el perfil energético de cada facultad a los comportamientos individuales de sus ocupantes, sino que son los comportamientos colectivos y las normas que los rigen quienes condicionan el nivel de consumo de un sector determinado. Un ejemplo claro: a efectos del gasto de energía, que un aula esté ocupada por 50 o por 100 alumnos no implica una variación en el consumo, ya que las luces se encenderán de igual manera, el profesor hará uso de los mismos equipos de computación y los ocupantes utilizarán el mismo aire acondicionado sin importar cuántas personas haya en el interior del local. Solo regirse por determinados criterios de eficiencia energética podría significar una baja en el gasto eléctrico de este ejemplo: que las luces se enciendan con llaves individuales o por sector, que los ocupantes utilicen la iluminación natural si está disponible, o que prescindan del uso del aire acondicionado y promuevan la ventilación natural manipulando las aberturas y poniendo en funcionamiento los ventiladores del local.

En cuanto al consumo anual medio por superficie cubierta, tres de los cuatro sectores presentan valores similares en torno a los  $44,50\text{kWh/m}^2/\text{año}$ . Como en este caso sí fue posible obtener un parámetro más homogéneo, y que el consumo está en relación a la complejidad y extensión de sus instalaciones y no al crecimiento o decrecimiento de sus ocupantes, el consumo anual medio por metro cuadrado de superficie cubierta debe ser el indicador a partir del cual medir toda mejora o propuesta para que el consumo energético de los sectores auditados tienda hacia la eficiencia. Podría convertirse en un instrumento de medición anual de la variación en el gasto energético que tendría en cuenta las posibles ampliaciones edilicias, las que a su vez provienen de la necesidad de alojar más ocupantes. Así se incorporaría indirectamente la variable del consumo por persona.

Para las etapas subsiguientes del PURE no podrán emprenderse medidas de mejora sin la participación activa de las autoridades de la UNNE y de cada facultad e instituto, como tampoco podrá existir ahorro energético sin la colaboración permanente del resto de la comunidad académica. Para ello, describimos someramente a continuación cuáles son las recomendaciones técnicas, procedimentales y normativas que las autoridades deberían tener en cuenta para continuar con la aplicación del PURE:

- Recomendaciones técnicas: reemplazo de tecnologías en el sistema de iluminación; reemplazo de tecnologías en el sistema de climatización; incorporación de sensores de movimiento en áreas comunes; incorporación de sensores de temperatura en aulas, talleres, oficinas y laboratorios; incorporación de medidores seccionales de energía; incorporación de energías renovables para calentamiento de agua; incorporación de sistemas de renovación del aire interior; y rehabilitación energética de la envolvente arquitectónica.

- Recomendaciones procedimentales: adquisición de equipos nuevos bajo criterios de eficiencia energética; ampliación de la información patrimonial con datos de antigüedad y consumo energético de equipos; conformación de un grupo de trabajo para mantenimiento; capacitación periódica; implementación de campañas de concientización y sensibilización; y conformación de una comisión permanente a cargo de la Gestión de la Energía.

- Recomendaciones normativas: cumplimiento de la normativa argentina vigente en materia de aislación térmica y eficiencia energética; y creación de reglamentaciones a nivel universitario y a nivel de las facultades orientadas a la disminución del consumo de energía.

## CONCLUSIONES

Para comprender el impacto que algunas de estas recomendaciones tendrían en el consumo de energía, tomamos solo cinco medidas puntuales, tres de recambio o incorporación de tecnología y dos relativas al comportamiento de los ocupantes, para verificar cuál sería la reducción real del consumo energético. Las medidas de mejora tenidas en cuenta en este ejemplo son: reemplazo de equipos de iluminación fluorescentes por otros de tecnología LED, reemplazo de monitores tipo CRT por los de tipo LED, precalentamiento de agua para beber mediante energía solar fototérmica, desconexión de equipos para evitar consumos en modo *stand-by* y reducción de las horas de uso de los aires acondicionados en los horarios de baja actividad académica y administrativa. Implementar estas medidas posibilitaría una reducción del gasto de electricidad global en un 32%, tal y como lo expresa la tabla 3.

Tabla 3. Comparación entre el consumo anual y el consumo incorporando medidas de eficiencia, en kWh/año.

Sector	Consumo anual (kWh/año)		Ahorro energético	
	Promedio actual	Con medidas de eficiencia	Diferencia (kWh/año)	%
FAU	457195,84	293357,35	163838,50	36
FI	500085,91	361797,00	138288,91	28
FCE	480861,44	302475,92	178385,52	37
FH	416906,27	305362,98	111543,29	27
<b>TOTAL</b>	<b>1855049,47</b>	<b>1262993,25</b>	<b>592056,22</b>	<b>32</b>

Este ahorro se traduce en menos dinero destinado al pago del servicio eléctrico, pero también implica, en el caso de las medidas de recambio o incorporación de tecnología, una importante inversión inicial. De esta forma el sistema funciona como un círculo virtuoso: se hace una fuerte inversión inicial que luego se recupera al ahorrar dinero en el pago de las facturas de electricidad. Una vez recuperada la inversión, lo que se ahorra se destina a más inversión, hasta alcanzar el equilibrio de consumo, el estado ideal en el que no se puede consumir menos sin alterar el buen funcionamiento de los edificios.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ing. Sofía Arsuaga y a la Arq. Ariana Lima por su colaboración en el proceso de levantamiento de datos que formó parte de la Fase I de la metodología aplicada en este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] Decreto N°140. *Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía*. Boletín Oficial de la República Argentina. Buenos Aires, 21 de diciembre de 2007.
- [2] Resolución N°972/16. *Plan de Uso Responsable de la Energía*. Boletín Oficial de la Universidad Nacional del Nordeste N°375. Corrientes, 13 de febrero de 2017.
- [3] International Organization for Standardization (ISO) (2014). *Energy Audits – Requirements with guidance for use*. (N° de publicación ISO 50002).
- [4] Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (2014). *Guía de Apoyo al Desarrollo de Diagnósticos Energéticos para Instituciones de Educación Superior (EIS)*. Santiago (Chile): Autor. Disponible en <http://campussustentable.ucn.cl/wp-content/uploads/2016/10/Gu%C3%ADa-de-Apoyo-al-Desarrollo-de-Diagn%C3%B3sticos-Energ%C3%A9ticos-para-IES.pdf>
- [5] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2002). *Aislamiento térmico de edificio. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*. (N° de publicación IRAM 11601). Argentina: autor.
- [6] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1996). *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*. (N° de publicación IRAM 11605). Argentina: autor.
- [7] Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2010). *Carpintería de obra y fachadas integrales livianas. Ventanas exteriores. Parte 4 – Requisitos complementarios. Aislación térmica*. (N° de publicación IRAM 11507-4). Argentina: autor.
- [8] Universidad Nacional del Nordeste. *UNNE en cifras*. <http://www.unne.edu.ar/homepage/unne-en-cifras/estudiantes>

# ENFOQUE INTEGRAL DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS Y SU APLICACIÓN A LA REGLAMENTACIÓN TÉRMICA PARA VIVIENDA NUEVA EN MONTEVIDEO, URUGUAY

Alicia Picción<sup>1</sup>, Magdalena Camacho<sup>1</sup>, María Noel López<sup>1</sup>

## RESUMEN

Las sociedades actuales, cualquiera sea su nivel de bienestar, necesitan un abastecimiento adecuado de energía para satisfacer sus necesidades. La forma en que se satisfacen varía notablemente en el tiempo y en el espacio ya que el consumo de energía -tanto la cantidad como el tipo de energía consumida- es resultado de las decisiones tomadas por las sociedades. La demanda de energía en el sector residencial se deriva de la energía que se utiliza en los diferentes servicios, tales como calefacción, refrigeración, cocina, calentamiento de agua, funcionamiento de los electrodomésticos e iluminación. La cantidad y tipo de energía utilizada están relacionados principalmente con las características climáticas, el diseño arquitectónico, las características de los sistemas consumidores de energía y las características y pautas de uso de los ocupantes. Esta demanda tiene que ver con los aspectos cuantificables y con los cualitativos del uso de la energía, relacionados a ¿quiénes, para qué, cómo y cuándo usan la energía? Si la energía es una demanda derivada, entonces la cantidad y tipo de energía requerida dependen de decisiones previas, como ser qué tipo de equipamiento se posee (incluidos los edificios), cuán eficiente es ese equipamiento y con qué intensidad se usa. En los últimos años en Uruguay se están dando pasos hacia la construcción de una normativa de eficiencia energética

---

<sup>1</sup> Universidad de la República (UDELAR), Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU), Instituto de Tecnologías, área Clima y Confort en Arquitectura (CCA), Hugo Prato 2314, CP 11200, Montevideo, Uruguay.

Mail: [apiccion@fadu.edu.uy](mailto:apiccion@fadu.edu.uy); [mcamacho@fadu.edu.uy](mailto:mcamacho@fadu.edu.uy); [marialop@fadu.edu.uy](mailto:marialop@fadu.edu.uy)

con medidas de dos tipos: unas para mejorar el desempeño de la envolvente del edificio y los sistemas de acondicionamiento térmico, que apuntan a la reducción de la demanda de energía final, y otras para el suministro de parte o del total de la demanda de energía mediante recursos renovables que apunta a la reducción del uso de energía primaria. El objetivo de este capítulo es presentar las estrategias metodológicas que ha desarrollado el equipo Clima y Confort en Arquitectura para las investigaciones relacionadas a eficiencia energética en el sector residencial, sus resultados, los productos que permitió desarrollar y los próximos desafíos.

## INTRODUCTION

El rápido y sostenido crecimiento del consumo de energía a nivel mundial y local genera preocupación debido a problemas de suministro, agotamiento de recursos energéticos y/o impactos ambientales globales y locales. Los datos del balance energético 2017 en Uruguay muestran que la contribución global de los edificios -residenciales, comerciales y de servicios- al consumo final de energía fue del 25% y el consumo final per cápita 1300 tep/1000hab, mientras que en 2007 fue de 800 tep/1000hab [1]. Esta tendencia al alza en el consumo de energía en los sectores residencial, comercial y de servicios se explica principalmente por la creciente demanda de servicios energéticos y los niveles de confort a satisfacer, junto con el aumento en el tiempo que se pasa dentro de los edificios. ¿Este uso es razonable? ¿Somos conscientes de las implicancias del uso de energía?

La eficiencia energética en los edificios es hoy un objetivo primordial para la política energética a nivel internacional, regional y nacional ya que vista como un recurso energético, a largo plazo tiene el potencial de contribuir a la seguridad energética, la mejora de la salud y el bienestar, la reducción de las emisiones de gas de efecto invernadero. En varios países de la AIE las medidas de eficiencia energética han conducido a reducciones de la demanda energética que superan el aporte de cualquier otra fuente [2]. Para cuantificar su aporte es necesario desarrollar y mantener indicadores de eficiencia energética, pero la elección y desarrollo de indicadores apropiados no es sencillo.

Una de las barreras es la información sobre el consumo de energía en los edificios ya que no siempre es suficiente, no está desagregada o disponible. El estudio de demanda

y consumo de energía en las edificaciones requiere de aproximaciones cuantitativas y cualitativas para el conocimiento de la realidad, tanto de factores de producción y tecnológicos como del impacto de los estilos de vida en la calidad y la cantidad de energía que se consume y de los niveles de equidad y satisfacción de necesidades, además de la organización adecuada de fuentes de datos.

El objetivo de este artículo es presentar enfoques y trabajos de investigación sobre confort y desempeño energético de edificios residenciales desarrollados por el equipo del CCA entre 2005 y 2012, que siguen el proceso de integración de diversas miradas, actores y estrategias metodológicas. Cada trabajo dejó al equipo de investigación preguntas abiertas, relativas a las decisiones que toman los actores involucrados y su impacto en el consumo de energía del edificio. La participación en grupos de trabajo sobre reglamentación de eficiencia energética reafirmó esas inquietudes. Por eso, a partir de 2012 también desarrollamos proyectos interdisciplinarios (arquitectura, economía, ciencias sociales, antropología, ingeniería) que buscan profundizar en los aspectos socioculturales, económicos y tecnológicos relacionados al consumo de energía en el sector residencial.

## **ENFOQUES Y APROXIMACIONES METODOLÓGICAS**

Las investigaciones sobre desempeño energético de edificios, integraron mediciones en condiciones de uso, simulación computacional y encuestas de confort a los usuarios, para profundizar en las interrelaciones de las variables involucradas. Se estudiaron distintos tipos de edificios, envolventes, usos, usuarios y zonas climáticas. En la figura 1 se muestra el marco teórico que se sustenta en el enfoque sistémico, donde se consideran tres subsistemas, conformado cada uno por una serie de variables, de parámetros y sus interrelaciones, que representan todas aquellas características que influyen sobre el intercambio térmico entre ellos y por lo tanto influyen en la vivienda y su comportamiento térmico y energético y sobre el ser humano y su confort [3]. En la figura también se representan los tipos de estudios a realizar para obtener información cuantitativa y cualitativa de calidad sobre cada subsistema y para su posterior evaluación en base a criterios de confort y de eficiencia energética, definidos de acuerdo a condiciones de contexto.

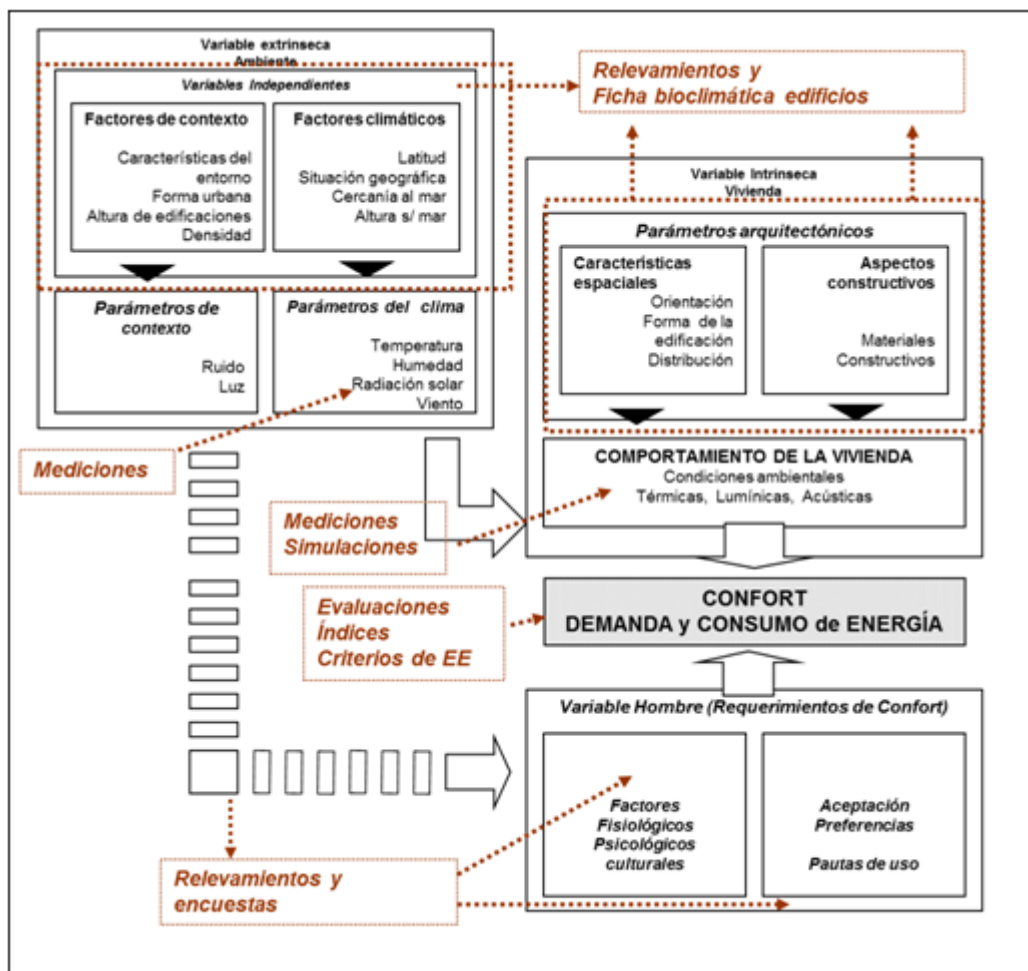


Figura 1. Variables para el análisis del comportamiento de la vivienda, demanda de energía y condiciones de confort. Modificado de Simancas, Katia.

La arquitectura bioclimática es aquella en que la calidad ambiental y la economía de energía son obtenidos mediante el aprovechamiento racional de recursos naturales, contribuyendo al equilibrio del ecosistema donde está inserta. Desde el punto de vista del proyecto y diseño arquitectónico, el enfoque plantea que el edificio debiera ser el resultado de procesos locales de cambios y mejoras del diseño a través del tiempo, que combinen pautas climáticas, culturales y tecnológicas para obtener condiciones interiores confortables. La figura 2 muestra los distintos factores a considerar y cómo las decisiones de diseño afectan el desempeño del edificio [4].

Los principios bioclimáticos se retoman a partir de la crisis energética de los 70 y evolucionan con los conceptos relacionados a calidad del ambiente y sustentabilidad. En consecuencia, en diversos países se han implementado programas, normas y proyectos demostrativos cuyo objetivo es promover tecnologías de climatización de los edificios integrando eficiencia energética y energías renovables. Estas acciones han llevado a modificar, por lo menos en parte, la práctica proyectual y constructiva creando una conciencia de la necesidad de integrar el edificio con el ambiente y el clima de su entorno. También se ha avanzado significativamente en el ámbito de la investigación, que han dado como resultado guías de diseño bioclimático para distintos programas arquitectónicos, hasta guías de diseño para la eficiencia energética específicas, por ejemplo, para la vivienda social. La incorporación del concepto bioclimático en la arquitectura actual dependerá del punto de vista del proyectista y del grado de optimización que quiera obtener.

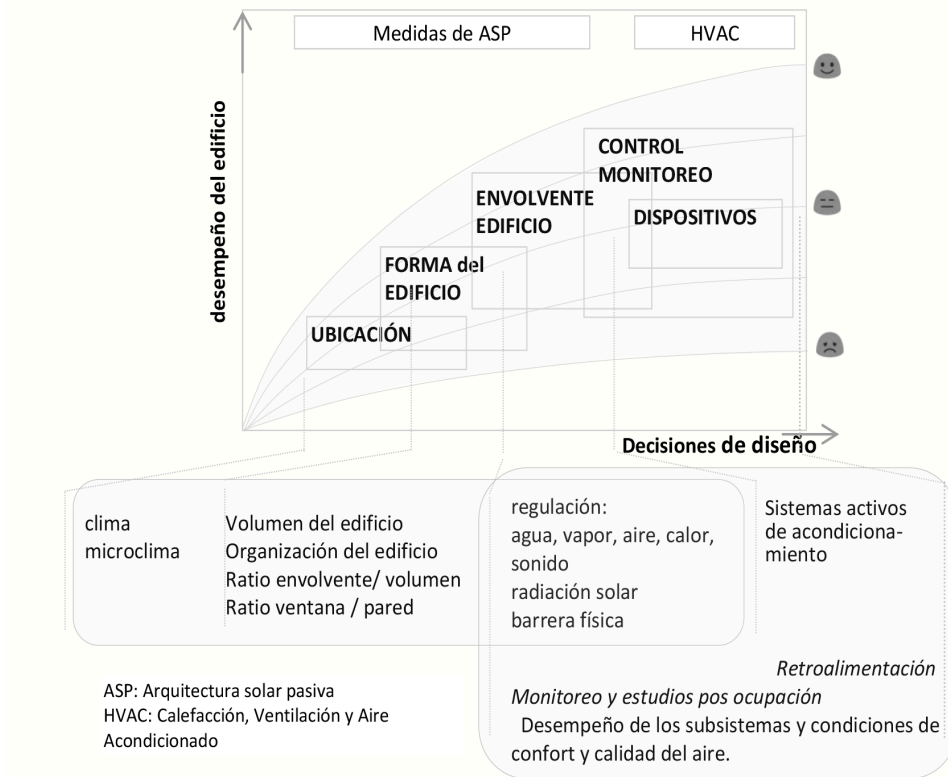


Figura 2. Representación conceptual de los efectos sinérgicos en el diseño de edificios que influyen en la calidad del proyecto, medida en términos de desempeño. Modificado de Košir, Mitja.

## **PAUTAS DE DISEÑO BIOCLIMÁTICO PARA OPTIMIZAR CONDICIONES DE CONFORT Y USO DE ENERGÍA EN EL SECTOR RESIDENCIAL, URUGUAY<sup>1</sup>**

La necesidad de lograr edificios eficientes que contribuyan a la sustentabilidad ambiental, debe tener su correlato en la adecuación de los códigos y reglamentos que regulan las características generales del proyecto. Las mejoras a estos reglamentos deben de estar fundamentadas por estudios profundos en relación al desempeño actual del parque construido en sus diferentes escalas, tipologías y características constructivas y de uso, así como al nivel de satisfacción percibido por sus ocupantes.

Este proyecto se propuso reelaborar criterios ajustados para la aplicación de las estrategias bioclimáticas, que constituyan herramientas de diseño y evaluación para el proyectista. El objetivo fue evaluar las potencialidades de eficiencia energética del diseño, a partir del ajuste de las estrategias que se utilizan más frecuentemente en clima templado. El estudio abarca 85 edificios de vivienda en Montevideo y Salto, financiados en la década del 90 por organismos públicos, que suman 4000 viviendas, donde para cada uno se realiza una ficha de relevamiento. Los criterios energéticos relevados son dimensiones del terreno y forma, volumen e implantación del edificio, factor de ocupación del suelo, número de pisos, número de viviendas por piso, espacios de transición (balcones, galerías y porches), área expuesta, orientación de las fachadas, área de huecos, tipo de protecciones solares y terminación exterior, transmitancia térmica de los cerramientos, estrategia de ventilación, tipo de calefacción y refrigeración, combustible utilizado.

La sistematización de los datos obtenidos permite definir cuatro tipologías de edificios básicas: Torre (73%); Tira (13%); Torre-tira (13%); individual-aislado (1%). Luego se procesa el análisis tipológico de las viviendas (apartamentos). Dentro de los tipos se definieron dos tipologías de apartamento: vivienda mono-orientada y vivienda doblemente orientada, ver figura 3. Para definir la muestra se fijaron una serie de criterios con el fin de acercarse a la fiabilidad respecto al universo objeto de estudio, para un nivel de confianza del 90%, y un error de  $\pm 10\%$ . Esta sistematización sirve de base a los estudios desarrollados en las sucesivas etapas del proyecto.

---

1 Proyecto financiado por PDT, Conicyt, 2006-2009. Premio Arquisur de Investigación 2011.

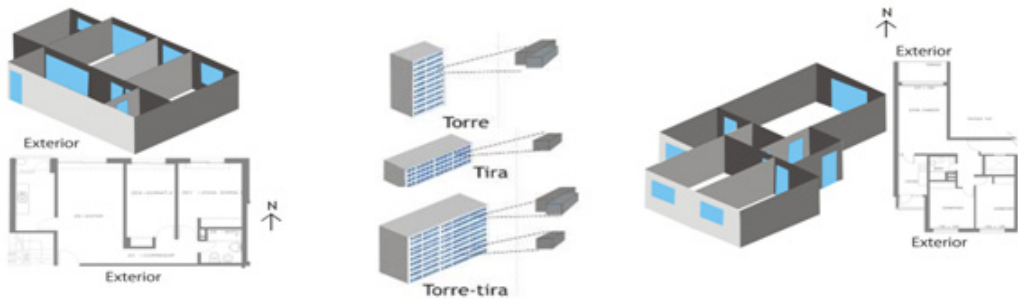


Figura 3. Tipos de edificios al centro; tipologías de vivienda, simplemente orientada a la izquierda y doblemente orientada a la derecha.

La siguiente etapa para obtener datos de calidad, consistió en seguir un protocolo de monitoreo de la temperatura de bulbo seco y HR en un dormitorio y en el estar de las viviendas seleccionadas. En simultáneo se realizaron encuestas de confort y patrones de uso de las viviendas. Los principales resultados de esta etapa para Montevideo muestran que en el período frío los apartamentos presentan temperaturas promedio que varían entre 14°C y 19°C, sin embargo el 75% de los usuarios encuestados expresó sentirse en confort térmico. Esta diferencia entre las bajas temperaturas registradas y la percepción del usuario, habla de la necesidad de ajustar los rangos de confort establecidos en función de las expectativas y capacidad de adaptación de las personas. En el período caluroso en todos los apartamentos se registran temperaturas promedio entre los 26°C y 27°C, dentro del rango de confort (22 a 27°C). Se utilizan equipos de ventilación pero no equipos de aire acondicionado, lo que permite sacar conclusiones más robustas sobre el andamio de la temperatura interior en los espacios considerados. También se constató que la oscilación de la temperatura interior es estable por la presencia de masa térmica, pero los valores se alejan del rango de confort en el período frío. Los bajos valores de temperatura se explicarían por la poca generación de calor interior (baja ocupación, calefacción intermitente, baja ganancia solar) y por las pérdidas de calor producidas a través de la envolvente. Se registran mayores valores de amplitud térmica diaria en las viviendas con doble orientación.

Al monitoreo de las condiciones reales sobre las tipologías seleccionadas le siguió la simulación con el programa EnergyPlus con el objetivo de obtener los resultados necesarios para analizar tanto el comportamiento térmico de los modelos como su consumo de energía eléctrica para obtener condiciones de confort todo el año (calefacción y refrigeración). Lo mismo se realizó para las diferentes variantes o modificaciones introducidas a las distintas estrategias de diseño aplicadas. Además los

datos de salida obtenidos en cada caso permitieron comparar las horas de confort y el consumo energético alcanzado en la vivienda monitoreada y el modelo aplicado. Las variables elegidas tanto para el período caluroso como el frío fueron: orientación solar, factor de huecos, transmitancia térmica y factor solar de vidrios, transmitancia térmica de cerramientos opacos, absorptancia de superficies exteriores, tipo de protección solar, carga de ocupación y pautas de uso de las viviendas. En una primera etapa modifica cada una por separado, dentro de un rango o criterio de aplicación, para analizar su impacto en el comportamiento higrotérmico del modelo; las otras variables permanecen fijas. A partir del análisis de estas simulaciones, posteriormente se desarrolla un modelo ideal que integra todas las estrategias con el criterio que supuso menor consumo de energía.

Las simulaciones realizadas dieron por resultados consumos mínimos para Montevideo de 20 Kwh/m<sup>2</sup> año para las viviendas con condiciones más favorables hasta máximos de 45 Kwh/m<sup>2</sup> año para las que ofrecen condiciones desfavorables. Para Montevideo las estrategias con mayor peso en el ahorro de energía son las que atienden los problemas del frío (transmitancia térmica y factor de hueco, asociadas al área expuesta y la masa térmica). Las simulaciones térmicas mostraron el bajo impacto del aislamiento sólo en paredes sobre la reducción del consumo de energía anual. La revisión bibliográfica evidencia la importancia del aislamiento térmico como estrategia para el control del clima interior y el consumo de energía en climas fríos, pero esta estrategia resulta insuficiente para evitar problemas de sobrecalentamiento en climas más cálidos aunque se la asocie a estrategias de protección solar y ventilación. Por esta situación se muestra también cómo al aumentar el espesor de aislante el consumo en refrigeración no disminuye sustancialmente. A partir de un factor de hueco superior al 30% los consumos de energía para calefacción y refrigeración se incrementan proporcionalmente. Para los problemas del calor, las estrategias con mayor impacto sobre el ahorro de la energía son el factor de área vidriada o de huecos, la orientación solar de los cerramientos vidriados y las protecciones solares. En Salto también el color de las superficies es determinante en el consumo de energía total de la vivienda, específicamente en refrigeración. Estas estrategias siempre están asociadas a la masa térmica.

La figura 4 muestra los porcentajes de ahorro posibles de lograr con la aplicación de las estrategias de diseño estudiadas y según su interrelación y el ratio utilizado. Por ejemplo, en el período frío se puede obtener hasta un 30% de ahorro de energía si se aplican en simultáneo las estrategias de orientación solar, factor de huecos, transmitancia media de la envolvente y masa térmica, dentro de los valores óptimos o del modelo ideal.

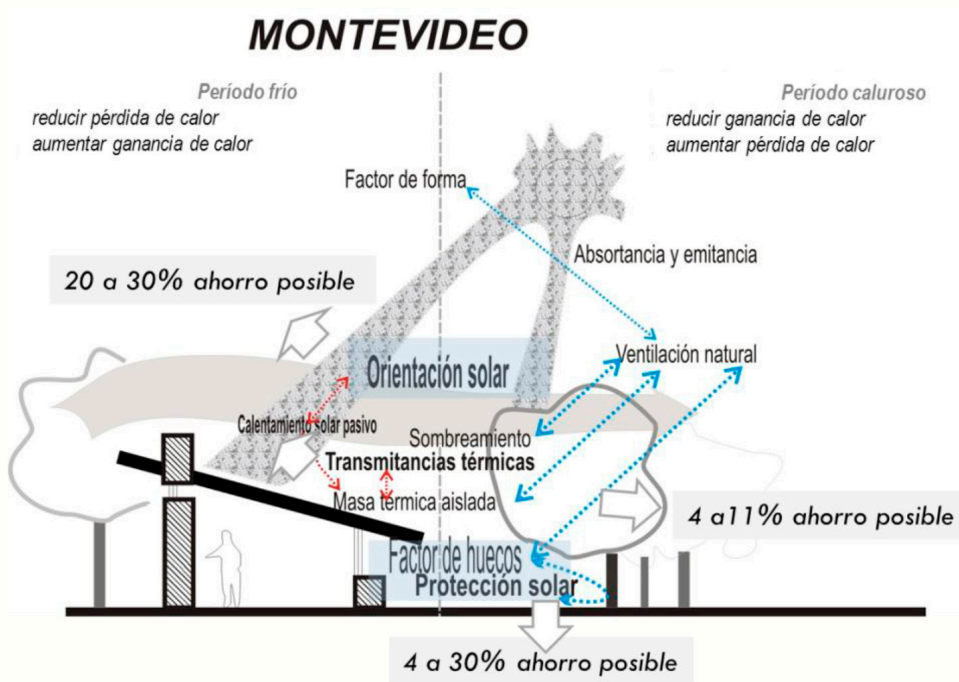


Figura 4. Impacto de las estrategias de diseño sobre el ahorro de energía para Montevideo.

## TRANSFERENCIA DE LOS CONOCIMIENTOS GENERADOS

En Uruguay no existían reglamentaciones sobre eficiencia energética en edificaciones, pero en el marco del Proyecto Nacional de Eficiencia Energética que comenzó en 2005, la Intendencia de Montevideo decidió incorporar a la normativa departamental en el Volumen XV- Planeamiento de la Edificación, el Capítulo: “De la reducción de la demanda de energía para acondicionamiento térmico de vivienda nueva”. Esta investigación aportó los datos para la definición de la normativa, vigente desde febrero de 2010. En este marco se decidió adoptar el valor de transmitancia térmica para cerramientos opacos  $U \leq 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$  como límite máximo. Asimismo, se limita el factor de huecos y la transmitancia térmica de ventanas según la orientación solar, por su impacto sobre el consumo de energía en calefacción. Se fija un valor de factor solar máximo de los huecos para reducir la demanda de energía en refrigeración.

Este fue un primer paso que muestra cómo la investigación puede dar insumos a la producción nacional en el sector edificación.

## REFLEXIONES / CONTINUACIONES

Por tratarse de una investigación basada en una muestra por conveniencia, es necesario confrontar el enfoque y ajustar la metodología y los instrumentos a escenarios más complejos. Las preguntas de investigación deben extenderse a otro nivel para profundizar las relaciones estudiadas y representar la variabilidad de escenarios, más allá de la frecuencia con que aparecen, a los efectos de caracterizar demandas de energía en el sector residencial a nivel nacional.

Los resultados muestran la importancia de profundizar en aspectos sustanciales que representen, esta vez, a distintos escenarios del sector residencial en Uruguay:

- el peso relativo que tienen las distintas estrategias de diseño sobre el consumo de energía y las variaciones del clima interior;
- la relación entre variable de diseño y estrategia bioclimática de confort, ponderada por su desempeño energético y costos, no solo iniciales;
- los criterios de evaluación e indicadores de consumo de energía,
- los factores socioculturales, incluidos los que contemplan la desigualdad que se manifiesta también como ineficiencia energética.

Para dar continuidad a una parte de estos intereses, en 2018 comenzamos a desarrollar el proyecto Eficiencia energética en el sector residencial. Situación actual y evaluación de estrategias de mejoramiento para distintas condiciones climáticas en el Uruguay<sup>2</sup>.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ministerio de Educación y Cultura, Programa de Desarrollo Tecnológico, por el financiamiento del proyecto 1 y a la Agencia Nacional de Investigación e Innovación por la financiación del proyecto 2. También a las instituciones y familias que permitieron realizar los estudios de campo por su tiempo y colaboración.

---

<sup>2</sup> Financiado por ANII Fondo Sectorial de Energía 2016, en conjunto con docentes del Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial de la Facultad de Ingeniería de Udelar, responsable P. Curto.

## REFERENCIAS

- [1] Ministerio de Industria, Energía y Minería - MIEM (2017) Uruguay, *Balance energético nacional 2017* Disponible en [https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/presentacion\\_ben2017\\_final.pdf](https://www.miem.gub.uy/sites/default/files/presentacion_ben2017_final.pdf)
- [2] Agencia Internacional de la Energía – AIE (2015) *Indicadores de Eficiencia Energética: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas*, OCDE/AIE.
- [3] Simancas, K. (2003) *Reacondicionamiento bioclimático de viviendas de segunda residencia en clima mediterráneo*, Tesis doctoral UPC,. Publicada en <http://www.tdx.cat/TDX-0216104-100306>
- [4] Košir, M. (2016) *Adaptive Building Envelope: An Integral Approach to Indoor Environment Control in Buildings*, Editor: INTECH. Capítulo disponible en <https://www.researchgate.net/publication/309014377>

## **PARTE III**

# **ENERGÍA SOLAR Y OTRAS FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE**

# GERAÇÃO DISTRIBUÍDA FOTOVOLTAICA EM UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO: TECNOLOGIA, SOCIEDADE E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Thiago Matheus Martins de Moraes<sup>1</sup>, Gabriela Maia Camargo<sup>1</sup>, André Kakiuthi<sup>1</sup>,  
Felipe Fernandes Jacintho<sup>2</sup>, Rubens Alves Dias<sup>1</sup>, José Feliciano Adami<sup>1</sup>

## RESUMO

A gênese deste trabalho está no projeto intitulado Ponto Iluminado, o qual consiste na iluminação de um ponto de ônibus situado em frente da Universidade Estadual Paulista (UNESP) *campus* de Guaratinguetá – FEG, através da geração de energia solar fotovoltaica *off grid* (sistema isolado), sendo este colocado em operação com sucesso. Diante do exposto, um novo projeto de ampliação do Ponto Iluminado, denominado FEG-Sustentável, encontra-se em desenvolvimento nesta faculdade e prevê a criação de um *campus* sustentável com um modelo de gestão consciente. Este projeto consiste na implementação de uma central de geração de energia solar fotovoltaica com tecnologia *on-grid* (ligada à rede), na modernização do sistema de iluminação e abrangendo, também, ações ligadas à gestão de resíduos sólidos e à economia de água dentro da FEG, trazendo ao *campus* uma economia mensal superior a R\$ 17.500,00. O escopo do presente projeto também contempla atividades que visam a esclarecer a sociedade sobre questões ambientais, por meio de campanhas de educação e conscientização sobre o uso racional de energia, sustentabilidade e

---

1 Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Campus de Guaratinguetá – DEE – Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – 12.516-410 – Guaratinguetá, SP, Brasil.

2 Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Ciências Médicas – Departamento de Farmacologia - Rua Alexander Fleming, s/n – Cidade Universitária – 13.083-881 – Campinas, SP, Brasil.

Mail: [thig3mor@gmail.com](mailto:thig3mor@gmail.com); [jose.feliciano@unesp.br](mailto:jose.feliciano@unesp.br)

seus impactos na saúde e cotidiano, e o aprimoramento das tecnologias de sistemas fotovoltaicos já empregadas no Ponto Iluminado. O FEG.

Sustentável cria dentro da FEG um modelo de gestão que permite um melhor gerenciamento dos recursos financeiros, de modo a sustentar um ciclo virtuoso de investimentos a curto, médio e longo prazo, trazendo retornos socioambientais e financeiros e viabilizando novos investimentos.

## INTRODUÇÃO

A Universidade Estadual Paulista (UNESP) é uma das cerca de 115 universidades que oferecem ensino superior público gratuito no Brasil. Esse modelo de educação pública, combinado com políticas de permanência estudantil e cotas para estudantes de baixa renda, pretende disseminar o conhecimento acadêmico e a experiência em todos os estratos da sociedade brasileira. A universidade pública é o núcleo de pesquisa no Brasil e oferece aos estudantes a oportunidade de uma graduação globalizada, por meio de convênios com instituições no exterior. Além disso, a UNESP é uma entidade multicampi: com 23 unidades em 22 cidades diferentes no estado de São Paulo, sendo a universidade do estado mais acessível geograficamente aos seus 37.388 estudantes de graduação e 13.206 de pós graduação [1].

Em virtude dos desafios econômicos, no sentido de redirecionamento de capitais no atendimento das necessidades da sociedade brasileira, são impostas várias restrições de ordem orçamentária na UNESP, bem como de outras instituições. E a inserção do campus de Guaratinguetá como um cogenerador de energia por painéis fotovoltaicos não só promove a sustentabilidade da universidade em termos da preservação dos recursos naturais, mas também em termos econômicos, permitindo, assim, a realocação de recursos para outras atividades que estão perdendo orçamento em virtude das restrições de ordem econômica e financeira, como pesquisa, extensão universitária e internacionalização.

O aproveitamento de energia solar é uma tendência na atualidade, sendo, portanto, o principal foco de muitos grupos de discussão [2]. No entanto, não é algo recente ou temporário. A energia solar tem sido uma solução para comunidades carentes que não têm acesso à eletricidade em todo o mundo, e não apenas a essas comunidades, mas também a cidades em geral que buscam fontes alternativas, além das tradicionais [3].



Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015 [6], cerca de 64% de toda a energia produzida no País vem de usinas hidrelétricas que, devido a questões geográficas, estão longe dos grandes centros de consumo. São Paulo, o estado que consome mais energia no País, importa 57% de sua energia de outros estados, de acordo com a Secretaria Estadual de Minas e Energia [7].

Como consequência desse transporte de energia das estações de geradoras distantes dos consumidores, 15,1% (93 TWh) de toda a energia produzida no Brasil é perdida no processo de transmissão, o que é equivalente a quantidade de energia que todos os centros comerciais do país consomem juntos, de acordo com o BEN de 2015.

Embora o país tenha o terceiro maior potencial hidrelétrico, possuindo 10% de todos os recursos hídricos no mundo, este se mostrou insuficiente, dada a crescente necessidade de energia elétrica do mercado interno.

A Agência Nacional de Energia Elétrica, a ANEEL, tem incentivado a microgeração e geração distribuída próximo aos consumidores, assim, reduzindo as cargas demandadas dos sistemas de transmissão, os quais não recebem investimentos consideráveis há anos.

## 2. POTENCIAL DE GERAÇÃO SOLAR BRASILEIRO

Devido à sua localização próximo a linha do equador, o Brasil tem um dos maiores potenciais de geração de energia solar do mundo. Seu clima tropical garante grandes períodos de irradiação durante todas as estações do ano.

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a insolação diária varia de 4,5 kWh/m<sup>2</sup> no Sul, a região mais distante da linha do equador, para 6,3 kWh/m<sup>2</sup> no norte do País, porém esse grande potencial é muito pouco utilizado devido às poucas iniciativas na área. A Alemanha, por exemplo, um dos maiores produtores mundiais de energia solar, tem um potencial de geração 40% menor que o Brasil [8].

Com iniciativas dentro das universidades e um intenso trabalho para aumentar a visibilidade deste tipo de geração de energia para a população em geral, a ANEEL publicou a Resolução Normativa 482 que tem como objetivo facilitar a conexão de pequenos geradores à rede elétrica.

Na Reunião de Sustentabilidade da UNESP em 2017, o secretário de meio ambiente do estado de São Paulo estabeleceu como um dos seus principais objetivos o estudo de métodos para tirar proveito deste ótimo potencial de geração solar presente no País e, com isso, reduzir a emissão de poluentes provenientes da geração de energia nas usinas termelétricas, reduzindo, assim, a importação de energia de outros estados da federação.

### 3. O CUSTO DA ENERGIA NO BRASIL

Apesar de ser a nona maior economia do mundo [9], o Brasil tem a sexta energia elétrica mais cara do planeta. Em fevereiro de 2017, o custo da eletricidade no País atingiu R\$ 402,26 (US\$ 126.30) por MWh. O valor é 46% superior à média internacional de US\$ 86,58 por MWh [10].

A necessidade por energia continua a crescer a um ritmo mais rápido do que a oferta, o que ocasiona o crescimento substancial do preço desse serviço. De acordo com a Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro (Firjan), o custo da energia para as indústrias aumentou 59,3% nos últimos três anos.

Devido ao aumento do custo da produção com o acionamento de usinas termelétricas, que queimam principalmente combustíveis fósseis para a geração de energia, para suprir a necessidade energética, um sistema de cobrança de tarifas adicional chamado “bandeiras tarifárias” foi implementado nas contas de energia, o que causou o aumento o preço da energia no país.

### 4. OS EFEITOS DA EMISSÃO DE POLUENTES

A poluição ambiental tem um efeito direto sobre o comportamento humano e a saúde. É um ciclo que reflete em todas as áreas da vida, ciência, conhecimento, portanto, afeta tanto o setor público quanto o privado.

A poluição do ar favorece o surgimento de doenças respiratórias na população, que frequentemente passam de aguda a crônica. Pode-se destacar a pneumonia, bronquite, asma, intoxicação, câncer e aquelas associadas aos vírus [11]. Assim, a geração de energia através de painéis solares fotovoltaicos, que tem emissão de poluentes considerada nula, melhora indiretamente a qualidade de vida da população, pois

deixa-se de utilizar energia proveniente das grandes usinas geradoras, que possuem maiores índices de emissão de CO<sub>2</sub>.

Um estudo realizado pela Universidade de Lund, Suécia onde foram recolhidos dados de 17 estudos anteriores e onde foram analisados 9 países europeus, estabelece uma relação entre a incidência de câncer de pulmão e o tempo de exposição da população à poluição a longo prazo. Concluiu-se que na média de 12,6 anos, 2.095 casos de câncer de pulmão foram diagnosticados, sendo estatisticamente comprovada a relação direta entre a poluição ambiental e a doença [12].

## 5. OS MALEFÍCIOS DAS LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO E DA POLUIÇÃO LUMINOSA

As lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*), diferentemente das de vapor de sódio, não possuem metais pesados e não emitem raios ultravioleta (UV), que causam câncer de pele e outros tumores no corpo humano, além de serem nocivos as córneas. Entre as alterações, as mais comuns são: catarata, fotoceratite e degeneração macular relacionada com a idade [13].

Outro ponto a ser considerado quando o assunto é iluminação pública, refere-se à poluição luminosa -alteração do padrão natural de claro e escuro ambiental- é dividida em três classificações: brilho do céu, ou *sky glow*; ofuscamento (*glare*); e luz intrusa (*light trespass*). Cada uma dessas poluições provoca um impacto ambiental, social e econômico, e está presente em 18,7% do mundo [14].

A iluminação excessiva tem impactos negativos nos ciclos migratórios, alimentares e reprodutivos de muitas espécies de animais e plantas. O uso de iluminação artificial com lâmpadas de vapor de sódio ou fluorescentes atrai insetos causadores de doenças como malária, dengue e zika. Além disso, pode causar cansaço visual, acarretando em sonolência, dor de cabeça e estresse. O excesso de iluminação artificial aumenta a incidência e desenvolvimento de alguns tipos de doenças: câncer de mama e alterações metabólicas resultante em diabetes tipo II, obesidade e doenças como malária e dengue, zika [14].

A escolha correta de lâmpadas e o seu direcionamento em relação ao solo, são suficientes para diminuir e evitar a poluição luminosa, além de diminuir gastos de energia elétrica. Estima-se que cerca de 30% dos gastos em energia para iluminar o ambiente externo é desperdiçado com a poluição luminosa. A iluminação correta é onde a luz incide única e exclusivamente na área que precisa ser iluminada

no tempo necessário e com o uso de lâmpadas que oferecem definição de cores corretas para cada situação [15].

## 6. A EDUCAÇÃO E A SOCIEDADE

Uma crescente preocupação a respeito do desenvolvimento sustentável das nações tem sido pauta de discussões em todo o mundo. Aflitas com a grande emissão de poluentes na atmosfera que tem degradado o meio ambiente desde o século XVIII as nações têm investido cada vez mais em programas e ações que visam à redução na emissão de poluentes e a educação de suas populações no que tange o uso racional de recursos [16].

Em tempos de crises energéticas e mudanças nos padrões de consumo, como acontece atualmente no Brasil, é primordial que a população seja educada quanto ao uso correto dos recursos energéticos, ou seja, se os utilizam de maneira adequada e de forma que minimize os desperdícios.

É responsabilidade inerente ao engenheiro, assim como da instituição que o forma, desenvolver e aprimorar métodos que visam a proteção do meio ambiente e dos recursos naturais sem que a economia ou o conforto da população seja afetado. Também cabe ao estado e as suas instituições instruírem e educar a população.

Levando em consideração que os laboratórios são uma importante ferramenta, cuja função é introduzir o aluno na aplicação de teorias e conceitos vistos em uma sala de aula de forma dinâmica e interativa e promover a absorção do conhecimento [17], ao agregar a universidade pública, seus alunos e a comunidade, o projeto aqui desenvolvido contribui como um grande showroom onde a população pode se inteirar com os projetos da faculdade e aprender em conjunto com seus estudantes.

Segundo Piaget, “O desequilíbrio cognitivo funciona como um terreno para aprender e cada nova situação contribui para a promoção do desenvolvimento. Conhecimento e desenvolvimento, os processos são dois lados da mesma moeda, eles são estabelecidos mutuamente” [18].

## A INICIATIVA PONTO ILUMINADO E O PROJETO FEG-SUSTENTÁVEL

Em 2014 foi criado e em 2016 implementado o projeto “Ponto Iluminado” que utiliza energia solar para gerar energia elétrica para iluminar parte do caminho dos transeuntes, próximo à Universidade, o que, de acordo com a polícia local, reduziu a taxa de criminalidade na área. A figura 2.1 mostra, o ponto de ônibus em frente ao campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá (FEG) antes e após a implantação do sistema de iluminação suprido por energia proveniente de um sistema fotovoltaico isolado (*off-grid*).

Tal sistema é constituído por um painel fotovoltaico, uma bateria dimensionada para suprir as cargas de iluminação, todas de 12 V para evitar o uso de inversores e baratear a implementação, por 2 dias, um sistema de proteção com disjuntores, fusíveis e aterramento para garantir a segurança dos usuários e um controlador de carga com memória para a aquisição de dados diários, semanais, mensais e anuais para estudar seu funcionamento ao longo do tempo.



Figura 2.1 - Ponto de ônibus antes e depois da implementação.

O projeto Ponto Iluminado recebeu grande prestígio a nível nacional e internacional, sendo divulgado em jornais, revistas, estações de rádio, na televisão e em sites de instituições de renome, como Eletrobrás e IEEE [19].

Em outubro de 2016, o projeto foi apresentado em uma das maiores conferências mundiais de tecnologia voltada à humanidade que aconteceu em Seattle, EUA e ganhou maior importância sendo o projeto classificado como um dos melhores do mundo na categoria Energia.

A estimativa média de insolação para o Vale do Paraíba é de 6 horas diárias [20], porém o projeto “Ponto Iluminado” possibilitou uma profunda análise in loco.

Em tal análise, foram coletados os dados de geração durante 24 meses através dos equipamentos de medição, apresentados na figura 2.2, e, munido da potência do painel e de todas as características do sistema, calculou-se o tempo real de insolação na FEG que, em virtude de sua localização e características de altitude e construções ao entorno, é de 5 h.



Figura 2.2 - Painel e equipamentos do projeto “Ponto Iluminado”.

Procurando dar continuidade na iniciativa Ponto Iluminado, em março de 2017 deu-se início ao projeto FEG-Sustentável, cujo objetivo é a criação de um campus sustentável dentro da UNESP atuando em 5 áreas principais: Geração de energia limpa, Eficiência energética, Gestão de resíduos sólidos, Economia de água, Conscientização da população.

## 1. GERAÇÃO DE ENERGIA LIMPA

Para a geração da energia elétrica são utilizados painéis fotovoltaicos de 320 Wp e considerando 5 h de insolação média por dia, com base nos dados obtidos pelo Ponto Iluminado dentro da FEG, tem-se que 16 painéis fotovoltaicos terão uma geração aproximada de 25.600 VAh/dia.

Tal energia gerada pelos módulos fotovoltaicos é direcionada à rede elétrica da FEG através de um inversor senoidal on-grid com capacidade de 5.200 VA, estando o mesmo conectado aos quadros de proteção e controle apresentados na figura 2.3, que garantem a segurança e o correto funcionamento do sistema projetado e montado pela equipe.



Figura 2.3 - Quadros de proteção e comando.

Realizando uma análise dos dados de insolação mensal das 3 estações meteorológicas na cidade de Guaratinguetá, apresentados na tabela 1, pode-se determinar a insolação média mensal [21].

Tabela 1. Insolação média mensal em Guaratinguetá.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Estação 1	5,56	5,79	4,91	4,48	3,68	3,41	3,55	4,51	4,67	5,15	5,24	5,87
Estação 2	5,36	5,62	4,81	4,38	3,61	3,39	3,51	4,48	4,59	5,03	5,08	5,66
Estação 3	5,65	5,86	4,98	4,47	3,67	3,42	3,55	4,49	4,61	5,16	5,3	5,93
Media	5,52	5,76	4,90	4,44	3,65	3,41	3,54	4,49	4,62	5,11	5,21	5,82

Tendo como base tais dados e tendo que a eficiência do painel fotovoltaico utilizado é 16,5% e sua área é 1,96 m<sup>2</sup>, pode-se utilizar a equação 1 para determinar a geração diária por painel, apresentada na Tabela 2 [21].

$$GD_{\text{painel}} = E_{\text{ger}} * A_{\text{painel}} * Ins_{\text{med}} \quad (1)$$

Onde:

$GD_{\text{painel}}$  = Geração diária de um painel fotovoltaico [kWh]

$E_{\text{ger}}$  = Eficiência de geração do painel fotovoltaico [%]

$A_{\text{painel}}$  = Área do painel fotovoltaico [m<sup>2</sup>]

$ns_{\text{med}}$  = Insolação média diária no mês de referência [kWh/m<sup>2</sup>.dia]

Tabela 2. Geração diária por painel.

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Geração por painel [kWh/dia]	1,77	1,84	1,57	1,42	1,17	1,09	1,13	1,44	1,48	1,64	1,67	1,86
Geração [kWh/dia]	849	885	753	683	561	523	543	690	710	786	800	894

Assim, pode-se calcular que com os 16 painéis do projeto em 30 dias de geração é possível trazer uma economia mensal que pode superar 850 kWh, conforme apresenta a figura 2.4.

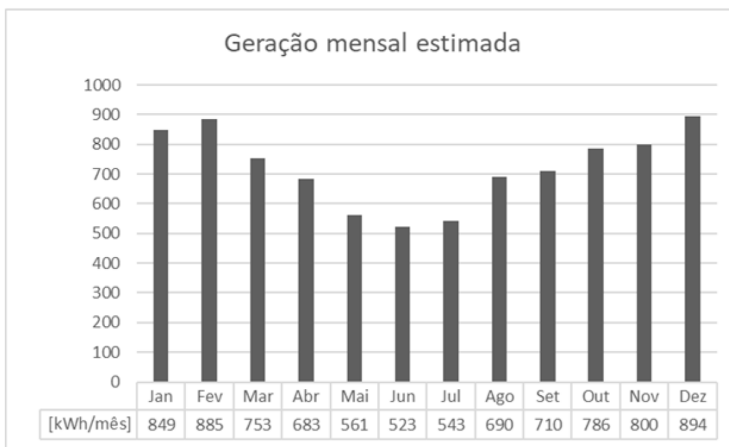


Figura 2.4 – Análise da geração mensal de energia estimada pelo método da insolação.

Garantindo melhores condições para medições e melhor resiliência para eventuais manobras, a proteção de cada painel fotovoltaico é individual dentro dos dois conjuntos de painéis existentes, um deles com 9 painéis (2900 Wp / 330 Vdc) e outro com 7 (2250 Wp / 260 Vdc), assim, possibilitando a análise individual dos conjuntos fotovoltaicos visto que possuem características de instalação distintas.

O sistema de proteção modularizado, apresentado no diagrama da figura 2.5, mostra que é possível retirar e inserir painéis fotovoltaicos sem que todo o sistema seja desligado para tanto, já que os disjuntores e fusíveis para manobra são divididos em três segmentos até a entrada do inversor. Além do que o sistema permite um monitoramento individual (painel a painel) que traz ao projeto a possibilidade de analisar com maior riqueza de detalhes as características individuais de cada painel e buscar formas de alcançar os melhores resultados possíveis em termos de geração de energia.

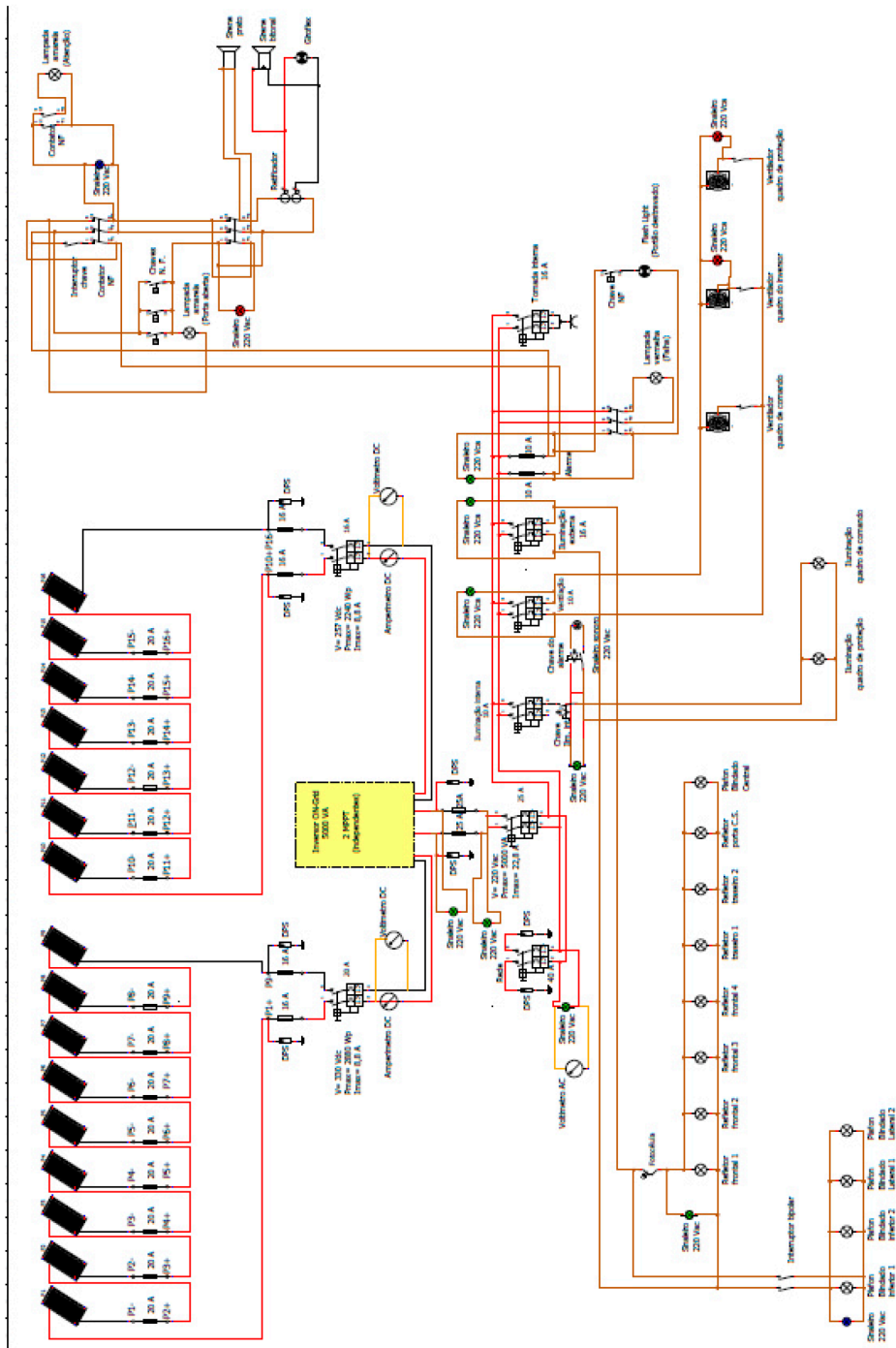


Figura 2.5 - Diagrama elétrico

Visando a proteção ampla contra descargas atmosféricas o sistema, além de aterrado em suas partes condutoras, possui dispositivos de proteção contra surtos individuais para cada um dos módulos de painéis fotovoltaicos tanto no positivo quanto no negativo e nas duas fases na saída do inversor.

Para o acondicionamento dos componentes, foi elaborada uma estrutura resistente projetada para suportar os mais variados eventos climáticos e possíveis intervenções humanas, garantindo, assim, a segurança e a durabilidade de todos os componentes do projeto, conforme apresentado na figura 2.6.

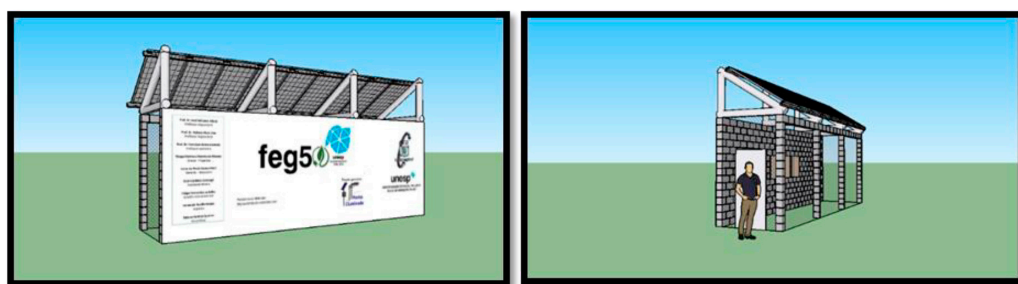


Figura 2.6: Showroom de energias renováveis.

No que se refere ao cabeamento, foi adotada a temperatura ambiente de 50°C, estimando a pior situação no caso de um dia quente de verão e que a ventilação forçada dos quadros de proteção falhe, mesmo contando com três exaustores individuais que são capazes de realizar a ventilação dos três quadros mesmo com apenas um em funcionamento.

Conforme o fabricante, quando trabalhando individualmente a corrente máxima em cada painel fotovoltaico não excede 16 A, estando estes em série na configuração utilizada no projeto, a corrente máxima de cada conjunto de painéis é inferior a 9 A.

Também tendo como base os dados de placa do produto, o fusível NH individual de cada painel utilizado para a proteção e modularização do sistema foi de 20 A, portando a seção do condutor entre os painéis e os quadros de comando foi calculada prevendo esta corrente de surto, proteção esta que, em dias quentes, atuará antes da corrente nominal, mas sem interromper o sistema quando o funcionamento estiver normal, conforme mostra o figura 2.7 com o fator de temperatura ambiente em relação a atuação dos fusíveis utilizados.

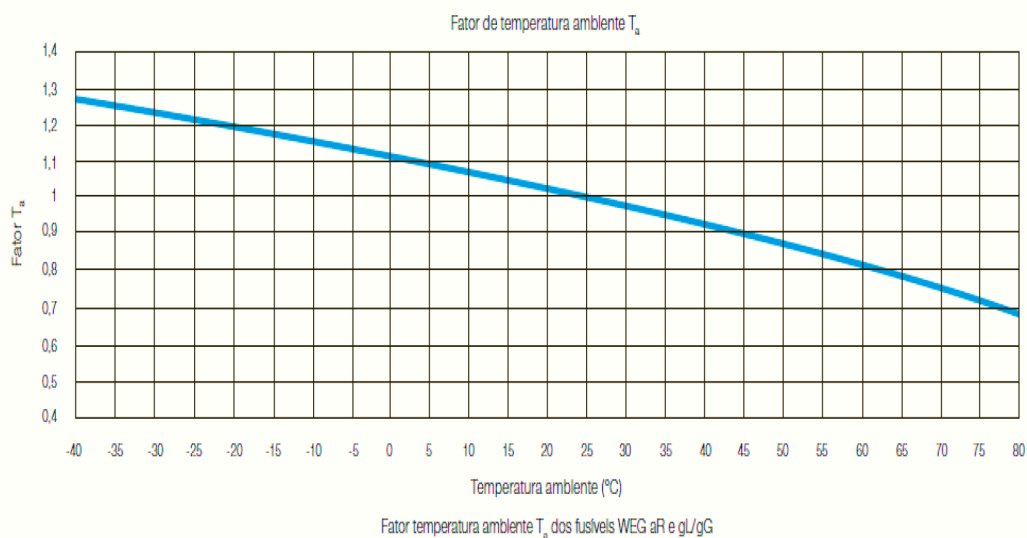


Figura 2.7. Fator de temperatura dos fusíveis utilizados.

Aplicado o fator de correção pela temperatura máxima estimada, supondo a utilização de cabos com revestimento de policloreto de vinila (PVC), pior caso, a corrente que o cabo deveria suportar pelo método da ampacidade seria 28 A. Para a conexão entre os painéis e o quadro de proteção, que estarão a uma distância pequena, foi escolhido o cabo de 4 mm<sup>2</sup> que, nas condições de instalação, possui capacidade para até 30 A.

Os condutores utilizados para as conexões internas entre os quadros serão de 2,5 mm<sup>2</sup>, visto que o sistema de proteção está projetado para atuar em correntes superiores a 16 A. Os condutores utilizados para iluminação interna dos quadros de comando, ventilação e sinaleiros, sistemas que demandaram correntes inferiores a 2 A, serão de 1,5 mm<sup>2</sup>.

Fazendo a análise dos dados geográficos da cidade de Guaratinguetá e utilizando os métodos de otimização da geração estudados através de pesquisas, os painéis serão posicionados com a 19° a leste do norte geográfico e com uma inclinação de 27° em relação ao solo [22].

Cabe destacar que toda esta estrutura de geração foi projetada de forma que possa ser facilmente implementada em outros campi da UNESP e, também, em demais localidades dentro da própria FEG, como o prédio da biblioteca.

## 2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O atual sistema de iluminação do campus consiste em lâmpadas de vapor de sódio de 250 W cada, que exigem reatores, capacitores e ignitores para o seu correto funcionamento, sendo que a potência média do conjunto medido *in loco*, com o uso de analisador de qualidade de energia em postes de toda a área que o projeto abrange, foi de 325 VA e possui uma taxa de distorção harmônica superior a 27%, conforme apresentado na figura 2.8. Distorção harmônica esta que, além de prejudicar a qualidade da energia na rede do Campus, ainda contribui para a diminuição do fator de potência, o que representa uma influência direta na fatura de energia elétrica posto que o baixo fator de potencia é tarifado no Brasil.

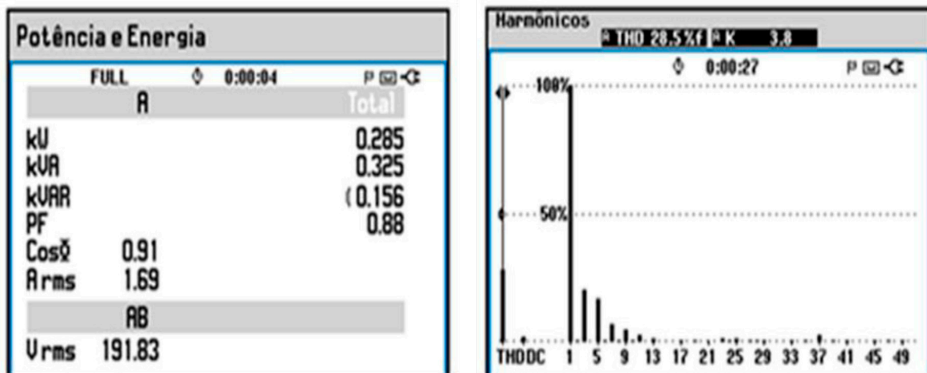


Figura 2.8 - Análise do sistema de iluminação atual.

Conforme constatado em testes *in loco*, postes com as lâmpadas de vapor de sódio são alimentados por circuitos com cabos bipolares de  $1,5 \text{ mm}^2$  e a corrente que passa por eles é próxima do máximo suportado pelo cabo, de modo que a perda estimada é de 10% por poste de iluminação. Para fins de cálculo, a potência de 325 VA por poste foi adotada.

As lâmpadas com tecnologia de vapor de sódio, além das características elétricas apresentadas, possuem um baixo índice de reprodução de cores (IRC) podendo chegar a 35%, o que dificulta a identificação de objetos e pessoas e, por consequência, reduz a segurança dentro do campus.

As lâmpadas LED utilizadas pelo projeto FEG-Sustentável possuem certificação do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO), garantindo a sua qualidade, sendo o fator de potência é igual ou superior a 0,92, e possuem potência

nominal de 45 W. Testes foram realizados em todos os lotes de lâmpadas antes de sua instalação no sistema de iluminação externo, de forma a ratificar estes parâmetros.

Além dos testes laboratoriais e a análise prévia por softwares, a implementação, conforme apresentado na figura 2.9, comprova sua eficiência luminosa.

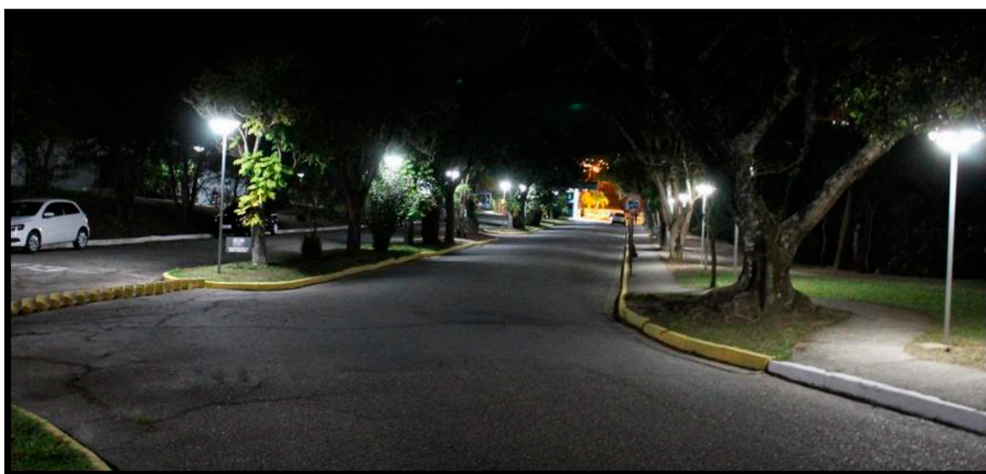


Figura 2.9 - Novo sistema de iluminação próximo à portaria principal do campus.

Seguindo as regras da NBR 5101 [23], além dos testes realizados nos locais onde se pretende instalar o novo sistema de iluminação, foram realizadas pesquisas com os transeuntes e análises com o auxílio do software DIALux. De acordo com as condições apresentadas na NBR 5101, as vias da FEG podem ser classificadas como vias locais de tráfego leve e baixo fluxo de pedestres, sendo assim, a iluminância média mínima que atende a norma é de 5 Lux. Conforme é apresentado nas figuras 2.10a e 2.10b, os testes realizados no software demonstram, por amostragem, que o novo sistema se encontra de acordo com a norma.

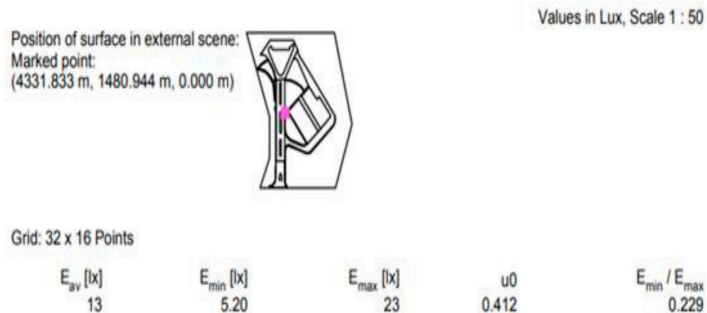


Figura 2.10a: Amostra do sistema testada no DIALux.

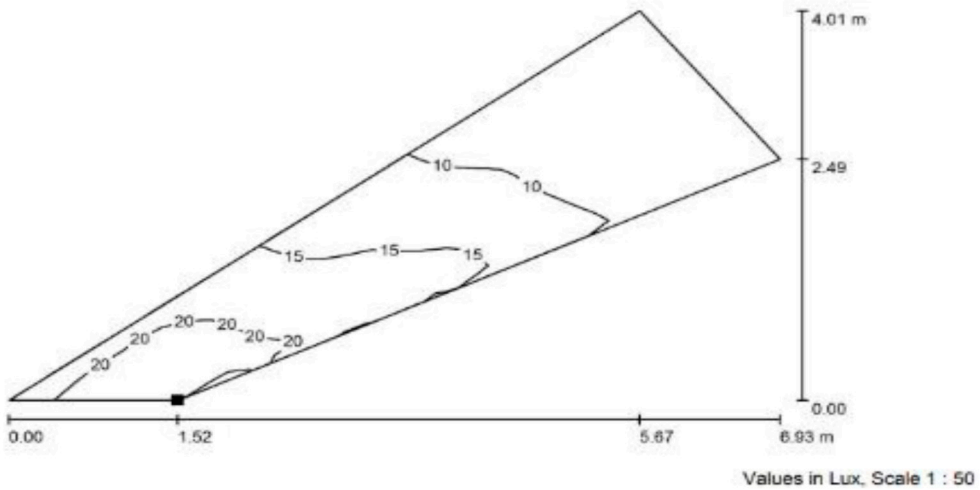


Figura 2.10b: Amostra do sistema testada no DIALux.

Já tendo comprovado a eficiência do sistema através de modelos e com a substituição de algumas lâmpadas a caráter de teste, foi realizada uma pesquisa de opinião com pedestres e motoristas que trafegam pela região onde o sistema está em teste. Nesta pesquisa, 90,3% dos entrevistados acreditam que, em termos gerais, o sistema com as lâmpadas tipo LED é melhor do que o sistema de iluminação anterior.

Com isso, a modernização do sistema de iluminação do campus, além de trazer grande economia, benefícios para a rede elétrica, para a saúde dos transeuntes e para o meio ambiente, ainda atende de forma satisfatória os que fazem uso das vias internas do campus. Ressalta-se, ainda, que a modernização destes postes facilitou e tornou menos dispendioso em mais de 35% a manutenção destes, além de possuírem melhores condições para o planejamento da manutenção preventiva, o que, traz economia e inúmeros benefícios para o setor de manutenção da instituição.

### 2.1. Combate à poluição luminosa

Além da economia de energia elétrica de aproximadamente de 85%, a menor taxa de distorção de harmônicos e a não emissão de raios UV, o novo sistema implementado pelo projeto em uma área superior a 85.000 m<sup>2</sup>, através de ações envolvendo toda a comunidade local, possui a iluminação necessária para que o caminho dos transeuntes seja iluminado com alto índice de reprodução de cores e com redução nas áreas de penumbra, sem causar grande poluição luminosa, como o sistema anterior de vapor de sódio.

Conforme relatos dos usuários do observatório do Departamento de Matemática da FEG, a poluição luminosa causada pelo sistema antigo acarretava em uma grande dificuldade na utilização do telescópio, visto que grande parte da luz era desperdiçada iluminando regiões que não deveriam ser iluminadas, como o céu.

Com seus focos voltados para as ruas e calçadas, as novas lâmpadas utilizadas pelo FEG Sustentável permitem que menos luz seja “desperdiçada” e que o caminhar dos transeuntes seja mais agradável por não causarem ofuscamento e por permitirem a melhor visualização de objetos ou deformidades no caminho que poderiam causar acidentes.

Tal ação trouxe para a FEG grande visibilidade na região, sendo divulgada em diversos meios de mídia, como sites e jornais [24] [25].

### 3. GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

Além das ações na área de elétrica, o projeto FEG-Sustentável criou e está implementado um depósito de lixo reciclável e lixo eletrônico que possibilitará a coleta seletiva dentro da faculdade.

O projeto do depósito, apresentado na figura 2.11 foi desenvolvido em parceria com o departamento de Engenharia Civil da FEG-UNESP e com a Diretoria de Serviços e Atividades Auxiliares (DSAA) para garantir que atendesse a todas as necessidades presente e futuras da instituição.

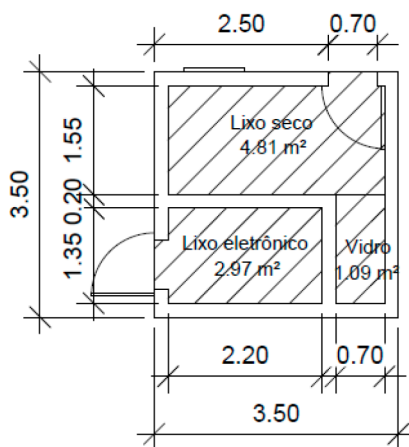


Figura 2.11: Projeto do depósito de lixo reciclável.

Além do depósito, o projeto prevê a instalação de lixeiras personalizadas que possibilitarão o descarte correto de resíduos pela comunidade.

#### 4. ECONOMIA DE ÁGUA

O FEG-Sustentável atua, ainda, junto ao setor de manutenção para a modernização de torneiras e bebedouros para a redução do desperdício de água e, em parceria com o Centro Acadêmico da Engenharia Civil, está implementando um protótipo com capacidade para 4.000 litros para a captação de água da chuva, conforme apresentado na figura 2.12.



Figura 2.12: Caixas D'água usadas na captação da água da chuva.

#### 5. CONSCIENTIZAÇÃO DA POPULAÇÃO

Desde o início do Ponto Iluminado, procura-se atingir o máximo de pessoas dentro e fora da Universidade, por meio de sua relevância para a região e envolvendo a comunidade nas ações que fazem parte do projeto.

Com o objetivo de atuar diretamente nas bases da sociedade, as ações educacionais desta iniciativa incluem atividades junto a instituições públicas e privadas de ensino fundamental, médio e superior disseminando e popularizando assuntos relacionados

com o uso racional de energia elétrica e dos impactos das medidas sustentáveis no cotidiano da população, assim, auxiliando na criação de uma sociedade mais amiga do meio ambiente. Sua visibilidade pela divulgação constante em diversos meios de mídia, bem como a disseminação do projeto através de palestras, aulas e exposições realizadas pela equipe do Ponto Iluminado, tem por intuito mudar a maneira com que as pessoas entendem e lidam com a sustentabilidade, a engenharia e o consumo de energia.

Além disso, o projeto abre espaço para voluntários trabalharem nas ações deste, de modo a ensinar conceitos práticos aos participantes em uma espécie de laboratório de eficiência energética e segurança em instalações elétricas. Tais ações trazem a realidade dos alunos do campus uma nova visão sobre a utilização dos recursos da Universidade e formas de auxiliar na redução de gastos dentro e fora do campus.

O projeto almeja demonstrar a importância de ações sustentáveis na construção de um mundo melhor através da reeducação da população quanto ao uso de energia elétrica, a orientação sobre desenvolvimento sustentável e a integração da sociedade com os projetos desenvolvidos na universidade. É esperada, a partir dessas ações, a aplicação dos conhecimentos e novos hábitos sustentáveis no cotidiano das pessoas e o interesse por ações que visam a melhor qualidade de vida levando em consideração o bem-estar da população e preservação dos recursos naturais.

Outra forma pela qual o projeto também realiza a divulgação de seus conceitos é através da participação em eventos, feiras, congressos e seminários. No ano de 2018 foi aceito entre os melhores do mundo na *International Conference on Sustainable Energy and Environment Sensing (SEES'18)*, uma conferência internacional com foco na sensibilidade ao meio ambiente e energia sustentável realizada esse ano pela Universidade de Cambridge no Reino Unido. Ficou em terceiro lugar nacional na categoria dentre todos os projetos do maior instituto de engenharia do mundo, o IEEE, e foi selecionado para a abertura do segundo dia de eventos de um Simpósio realizado na Universidade Federal de Itajubá. Também, o projeto foi escolhido como o melhor na área de Ciências Exatas do XXX Congresso de Iniciação Científica da UNESP, dentre todos os projetos de iniciação científica dos mais de 40 mil alunos da instituição.

Ademais, o projeto firmou uma parceria com a empresa suíça ABB que possibilitou a oferta de um curso sobre energia solar fotovoltaica para a comunidade local, parceria esta que foi facilitada pela a ativa participação dos membros do projeto em feiras da área.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os benefícios do projeto são inúmeros. Os três principais resultados desta primeira etapa do FEG Sustentável, que consiste na modernização de 254 postes de iluminação, na geração de energia por painéis fotovoltaicos, na gestão dos resíduos sólidos e na economia de água são a economia superior a 250 mil reais por ano, a redução em mais de 38 toneladas na emissão de CO<sub>2</sub> em virtude da redução do consumo de energia proveniente da rede e a conscientização da comunidade local a respeito do uso racional de recursos.

### 1. RETORNO FINANCEIRO

Mensalmente, a central de geração fotovoltaica do projeto com uma produção, em média, 730 kWh e sendo o valor do kWh pago pela FEG de R\$ 0,58, tem-se que mensalmente há uma economia de mais de R\$ 423,00. Economia esta que pode ser reinvestida na modernização do sistema de iluminação.

Conforme anteriormente apresentado, a potência média das lâmpadas de vapor de sódio utilizadas no campus é de 325 VA, sendo que estas somam 367 unidades alocadas em 152 postes ornamentais e 102 postes de iluminação pública e refletores que permanecem ligados por cerca de 12 horas por dia, assim, R\$ 24.904,00 da fatura de energia elétrica da faculdade, o que representa, em média, 25% do total, é proveniente apenas deste ultrapassado sistema de iluminação.

Utilizando a economia proveniente da geração fotovoltaica para a substituição das lâmpadas e modernização do sistema de iluminação utilizando as lâmpadas de 45 W (50 VA) selecionadas durante os testes e estudos realizados, o gasto mensal para manter as ruas do campus iluminadas cai para de R\$ 3.831,48. O que significa que a implementação do projeto FEG-Sustentável traz para a Unesp uma economia mensal de aproximadamente R\$ 21.495,52.

Assim, além dos benefícios para pesquisa e questões socioambientais, o projeto permite uma economia que pode ser usada para a expansão e adoção de novas ações ecologicamente corretas.

O projeto tem um custo de R\$ 32.000,00 para os materiais necessários para a geração, R\$ 25.000,00 para a construção de alvenaria e R\$ 50.000,00 para a modernização do sistema de iluminação, o que significa que com a geração de energia do sistema

possibilita a troca das lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas LED e que em menos de cinco meses após a implementação total o investimento é pago, conforme mostra a figura 3.1.

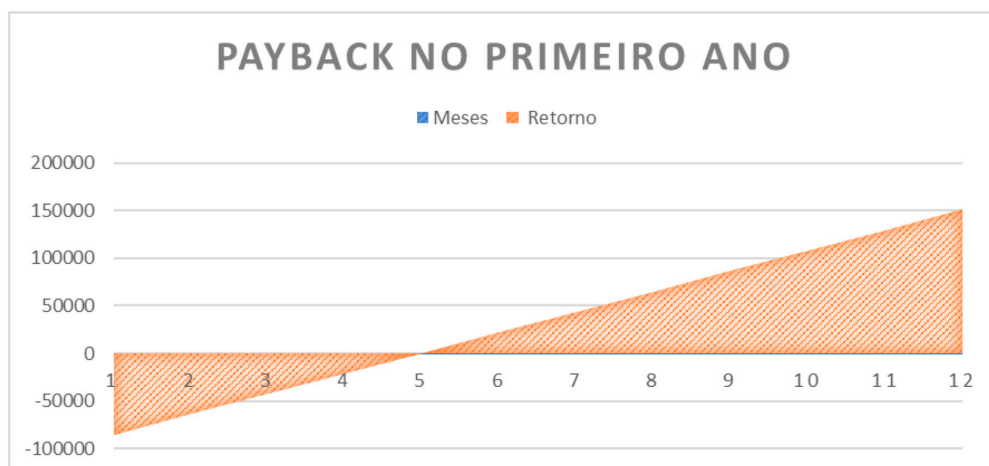


Figura 3.1 - Retorno financeiro nos 12 primeiros meses.

Durante a vida útil estimada do projeto que é superior a 25 anos, o retorno financeiro acumulado, na pior das hipóteses que supõe um aumento de 0,05% no rendimento anual em virtude do aumento da tarifa de energia elétrica e do reinvestimento em novas ações sustentáveis e energeticamente eficientes, ultrapassa os 6 milhões de reais.

Assim, gerando uma economia para toda a Universidade, que pode reinvestir em mais projetos de pesquisa para melhorar as tecnologias envolvidas. Ainda, o projeto possui parcerias com empresas para a disseminação de tal tecnologia nos mais variados locais, atingindo amplamente a comunidade.

## 2. BENEFÍCIOS PARA O MEIO AMBIENTE E PARA A SAÚDE

A conversão de energia através da luz solar, contribui para a diminuição da concentração de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e outros poluentes na atmosfera, visto que as formas convencionais de geração de energia, em sua maioria, liberam uma grande quantidade de gases poluentes, propiciando, assim, o desenvolvimento de doenças respiratórias e a proliferação de micro-organismos causadores dessas patologias [26] [27].

Essa mesma tecnologia utilizada pela iniciativa Ponto Iluminado diminui a carga na rede, reduzindo a emissão de poluentes no meio ambiente pelas grandes centrais geradoras, mitigando a criação de um cenário favorável às manifestações de doenças respiratórias, tumores do trato respiratório e proliferação de microrganismos responsáveis por essas alterações patológicas.

De acordo com a International Energy Agency (IEA), o Brasil emite 86,7654 gramas de  $\text{CO}_2$  por kWh de energia produzida (IEA, 2017). Sendo que o projeto FEG-Sustentável prevê uma geração mensal de 730 kWh, o mesmo fará com que mensalmente 66,64 kg de  $\text{CO}_2$  deixem de ser emitidos na atmosfera pela geração de energia. Além da geração de energia, o projeto irá reduzir a carga de iluminação de 42.939 kWh/mês para 6.606 kWh/mês, resultando em uma economia mensal média total de 36.333 kWh/mês.

Durante a vida útil estimada (mais de 20 anos) do projeto, este terá evitado a emissão de mais de 771 toneladas de dióxido de carbono na atmosfera. Um estudo realizado pelo Instituto Totum e pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), da Universidade de São Paulo, em parceria com a Fundação SOS Mata Atlântica, estima que cada árvore da Mata Atlântica absorve 163,14 kg de gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) equivalente ao longo de seus primeiros 20 anos [28]. Portanto, a execução do projeto FEG-Sustentável é tão benéfica para o meio ambiente quanto plantar mais de 4.731 árvores.

No que tange a substituição das lâmpadas de vapor de sódio por lâmpadas LED, tem-se que a lâmpada LED não emite raios UV e não contém metais pesados (como mercúrio), o que pode causar câncer de pele e outros tumores.

Conforme apresenta a figura 3.2, a poluição luminosa do sistema antigo é evidente e a do novo sistema implementado pelo projeto FEG-Sustentável é quase imperceptível.



Figura 3.2 - Foto comparativa entre os dois sistemas em funcionamento em frente à biblioteca do campus.

A vida útil destas lâmpadas utilizadas, segundo os fabricantes selecionados, é superior a 25.000 horas de uso, e conseqüentemente a sua manutenção é reduzida. Ainda, estas, diferentemente do sistema anterior, não necessitam de reatores, capacitores e ignitores, o que reduz a produção de lixo e a poluição ambiental no descarte.

Com relação aos painéis fotovoltaicos, estes possuem 97% de seus materiais, como as suas partes em alumínio, recicláveis, facilitando a separação após a vida útil do equipamento. Os principais fabricantes garantem que a vida útil dos equipamentos pode chegar a 30 anos. Diferentemente da Europa, onde a lei exige que o fabricante deve ser responsável pelo descarte correto de resíduos dos painéis, o Brasil não possui lei parecida, mas pesquisadores defendem que se deve ter acordos entre os setores para o descarte dos equipamentos [29].

A utilização de energia fotovoltaica contribui para a economia de água, pois para gerar energia elétrica convencional dispõe-se de hidroelétricas e um grande volume de água. Essas águas podem então ser destinadas para outros fins e áreas podem ser evitadas de inundação para a construção de barragens e o seu funcionamento. Empregar um sistema com seis painéis fotovoltaicos em operação por doze meses gera uma economia de 2.626.221 litros de água. Além disso, os painéis não possuem partes móveis, engrenagens ou motores, de modo que a sua manutenção é para a verificação de conectores e equipamentos e a própria água da chuva faz a limpeza de poeira ou resíduos [30].

A construção de um local apropriado para a coleta seletiva de lixo no campus demonstra a preocupação do Projeto com o meio ambiente. Dados de um estudo mostram que há no oceano cerca de 5,25 trilhões de partículas de plástico, equivalente a 296 mil toneladas. Esse dado é extremamente importante, pois os microplásticos (presentes em parte dessas partículas) absorvem substâncias químicas, e animais marinhos acabam ingerindo o microplástico contaminado, refletindo então na cadeia alimentar destes e dos animais terrestres, sendo um deles, o ser humano [31].

A reciclagem correta de lixo faz com que se tenha menos resíduos chegando em aterros sanitários, menos poluição em solo, água e ar e desperdício de materiais contaminantes, no caso de artigos eletrônicos, e propicia uma economia: a produção de 1 tonelada de papel gasta 100 mil litros de água e 5 mil kW de energia. Ao se reciclar papel para produzir a mesma quantidade, gasta-se 2 mil litros de água e 50% da energia. A iniciativa do Projeto representa o começo de uma mudança de hábitos que podem salvar o planeta [32] [33].

A iniciativa do Projeto em captar água da chuva traz um grande benefício para o *campus* universitário e a sua comunidade, servindo de exemplo para a população. A água armazenada da chuva pode ser reutilizada, de acordo com a legislação vigente, para lavar o passeio público e regar plantas, por exemplo. Outro fator a ser considerado é a economia financeira que o campus terá com a conta de água, e, além disso, ao se reutilizar água da chuva, o volume de água que vai para as ruas acaba sendo menor e consequentemente o número de alagamentos na época de verão -quando se tem as fortes chuvas- pode ser reduzido [34] [35].

## CONCLUSÃO

O projeto FEG-Sustentável visa inovar e tornar o campus da UNESP de Guaratinguetá economicamente, ambientalmente e socialmente sustentável.

Onde antes existia um ciclo vicioso de gastos de grandes proporções com um sistema ultrapassado que, além de ineficiente, causava impactos negativos ao ecossistema da região e a saúde da população e onde cada vez se gastava mais para mantê-lo e menos se tinha para modernizá-lo, o projeto está transformando-o em um ciclo virtuoso, onde, investe-se em ações sustentáveis que conscientizam a população e reduzem gastos tanto pelas tecnologias empregadas quanto pelos novos hábitos de consumo da comunidade, o que permite que cada vez se invista mais nestas ações.

Todo esse benefício associado, ainda, ao aprimoramento das técnicas de pesquisa dentro da faculdade, a conscientização de toda a população da região que participa ativamente das ações, palestras e visitas e aos benefícios ao meio ambiente e a saúde que tem impactos positivos para toda a comunidade.

O FEG-Sustentável tem influência direta no modelo de gestão da faculdade em diversos âmbitos, desde o planejamento das ações do setor de manutenção e melhor gestão dos recursos financeiros até a nova mentalidade de gestão da administração, que passa a tomar decisões sobre este novo sistema sustentável implementado.

## AGRADECIMENTOS

Fica o agradecimento à toda a equipe do projeto que tanto se empenha para viabilizar este audacioso plano, aos professores, alunos e funcionários da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá por seu apoio a esta iniciativa, a UNESP pelo

aporte e incentivo ao projeto e a todas as empresas e pessoas que, financeiramente, viabilizaram este projeto e estão devidamente homenageadas no site “feg sustentavel.webnode.com”.

## REFERÊNCIAS

- [1] Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, *Anuário Estatístico 2016, ano base 2015*. Disponível em: <<https://ape.unesp.br/anuario/>>. Acesso em: 14 jun 2018.
- [2] ABSOLAR, *Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidades e Desafios*. Disponível em: <<https://goo.gl/XTyNqE>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [3] Senado Federal, *Problemas no setor elétrico aumentam custos e exigem mais investimento em fontes renováveis*. Disponível em: <<https://goo.gl/n38CSW>>. Acesso em: 16 jul 2018.
- [4] Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, *Brasil em Síntese*. Disponível em: <<https://goo.gl/vyiF7t>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [5] Portal Brasil, *Rede de transmissão supera 107 mil quilômetros*. Disponível em: <<https://goo.gl/fZX8pR>>. Acesso em: 14 jul 2018.
- [6] Ministério de Minas e Energia, *Balanço Energético Nacional, 2015*. Disponível em: <<https://goo.gl/VCVWKM>>. Acesso em: 14 jul 2018.
- [7] SINDIENERGIA, *Avanço da GD deve mudar modelo tradicional e distribuidoras serão gestoras de sistemas, afirmam profissionais em Fórum sobre tema*. Disponível em: <<https://goo.gl/TKQ5qA>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [8] America do Sol, *Potencial solar no Brasil*. Disponível em: <<https://goo.gl/k6EyPB>>. Acesso em: 15 jul 2018.
- [9] EXAME, *Brasil cai para a posição de 9ª economia do mundo*. Disponível em: <<https://goo.gl/sCUJ5o>>. Acesso em: 16 jul 2018.
- [10] VEJA, *Brasil piora em ranking e passa a ser o 6º com a energia mais cara do mundo*. Disponível em: <<https://goo.gl/VtqaPH>>. Acesso em: 16 jul 2018.
- [11] ARBEX, M. A, et al, (2012) A poluição do ar e o sistema respiratório. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, p 643-655.
- [12] Brazilian Times, (2017) *Poluição do ar pode causar câncer de pulmão, diz estudo*. Disponível em: <<https://goo.gl/BqoeyS>>. Acesso em: 15 jun 2018.

- [13] LED Technology Brasil, *O led na iluminação: aspectos a serem considerados na decisão de compra*. Disponível em: <<https://goo.gl/LhGsEL>>. Acesso em: 14 jul 2018.
- [14] FERNANDES, G. W.; COELHO, M. S.; CAIRES, T. O. (2010) O impacto ambiental da poluição luminosa. *Especial Scientific American Terra 3.0*, pp. 40-47. Disponível em: <<https://goo.gl/zb2VnQ>>. Acesso: 14 abr 2018.
- [15] Laboratório Nacional de Astrofísica, *Você sabe o que é a Poluição Luminosa?* Disponível em: <<http://www.lna.br/lp/>>. Acesso em: 14 abr. 2018.
- [16] REN21, *Energias renováveis 2016: Relatório da situação mundial*. Disponível em: <<https://goo.gl/L8c6hh>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [17] KAKIUTHI, A., MATSUYAMA, R. T., PIMENTEL, F. P., & DE MORAES, T. M. M. (2014, OCTOBER). Improving science education through new perspectives. In *IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC 2014)* (pp. 115-119). IEEE.
- [18] DE LA TAILLE, Y. et al, (1992) *Teorias psicogenéticas em discussão*, pp. 23-36, São Paulo: Summus.
- [19] Eletrobras, *Uso racional de energia ajuda a diminuir criminalidade*. Disponível em: <<https://goo.gl/D5xNX7>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [20] CEPEL, *Insolação diária*. Disponível em: <<https://goo.gl/un6soz>>. Acesso em: 23 jul 2018.
- [21] CRECESB, *Potencial Solar. Rio de Janeiro, 2018*. Disponível em: <<https://goo.gl/BhcGuZ>>. Acesso em: 20 jul 2018.
- [22] VILLALVA, M. G. (2015) *Energia Solar Fotovoltaica: Conceitos e Aplicações*. 2ª Edição. São Paulo: Érica.
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas, (2012) *NBR 5101: Iluminação Pública – Procedimento*. 2 ed. Rio de Janeiro.
- [24] Quem Inova, *Projeto quer aplicar energias renováveis em campus de SP, 2018*. Disponível em: <<https://goo.gl/G6h7M1>>. Acesso em: 15 jul 2018.
- [25] Jornal de Guará, *Projeto FEG Sustentável moderniza 70 postes de iluminação na UNESP em Guaratinguetá*. Disponível em: <<https://goo.gl/hWswuv>>. Acesso em: 15 jul 2018.
- [26] DE MELO, M. F. *Hidrelétricas emitem gases do efeito estufa, revela estudo*. Disponível em: <<https://goo.gl/MUccfm>>. Acesso em: 14 jul 2018.
- [27] MANTOVANI, K. C. C. et al, (2016) Poluentes do ar e internações devido a doenças cardiovasculares em São José do Rio Preto, Brasil. *Revista Ciência & Saúde Coletiva*. Vol. 21. Issue 2, pp 509-515. Fev.

- [28] ROSA, M. *Quanto vale cada árvore*. Disponível em: <<https://goo.gl/CgwEWx>>. Acesso em: 02 jun 2018.
- [29] ENEL X, *97% do material dos painéis fotovoltaicos são recicláveis*. Disponível em: <<https://goo.gl/vYhQ2B>>. Acesso em: 13 jul 2018.
- [30] ENEL X, *Conheça 5 benefícios da energia solar*. Disponível em: <<https://www.enelx.com.br/blog/2014/12/5-beneficios-da-energia-solar/>>. Acesso em: 10 jun 2018.
- [31] ERIKSEN, M. et al. (2014) Plastic pollution in the world's oceans: more than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea. *PLoS ONE*, v. 9, n.12.
- [32] RIBEIRO, R. (2012) *Como e porquê separar o lixo?* Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/informma/item/8521-como-e-porqu%C3%AA-separar-o-lixo>>. Acesso: 11 dez 2018.
- [33] WGSOL, *Aquecimento solar e economia de água. Como funciona essa relação*. Disponível em: <<https://wgsol.com.br/aquecimento-solar-e-economia-de-agua-como-funciona-essa-relacao/>>. Acesso em: 10 jun 2018.
- [34] G1, *Como aproveitar a água da chuva e economizar*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/especial-publicitario/casa-da-cisterna/noticia/2017/03/como-aproveitar-agua-da-chuva-e-economizar.html>>. Acesso: 11 dez 2018.
- [35] ECYCLE, *Projeto de captação de água da chuva gera economia em condomínios*. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/5088-projeto-de-captacao-de-agua-da-chuva>>. Acesso: 11 dez 2018.

# CALIBRACIÓN DE CONTROLADORES SISTEMA TURBINA - GOBERNADOR

Ing. Rodmy Miranda Ordoñez<sup>1</sup>

## RESUMEN

Las pruebas de ensayo en los reguladores de velocidad, reguladores de voltaje y estabilizadores de potencia, son necesarios para un funcionamiento correcto de las centrales eléctricas, para esto es necesario conocer los modelos de los controladores y/o obtener los mismos mediante pruebas en sitio. La calibración de los controladores debe permitir una respuesta dinámica de estos sistemas enmarcados en los requisitos técnicos mínimos establecidos en la política regulatoria de cada país. La modelación de los controladores por separado permite un análisis sencillo y con un error mínimo, considerando que los enlaces del control de velocidad-potencia activa y voltaje-potencia reactiva son débiles. La metodología presentada en la calibración de controladores se basa en la normativa boliviana, utilizando un caso de estudio real del sistema eléctrico boliviano.

## INTRODUCTION

La Norma Operativa N<sup>o</sup> 11 del Comité Nacional de Despacho de Carga “Condiciones Técnicas para la Incorporación de Nuevas Instalaciones al Sistema Interconectado nacional” define las condiciones que deben cumplir las empresas eléctricas para la incorporación de nuevas instalaciones eléctricas al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Los equipos de control de las unidades de generación deben cumplir lo establecido en la Resolución de la Autoridad de Control Social y Fiscalización de Electricidad AE N<sup>o</sup> 110/2011 “Condiciones de Desempeño Mínimo del SIN” durante

---

<sup>1</sup> Universidad Mayor de San Andrés - La Paz, Bolivia.

Mail: [rmiranda@umsa.edu.bo](mailto:rmiranda@umsa.edu.bo)

la operación transitoria y dinámica, para esto es necesario realizar pruebas tipo a los equipos de control.

En el numeral 2 se presenta los requerimientos de las Condiciones de Desempeño Mínimo del SIN aplicadas para los controladores.

En el numeral 3 se presenta la metodología de calibración empleada en los controladores. La cual se basa en un análisis simplificado de sistemas separados regulador de voltaje y regulador de velocidad.

En el numeral 4 se muestra la interacción de los controladores con un generador sincrónico que permite validar la metodología del punto 3.

## REQUERIMIENTO DE DESEMPEÑO MÍNIMO DE CONTROLADORES

Los indicadores establecidos en la Resolución AE N° 110/2011 para calificar el desempeño de los controladores de las unidades generadoras del SIN de Bolivia, y sus correspondientes valores mínimos, son los indicados a continuación:

- Respuesta del Sistema de Excitación

- a) **Respuesta Dinámica:** Evolución sin sobre amortiguamiento  
 b) **Sobre oscilación:**  $\leq 15\%$   
 c) **Tiempo Máximo de Crecimiento (Tr):** de la tensión terminal para pasar del 10% al 90 % del valor final (incremento de carga aplicado), luego de haber aplicado un incremento de tensión en la referencia del regulador:

Unidad Generadora	Tiempo de Excitatriz	Tr
Con licencia de generación otorgada antes del año 2001	Excitatrices estáticas	$\leq 350$ ms
	Excitatrices con rectificadores rotantes (Brushless)	$\leq 550$ ms
	Otras excitatrices	$\leq 850$ ms
<b>Con licencia de generación posterior al año 2001</b>	Excitatrices estáticas	$\leq 250$ ms
	<b>Otras excitatrices</b>	<b><math>\leq 350</math> ms</b>

- d) **Tiempo Máximo de Establecimiento (Ts),** para el rango  $\pm 5\%$  del valor final del cambio e la tensión terminal:

Unidad Generadora	Tiempo de Excitatriz	Ts
Con licencia de generación otorgada antes del año 2001	Excitatrices estáticas	≤ 3 seg
	Otras excitatrices	≤ 5 seg
<b>Con licencia de generación posterior al año 2001</b>	<b>Cualquier</b>	<b>≤ 2 seg</b>

e) **Error máximo de estado estacionario**, para una variación de la tensión de alimentación del campo principal de máquina, correspondiente al paso entre el estado de vacío y de plena carga del generador:

Unidad Generadora	Valor del Error
Con licencia de generación otorgada antes del año 2001	≤ 1%
<b>Con licencia de generación posterior al año 2001</b>	<b>≤ 0.5%</b>

- Respuesta del Sistema de Regulación de Velocidad

a) **Banda Muerta de Frecuencia:** Evolución de la potencia mecánica sin sobre amortiguamiento

b) **Respuesta Dinámica:** 0.00 Hz

c) **Estatismo Permanente:**

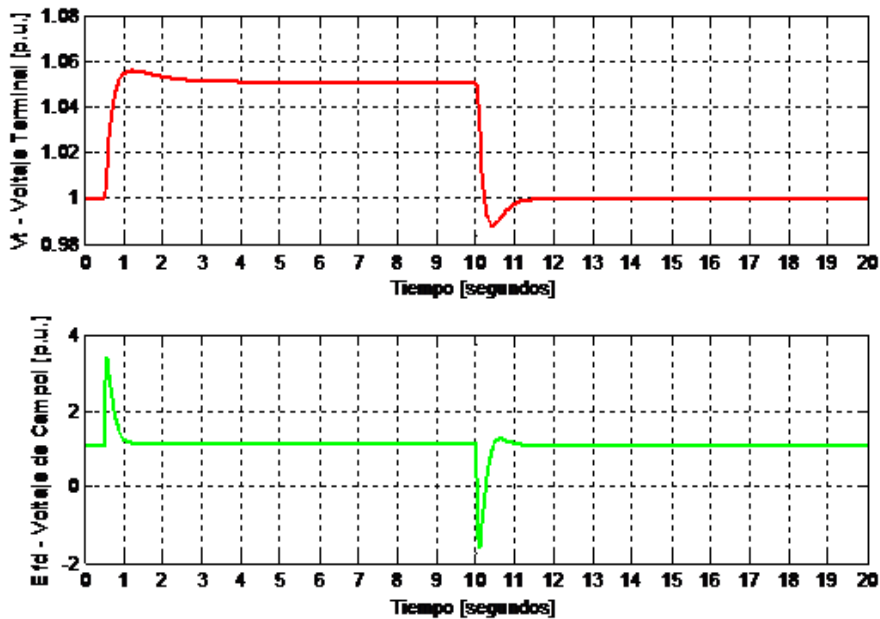
- Unidades Térmicas → Entre 4% y 7%
- Unidades Hidráulicas → Entre 6% y 12%
- Unidades a vapor → Entre 5% y 10%

El valor a aplicar por el Agente Generador será igual al mínimo de la banda, salvo que por requerimientos del proyecto o del propietario se requiera otro valor, previamente justificado, situación que será coordinada con el CNDC.

d) **Tiempo Máximo de Establecimiento para el cambio en la potencia mecánica del ± 10% del valor final:**

Unidad Generadora	Tipo de turbina	Tiempo
Con licencia de generación otorgada antes del año 2001	Gas, Vapor	≤ 20 s
	Hidráulica	≤ 30 s
<b>Con licencia de generación posterior al año 2001</b>	<b>Gas, Vapor</b>	<b>≤ 15 s</b>
	Hidráulica	≤ 25 s





En caso de no obtener la respuesta enmarcada en los valores límites de las condiciones técnicas se modifica la ganancia proporcional ligeramente hacia abajo. En este tipo de controlador el valor principal que afecta la respuesta es la ganancia proporcional y con el modelo simplificado del controlador y el primer lazo de respuesta del generador nos permite realizar una sintonización rápida hasta obtener la señal deseada.

## 2. CALIBRACIÓN ÓPTIMA DEL REGULADOR DE VELOCIDAD

Considerando una Turbina a Gas marca Rolls Royce, tipo Trent WLE Dual Fuel equipada con limitadores de toma de carga, cuya estructura de control según la representación recomendada por el fabricante, es la indicada por el diagrama de bloques de la siguiente figura.

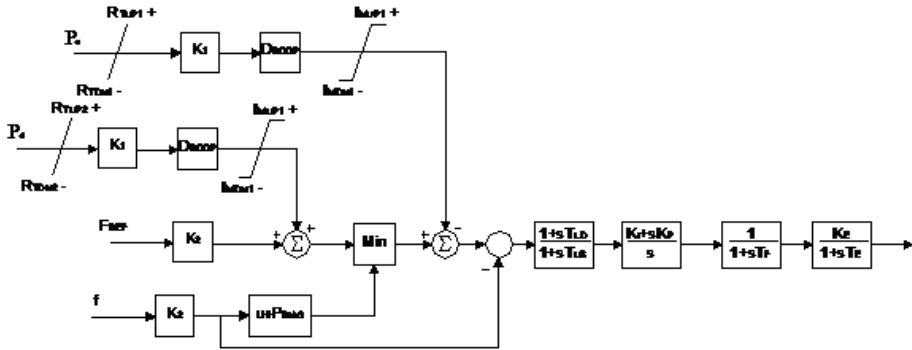
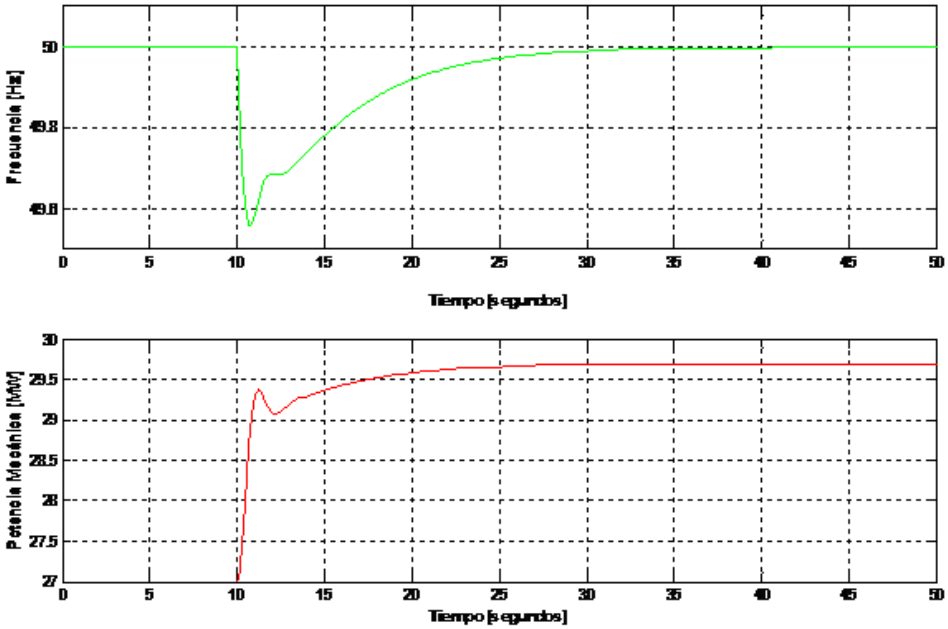


Figura 2. Diagrama de Bloques del Sistema de combustión de la Turbina de Gas Trent FP WLEDF.

En la simulación con MATLAB se determina la respuesta transitoria de la frecuencia y potencia entregada por la turbina ante un incremento del 10% de la demanda, considerando operación en red aislada y modo de control de velocidad. Nuevamente el parámetro principal de control es la ganancia proporcional del sistema, la cual se varía desde el valor alto hasta una respuesta rápida y sin sobrepasos excesivos. Los resultados gráficos obtenidos son:



## DESEMPEÑO DINÁMICO DE LA UNIDAD GENERADORA

Para verificar si los controladores analizados por separado e implementados en el entorno de SIMULINK proporcionan respuestas consistentes acorde a lo establecido en las condiciones de desempeño mínimo del SIN, se ha considerado un sistema Generador-Red Equivalente, como se muestra en la Figura 3.

Los ensayos efectuados en esa oportunidad son los siguientes:

- Escalón de  $\pm 5\%$  en la consigna del AVR, sin PSS
- Escalón de  $\pm 5\%$  en la consigna del AVR, con PSS
- Escalón de 50% en la consigna Potencia

Toda vez que el acoplamiento entre el control de la potencia activa y la potencia reactiva es despreciable, el proceso de desempeño dinámico se dividirá en los dos lazos de control: control del voltaje-reactivo (V-Q) y control frecuencia-carga (f-P).

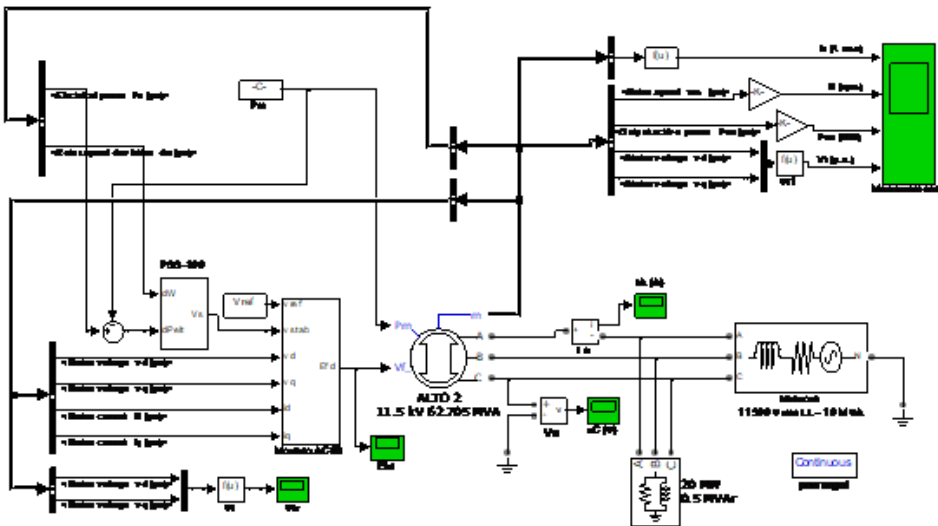


Figura 3. Sistema Generador – Red Equivalente.

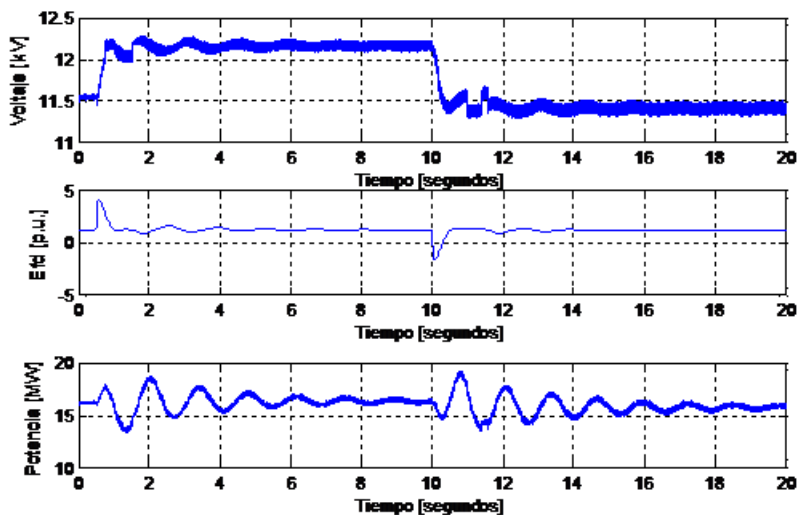
## 1. MODELOS EN LAZO DE CONTROL DE VOLTAJE

El lazo de regulación del voltaje está constituido por la dinámica del rotor del generador, el sistema de excitación y el estabilizador de sistemas de potencia (PSS) para el control del voltaje en terminales del generador.

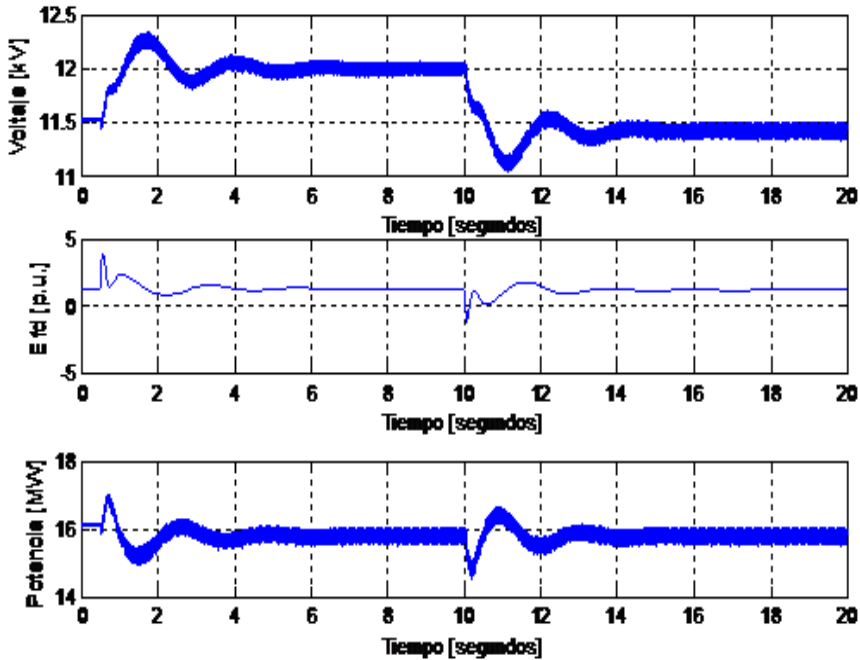
La prueba efectuada para este lazo de control consiste en la aplicación de una señal escalón de amplitud  $\pm 5\%$  en la consigna del regulador automático de voltaje ( $V_{ref}$ ) cuando el generador de 62.7 MVA de capacidad está entregando 16.07 MW al sistema y girando a velocidad de rotación nominal con el PSS en servicio y fuera de servicio, a efectos de visualizar el amortiguamiento natural y el amortiguamiento con el estabilizador de la unidad.

Este tipo de disturbio (altamente controlable dentro el área) puede ser considerado como una pequeña perturbación en el sistema eléctrico de potencia, clasificado entre las oscilaciones electromecánicas de “modo local” en el rango de frecuencias comprendidas entre 0.8 y 1.8 Hz.

En las siguientes figuras se presentan los resultados obtenidos mediante simulación temporal efectuada con el modelo dispuesto en MATLAB, para el ensayo sin el estabilizador. Se muestran las variables eléctricas: tensión fase-fase, voltaje de campo y potencia activa de la unidad.



Respuesta simulada al escalón de tensión sin PSS.

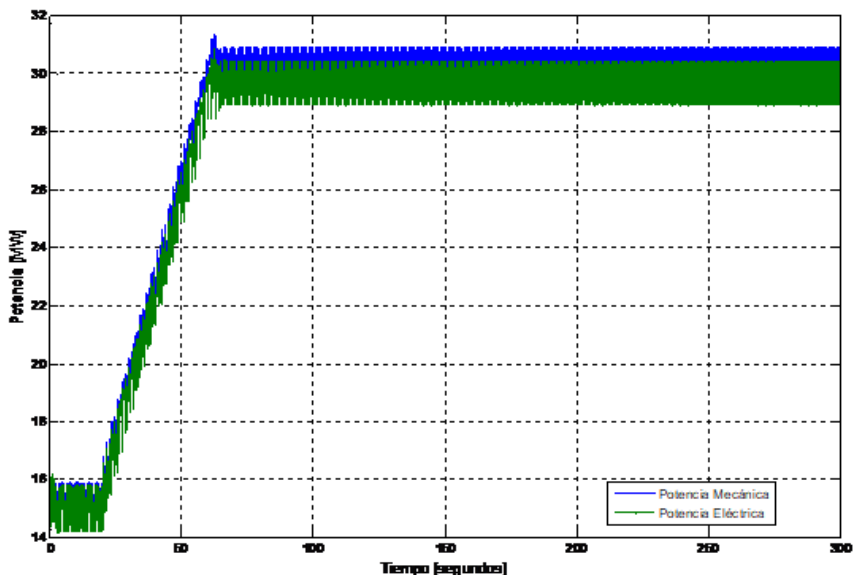


Respuesta simulada al escalón de tensión con PSS en servicio.

## 2. MODELOS EN LAZO DE CONTROL DE VELOCIDAD

Con el generador entregando aproximadamente 15 MW al sistema y girando a velocidad de rotación nominal, se procede a dar un escalón en la referencia de potencia (Pref) del regulador de velocidad Trent FP WLEDF de manera que el despacho de la unidad suba a 30 MW.

En la siguiente figura se presentan los resultados obtenidos mediante simulación temporal efectuada con el modelo dispuesto en MATLAB. Se muestran las variables de potencia mecánica y eléctrica, determinando un tiempo de respuesta de 45 s para la toma e carga de 15 MW de potencia, esta situación está asociada al limitador de máxima variación de carga de 0.35 MW/s.



## CONCLUSIONES

Los resultados del análisis realizado demuestran que con una adecuada parametrización del regulador automático de voltaje y regulador de velocidad, el generador sincrónico podrá desempeñarse en la operación cumpliendo con las prescripciones de desempeño mínimo establecidas por la Resolución AE N° 110/2011 de la Autoridad de Fiscalización y Control Social de Electricidad.

El análisis separado de los controladores a través de modelos simplificados reduce el tiempo de simulación y permite encontrar los parámetros adecuados para una respuesta dinámica enmarcada en la normativa local.

# **SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO: UNA ALTERNATIVA REAL PARA EL SISTEMA ELÉCTRICO CHILENO?**

Javiera Guajardo<sup>1</sup> y Hector Chavez<sup>1</sup>

## **RESUMEN**

La contribución de los sistemas de almacenamiento a la operación e los sistemas eléctricos es ampliamente aceptada. Aspectos como control de frecuencia y otros son técnicamente factibles y han mostrado ser efectivos. Sin embargo, no es claro si los sistemas de almacenamiento son sostenibles económicamente dado el alto costo de inversión de tales sistemas y los varios marcos regulatorios en diferentes países que definen los pagos de los mismos. Este trabajo presenta un análisis detallado en el caso de Chile para entender las oportunidades económicas de los sistemas de almacenamiento. En particular, remuneración por energy arbitraje y servicios complementarios son considerados.

## **INTRODUCTION**

La significativa integración Energías Renovables no Convencionales (ERNC) en el Sistema Eléctrico Chileno (SEN), ha establecido nuevos desafíos en la flexibilidad de la operación y en la seguridad de la infraestructura disponible. En tal contexto, la integración de nuevas tecnologías como el almacenamiento puede generar un aumento en la flexibilidad y en la capacidad del sistema de alojar una mayor cantidad de ERNC.

Según CEN, el sistema cuenta actualmente con 23.729 [MW] de capacidad instalada, entre las cuales se cuentan 814 [MW] que representan proyectos interconectados

---

<sup>1</sup> Ecuador 3519, Santiago, Chile  
Mail: [hector.chavez@usach.cl](mailto:hector.chavez@usach.cl)

prontos a ser entregados a la operación. De esos proyectos, el 80% corresponde a energías solares y eólicos [1]. Es decir, los proyectos de ERNC seguirán aumentando su presencia en el sistema eléctrico nacional.

Al respecto, las fuentes de ERNC son tecnologías de generación variable con costos de operación bajos; 6 [USD/MWh] para las centrales solares fotovoltaicas (FV) y para las centrales eólicas de 7,7 [USD/MWh] [2]. Por otro lado, centrales térmicas como Laguna Verde bordean 30 [USD/MWh] y para centrales a petróleo diésel como Emelda unos 300 [USD/MWh] [2]. Esto implica un desplazamiento de las tecnologías de generación convencional del SEN, en donde se está disminuyendo la capacidad de proveer balance energético de corto plazo. Producto de esto se hace importante considerar de alguna manera los costos adicionales de incluir ERNC debido a la disminución en los rangos de seguridad del sistema” [3].

Una posible solución a los problemas planteados anteriormente son los sistemas de almacenamiento, los cuales ayudarán a compensar las fluctuaciones de generación renovable, aportando potencia activa durante periodos de máxima demanda en que pueden no existir las condiciones climáticas ideales para las ERNC (Energy Arbitrage) y/o aportar reserva en giro, aumentando así la confiabilidad del sistema (servicios complementarios). Sin embargo, no es claro que estas soluciones sean posibles, principalmente por el costo de inversión alto que ellas conllevan y la naturaleza incierta de su modelo de remuneración dada la naturaleza desregulada y no subsidiaria del segmento de generación eléctrica en Chile.

Este trabajo consta del estudio de sistemas de almacenamientos aplicados al mercado eléctrico chileno, en donde se realizará una evaluación técnico económico de la implementación de sistemas de almacenamiento por bancos de baterías (BESS), determinando así la factibilidad de incorporar estas tecnologías al SEN.

## **EL MERCADO ELÉCTRICO CHILENO**

Los sistemas eléctricos en Chile poseen una capacidad instalada de 22.516 [MW], a la fecha de marzo 2018 [4]. Dicha potencia se encuentra mayoritariamente en el SEN, la cual corresponde al 99,26% de la capacidad instalada total. Por ende, los sistemas medianos solo poseen 63 [MW] en SEA y 104 [MW] en el SEM. La generación eléctrica es predominantemente térmica (Carbón 21%, Gas Natural 20%, Petróleo Diésel 13%), seguido de centrales hidráulicas con un 30%, y finalmente, las energías solares y eólicas alcanzando un 14%. La energía solar, eólica, biomasa y mini hidráulica

triplicaron su participación 2014 y 2017 con una generación anual de 5.000 [GWh-año] en comparación con los 12.000 [GWh-año] en el año 2017.

En cuanto a la estructura del mercado eléctrico, se pueden distinguir tres segmentos: mercado spot, contratos bilaterales y licitaciones de distribución.

### 1. MERCADO SPOT

Este está asociado a la operación técnico-económica del sistema eléctrico, donde el costo total de operación es minimizado, dados los costos de operación auditados de cada tecnología de generación. Las unidades generadoras participan con sus costos auditados y son adjudicadas con bloques de generación dependiendo si su costo es el más bajo dentro de un alista de mérito económico. La operación económica incluye también las restricciones de transmisión por lo cual, en presencia de una congestión, puede establecerse precios diferentes en cada barra del sistema y diferentes para cada hora del día. Esto ha dado lugar al concepto de *energy arbitraje*, que consiste, en el caso de un BESS, a retirar energía cuando el precio es bajo e inyectarla cuando el precio es alto.

### 2. CONTRATOS BILATERALES

Aun cuando toda la generación debe ser transada en el mercado spot, los generadores pueden hacer estimaciones económicas y suscribir contratos de suministro bilateral con demandas específicas, absorbiendo el riesgo de volatilidad de precio en el mercado Spot y ofreciendo contratos a precio fijo.

### 3. LICITACIONES DE DISTRIBUCION

Dado que el sector distribución es definido como monopolio natural en Chile, la energía que provee a los consumos de distribución es licitada por el estado.

## **MODELOS DE REMUNERACIÓN PARA BESS EN CHILE**

Como se indicó, un BESS puede recibir remuneraciones tanto por *energy arbitraje* como por Servicios Complementarios.

#### 4. ENERGY ARBITRAGE

Los sistemas de almacenamiento pueden gestionar la compra y venta de energía, de modo que puede almacenar energía a un precio más bajo (en periodos de baja demanda) y revenderla a un precio más alto (en periodos de alta demanda), y así beneficiarse de la diferencia de precios, como se ve en la Fig. 1.

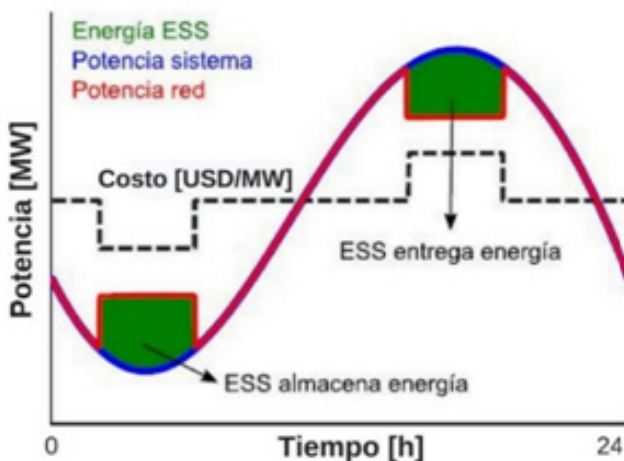


Fig. 1: Ejemplo gráfico de *Energy Arbitrage* [5].

A modo de ejemplo, en California los sistemas de almacenamiento de energía han demostrado ser prometedores para futuras soluciones económicas y técnicas debido a los posibles beneficios del arbitraje de almacenamiento de energía. Para ilustrar, existe un análisis económico del arbitraje energético en California utilizando sistemas fotovoltaicos conectados directamente con un sistema de almacenamiento de energía [6].

#### 5. SERVICIOS COMPLEMENTARIOS

Los servicios complementarios (SSCC) son requerimientos técnicos del sistema eléctrico para mantener la operación segura que no son asociados a los costos de producción de energía. En Chile, su remuneración está normada por el DS 130/2011 [7], en donde se definen los siguientes servicios complementarios: RG: Reserva en Giro, CF: Control de Frecuencia, CT: Control de Tensión, PRS: Plan Recuperación Servicio, EDAC: Desprendimiento de carga, CVSM: Costo Variable Superior al Marginal.

En el caso de los BESS, estos pueden participar mayoritariamente en el servicio de reserva en giro, que consiste en ofrecer respuesta al sistema de control automático de generación (AGC).

Según el Art. 140 de la NT SSCC [8], los montos a remunerar a las empresas coordinadas que prestan el servicio de reserva en giro, con motivo de la regulación de frecuencia por instrucción de la DO, se determinarán según se detalla a continuación.

Se determina el Margen de Reserva efectivo horario para las unidades generadoras que prestan el servicio de regulación de frecuencia según la expresión:

$$MRE_{i,h} = PMax_{i,h} - PDesp_{i,h} \quad (1)$$

donde,

$MRE_{i,h}$ : Margen de Reserva Efectivo de la unidad generadora  $i$  en la hora  $h$ , expresada en MW.

$PMax_{i,h}$ : Potencia máxima neta de la unidad generadora  $i$  en la hora  $h$ , de acuerdo a lo informado por la DO en el Programa Diario correspondiente o declarada al CDC en la operación real, expresada en MW.

$PDesp_{i,h}$ : Potencia media neta efectivamente despachada para la unidad generadora  $i$  en la hora  $h$ , expresada en MW.

No se considera, dentro del margen de todas efectivo, aquella potencia disponible que pudiese haber sido brindada por la unidad marginal del sistema ni aquella proporcionada por unidades de generación que operaron a un costo variable de operación superior al costo marginal horario del sistema, o a mínimo técnico. Se determina el margen horario de Reserva Total del sistema como:

$$RTot_h = \sum_{i=1}^n (MRE_{i,h}) \quad (2)$$

Donde,

$RTot_h$ : Reserva total del sistema para la hora  $h$ .

$n$ : Número de unidades generadoras que prestan el servicio de regulación de frecuencia.

Para cada unidad generadora del sistema, se determina la cuota horaria de reserva en giro como:

$$C_{i,h} = RTot_h \cdot \frac{(PDesp_{i,h} + MRE_{i,h})}{\sum_{i=1}^m (PDesp_{j,h} + MRE_{j,h})} \quad (3)$$

Donde,

$C_{i,h}$ : Cuota de la unidad generadora  $i$  para la hora  $h$ , expresada en MW.

$m$ : Número de unidades generadoras en operación durante la hora  $h$ , excluyendo aquellas unidades que operaron a un costo variable de operación superior al costo marginal horario del sistema, o a mínimo técnico.

No se considera en la determinación de la cuota a aquellas unidades de generación que operaron a un costo variable de operación superior al costo marginal horario del sistema, o a mínimo técnico. Tanto para las unidades generadoras que no prestaron el servicio de control de frecuencia como para aquellas que lo prestaron, se calculará el valor por reserva en giro mensual de la siguiente manera:

$$VR_i = \sum_{h=1}^{htot} (C_{i,h} - MRE_{i,h}) \cdot \text{Max} \{ CMg_{i,h} - COP_{i,h}, 0 \} \quad (4)$$

Donde,

$VR_i$ : Valor por reserva en giro para la unidad generadora  $i$ , expresado en USD.

$C_{i,h}$ : Cuota de reserva en giro de la unidad generadora  $i$  en la hora  $h$ , expresado en MW.

$CMg_{i,h}$ : Costo marginal horario en la barra de valorización de la unidad generadora  $i$  para la hora  $h$ , expresado en USD/MWh.

$COP_{i,h}$ : Costo Unitario de Operación de la unidad generadora  $i$  en la hora  $h$ , expresado en USD/MWh.

$htot$ : Total de horas del mes.

Se calcula el monto mensual total a remunerar por concepto de reserva en giro de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$VRp = \sum_{i=1}^{NC} \text{Max}(VR_i, 0) \quad (5)$$

$$VRn = \sum_{i=1}^{NC} \text{Min}(VR_i, 0) \quad (6)$$

$$VRr = \text{Min}(VRp, -VRn) \quad (7)$$

Donde,

$VRp$ : Suma total de los valores por reserva en giro positivos del mes.

$VRn$ : Suma total de los valores por reserva en giro negativos del mes.

$NC$ : Número total de Unidades Generadoras.

El monto total que debe compensar una unidad generadora en el Período de Operación, se obtiene de la siguiente expresión:

$$VRpr_i = \frac{Max(VR_i, 0)}{VRp} \cdot VRr \quad (8)$$

Donde,

:Valor que debe compensar la unidad generadora  $i$ .

Finalmente, a cada unidad generadora que resulte con un valor por reserva en giro positivo en el mes, le corresponderá remunerar el monto  $VRpri$  determinado en (8) que será distribuido entre todas las unidades generadoras que resulten con valores negativos por reserva en giro mensual, en la proporción en que cada una de estas últimas participe del total de los valores por reserva en giro mensual negativos del mes  $VRn$ .

$$VRnr_i = \frac{Min(VR_i, 0)}{VRn} \cdot VRr \quad (9)$$

Donde,

$VRnr_i$ : Remuneración de la unidad generadora  $i$ .

## **COSTO DE INVERSIÓN DE UN SISTEMA BESS**

Para la estimación de costos, se se considera una BESS de 10 [MW] de ESS conectada al sistema interconectado en 220 [kV]; para ello, se necesitan transformadores elevadores, equipos de control y protección, entre otros elementos que se detallan a continuación:

- ESS, compuesto por 10 módulos de 1 [MW].
- Transformador elevador 23/0.4 [kV], cada uno conectado a dos contenedores ESS. Como estos transformadores poseen una potencia de 2 [MVA] no requiere relés de protección, basta con fusibles.
- Switchgear de media tensión (MT) de 23 [kV], con un transformador de poder (TP) encargado de alimentar instrumentos de medidas, contadores, relés y otros aparatos análogos. Contiene 5 interruptores hacia los ESS y una celda acometida hacia la barra de MT 23 [kV].
- Transformador elevador 220/23 [kV] de 16 [MVA], el cual posee relés de protección principales y secundarias.

Para estimar costos de inversión y mano de obra se consultó a la Agencia Internacional de Energía (EIA) [9] cotizaciones en moneda nacional (\$CLP). A continuación los resultados de la estimación de costos:

TABLE I  
Costo del Sistema de Almacenamiento

Descripción	Cant.	Vida útil	1 MWh [MUSD]	10 MWh [MUSD]
Bancos de Baterías Ion Litio	12	10 años	1.000	10.000
Inversores	4			
<b>BMS</b>	12			
<b>BSC</b>	1			
Contenedor	1			

TABLE II  
Costo del Sistema de Equipos Eléctricos

Descripción	Cant.	Valor Equipo [MUSD]	Valor Montaje [MUSD]	Valor Total [MUSD]
Transformador BT/MT	5	43	3.5	219
Sala eléctrica prefabricada con switchgear MT, sistema contra incendio y SSAA	1	383	10.3	393
Sistema de puesta a tierra	1	1.8	11	12

TABLE III  
Costo del Obras Civiles

Descripción	Cant.	Unidad	Valor Total MUSD
Zapata de Fundación	200	M3	80
Pilares, Columnas, Muros y Vigas	2	M3	1.2
Acero de Refuerzo	10	Ton	25

Considerando además el costo de la instalación de un paño (conexión en simple circuito) de conexión en la subestación de conexión del sistema eléctrico correspondiente (13,8/220kV, 10 MW) por un costo de MUSD\$ 2.200, el costo total de inversión para el BESS de 10 MW y 1 hora de almacenamiento bordea los MMUSD\$ 13. Para un sistema de 10 horas de almacenamiento el costo se eleva a MMUSD\$130.

## ANÁLISIS PARA ENERGY ARBITRAGE

Para considerar un caso específico, se analizó el conjunto de barras del sistema eléctrico chileno, determinándose que las siguientes barras tenían variaciones significativas de precio durante la operación diaria entre mayo 2017 y abril 2018. Se detectó que la barra Taltal 220 tenía la mayor diferencia, que puede apreciarse en la Fig. 2.

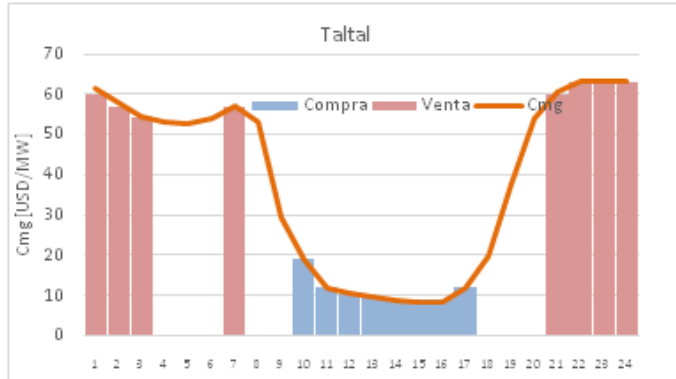


Fig. 2: Variación diaria de costos marginales en la barra Taltal 220 del CEN.

Con esto, se puede construir una tabla con las remuneraciones que se pueden generar realizando *energy arbitraje* en la barra TalTal 220:

TABLE IV  
Ganancias Estimadas Por Energy Arbitraje

MES	Cmg 9:00-18:00 [USD]	Cmg 20:00-5:00 [USD]	Compra energía 10 hrs [USD]	Venta energía 10 hrs [USD]	Ganancia total [USD]
May 2017	9.72	46.9	29,168	140,760	111,591
Jun 2017	12.07	55.3	33,809	155,035	121,226
Jul 2017	10.97	54.3	32,905	163,098	130,193
Ago 2017	9.91	55.9	29,717	167,912	138,195
Sep 2017	4.66	52.9	13,969	158,946	144,977
Oct 2017	1.99	59.9	5,970	179,835	173,865
Nov 2017	1.62	63.0	4,850	189,232	184,382
Dic 2017	8.84	68.1	26,510	204,415	177,905
Ene 2018	12.32	64.7	36,956	194,165	157,210
Feb 2018	8.16	54.9	24,473	164,901	140,428
Mar 2018	21.48	57.0	64,451	171,141	106,690
Abril 2018	37.88	57.8	113,654	173,586	59,933
TOTAL ANUAL [USD]		1,646,594			

Considerando un valor de MMUSD\$ 130 (el movimiento de energía requiere 10 horas de almacenamiento) y un valor de ingresos por año en un periodo de 10 años de MMUSD\$ 1.65, el valor actualizado neto de la inversión es MMUSD\$ - 117, por lo cual la inversión no es rentable.

## **ANÁLISIS PARA RESERVA EN GIRO**

Como se indicó en la Sección III.B, cada unidad del sistema posee una responsabilidad de proveer Reserva en Giro (RG) en proporción a su inyección de energía al sistema. Dada la naturaleza técnica de algunas unidades generadoras (ERNC o capacidad de rampa limitada), no todas puede físicamente proveer RG; en tal escenario, algunas unidades del sistema deben proveer reserva de manera obligatoria por razones de seguridad técnica. Cuando la unidad es escogida para proveer RG y su costo variable de operación es inferior al costo marginal de operación de la barra donde se conecta, la unidad debe ser remunerada por su costo de oportunidad como se explicó en la Sección III.B. Así, un BESS puede:

- a) proveer de RG para permitir el despacho de la unidad a máximo técnico, con lo cual se obtiene una ganancia equivalente al pago por el costo de oportunidad, y
- b) proveer de RG por sobre su cuota en caso que por razones técnicas el CEN le asigne tal responsabilidad.

La idea es estudiar si esta ganancia respecto a la inversión por el BESS resulta rentable.

Para generar un ejemplo numérico, se consideró el generador U-15 en la barra Taltal 220, la misma barra del ejemplo anterior. La unidad U-15 es programada por el CEN (informe de valorización de transferencias del SEN (IVT) [65]) para proveer una cantidad de RG que varía con el tiempo teniendo un mínimo de cero y un máximo de 17 MW para el mes de enero 2018 con un valor medio cercano a 8 MW. Por lo general su margen de reserva asignada por el CEN (es mayor que su cuota de RG) (ver sección III.B). Además, la unidad era despachada con costo variable menor que el precio marginal de la barra de conexión, por lo cual su es siempre negativo y recibía un pago por proveer RG. Se puede ver un detalle de la operación de las primeras 6 horas del 1 de enero de 2018 en la Tabla V. En la tabla se considera la implementación de un BESS de 10 MW.

TABLE V  
Ingresos proyectados para U-15 con BESS de 10 MW

Hora	DATOS DEL SEN				Ingresos	
	Cuota [MW]	MRE [MW]	Cmg [USD/MW]	CV [USD/MW]	Pago RG [USD]	Despacho [USD]
1	6.77	11.1	54.00	49.18	21.1	48.2
2	6.80	10.5	54.00	49.18	17.9	48.2
3	8.94	9.06	54.00	49.18	0.6	43.7
4	7.86	9.48	54.00	49.18	7.8	45.7
5	8.12	10.3	54.00	49.18	10.9	48.2
6	8.60	45.1	54.00	49.18	176.2	48.2

Notar que para algunos periodos tienen un requerimiento de reserva mayor a 10 MW, por lo cual el BESS solo puede liberar de la unidad un máximo de 10 MW por sobre el total de la reserva entregada (MRE). Este cálculo se realizó para todas las horas del mes y para 6 meses de 2018, obteniendo la tabla VI.

TABLE V  
Ingresos proyectados para U-15 con BESS de 10 MW [USD] (6 meses)

Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
13,318	7,781	7,208	697	4,670	6,735

Con estos datos, se puede proyectar un ingreso anual de cerca de USD\$ 800,000, con una inversión de MM\$US 13. El valor actualizado neto de la inversión es MMUSD\$ - 6.82, por lo cual la inversión no es rentable. La inversión se hace rentable para un valor del BESS cercano a MMUSD\$ 6.2.

## CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la rentabilidad del uso de sistemas BESS en el caso Chileno. Se pudo verificar que para los usos en Energy Arbitraje y Reserva en Giro la inversión no era rentable para los precios actuales de los BESS. Sin embargo, pudo detectarse la necesidad de profundizar en algunos aspectos que se consideran trabajo futuro del presente estudio.

-Para Energy Arbitrage se recomienda desarrollar una metodología de optimización de la ubicación de barra del SEN con alta variabilidad de precios, incorporando los nuevos proyectos al sistema interconectado.

–Realizar estudios dinámicos de implementación de las tecnologías de almacenamiento BESS, para los distintos sectores de un sistema eléctrico. No es claro que 1 hora de almacenamiento sea suficiente para garantizar que se cumple el standard de desempeño para control de frecuencia.

–Desarrollar una investigación más en detalle acerca del uso del hidrogeno como almacenamiento de energía relacionado al sistema eléctrico chileno, generando proyectos pilotos en Chile en la categoría “power to power”. Si bien es cierto que se está avanzando en esta materia, ya que en enero 2018 se inició la formación de la Asociación Chilena de Hidrógeno (H2 Chile); sin embargo aún es incipiente este tema. Por lo tanto, se recomienda investigar y desarrollar este vector energético en Chile, aprovechando las fuentes ERNC.

El hecho que los sistemas de almacenamiento no sean rentables en el marco regulatorio actual plantea varias preguntas sobre como un sistema como el Chileno que está experimentando un crecimiento significativo en ERNC. Se puede verificar que la necesidad de flexibilidad por medio de almacenamiento no es una alternativa en el sistema Chileno, lo cual plantea muchas dudas a como se podrá alcanzar las metas de decarbonificación. Trabajo futuro se propone en analizar cuál es la alternativa más rentable para proveer de flexibilidad al sistema Chileno en el Futuro.

## REFERENCES

- [1] Coordinador Eléctrico Nacional, (2018). *Reporte energético Enero 2018*, Santiago, Chile.
- [2] CNE, (2016). *Informe Técnico Definitivo- Fijación de Precios de Nudo de Corto Plazo de Abril 2016*.
- [3] LARREA, R. (2015). *Análisis de la respuesta en frecuencia en sistemas de potencia con altos niveles de generación variable sin inercia*, Universidad de Chile.
- [4] Comisión Nacional de Energía, (2018). *Capacidad instalada – Energía Abierta, Energía Abierta*. [En línea]. Disponible en: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/capacidad-instalada/>. [Accedido: 21-ago-2018].
- [5] ARNALTES, S. Y GARCÍA PLAZA, M. (2018) *Sistemas de Almacenamiento Energético Aplicaciones de Potencia para Eólica*, Universidad Carlos III, Madrid.
- [6] LAM, R. K. TRAN, D. H. Y YEH, H. G. (2015) *Economics of residential energy arbitrage in California using a PV system with directly connected energy storage*.

*Proceedings of the 2015 IEEE Green Energy and Systems Conference (IGESC)*, Long Beach, CA, pp. 67-79

- [7] D.S. N° 130, (2017) Aprueba reglamento que establece las disposiciones aplicables a los servicios complementarios, pp. 9-11.
- [8] Comisión Nacional de Energía, (2017) *Norma técnica de SSCC* a los que se refiere el D.S. N°130. 2017.
- [9] International Energy Agency, (2015) *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*, Springer Reference.

## **PARTE IV**

# **POLÍTICAS ENERGÉTICAS**

# SISTEMAS FOTOVOLTAICOS RESIDENCIAIS: UMA ANÁLISE POLÍTICA NO BRASIL

Thamyres Machado David<sup>1</sup>, Marcela Aparecida Guerreiro Machado<sup>1</sup>,  
Paloma Maria Silva Rocha Rizol<sup>2</sup>

## RESUMO

Com a necessidade da busca pelo desenvolvimento sustentável cada vez mais presente, a mitigação dos impactos ambientais causados pelo setor energético está sendo mais disseminada. Nesse sentido, o aumento das fontes de energias renováveis nas matrizes energéticas de vários países é uma realidade. Este trabalho pretende analisar as políticas públicas energéticas das maiores potências no segmento de energia solar, quais sejam: China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália, além de prover uma análise mais detalhada do Brasil levando-se em conta a evolução política energética desde os anos 1970, o estado atual da matriz energética do setor residencial, e as tarifas, legislações e incentivos financeiros para este setor.

## INTRODUÇÃO

Ao longo dos anos, a participação das energias renováveis nas matrizes energéticas de países desenvolvidos e em desenvolvimento cresce significativamente, com destaque para a energia solar, considerada uma fonte limpa, livre de ruídos e que, em 2017, foi a principal fonte de nova capacidade de energia em vários mercados importantes, incluindo China, Índia, Japão e Estados Unidos. O seu crescimento superou as expectativas apesar dos seus

---

1 Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Produção. Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, 12516410 - Guaratinguetá, SP - Brasil.

2 Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Departamento de Eletricidade. Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Pedregulho, 12516410 - Guaratinguetá, SP - Brasil. Mail: [paloma.rizol@unesp.br](mailto:paloma.rizol@unesp.br)

custos de investimento ainda serem considerados altos. Segundo o REN21 (*Renewable Energy Policy Network*) [1], a expansão do mercado solar no mundo é devido, em grande parte, à crescente competitividade da energia solar fotovoltaica (FV), combinada com a crescente demanda por eletricidade e a crescente conscientização do potencial da tecnologia para mitigar a poluição, reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> e para fornecer acesso à energia a quem não possui, pelas concessionárias convencionais energéticas.

O Brasil também apresenta um crescimento desta fonte energética, porém tímido se considerarmos o grande potencial solar presente em território nacional. Por exemplo, na Alemanha, líder de capacidade instalada no ano de 2015, a região com a maior incidência de irradiação solar não ultrapassa os índices de irradiação solar no local com menor incidência no Brasil [2].

A irradiação solar é usada nos sistemas fotovoltaicos na conversão de energia para consumo, por isso, quanto maiores os índices de irradiação, mais energia é produzida.

As maiores potências no segmento solar para a capacidade instalada são: China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália [1]. Entretanto, novos mercados estão surgindo, e países de todos os continentes começaram a contribuir significativamente para o crescimento global. No final de 2017, pelo menos 29 países tinham 1 GW ou mais de capacidade.

Nesse sentido, este capítulo analisa as políticas públicas energéticas das maiores potências no segmento de energia solar. Realiza-se uma análise mais detalhada do Brasil levando-se em conta a evolução política energética desde os anos 1970, o estado atual da matriz energética do setor residencial e as tarifas, legislações e incentivos financeiros para este setor.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 1. CHINA

No país mais populoso do mundo, um motivo maior o fez tornar-se o líder no segmento solar: a busca pela qualidade do ar. Tendo em vista que o carvão é o único recurso fóssil disponível em grande quantidade no país, o uso do carvão como fonte de energia primária causa inúmeros problemas ambientais, colocando a qualidade do ar das cidades chinesas entre as piores do mundo [3].

A reserva de gás natural per capita chinesa representa números muito baixos, por isso, a China depende em grande medida das importações. Assim, grande parte das receitas de exportação da China teria que ser paga pelas importações, e a economia poderia ter que sofrer com mudanças no preço da energia no mercado mundial. Nesse sentido, os chineses viram como a única maneira de reduzir a dependência das importações e os problemas ambientais causados pela combustão de combustíveis fósseis o uso fontes de energia renovável [3]. A Figura 1 apresenta um comparativo das matrizes energéticas chinesas do período de 2011 e 2017. Na Figura 1 pode ser observado como o uso das fontes solar e eólica se desenvolveram ao longo dos anos.

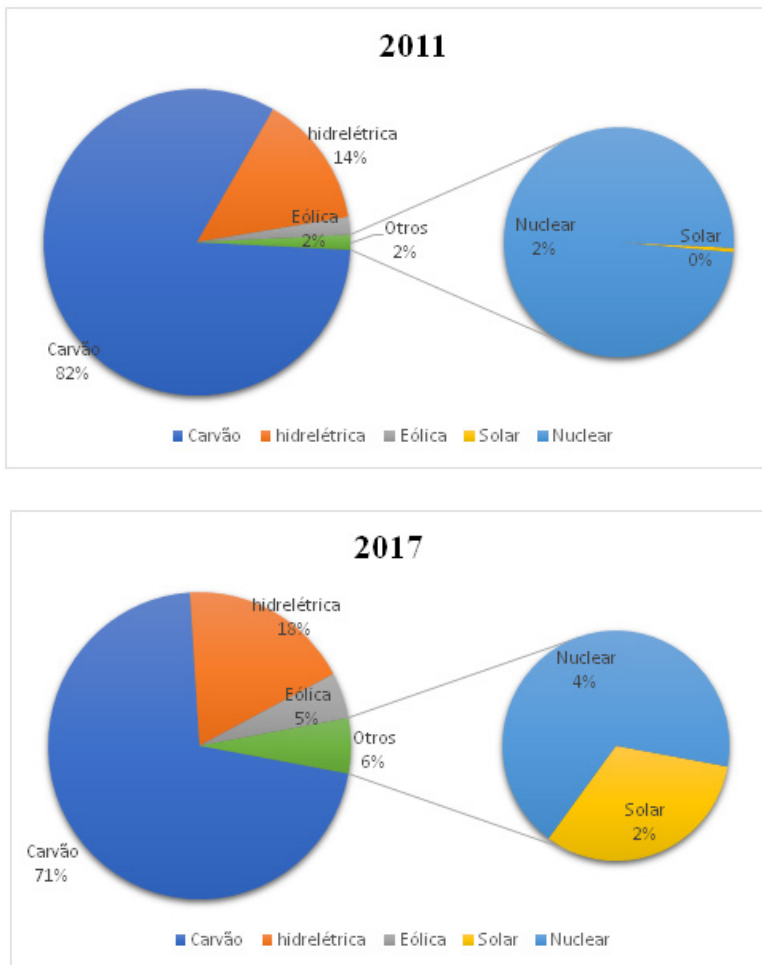
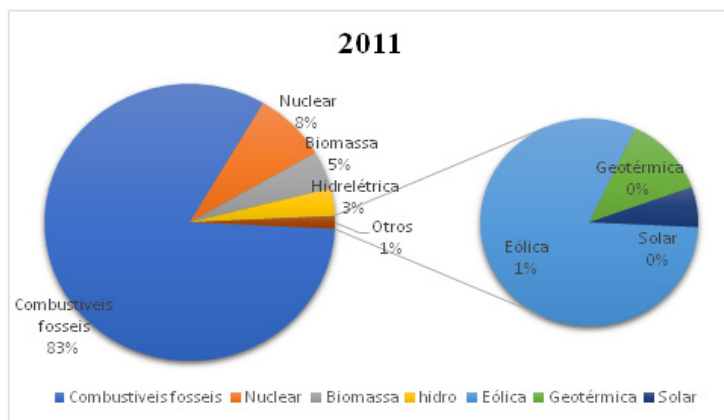


Figura 1. Comparativo da matriz energética chinesa de 2011 e 2017. Fonte: [4, 5]

A China iniciou a transformação de um sistema de energia baseado em carvão com altos custos ambientais para um sistema de energia de baixo carbono e ambientalmente sustentável [6]. Os esforços em termos de políticas públicas começaram a partir de 2009, quando planos e programas de subsídios como o “*Solar Rooftop Plan*” e os “*Golden Sun Demonstration Projects*” destinados a apoiar o desenvolvimento da indústria chinesa de energia solar, incluindo licenças de usinas solares foram criados. Os planos visavam usinas de energia solar em grande escala e sistemas solares em telhados urbanos. Em 2010, as leis que impulsionaram esta fonte foram as “*Renewable Energy Law*” e “*Renewable Energy Medium and Long-term Development Plan*”, que estipulam o desenvolvimento da energia solar com objetivos de médio e longo prazo [7]. Com o apoio a políticas públicas que reduzem os custos das energias renováveis, a energia solar FV tornou-se a forma mais barata de geração de eletricidade na China [8].

## 2. ESTADOS UNIDOS

Os incentivos financeiros para projetos de energia solar nos EUA são fornecidos pelo governo federal, estadual e local. Historicamente, os incentivos federais foram fornecidos principalmente por meio do imposto tributário, na forma de um crédito fiscal para investimentos e depreciação fiscal acelerada de 5 anos [9]. Um incentivo que carece é um mandato de implantação em nível nacional, a fim de evitar incertezas quanto à continuação dos mecanismos de apoio oferecidos para a geração de energia renovável [10]. Mandatos de estado individuais foram implementados com sucesso, apesar da falta de uma estrutura nacional uniformizada. A política existente em nível estadual, o rápido declínio dos custos de tecnologia e o investimento em pesquisa e desenvolvimento no setor permitiram que a FV continuasse crescendo rapidamente nos EUA [8]. A Figura 2 mostra a evolução no que diz respeito a matriz energética dos EUA.



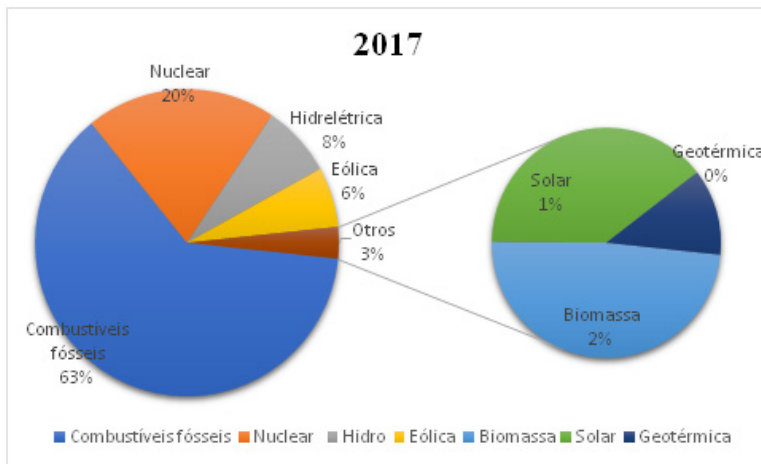


Figura 2. Comparativo da matriz energética dos Estados Unidos de 2011 e 2017. Fonte: [11].

Os preços dos sistemas solares instalados têm caído nos Estados Unidos, impulsionados por três fatores principais: 1) queda nos preços dos equipamentos 2) a mudança para sistemas maiores e 3) melhores práticas de instalação. Enquanto os preços médios do sistema ainda são mais altos do que em outros países desenvolvidos, a tendência é claramente decrescente em todos os setores e os preços das concessionárias estão começando a cair [9].

Para se tornar uma das maiores potências nesse segmento solar, os EUA contam com programas específicos de investimentos que se baseiam em: financiamento de terceiros (atendem a altos investimentos iniciais com compra de energia pela concessionária); *leasing* (financiamento de compra de energia pela concessionária); financiamento com vantagens (por exemplo: programa estadual de financiamento para projetos de lei de energia solar); investimento em plantas fotovoltaicas e comunidade solar (múltiplos participantes se beneficiem diretamente da energia produzida por um painel solar) [9].

### 3. JAPÃO

Após o acidente nuclear de Fukushima em 2011, o governo japonês decidiu mudar significativamente seu modo de produzir energia. Para Huang et al [12], o acidente causou sérios impactos ambientais, econômicos e políticos em todo o mundo e também afetou gravemente as atitudes públicas em relação à energia nuclear. Mas mesmo antes do acidente o Japão já investia na tecnologia solar. Pesquisa e desenvolvimento

relacionados ao consumo de energia aumentaram consistentemente desde os anos 1970 até os anos 2000. Em 1980, o Japão aprovou a Lei de Energia Alternativa que apoiava a energia solar e outras fontes alternativas através de medidas financeiras, técnicas e legislações, com o argumento que a energia solar é necessária para enfrentar a “futura crise energética”, à qual o Japão é especialmente vulnerável devido à sua taxa extremamente alta de crescimento da demanda [13].

O governo japonês propôs uma meta de energia renovável de aproximadamente 20% do uso total de energia em 2030 e destaca que alcançar um rápido aumento de energia renovável é uma questão política importante [14]. A Figura 3 apresenta a evolução das matrizes energéticas do Japão referente aos anos de 2010 e 2017. Observa-se que houve diminuição significativa da energia nuclear e o aumento da fonte de energia solar, que foi de menos de um por cento em 2010 para mais de cinco por cento em 2017.

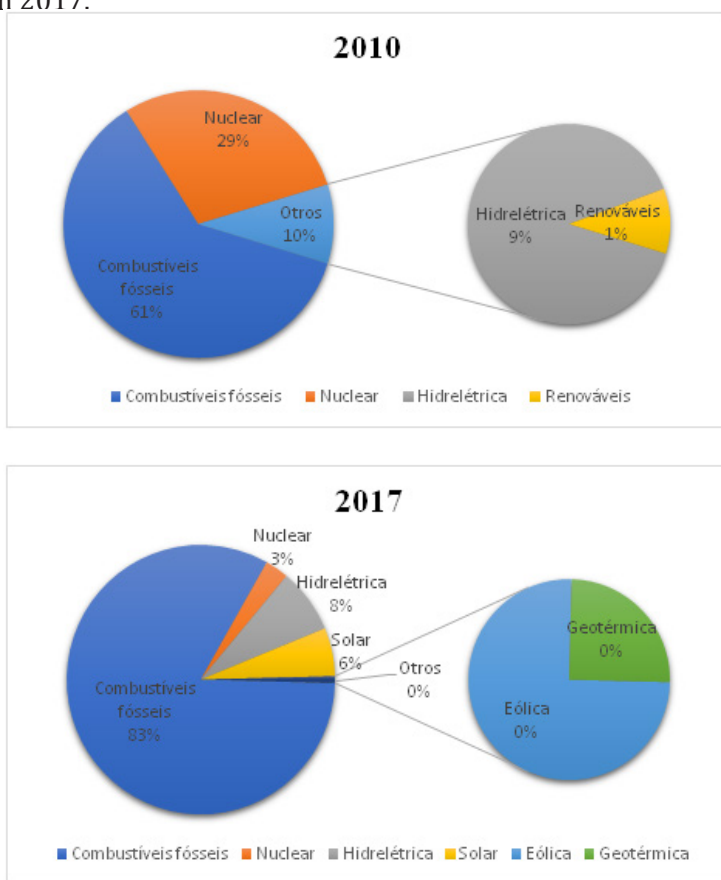


Figura 3. Comparativo da matriz energética do Japão de 2010 e 2017. Fontes: [15, 16].

Com o programa de tarifas *feed-in* (FIT) em 2012, o Japão conseguiu aumentar drasticamente sua capacidade instalada de energia FV. O programa FIT baseia-se nos seguintes fundamentos: 1) criação de um esquema de aprovação; 2) introdução custo-eficiente; 3) introdução de fontes de energia com um longo prazo de execução; 4) sistema de isenção de sobretaxa; e 5) transição para compra de energia pelos operadores de transmissão e distribuição. Objetiva também a redução de custos a médio e longo prazo e o apoio a expansão da introdução de fontes de energia renovável [17].

Em relação aos planos estratégicos de energia do Japão, pela primeira vez na história a energia renovável está posicionada como uma fonte de energia convencional. O setor fotovoltaico japonês se destaca e tem promovido o restabelecimento do negócio fotovoltaico, o desenvolvimento de tecnologia e a expansão dos negócios no exterior [17].

#### 4. ALEMANHA

A Alemanha está entre os países mais ambiciosos do mundo na intenção de promover uma transição para energia sustentável. No entanto, o debate público no país sobre a *Energiewende* (ou virada energética) em geral em suas diferentes características tem um caráter político. Para apoiar a *Energiewende*, a legislação vigente conta com mecanismos direcionados a todas as etapas do desenvolvimento de tecnologias de energia renovável, desde a pesquisa básica até a implantação [18]. O sistema de tarifas *feed-in* (FIT) é o elemento central das políticas da Alemanha e caracteriza-se pela compra de cada KWh injetado na rede pelo produtor de energia, provando ser um ótimo incentivo pela característica da contrapartida monetária. No entanto, sua eficiência depende da determinação apropriada dos níveis tarifários.

Iniciada na década de 1990, a *Energiewende* é uma estratégia energética e climática de longo prazo com planos até 2050. Que conta com amplo apoio público e é impulsionada por quatro objetivos políticos principais: combater a mudança climática, evitar riscos nucleares (como o acidente nuclear de Fukushima), melhorar a segurança energética e garantir competitividade e crescimento [19]. Com metas ambiciosas de suprir a demanda energética em sua maioria (80%) por fonte renovável, obteve um grande salto de 2011 a 2017 no que diz respeito as fontes energéticas, com o aumento da participação das renováveis e a diminuição do uso dos combustíveis fósseis (Figura 4).

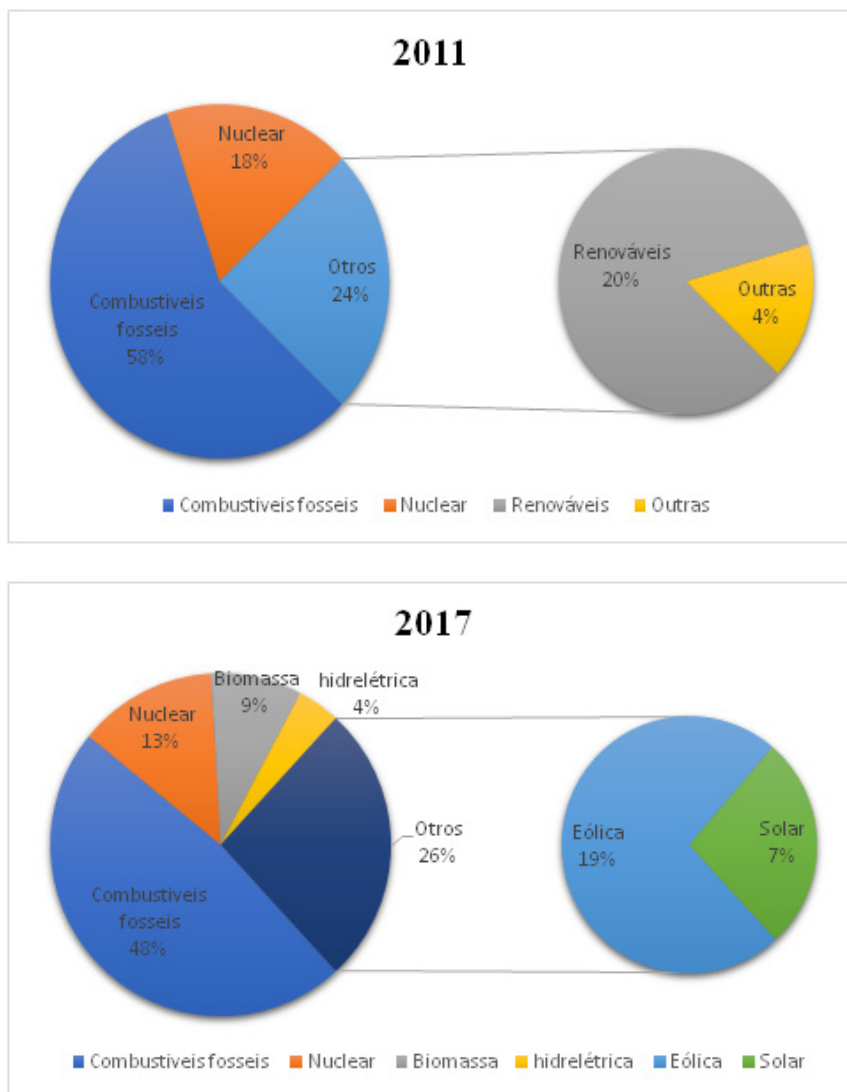


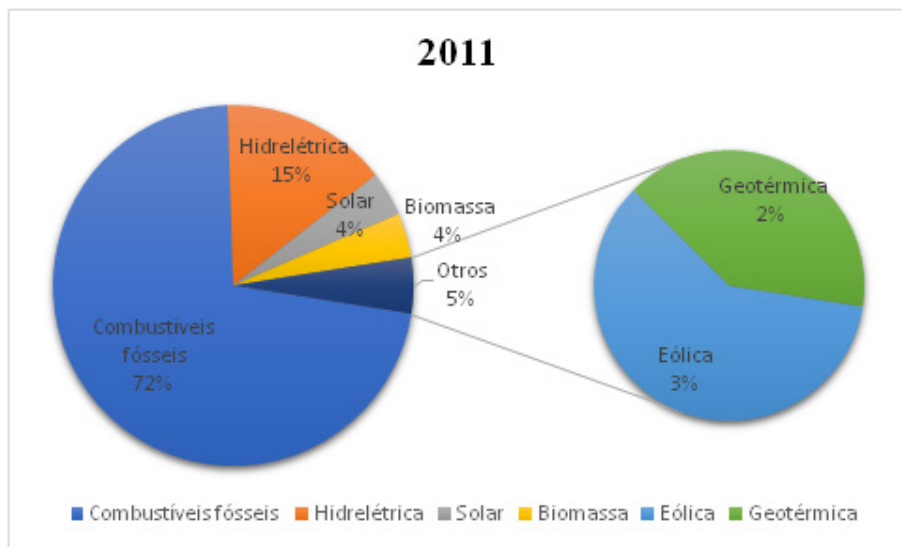
Figura 4. Comparativo da matriz energética da Alemanha de 2011 e 2017. Fonte: [20].

Com relação ao mercado de armazenamento de energia, a Alemanha se encontra em absoluta vantagem. Segundo o IEA [8], apenas a Alemanha tem incentivos para o armazenamento de energia em baterias de sistemas fotovoltaicos. Durante o ano de 2016, a instalação de sistemas de armazenamento foi financiada por 6468 sistemas de armazenamento (800 para sistemas fotovoltaicos existentes e 5668 para sistemas fotovoltaicos recentemente instalados). O programa de incentivos foi introduzido em 1 de maio de 2013 e tem continuação prevista até o final de 2018.

## 5. ITÁLIA

Na Itália, o ano de 2017 foi marcado por um aumento significativo de instalações fotovoltaicas e, com isso, ganhou destaque entre as maiores potências nesse segmento. O mercado de FV na Itália é bastante promissor devido ao plano energético de 10 anos do governo (*National Energy Strategy*) que foi adotado para gerenciar a mudança no sistema energético. A energia solar está agora fornecendo, em média, quase 4% da demanda de eletricidade na Europa. Na Itália está produzindo mais de 7% de sua demanda por energia solar [8].

O país é suportado por cinco programas nacionais: “*Scambio Sul Posto*” (sistema de faturamento líquido que lida com o valor da energia trocada com a rede); “*Ritiro Dedicato*” (venda de eletricidade); Isenções fiscais (despesas associadas a pequenas instalações fotovoltaicas deduzidas dos fluxos de rendimento tributável); Certificados brancos (mecanismo que recompensa todas as iniciativas para a economia de energia) e “*Sistemi Efficienti di Utenza*” (um esquema no qual uma ou mais usinas de produção de energia operadas por um único produtor são conectadas através de uma linha de transmissão privada a um único usuário final) [8]. Com o sucesso atribuído à implementação dos programas, principalmente “*Scambio Sul Posto*” e às Isenções fiscais, pode-se observar um crescimento das fontes renováveis e a diminuição dos combustíveis fósseis na matriz energética Italiana (Figura 5).



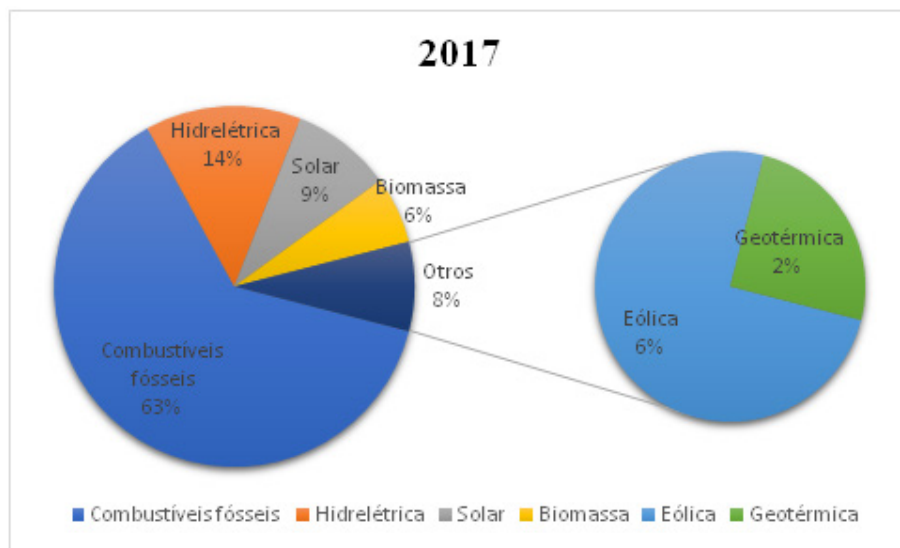


Figura 5. Comparativo da matriz energética da Itália de 2011 e 2017. Fonte: [11].

Em um artigo publicado em 2018 [21], os autores comentaram algumas ações políticas específicas direcionadas para aprimorar o setor de energia solar do país, tais como: melhorar a infraestrutura energética e, principalmente, o armazenamento de energia, que levará a um sistema de distribuição mais eficiente; harmonizar a implementação da reforma energética a nível regional para impulsionar um maior nível de convergência; sensibilizar e capacitar o pessoal para novos desenvolvimentos tecnológicos e incentivar o ensino superior em graus mais técnicos; aumentar a riqueza econômica da comunidade local e o bem-estar geral, especialmente em áreas periféricas que experimentam custos mais altos de energia e, portanto, tendem a ser menos eficientes.

## 6. BRASIL

### 6.1. Evolução da Política Energética

Até os anos 1970, a matriz energética brasileira era constituída em sua maioria por lenha, carvão, vegetal e petróleo. Porém, entre os anos 1970 e 1980, houve uma crise do petróleo e várias medidas foram tomadas como: racionamento, substituição do petróleo pelas hidrelétricas e intensificação do programa nuclear brasileiro. Os anos 1990 foram marcados pelo forte crescimento das hidrelétricas, que mesmo tendo

vários problemas como alto custo de implantação, impactos ambientais e sociais, chegou a quase 40% de participação em 1995 [22].

O crescimento das usinas hidrelétricas foi um avanço para o país, visto que é considerada uma energia limpa e renovável, porém desencadeou uma das maiores crises energéticas do Brasil, o apagão de 2001. Segundo Tolmasquin [23], o esgotamento dos reservatórios ocorreu em um período relativamente curto de tempo. Ao final de 1997, os reservatórios terminaram o período seco com 66% de água armazenada e no final de 1999, o nível dos reservatórios estava em apenas 28%. Neste momento ficou nítido o abandono da gestão plurianual dos reservatórios, tornando-se cada vez mais dependente do período chuvoso. O autor ainda menciona que a crise foi “consequência do descompasso entre o crescimento do consumo de energia e da capacidade instalada” [23]. Assim, a origem da crise energética foi a falta de investimentos em geração e em transmissão. Nesse contexto, as empresas estatais tinham condições de investir, mas estes investimentos não foram autorizados por conta das metas de corte dos gastos do governo [22, 23].

Entre os anos 2000 e 2010, o governo investiu em termoelétricas, aumentou a produção de etanol, reativou o programa nuclear e paralisou as privatizações da Eletrobrás. Foi a fase de recuperação do setor elétrico brasileiro. Porém, problemas no setor voltaram a ocorrer e em 2015 os reservatórios de água que alimentam as usinas hidrelétricas do sistema sudeste/centro-oeste registravam pouco menos de 17% de sua capacidade. Com isso, o governo teve de contratar termelétricas, que além do alto impacto ambiental, geram energia a um preço superior; em alguns casos, até oito vezes maior que as hidrelétricas por meio das bandeiras tarifárias de energia [24].

Em vista desse cenário, pesquisadores estão estudando a inclusão expressiva das energias renováveis desde os anos 1990. No Brasil, segundo o artigo intitulado “*Solar energy resource assessment — Brazil*” publicado em 2002 pelos brasileiros Tiba, Fraidenraich e Lyra e pelo argentino Gallegos [25], o estímulo pela energia solar teve seu início em janeiro de 1993 com o Grupo de trabalho de Energia Solar Fotovoltaica - GTEF, sob a coordenação do Centro de Pesquisa de Eletricidade - CEPEL/ELETROBRÁS. Com o objetivo de fomentar e discutir questões ligadas a energia solar o GTEF tinha cobertura nacional e era constituído por empresas do setor elétrico, grupos de pesquisa, universidades e fabricantes ou representantes de equipamentos fotovoltaicos. Em 1994, o projeto de um Atlas Solarimétrico Nacional foi submetido ao CEPEL. Os autores da proposta consi-

deraram que a publicação do Atlas disponibilizaria uma base de dados importante (itens como irradiação solar e horas de insolação) para o público-alvo e, à medida que a tecnologia solar se espalhava no Brasil, esse tipo de geração de energia se tornaria cada vez mais importante. Finalmente, em maio de 1996, o grupo FAE-UFPE/CEPEL assinou um acordo que permitiu a execução do projeto de elaboração do Atlas Solarimétrico Nacional [25].

A energia solar tem uma participação hoje na matriz energética muito inferior, visto que as fontes de geração atuais predominantes (hidrelétricas e termelétricas) já vêm comprovando sua ineficácia nos últimos 17 anos. De acordo com Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL [26], esse tipo de geração representava somente 0,03% de potência. A hídrica ainda representa 60%, de origem fóssil 16%, biomassa e eólica em 8% e 7%, respectivamente.

O potencial que o Brasil tem para esse tipo de geração é enorme, como a incidência de irradiação solar. A produção de energia elétrica através de um sistema fotovoltaico é baseada na conversão de irradiação solar em energia para consumo. O Brasil tem altos índices de incidência chegando a 2300 kWh/m<sup>2</sup> em algumas regiões por ano [27]. Outro fator de vantagem é em relação à abundância do quartzo usado nos painéis fotovoltaicos. A maioria dos painéis fotovoltaicos é fabricada a partir do silício cristalino, de acordo com Silva [28] “o silício cristalino é obtido a partir do quartzo, que deve ser purificado até o grau solar, que exige 99,9999% de pureza. O Brasil possui jazidas de quartzo de alta pureza, mas ainda não desenvolveu a tecnologia necessária para obter silício com grau solar”. Encontra-se em aproveitamento o fomento a instalação de indústrias de silício para fabricá-lo no grau solar, já que o Brasil é o maior exportador mundial de silício, mas no grau metalúrgico [29].

## 6.2. Matriz de Energia Elétrica

Atualmente, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica [30], a matriz brasileira é uma das mais renováveis do mundo por conta da fonte hídrica que predomina (63%). Em seguida tem-se por outras fontes renováveis e em terceiro por fonte de combustíveis fósseis (Figura 6).

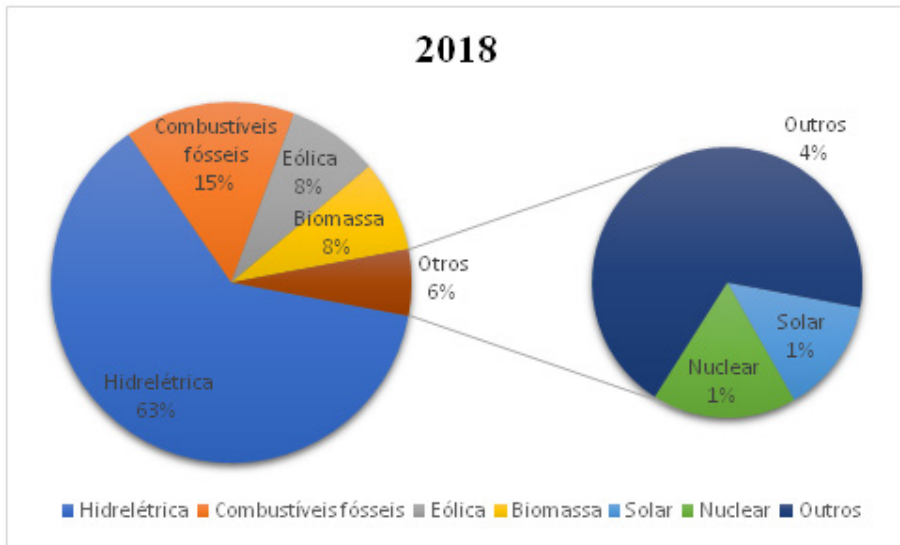


Figura 6. Matriz energética do Brasil em 2018. Fonte: [30].

No que diz respeito ao consumo de energia por setor, o residencial se encontra em segundo lugar, perdendo somente para o setor industrial [31]. A introdução da energia solar FV em residências levaria a uma eficiência energética como a redução de perdas de transmissão e distribuição e é um setor com ótimo aproveitamento desta tecnologia. Entretanto, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica [32], quase 90% dos brasileiros querem gerar energia renovável em casa, mas a geração distribuída ainda representa menos de 0,1% do atendimento da demanda atual.

### 6.3. Tarifas, Legislações e Incentivos financeiros

Mesmo tendo uma participação extremamente baixa na matriz energética, a energia solar tem alguns incentivos para aumentar sua aplicabilidade. O maior incentivo é o Sistema de Compensação de Energia da ANEEL, pela resolução 482, que se caracteriza pelo sistema de crédito de energia. Por exemplo, um consumidor que produz sua própria energia em casa através de energia solar, pode conectar o sistema na rede da concessionária local e fazer uso do sistema, cada kWh que “sobrar” do seu consumo, o consumidor pode injetar esse excedente na rede e obter um crédito de energia para o dia que ele não produz energia suficiente para suprir sua demanda. Os outros incentivos secundários são várias formas de financiamento para a compra do sistema solar, que ainda é considerado caro.

Outro incentivo que faz o crescimento da energia solar no Brasil é em relação as tarifas de energia. As tarifas de energia no Brasil são consideradas elevadas quando comparadas a outros países. Mas seu valor elevado não se motiva pelo preço em si da energia, e sim pelos atributos secundários como transmissão e distribuição, encargos do setor e os impostos, sendo este último o maior valor agregado entre todos. E como forma de encarecer ainda mais o valor, tem-se as bandeiras tarifárias (amarela e vermelha) que são acionadas quando problemas no setor energético surgem e é preciso ligar as termelétricas (fonte mais cara de energia) [30]. Em vista disso, a aquisição da energia solar, em alguns casos, torna-se benéfica por conta das tarifas elevadas.

Um dos maiores e recente (em 2015) marco do setor foi a isenção do PIS (Programas de Integração Social) e COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social) sobre a energia injetada e regulada pela resolução 482. Somente quatro estados (Amazonas, Paraná, Santa Catarina e Espírito Santo) ainda não aderiram a esta nova legislação [32].

## 7. CONCLUSÃO

A participação da fonte de energia solar é visível e crescente no mundo todo. Um dos precursores foi o alto investimento no setor e a ampliação de pesquisa e desenvolvimento das tecnologias solares. As maiores potências nesse segmento energético (China, Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália) se motivaram por: mais qualidade do ar; independência de importação de energia; eficiência energética; evitar riscos nucleares; apoio a expansão de fontes de energia renovável; combater as mudanças climáticas e melhorar a segurança energética.

No Brasil, ocorre um crescimento da fonte de energia solar, porém as políticas públicas energéticas existentes não são significativas, pois não ocorre nenhuma contrapartida monetária. Tem-se como exemplo a própria resolução 482 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), considerada a maior regulação de incentivo, que não inclui nenhum tipo de retorno financeiro ou subsídios para quem possui sistemas solares em residências. Ocorre somente a forma de crédito de energia, desmotivando vários possíveis produtores, diferentemente do que ocorre nos países mencionados anteriormente. O incentivo financeiro é um dos maiores motivadores, como a tarifa *feed in* (que compra a energia excedente do consumidor de energia residencial por cada KWh produzido). Assim, com o custo dos equipamentos solares cada vez mais baixos e um apoio regulatório mais expressivo, o crescimento a nível de competir com a fonte hídrica e de combustíveis fósseis é possível.

## REFERENCES

- [1] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2018) – REN21. RENEWABLES 2018 GLOBAL STATUS REPORT.
- [2] DAVID, T. M.; SABBADINI, F. S. (2017) Políticas públicas e eficiência energética em energia solar: uma análise comparativa entre Brasil e Alemanha *Anais do simpósio de excelência em gestão e tecnologia 2017 (SEGET 2017)*.
- [3] HANG, Q.; JUN, Z.; XIAO, Y.; JUNKUI, C. (2008) Prospect of concentrating solar power in China—the sustainable future *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 2505–2514.
- [4] China Electricity Council, *Basic data of electric power industry in 2011* (in Chinese), (2011) Disponível em: <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2013-04-19/100589.html>. Acesso em 6 dezembro 2018.
- [5] China Electricity Council, *Basic data of electric power industry in 2017* (in Chinese), (2017) Disponível em: <http://www.cec.org.cn/guihuayutongji/tongjixinxi/niandushuju/2018-02-05/177726.html>. Acesso em 6 dezembro 2018.
- [6] China National Renewable Energy Centre e Energy Research Institute of Academy of Macroeconomic Research/NDRC, (2017) *China Renewable Energy outlook 2017*.
- [7] LIANG, C. (2010). Overview of China's solar PV policies *DIGITIMES Research*.
- [8] International Energy Agency – IEA, (2017). Photovoltaic Power Systems Technology Colloboration Programme: *PVPS Annual Report 2017*.
- [9] International Energy Agency – IEA, (2017) National Survey Report of Photovoltaic Applications in United States of America 2017: *Photovoltaic Power Systems Programme*.
- [10] OKIOGA, I.T.; SIRELI, J.W.Y.; HENDREN, H. (2018) Renewable energy policy formulation for electricity generation in the United States *Energy Strategy Reviews*, vol. 22, pp. 365–384.
- [11] U.S. Energy Information Administration. 2018, *International Energy Statistics*, Disponível em: <https://www.eia.gov/beta/international/>. Acesso em 5 dezembro 2018.
- [12] HUANG, L.; HE, R.; YANG, Q.; CHEN, J.; ZHOU, Y.; HAMMITT, J.K.; LU, X.; BI, J.; LIU, Y. (2018) The changing risk perception towards nuclear power in China after the Fukushima nuclear accident in Japan *Energy Policy*, vol. 120, pp. 294–301.
- [13] CHERP, A.; VINICHENKO, V.; JEWELL, J.; SUZUKI, M.; ANTAL, M. (2017) Comparing electricity transitions: A historical analysis of nuclear, wind and solar power in Germany and Japan *Energy Policy*, vol. 101, pp. 612–628.

- [14] TANAKA, K.; SEKITO, M.; MANAGI, S.; KANEKO, S.; RAI, V. (2017) Decision-making governance for purchases of solar photovoltaic systems in Japan *Energy Policy*, vol. 111, pp. 75–84.
- [15] Ministry of Economy, Trade and Industry Agency for Natural Resources and Energy, *Japan's Energy: 20 questions to understand the current energy situation*, 2016 edition.
- [16] Institute for Sustainable Energy Policies, *The share of renewable energy in total power generation in Japan in 2017*, Disponível em: <https://www.isepp.or.jp/en/library/3362>. Acesso em 6 dezembro 2018.
- [17] International Energy Agency – IEA, (2017) National Survey Report of Photovoltaic Applications in Japan 2017: *Photovoltaic Power Systems Programme*.
- [18] PEGELS, A.; LÜTKENHORST W. (2014) Is Germany's energy transition a case of successful green industrial policy? Contrasting wind and solar PV *Energy Policy*, vol. 74, pp. 522–534.
- [19] PESCIA, D.; GRAICHEN, P. (2015) Understanding the Energiewend. *Agora Energiewende*.
- [20] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, (2018) *Power Generation In Germany – Assessment Of 2017*.
- [21] MELEDDU, M.; PULINA, M. (2017) Public spending on renewable energy in Italian regions. *Renewable Energy*.
- [22] Agencia Nacional De Energia Elétrica – Aneel, (2007) *Atlas de Energia Elétrica. Energia Solar*, 2. ed. Brasil.
- [23] TOLMASQUIM, M. T. (2000) As origens da crise energética brasileira. *Ambiente e Sociedade*.
- [24] MORAIS, L. C. (2015) *Estudo Sobre o Panorama da Energia Elétrica no Brasil e Tendências Futuras* Dissertação. Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Engenharia.
- [25] TIBA, C.; FRAIDENRAICH, N.; LYRA, F.J. (2002) *Solar energy resource assessment — Brazil*.
- [26] Agencia Nacional De Energia Elétrica – Aneel, *Ranking das tarifas*, Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>. Acesso em 15 novembro 2017.
- [27] SOLARGIS *Mapas Solares para o Brasil*, (2013). Disponível em: <http://solar-gis.com/products/maps-and-gis-data/free/download/brazil>. Acesso em: 3 de dezembro de 2018.
- [28] SILVA, R. M. (2015) *Energia Solar: dos incentivos aos desafios. Texto para discussão nº 166*, Brasília. Senado Federal.

- [29] Comitê Interministerial Sobre Mudança Do Clima — CIM, Governo Federal, *Plano Nacional Sobre Mudança do Clima, PNMC*: Brasília, Dezembro, 2008.
- [30] Agencia Nacional De Energia Elétrica – Aneel, (2018) *Banco de informações de Geração BIG: Matriz de Energia Elétrica*.
- [31] Empresa de Pesquisa Energética – EPE, (2018) *Balço energético nacional: ano base 2017*.
- [32] Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica –ABSOLAR, (2017) *Energia Solar Fotovoltaica: Panorama, Oportunidade e Desafios*.

# EL NEXO AGUA-ENERGÍA-ALIMENTOS EN LA AGROECOLOGÍA PERI-URBANA EN ROSARIO: UNA ESTRATEGIA DE INCLUSIÓN SOCIAL Y ACCIÓN HACIA LA SUSTENTABILIDAD DEL DESARROLLO

Terrile, Raúl<sup>1</sup>, Céspedes, Lucía<sup>2</sup>, Lang, Florencia<sup>2</sup>, Budai, Natalia<sup>1</sup>, Martínez, Nahuel<sup>1</sup>; Costa, Mariano<sup>1</sup>

## RESUMEN

Además de factores productivos como el agua y la tierra, la energía es un insumo crucial a lo largo del sistema alimenticio. En las últimas décadas, estos complejos sistemas se han convertido en intensivos usuarios de energía y emisores de gases de efecto invernadero (GEI), a raíz de lo cual han surgido diversos conceptos para describir esta problemática y potenciar su sustentabilidad. Dos de los más utilizados son el nexo agua-energía-alimentos, el cual se basa en una visión integral de las interrelaciones entre estos elementos dentro del entorno natural y las actividades humanas, y las millas de alimentos, el cual refiere a la distancia que recorren los alimentos desde su lugar de producción hasta su punto de consumo, representando así un indicador de dependencia económica y alimentaria y una medida del impacto ambiental del transporte de alimentos. En este contexto, el presente trabajo propone a la agroecología urbana y periurbana (AUP) como una alternativa integral que permite potenciar la seguridad alimentaria y los saberes tradicionales de los productores rurales, crear puestos de trabajos verdes y disminuir el impacto ambiental de los sistemas alimentarios al evitar el uso de agroquímicos sintéticos, proteger áreas verdes y disminuir las distancias recorridas por los alimentos. En base a una

---

1 Programa Alimentario – Secretaría de Producción - Municipalidad de Rosario– Argentina

2 Laboratorio Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático (LESyC), Instituto Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)- Universidad Nacional de Rosario (UNR)- Argentina.  
Mail: [luciacespedes91@gmail.com](mailto:luciacespedes91@gmail.com)

de las quintas periurbanas de la ciudad de Rosario, como modelo susceptible de ser replicado, se analizó la contribución en cuanto a reducción de emisiones de GEI y de energía consumida por disminución del transporte de lechuga, calabaza y zanahoria. Se planteó, asimismo, un escenario considerando las 800has del Cinturón Verde. En todos los casos, comparando las emisiones de GEI y la energía consumida por el transporte desde el lugar de origen actual de los vegetales y por el transporte desde la quinta hacia el punto de venta, se obtuvieron reducciones de más del 98%. Por otro lado, se planteó la incorporación de energías renovables, para aumentar la autonomía del productor y la estabilidad de la producción (ya que el productor no cuenta con servicio de energía eléctrica ni de gas natural) y disminuir el impacto ambiental. En primer lugar, se dimensionó un sistema de bombeo solar, el cual evita el uso de 7,3m<sup>3</sup> de gasolina anuales para alimentar el generador y la bomba actual e impide la emisión de 17,35tonCO<sub>2</sub>eq. Asimismo, permite la generación de 2,52MWh/año de energía eléctrica renovable, lo cual evita la emisión de 1,35ton-CO<sub>2</sub>eq. Por último, se dimensionó un biodigestor para gestionar adecuadamente los 1.750kg/año de residuos hortícolas, generar 131,4m<sup>3</sup> de biogás y obtener bioabono. Se observan, en conclusión, los diversos impactos positivos de la incorporación de energías renovables en la AUP para potenciar la sostenibilidad urbana.

## INTRODUCCIÓN

La energía es un insumo crucial a lo largo del sistema alimenticio actual, tanto como el agua y la tierra. Desde la producción y aplicación de fertilizantes y pesticidas, hasta la siembra, irrigación, cosecha, procesamiento, refrigeración, distribución y cocción utilizan enormes cantidades de combustibles fósiles como materia prima. Es por esto que los sistemas alimentarios se han convertido en vastos consumidores de energía y productores de GEI. Es así, que, en un contexto global de constante crecimiento poblacional acompañado de una fuerte presión sobre los recursos naturales y escasez de alimentos y tierras cultivables, la AUP se presenta como una alternativa integral que además permite mitigar los efectos del cambio climático y aumentar la resiliencia de los agroecosistemas. Permite, así, la creación de un nuevo paradigma de producción alimenticia amigable con el medio ambiente y socialmente justo.

Es en este contexto que surge el concepto de nexo agua-energía-alimentos, el cual se basa en una visión integral de la sostenibilidad que describe los complejos sistemas de recursos naturales, esenciales para el bienestar humano y el desarrollo sostenible. De esta manera, el presente trabajo presenta un enfoque que busca un conocimiento profundo de las interrelaciones entre el entorno natural (agroecosistemas) y las

actividades humanas (producción de alimentos) al analizar la contribución de la agroecología periurbana a la disminución del consumo de energía y de las emisiones de GEI en el transporte (puntos de producción cercanos a los puntos de consumo), la producción primaria (utilización de insumos naturales internos en lugar de agroquímicos e incorporación de energías renovables) y la post-cosecha (tratamiento de residuos hortícolas con generación de energía renovable). El objetivo es avanzar hacia una gestión adecuada de los recursos naturales, identificando soluciones de compromiso y sinergias entre los distintos elementos.

En este sentido, la ciudad de Rosario, Argentina es una de las pocas de América del Sur que ha incorporado plenamente la AUP en la planificación del uso del suelo y en las estrategias de desarrollo urbano y periurbano, lo cual le valió el Premio Internacional de Dubái a las Buenas Prácticas, administrado por el Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos. Partiendo de esta base, en el presente trabajo se buscó, a partir del análisis de una quinta en el periurbano, participar de la continuación del Proyecto de Agricultura Urbana y Periurbana y del Cinturón Verde a través de la incorporación de tecnologías limpias que mejoren la eficiencia energética e hídrica de los procesos, al mismo tiempo que aumenten la autonomía del productor y la estabilidad de la producción. Este caso se presenta como prueba piloto, plausible de ser replicada a nivel local y regional.

## **METODOLOGÍA**

### **1. MILLAS DE ALIMENTOS (FOOD MILES)**

Además de factores productivos tales como el agua y la tierra, la energía es un insumo crucial a lo largo del sistema alimenticio. Particularmente, en las últimas décadas, estos complejos sistemas se han convertido en intensivos usuarios de energía y emisores de GEI. De hecho, consumen el 30% de la energía global, y se espera que el consumo mundial de energía aumente hasta en un 50% para el año 2035 y que la producción de alimentos se incremente en un 60% debido al crecimiento poblacional esperado [1].

En este contexto, se ha comenzado a hacer énfasis en índices de soberanía alimentaria que indiquen en qué medida un país o ciudad puede brindar alimentos en calidad y cantidad suficientes a sus ciudadanos, sin depender de fuentes externas. Uno de los conceptos más utilizados, en este sentido, es el de millas de alimentos (food miles),

el cual refiere a la distancia que recorren los alimentos desde su lugar de producción hasta su punto de consumo. Resulta ser tanto un indicador de dependencia económica y alimentaria, como una medida del impacto ambiental y socioeconómico del transporte de los alimentos, desconocido muchas veces por los consumidores.

Este análisis aporta evidencia clara a modo de diagnóstico para propulsar políticas públicas de ordenamiento territorial que permitan un desarrollo sustentable tanto de las urbes como de las zonas periurbanas y rurales. En este sentido, el programa de Agricultura Urbana y Periurbana de Rosario y el Proyecto de Cinturón Verde han permitido la protección legal de áreas verdes dedicadas a la producción frutihortícola agroecológica, con el objetivo de disminuir las distancias recorridas por los alimentos, revalorizar los saberes tradicionales de los productores, producir alimentos sanos y fortalecer la seguridad alimentaria y economía locales.

En el presente trabajo se ha analizado la contribución de la agricultura periurbana a la disminución del consumo de energía y de emisiones de GEI en el sistema agroalimentario. Para esto, en primer lugar, se recabaron datos acerca de los vegetales más consumidos en la ciudad de Rosario [2]:

Tabla 1. Consumo de vegetales para una población del Gran Rosario de 1.500.000 y considerando una pérdida por transporte del 20%.

Vegetal	Consumo (kg/hab)	Producción vendida anual (ton/año)
Papa	58	104400
Tomate	26	6800
Lechuga	20	35940
Cebolla	10	18000
Zanahoria	6	10800
Calabaza	3	12376

De estos, se han tenido en cuenta la lechuga, calabaza y zanahoria al ser los vegetales producidos en la quinta analizada. Cabe destacar, entonces, que el presente análisis corresponde a un escenario acotado, que puede ser replicado a distintas escalas y considerando los vegetales apropiados para caso en particular. Se fomenta, sin embargo, el análisis simultáneo de diversos cultivos ya que la rotación y diversificación de cultivos es una de las premisas de la agroecología, en oposición al monocultivo.

A continuación, se realizó un detallado análisis de los lugares de origen actuales de estos vegetales, para luego calcular las emisiones de GEI y el consumo de energía del sistema de transporte de alimentos actual (sin considerar la refrigeración) [2].

Tabla 2. Toneladas de lechuga, zanahoria y calabaza transportadas de su lugar de origen actual hacia la ciudad de Rosario, por época de comercialización.

	Origen	Época de Comercialización	Distancia Promedio a la ciudad de Rosario (km)	Toneladas transportadas a Rosario por año
Lechuga	Provincia de Tucumán	Mayo-agosto	958	14000
	Provincia de Santiago del Estero	Septiembre-octubre	788	11500
	Región Periurbana de Mar del Plata	Diciembre-febrero	718	10440
Zanahoria	Origen	Época de Comercialización	Distancia Promedio a la ciudad de Rosario (km)	Toneladas transportadas a Rosario por año
	Mendoza	Noviembre-Febrero	1000	2742
	Buenos Aires	Noviembre-Febrero	750	1412
		Marzo-Junio		1495
	Santiago del Estero	Marzo-Junio	800	2243
		Julio-Septiembre		2181
	Garay, Santa Fe	Julio-Septiembre	300	727
Calabaza	Origen	Época de Comercialización	Distancia Promedio a la ciudad de Rosario (km)	Toneladas transportadas a Rosario por año
	Mendoza	Mayo-Julio	900	3332
		Agosto-Septiembre		1200
	Chaco	Enero-Febrero	720	1042
		Diciembre		550
	Santiago del Estero	Enero-Febrero	800	1100
		Marzo-Abril		1904
	Salta	Agosto-Septiembre	1200	942
		Octubre		952
		Noviembre		430
Formosa	Noviembre	880	522	
	Diciembre		402	

Para calcular las emisiones de gases de efecto invernadero se utilizó la siguiente ecuación:

$$ECO_2 = N * D * C_{TOTAL} * FE_{CO2} \quad (1)$$

Donde:

- $N$ : número de viajes por año que debe realizar un vehículo para transportar el alimento hasta el lugar de consumo.
- $D$ : distancia recorrida desde el lugar de origen hasta el lugar de consumo (km).
- $C_{total}$ : consumo de combustible del vehículo (litro/km). Es igual a la suma del consumo cuando el vehículo circula cargado (0,32 l/km) más el consumo cuando circula vacío (0,23 l/km) [2]. En este caso se considera gasoil como combustible típico utilizado en vehículos de carga.
- $f_{CO_2}$ : factor de emisión de  $CO_2$  equivalente del combustible (kg $CO_2$  eq/litro).

A su vez, el número de viajes será:

$$N = \frac{m_{vegetal}}{T_{vehículo}} \quad (2)$$

- $m_{vegetal}$ : masa total del vegetal transportada.
- $T_{vehículo}$ : capacidad de carga promedio del vehículo.

Por su parte, para el caso del cálculo de la energía consumida por el transporte de los vegetales hacia la ciudad de Rosario (E), se consideran los litros de combustible (gasoil) que pueden transformarse en energía a través del poder calorífico a partir de las siguientes ecuaciones:

$$L = D * C_{total} * N \quad (3)$$

$$E = K * L \quad (4)$$

Donde:

- $L$ : Volumen de combustible (litros).
- $K$ : poder calorífico del combustible (MJ/l).

Ahora bien, en todos los cálculos realizados en el trabajo se plantean los siguientes escenarios:

1. Emisiones de GEI producidas y energía consumida por el transporte de las toneladas de vegetales actualmente transportadas hacia Rosario desde sus distintos puntos de origen.

2. Emisiones de GEI producidas y energía consumida por el transporte de las toneladas de vegetales actualmente cultivados en la quinta periurbana analizada desde ésta hacia el punto de venta (Mercado del Patio).
3. Emisiones de GEI que se producirían y energía que se consumiría si las toneladas de vegetales que se cosechan en la quinta se traerían de cada lugar de origen actual.
4. Emisiones de GEI que se producirían y energía que se consumiría si las toneladas de vegetales que se podrían cultivar en las 800 hectáreas del cinturón verde se transportarían hacia el punto de consumo (Mercado del Patio).
5. Emisiones de GEI que se producirían y energía que se consumiría si las toneladas de vegetales que se cosecharían en el cinturón verde se traerían de cada lugar de origen actual.

Los datos de toneladas cultivadas en la quinta periurbana y en el cinturón verde se obtienen de los rendimientos de cultivos: 22 ton/ha para la lechuga, 80 ton/ha para la zanahoria y 12 ton/ha para la calabaza [2]. Dado que presentan dos rotaciones anuales, a lo largo del año se plantarán 44ton/ha, 160ton/ha y 24ton/ha, respectivamente.

Se deben considerar dos cuestiones en cuanto a los escenarios relacionados a la quinta periurbana y al cinturón verde. En primer lugar, la quinta cuenta con un total de 12 has, 2 de las cuales son estrictamente agroecológicas, mientras que las 10 has restantes se encuentran en transición. Se tomarán en cuenta las 12 has totales que en un futuro serán agroecológicas. En segundo lugar, dado que sólo se consideran 3 vegetales y que la agroecología fomenta la rotación de cultivos, de estas 12 y 800 has para la quinta y el cinturón verde, respectivamente, se considerarán para el cálculo 10 y 750 has divididas equitativamente entre los 3 vegetales. Se asume que las hectáreas restantes se utilizarán para los demás vegetales, que no se consideran en este estudio por no ser consumidos masivamente y no presentar un gran impacto en cuanto a transporte.

Para cada caso se realiza una comparación entre las emisiones de GEI producidas y la energía consumida por el transporte desde las zonas periurbanas de Rosario, y por el transporte desde los lugares de origen actuales. El objetivo es evidenciar y visibilizar la contribución de la agricultura periurbana a la disminución tanto de la energía como de las emisiones de GEI.

## 2. ENERGÍAS RENOVABLES

El nexo-agua-energía-alimentos presenta sistemas íntimamente relacionados, los cuales interactúan constantemente, por lo que las soluciones a adoptar deberán aprovechar las sinergias entre estos elementos. Las energías renovables representan una alternativa viable para abordar las posibles soluciones de compromiso requeridas para alcanzar simultáneamente los objetivos relacionados a la energía, al agua y a la producción alimenticia.

En el presente proyecto han trabajado en conjunto diversas instituciones de manera de establecer un abordaje interdisciplinario e integral: a) Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático, del Instituto de Mecánica Aplicada de la Facultad de Cs Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario, b) Programa Alimentario de la Secretaría de Producción de la Municipalidad de Rosario y c) productores frutihortícolas del periurbano. El objetivo es entrelazar los saberes tradicionales con los conocimientos científicos de las distintas disciplinas para incorporar energías limpias en una de las quintas periurbanas de Rosario de manera de mejorar la eficiencia energética y disminuir las huellas hídricas y de carbono.



Figura 1: Ubicación de la quinta periurbana rosarina analizada. Fuente: Google Maps.

Para esto, en primer lugar, se realizaron estudios de campo, a través de los cuales se detectaron las problemáticas principales en relación al nexo. Al estar ubicada dicha quinta en el periurbano y al cultivar a pequeña escala, no sólo se ve particularmente afectada por las constantes fluctuaciones en la economía nacional y las crisis energéticas, sino también por la falta de servicios básicos, impidiendo un desarrollo

estable. Esto se ve reflejado en el suministro de agua, el cual proviene de los acuíferos subterráneos, al no contar con acceso a la red de agua potable. Asimismo, para obtener este recurso el productor recurre a un generador a gasolina que activa una bomba sumergible, ya que tampoco cuenta con un servicio de red eléctrica estable. Este generador consume  $7,3 \text{ m}^3$  gasolina/año, con un costo de 7.300 USD y con las consecuentes emisiones asociadas, que se estiman en  $17,35 \text{ tonCO}_2$  equivalente. De esta manera, se puede observar la fuerte dependencia de combustibles fósiles para el bombeo de  $50 \text{ m}^3/\text{día}$  de agua de irrigación. Es de destacar, asimismo, que la eficiencia del sistema de riego actual (por inundación) es considerablemente baja, por lo que se plantea una sustitución por un sistema de riego por goteo, que permitirá el ahorro de  $20 \text{ m}^3/\text{día}$ .



Figura 2: A) generador a gasolina; B) Bomba de agua para irrigación. Fuente: Autoría propia

En consecuencia, se planteó la incorporación de energías renovables para potenciar la autonomía del productor y estabilidad de la producción y disminuir el impacto ambiental.

Por una parte, se ha dimensionado una instalación de bombeo solar. Este sistema está compuesto por una bomba hidráulica alimentada de manera directa por paneles solares fotovoltaicos. Este sistema será autónomo, pero en lugar de baterías, presentará un tanque de almacenamiento de agua, de manera disminuir el costo y facilitar la operación y mantenimiento. Considerando el sistema de riego por goteo ya instalado, el caudal a suministrar será de  $30 \text{ m}^3/\text{día}$ , es decir,  $1,25 \text{ m}^3/\text{h}$ . Por su

parte, la altura manométrica o altura total de bombeo será de 22 m, lo cual surge de la suma de la profundidad de la bomba actual (16 m), de la altura del tanque a instalar (4 m) y de las pérdidas (2 m). Bajo estas condiciones, la bomba seleccionada fue la Bomba sumergible para perforación de 4" MK4D 6, del fabricante DAB, la cual cuenta con una potencia de 0,75HP y un rendimiento de 0,8.

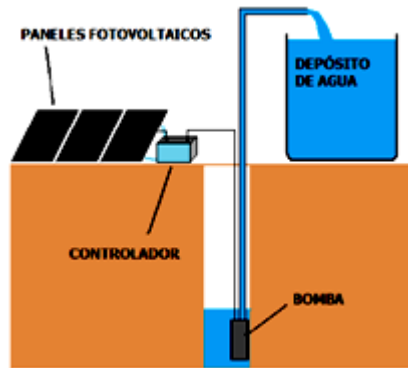


Figura 3: sistema autónomo de bombeo solar con tanque de almacenamiento. Fuente: [5] <https://www.sfe-solar.com/bombeo-solar/riego-solar/>

Por otra parte, se ha dimensionado un biodigestor que permitirá, a través de un proceso natural como lo es la digestión anaeróbica, el tratamiento de los residuos de la cosecha, de manera de gestionar eficientemente estos desechos, generar biogás y obtener un bioabono natural. Esta tecnología no sólo le permite al productor acceder a una nueva fuente de energía limpia y segura para realizar sus actividades diarias, sino también obtener un insumo interno natural para aumentar el rendimiento de los cultivos, el cual reemplaza a los fertilizantes naturales que el productor debe adquirir desde fuentes externas, con el consecuente costo. En definitiva, le permitirá, siguiendo los lineamientos de las buenas prácticas agroecológicas, aumentar su autonomía en materia de insumos externos (energía, fertilizantes), reemplazándolos con procesos internos naturales. Se ha escogido un diseño sencillo, de autoconstrucción, fácil instalación, mantenimiento y operación. El mismo contará con:

- Reactor: tanque domiciliario comercial de polietileno, con las correspondientes entradas y salidas de efluentes.
- Gasógeno de tanque invertido: dispositivo de almacenamiento de gas y regulación de la presión del gas. Consta de dos recipientes de diámetro ligeramente diferentes, de forma que uno pueda ser colocado dentro del otro de forma invertida. Uno de ellos se encuentra relleno de agua con la finalidad de realizar un sello de agua y evitar pérdidas de gas. El otro almacena el gas, ascendiendo a medida que aumenta el volumen almacenado. La presión estará regulada por el

peso que se coloque por encima de este tanque. Se recomienda que el mínimo sea de 10cm de columna de agua [4].

- Sistema de agitación manual: la agitación incrementa la producción de biogás y disminuye el tiempo de retención hidráulica (TRH) ya que distribuye uniformemente la temperatura, el sustrato y los productos dentro del digester y mejora el contacto entre las bacterias y la materia prima. En este caso se opta por un sistema mecánica manual ya que constituye un sistema adecuado y económico para la escala planteada.
- Válvulas de seguridad: permiten la liberación de gas en caso de alcanzar presiones peligrosas.
- Filtro de ácido sulfhídrico: en este caso se trata de virutas de hierro/acero (virulana) previamente oxidadas, por ser de fácil acceso y de bajo costo. La remoción de ácido se da por reacción con el óxido de hierro, el cual lo transforma en sulfuro de hierro.
- Trampas de agua: el biogás presenta un contenido de humedad relativamente alto, y en su recorrido por las cañerías, al experimentar temperaturas menores, se condensa. Asimismo, como el gasógeno elegido es de tanque invertido, el gas se hidratará por estar en contacto con el agua, por lo que la trampa de agua debe colocarse luego del mismo, en el punto más bajo del sistema (de lo contrario impide la circulación del gas). Estos purgadores deben disponer de una capacidad de un cuarto o medio litro [3].
- Apagallamas: accesorio de seguridad que evita eventuales retrocesos de fuego. En este caso, se opta por una válvula de una sola vía.

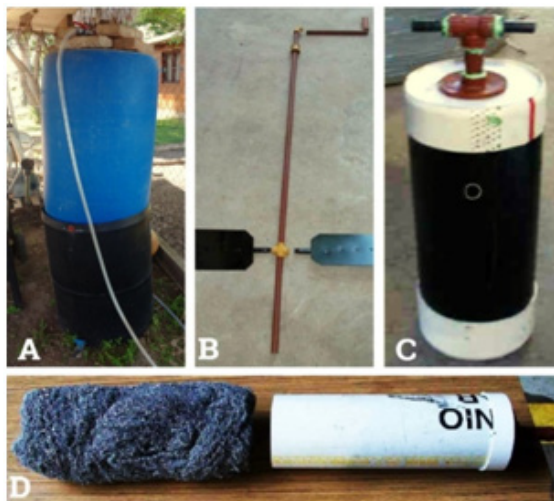


Figura 4: A) Gasógeno de tanque invertido. Fuente: autoría propia; B) agitador manual.; C) trampa de agua.; D) filtro de SH2. Fuente: [4] INTA, 2014



Figura 5: diagrama de la instalación de biodigestor rural. Fuente: autoría propia.



Figura 6: sistema de biodigestión rural. Fuente: autoría propia.

El TRH está íntimamente relacionado con el volumen del biodigestor a través de la siguiente relación (para el caso de un sistema semicontinuo de carga diaria):

$$Volumen_{digestor} (m^3) = Volumen\ de\ carga\ diaria \left( \frac{m^3}{día} \right) * Tiempo\ de\ retención (día) \quad (5)$$

El TRH expresa el tiempo que transcurre desde que el sustrato ingresa al digestor hasta que egresa del mismo, por lo que está íntimamente relacionado a la temperatura de operación. Esto se debe a que, como cualquier proceso biológico, la digestión anaeróbica depende fuertemente de la temperatura, ya que a medida que aumenta esta variable, aumenta también la velocidad de crecimiento de los microorganismos y por ende, los procesos de digestión y la producción de biogás. Existen tres rangos en los que puede trabajar un biodigestor: psicrófilo ( $\leq 25\ ^\circ C$ ), mesófilo (entre  $25$  y  $45\ ^\circ C$ ) o termófilo (entre  $45$  y  $65\ ^\circ C$ ) [3]. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a medida que aumenta la temperatura también aumenta la inestabilidad del proceso, por lo que resulta más vulnerable ante cualquier cambio en las condiciones de operación. Dadas las temperaturas templadas de la ciudad de Rosario y ante la decisión

de no incorporar calefacción, se trabajará en régimen mesófilo, el cual está asociado a un tiempo de retención promedio de 30 días [3].

Por otro lado, el volumen de carga diaria refiere al volumen de materia prima (ya diluida) que ingresará al digestor por día. En este caso, este parámetro resulta fijo, asociado a los desechos hortícolas obtenidos. Es importante destacar, entonces, que este valor incluye no sólo los residuos obtenidos, los cuales se calcularon a partir de la masa cosechada diaria informada por el Programa Alimentario, asumiendo un porcentaje de pérdida típico del 20%, sino también el agua de dilución. Es necesario añadir agua al sustrato debido a que la movilidad de las bacterias metanogénicas se ve crecientemente limitada a medida que aumenta el contenido de sólidos, por lo que afectará también a la eficiencia del sistema [3].

En general, toda materia orgánica está compuesta por una fracción de sólidos, denominados sólidos totales, y por agua. Para el caso de los residuos hortícolas, se estima un porcentaje de sólidos totales de 12,5% [3]. Sin embargo, para un correcto funcionamiento, la materia prima debe ingresar con un contenido de sólidos de entre 7 y 9%, por lo que, además del agua contenida en los desechos, se debe añadir el agua de dilución mencionada. Para calcular la cantidad de agua a añadir se plantea el siguiente balance de masa:

$$M1 * C1 = M2 * C2 \quad (6)$$

- $M1$ : masa del sustrato sin agua de dilución (kg).
- $C1$ : concentración de sólidos totales de la materia prima (%).
- $M2$ : masa total del sustrato más el agua de dilución (kg).
- $C2$ : concentración de sólidos totales de la mezcla de sustrato más agua (8%, recomendado).

Así la masa de agua a agregar ( $M_{agua}$ ) será:

$$M_{agua} = M2 - M1 \quad (7)$$

Dado que el biodigestor necesita de una fuente de agua externa, aplicando mayor presión en los recursos naturales, se ha optado por un sistema de recolección de agua de lluvia en el techo de las instalaciones de la quinta periurbana.

Como se puede ver, ambas tecnologías renovables son altamente versátiles y flexibles, de manera que la versión más simple y sencilla posibilita un desarrollo sustentable en áreas sin acceso a los servicios básicos, mejorando también la calidad de vida.

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 1. MILLAS DE ALIMENTOS (FOOD MILES)

Como ya se ha establecido, se ha intentado demostrar la contribución de la producción local de alimentos a disminuir la energía y las emisiones de GEI producidas por la cadena alimenticia. En particular, el concepto de millas de alimentos analiza la etapa de transporte.

En primer lugar, se han obtenido los siguientes resultados para el caso de las emisiones producidas y energía consumida por el transporte de los vegetales desde su lugar de origen actual hacia la ciudad de Rosario (escenario 1):

Tabla 3. Emisiones producidas y energía consumida por el transporte de los vegetales analizados desde su lugar de origen actual hacia Rosario.

Vegetal	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (kg)	Energía (MJ)
Lechuga	12.245.607	172.369.854
Zanahoria	626.804	8.746.586
Calabaza	810.085	11.402.808

En segundo lugar, teniendo en cuenta el escenario 2, se obtienen los resultados para el caso de los cultivos cosechados en las 10 has de la quinta periurbana analizada (3,33 has para cada cultivo).

Tabla 4. Emisiones producidas y energía consumida por el transporte de los vegetales analizados desde la quinta periurbana hacia el punto de venta.

Vegetal	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (ton)	Energía (MJ)
Lechuga	0,47894	6.742
Zanahoria	0,30478	4.290
Calabaza	0,04572	644

En tercer lugar, para poder realizar una comparación clara entre el transporte desde origen actual y desde la quinta periurbana se analiza una cantidad igual de masa producida, es decir, las emisiones que se producirían y la energía que se consumiría si las toneladas que se producen en la quinta se traerían de cada uno de sus lugares actuales (escenario 3).

Tabla 5. Emisiones que se producirían y energía que se consumiría si los vegetales que se cultivan en las 10has de la quinta se traerían desde sus lugares de origen actuales.

	Origen	Emisiones (ton)	Energía (MJ)
Lechuga	Tucumán	57,353	807.306
	Santiago del Estero	47,176	664.047
	Región periurbana de Mar del Plata	42,985	605.058
Zanahoria	Mendoza	38,402	540.553
	Buenos Aires	28,878	433.301
	Santiago del Estero	30,783	406.488
	Santa Fe (Garay)	11,734	165.169
Calabaza	Santiago del Estero	4,617	64.995
	Chaco	4,160	58.560
	Mendoza	5,189	73.039
	Salta	6,903	97.171
	Formosa	5,075	71.430

Se pueden observar las drásticas reducciones tanto en emisiones como en energía en los siguientes gráficos, que en todos los casos alcanza más del 98%.

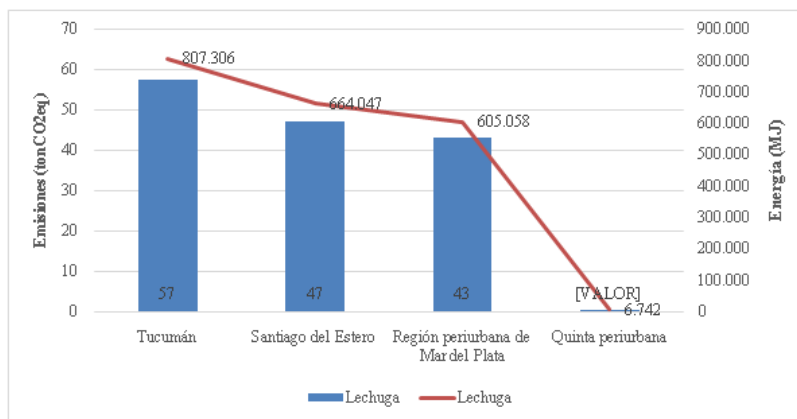


Figura 7: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de lechuga que se pueden cosechar en la quinta entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

El nexo agua-energía-alimentos en la agroecología peri-urbana en Rosario: una estrategia de inclusión social y acción hacia la sustentabilidad del desarrollo

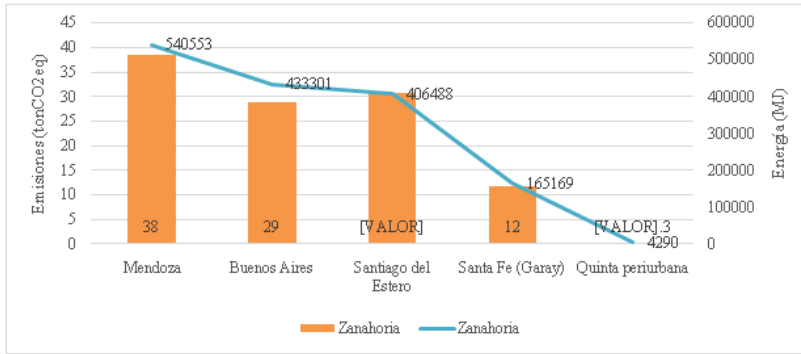


Figura 8: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de zanahoria que se pueden cosechar en la quinta entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

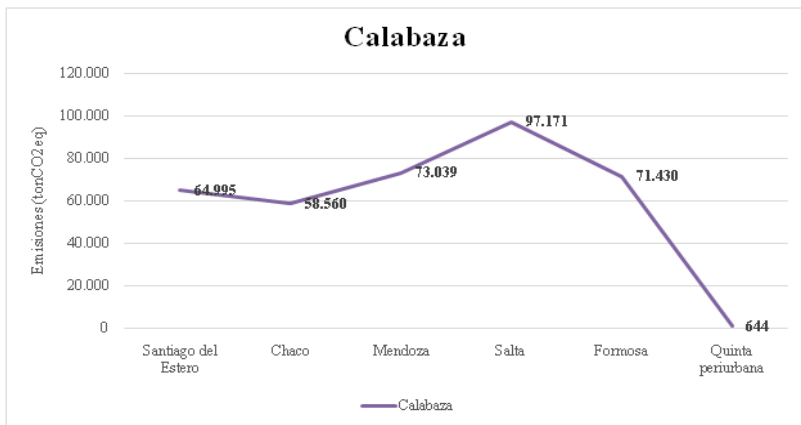
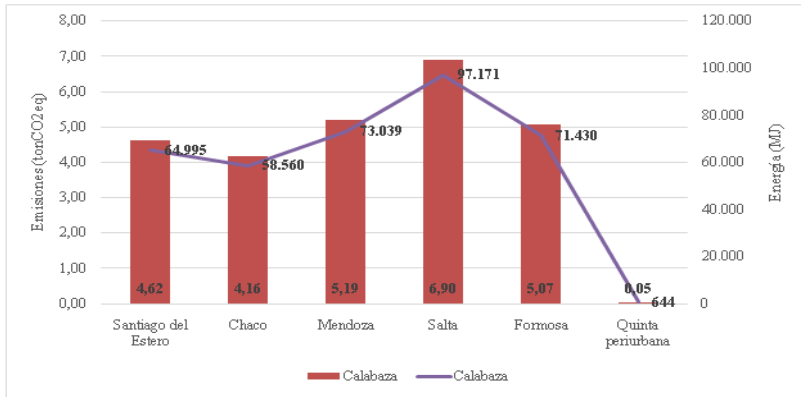


Figura 9: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de calabaza que se pueden cosechar en la quinta entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

Por último, se obtienen los resultados observados en la tabla 6 para las emisiones y la energía que se produciría si se cosecharían lechuga, zanahoria y calabaza en las 750 has analizadas del cinturón verde (250 has para cada vegetal). Luego, nuevamente, se comparan con las emisiones que se producirían y la energía que se consumiría si estas mismas toneladas se traerían desde sus lugares de origen actuales. En todos los casos se replica la reducción de más del 98% para ambas variables.

Tabla 6. Emisiones que se producirían y energía que se consumiría por el transporte desde un punto medio del Cinturón Verde hacia el punto de consumo.

Vegetal	Emisiones CO <sub>2</sub> eq (ton)	Energía (MJ)
Lechuga	45	207.051
Zanahoria	29	131.760
Calabaza	4	19.764

Tabla 7. Emisiones que se producirían y energía que se consumiría si los vegetales que se cultivan en las 750 has del Cinturón Verde se traerían desde sus lugares de origen actuales.

	Origen	Emisiones (ton)	Energía (MJ)
Lechuga	Tucumán	4.306	60.608.554
	Santiago del Estero	3.542	49.853.383
	Región periurbana de Mar del Plata	3.227	45.424.783
Zanahoria	Mendoza	2.883	40.582.080
	Buenos Aires	2.311	32.530.080
	Santiago del Estero	2.168	30.517.080
	Santa Fe (Garay)	881	12.400.080
Calabaza	Santiago del Estero	347	4.879.512
	Chaco	312	4.396.392
	Mendoza	390	5.483.412
	Salta	518	7.295.112
	Formosa	381	5.362.632

El nexo agua-energía-alimentos en la agroecología peri-urbana en Rosario: una estrategia de inclusión social y acción hacia la sustentabilidad del desarrollo

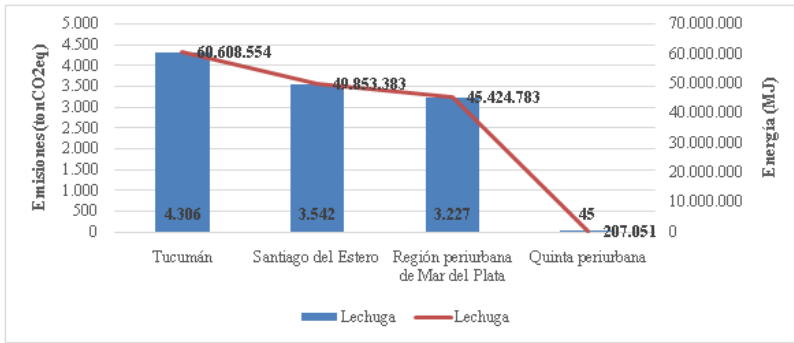


Figura 10: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de lechuga que se pueden cosechar en el cinturón verde entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

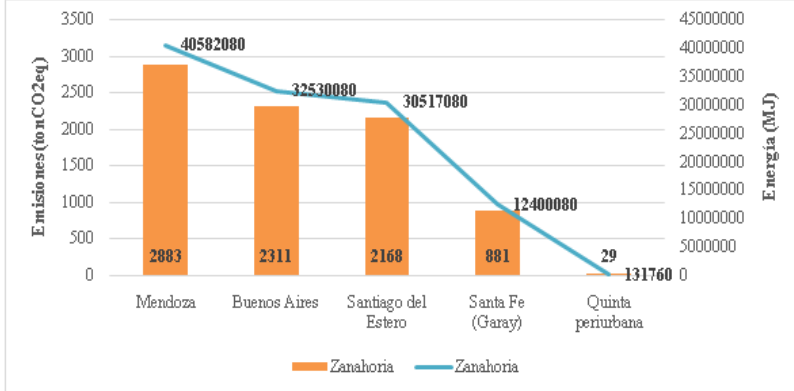


Figura 11: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de zanahoria que se pueden cosechar en el cinturón verde entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

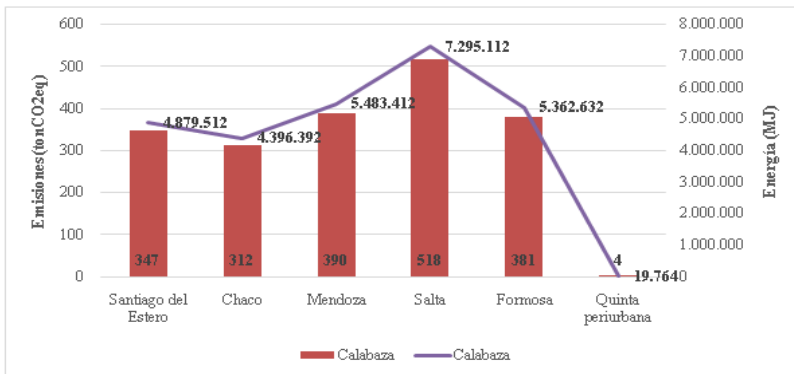


Figura 12: comparación de las emisiones producidas y la energía consumida por el transporte de las toneladas de calabaza que se pueden cosechar en el cinturón verde entre lugar de origen actual y quinta periurbana. Fuente: autoría propia.

Si, además, consideramos que Argentina emitió 364,4 MtnCO<sub>2</sub>eq durante el año 2016 [6] y durante ese año tuvo una población estimada de 43,6 millones de habitantes [7], entonces cada argentino emitió 8,36 tnCO<sub>2</sub>eq ese año. Así, las reducciones en las emisiones correspondientes al escenario del Cinturón Verde serían:

Tabla 8. Compensación de las emisiones de GEI en términos de habitantes argentinos.

Lugar de origen	Compensación en números de argentinos
Lechuga	
Tucumán	510
Santiago del Estero	418
Mar del Plata	381
Zanahoria	
Mendoza	341
Buenos Aires	273
Santiago del Estero	256
Santa Fe	102
Calabaza	
Santiago del Estero	41
Chaco	37
Mendoza	46
Salta	61
Formosa	45

En definitiva, este análisis demuestra que es posible reducir significativamente las emisiones de GEI y la energía consumida en el transporte a través de la producción de vegetales en la zona periurbana de Rosario. Sin embargo, es de destacar que esta producción localizada presenta otro conjunto de beneficios, tales como reducción de tránsito pesado en rutas (con la consecuente disminución de accidentes, tráfico), de contaminación del aire (polvos finos), de contaminación acústica y de propagación de plagas y enfermedades que puedan acarrear las hortalizas. Asimismo, se disminuyen las pérdidas de alimentos por el menor tiempo que transcurre entre la cosecha y el consumo, y se incrementa la seguridad alimentaria.

## 2. ENERGÍAS RENOVABLES

El bombeo solar en la quinta periurbana se presenta como alternativa sustentable para extraer los 50.000 L diarios (30.000 L luego de la implementación del riego por goteo) necesario para la irrigación. De esta manera, la extracción del agua puede realizarse sin la utilización de combustibles fósiles y en lugares donde no se cuenta

con red eléctrica. En este sentido, al evitar el uso de 7,3 m<sup>3</sup> de gasolina anuales para alimentar el generador y la bomba actual, impide la emisión de 17,35 tonCO<sub>2</sub>eq. Asimismo, se generarán 2,52 MWh/año de energía eléctrica renovable. Dado el factor de emisión de la red eléctrica argentina, 0,535 tonCO<sub>2</sub>/MWh [8], se evita la emisión de 1,35 tonCO<sub>2</sub>eq, con lo cual la reducción de emisiones asciende 18tonCO<sub>2</sub>eq por año. Asimismo, se reduce la dependencia del productor en insumos externos, en este caso, combustible fósil con un precio en constante ascenso.

Por otro lado, la instalación de un biodigestor permitirá: mejorar las condiciones sanitarias de la quinta analizada debido a una gestión adecuada de los residuos vegetales, suministrar subproductos útiles con valor agregado, como lo es el bioabono, y generar energía renovable.

Como ya se ha establecido, los residuos hortícolas presentan un porcentaje de sólidos totales de 12,5% [3], por lo que deberán ser diluidos hasta lograr una concentración de 8 % de sólidos totales. Teniendo estos parámetros fijos, junto a la cantidad cosechada diaria estimada por el equipo técnico Programa Alimentario (24 kg/día), se puede obtener la masa total de sustrato diaria (M2) y así la masa de agua a añadir para la dilución, considerando asimismo que el 20% de la cantidad cosechada constituye pérdidas que pueden ser utilizadas como materia prima del biodigestor. Así:

$$M2 = \frac{4,8 \text{ kg} / \text{día} * 12,5\%}{8\%} = 7,5 \text{ kg} / \text{día} \quad (8)$$

De esta manera, la masa de agua será (considerando que estos 7,5 kg = 7,5 L, ya que debido a la alta dilución se puede considerar que presenta la densidad del agua):

$$7,5 \frac{\text{kg}}{\text{día}} - \frac{4,8 \text{ kg}}{\text{día}} = \frac{2,7 \text{ kg}}{\text{día}} = 2,7 \text{ L} / \text{día} \quad (9)$$

La misma será provista por un sistema de recolección de agua de lluvia que permitirá recolectar 150.000 L/año (cerca de 400 L/día) en un área de 204 m<sup>2</sup>, de manera de reducir la presión sobre el recurso de agua subterránea. Como se puede observar, se presenta una cantidad considerable de agua en exceso recolectada, que puede ser utilizada para riego.

Dados entonces el volumen de carga diaria (7,5 kg/día o 7,5 L/día), y el tiempo de retención para un régimen mesofílico en áreas templadas (30 días) [3], se tiene que el volumen del biodigestor necesario será de 230L, el cual es relativamente pequeño de manera que su mantenimiento, operación y localización serán sencillos.

Considerando, por último, que los residuos hortícolas producen 74 m<sup>3</sup> biogás/Ton-Fresca [9], se estima que la producción de biogás diaria será de 0,36 m<sup>3</sup>, mientras que la anual será de 131,4 m<sup>3</sup>. Considerando un poder calorífico promedio de 5.750 Kcal/m<sup>3</sup>biogás [10], se pueden obtener 2.070 Kcal diarias y 755.550Kcal anuales. Dado que una cocina a gas de dos hornallas consume entre 0,2 y 0,42 m<sup>3</sup>/h [3], la producción de biogás permitirá el uso de cocina durante 0.85-1,8 hrs por día. Por su parte, un generador eléctrico de 600 W presenta un consumo de entre 0,7 y 0,8 m<sup>3</sup>/kWh [3], por lo que se pueden generar entre 0,51 y 0,45 kWh por día, y entre 186,15 y 164,25 kWh por año.

## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se han establecido las siguientes conclusiones en relación a la contribución de la agricultura urbana y periurbana a la reducción del impacto socioambiental de la cadena alimenticia:

- En todos los escenarios planteados se observa una reducción de más del 98% en emisiones de GEI producidas y energía consumida en el transporte para el caso de la producción periurbana en comparación con la producción desde lugar de origen actuales.
- La reducción en el transporte de alimentos presenta además diversos beneficios tales como reducción de tránsito pesado en rutas, la contaminación del aire y la pérdida de alimentos por el tiempo transcurrido entre la cosecha y el consumo, todo lo cual potencia la seguridad alimentaria.
- Las energías renovables presentan un fuerte impacto en la autonomía del productor y la reducción del impacto ambiental. Por un lado, dado el abundante recurso solar en la ciudad de Rosario, el sistema de bombeo solar le permite un acceso al agua de irrigación más seguro y confiable, en relación al costoso generador a gasolina utilizado actualmente. Este permite la generación de 2,52 MWh por año de energías renovables, previniendo el uso de 7,3 m<sup>3</sup> de gasolina anuales, con las consecuentes 17,35 tonCO<sub>2</sub>eq. Por otro lado, la disponibilidad de biomasa, particularmente de desechos hortícolas, permite la incorporación de tecnologías de biodigestión, que presentan tres considerables resultados: la generación de biogás para obtener energía calórica (131,4 m<sup>3</sup> de biogás anuales, equivalentes a 755.550 Kcal) para las actividades diarias del productor; la obtención de un abono natural como insumo interno y la gestión adecuada de

cerca de 2 toneladas de residuos orgánicos. Asimismo, para fomentar el ideal de economía circular, el agua necesaria para este equipo se obtendrá parcialmente de la recolección de lluvia a partir del techo de un galpón de la quinta.

De esta manera, se ha buscado que el proyecto aborde cada uno de los ejes del desarrollo sustentable, desde el ámbito económico hasta el social y ambiental en el contexto de una quinta periurbana agroecológica. En conclusión, se ha demostrado el aumento en la seguridad alimentaria y la disminución en el consumo de energía y las consecuentes emisiones de GEI debido al desarrollo de agricultura periurbana, así como la su impacto en la creación de empleos verdes, dinamización de economías regionales, revalorización de saberes tradicionales y protección de áreas verdes. El resultado final es un modelo de economía social solidaria en una ciudad inclusiva y sustentable, que considera a los agentes económicos junto a sus identidades sociales, historia y cultura.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos, en primer lugar, la colaboración del productor agroecológico de la ciudad de Rosario, Javier Tolaba, por brindarnos la posibilidad de realizar los estudios de campo en la quinta periurbana. Asimismo, agradecemos el asesoramiento técnico-científico del Mg Ing Marcelo Vega y el Dr. Rubén Piacentini.

#### REFERENCIAS

- [1] FAO - IPCC, (2014). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *El nexo Agua-Energía-Alimentos. Un nuevo enfoque en respaldo de la seguridad alimentaria y de una agricultura sostenible.*
- [2] PIACENTINI, R.; VEGA, M. (2014). *Consumo de combustible y emisión de CO2 comparando la producción y transporte de vegetales hacia la ciudad de Rosario, Argentina con una producción local.* RUAF.
- [3] FAO, (2011). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Manual de biogás.*
- [4] INTA, (2014). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. *Biodigestores de pequeña escala. Un análisis práctico sobre su factibilidad.*
- [5] SunFields Europe. <https://www.sfe-solar.com/bombeo-solar/riego-solar/>

- [6] SGAYDS. (2019). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC)*.
- [7] INDEC, (2013). Instituto Nacional de Estadística y Censos. *Estimaciones y proyecciones de población 2010-2040*.
- [8] Secretaría de Energía de la República Argentina, (2015). <http://datos.minem.gob.ar/dataset/calculo-del-factor-de-emision-de-co2-de-la-red-argentina-de-energia-electrica>
- [9] ACHINAS S. et al., (2017). A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. Publicado en *Engineering*, Vol. 3, Ed. 3, pp. 279-429.
- [10] Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca de la República Argentina, (2015). Taller de Capacitación de Biogás. Capítulo I: introducción a la fermentación entérica. *UTF/ARG/20/ARG - Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa (PROBIOMASA)*.

Este libro es una continuación del primer volumen relativo a las investigaciones que se están realizando en la región sudamericana sobre energías convencionales y renovables y sobre eficiencia energética. En particular incluye artículos que están dedicados a analizar aplicaciones en los siguientes temas: Energías solar fotovoltaica, eólica y biomasa, eficiencia energética en viviendas y edificios, generación eléctrica, redes inteligentes y nexos energía-agua-alimentos.

Esperamos que el presente libro permita ampliar los conocimientos sobre las aplicaciones energéticas en Sudamérica y que dichos conocimientos puedan servir de base para aplicaciones diversas que mejoren el aprovechamiento energético y reduzcan las emisiones contaminantes.

ISBN 978-987-82864-1-9



9 789878 286419



CENTRO DE ESTUDIOS  
INTERDISCIPLINARIOS

UNR