

HÉCTOR CHIACCHIARINI

> coordinador

# ENERGÍA

> Investigaciones en América del Sur



Serie **Extensión**  
Colección **Ciencias y Tecnología**



| Héctor Chiacchiarini, coordinador |

# ENERGÍA

## Investigaciones en América del Sur



Serie **Extensión**  
Colección **Ciencias y Tecnología** |

---

Energía : investigaciones en América del Sur / Silvia Daniela Romano ... [et al.]; coordinación general de Héctor Gerardo Chiacchiarini. - 1a ed. - Bahía Blanca : Editorial de la Universidad Nacional del Sur. Ediuns, 2017.  
Libro digital, PDF

Archivo Digital: descarga y online  
ISBN 978-987-655-162-5

1. Energía. I. Romano, Silvia Daniela II. Chiacchiarini, Héctor Gerardo, coord.  
CDD 333.79

---



Editorial de la Universidad Nacional del Sur |  
Santiago del Estero 639 | B8000HZK Bahía Blanca | Argentina  
[www.ediuns.uns.edu.ar](http://www.ediuns.uns.edu.ar) | [ediuns@uns.edu.ar](mailto:ediuns@uns.edu.ar)  
Facebook: EdiUNS | Twitter: EditorialUNS



**Red de Editoriales de Universidades Nacionales**



Libro  
Universitario  
Argentino

---

El presente libro fue financiado con fondos de la Universidad Nacional del Sur (Argentina) y de la Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia).

---

Diseño interior: Alejandro Banegas  
Diseño de tapa: Fabián Luzi

Todos los contenidos del presente libro son responsabilidad exclusiva de los autores.

Queda hecho el depósito que establece la Ley n.º 11723.  
Bahía Blanca, Argentina, septiembre de 2017.  
© 2017, Ediuns.



## **AGRADECIMIENTOS**

Este libro de divulgación de las diferentes temáticas que abordan los integrantes del Comité Académico de Energía, de la Asociación de Universidades del Grupo Montevideo, fue un camino recorrido entre todos, donde se destacan la importancia de los temas y el nivel de exposición. Para la concreción del mismo queremos dejar expresado nuestro enorme agradecimiento por quienes directa o indirectamente contribuyeron al resultado del libro: Al Dr. Álvaro Maglia por sus valiosos aportes que clarificaron muchas de nuestras dudas; A la Universidad Nacional del Sur (Argentina) y la Universidad Mayor de San Andrés (Bolivia) que contribuyeron financieramente a la materialización del libro. Dejamos un apartado especial para nuestro colega el Dr. Héctor G. Chiacchiarini por la enorme labor de coordinación de los trabajos que integran el presente libro. Agradecemos también a la Dra. Graciela S. Landriscini por la evaluación del libro.

Comité Académico de Energía AUGM.



## PRÓLOGO

Culminado el proceso de producción académica emprendido tiempo atrás por el Comité Académico de Energía de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (CAE - AUGM), tanto como las tareas de compilación, de revisión, de edición, de búsqueda de la editorial y también del encuentro de ciertos financiamientos necesarios para la concreción de la publicación de este libro; tengo el placer y el deber de prologarlo y vaya en estas líneas mi gratitud al CAE - AUGM por haberme hecho partícipe de este proceso y esta iniciativa, y en fin, por invitarme a formar parte de este volumen.

Resulta sustancial indicar que este libro es el producto del trabajo académico en red de nuestras universidades públicas que componen AUGM, en una temática de cuyo carácter estratégico no hay lugar a duda alguna. Precisamente, en la propia conceptualización de lo que debe ser un Comité Académico de AUGM, figura el carácter estratégico para la región de la temática que cultiva y sobre la cual produce conocimiento y retroalimenta y activa el trabajo académico, para arrojar luz sobre un asunto trascendente para la región.

La mirada multidisciplinaria, interdisciplinaria y transdisciplinaria presente en esta obra, que abordan las diferentes componentes de la temática energética, da cuenta de algunos de los temas fundamentales para la región y alienta el trabajo académico en los diferentes modos: la producción científico tecnológica, la formación en el más alto nivel (posgrados académicos en particular doctorados), la innovación y la transferencia,

en una franca incursión a la internacionalización y regionalización de temáticas que no reconocen fronteras.

La producción de este libro estuvo signada por un trabajo previo de delimitación de temas, de organización en capítulos, de orientaciones académicas, de la selección de académicos especialistas en las diferentes temáticas y abordajes disciplinarios e interdisciplinarios; y en estos asuntos el CAE - AUGM fue crucial, tanto en la componente de la creación de confianza y de articulación entre nuestras universidades y entre las unidades académicas que se expresan en el Comité, como la del conocimiento profundo de los dominios de cada integrante del Comité. Los académicos participantes contaron además con respaldo de sus universidades para la dedicación a la tarea y también gestionaron las voluntades para un trabajo en red de alto compromiso con unos logros comunes; que seguramente redundan en beneficios para estudiantes y académicos de la región y para organismos nacionales e internacionales tanto como multilaterales.

La soberanía energética de los países de la región, tema de alto interés y de permanente uso en el discurso y en la acción de los decisores de políticas públicas en energía en nuestros países y en nuestra región, encontrarán en este libro aportes sustanciales para la construcción de tales políticas y a la vez conocerán mejor este instrumento que representa la AUGM y su Comité Académico de Energía.

Desde la Secretaria Ejecutiva de AUGM mantenemos el compromiso adoptado con la tarea de apoyar —dentro de sus competencias— el trabajo académico y en particular la producción de comunicaciones como las que aquí se realizan.

Prof. Álvaro Maglia Canzani  
Secretario Ejecutivo  
Asociación de Universidades Grupo Montevideo AUGM

# ÍNDICE

Prefacio	11
Os dez anos do Comitê Acadêmico de energia da Associação das Universidades Grupo Montevideú (CAE/AUGM)	13
Introducción	17
<b>Parte I: Biocombustibles</b>	
Biocombustibles líquidos en la Argentina <i>Silvia D. Romano</i>	21
Experiencias con cultivos energéticos en Mendoza <i>Cecilia Rebora, Leandra Ibareuren, Alejandra Bertona</i>	35
Biorrefinería microalgal: Una tecnología en desarrollo para la producción de biodiesel y co-productos de valor agregado <i>Cecilia A. Popovich, Patricia I. Leonardi</i>	49
La producción del carbón vegetal <i>Paulo C. da Costa Pinheiro</i>	69
<b>Parte II: Eficiencia energética</b>	
La eficiencia energética como factor clave en las construcciones sustentables. Estudio de caso del edificio Sustenta, Rosario, Argentina <i>Marcelo Vega, Natalia Feldman, Ruben D. Piacentini</i>	91

Dimensionamiento de sistemas híbridos de generación de energía <i>Justo J. Roberts, Agnelo M. Cassula, Jose L. Silveira, Pedro O. Prado</i>	109
Energía e equipamentos WLEDi para iluminação viária <i>Elvo C. Burini Junior</i>	137
Conversión electrónica de potencia para la gestión eficiente de la energía eléctrica <i>Héctor G. Chiacchiarini, Jorge A. Solsona, Alejandro R. Oliva, Claudio A. Busada</i>	165
<b>Parte III: Energía solar</b>	
Centrales solares fotovoltaicas en áreas con pasivos ambientales <i>Jorge L. Schnarwiler, Justo J. Roberts, Pedro O. Prado, Silvia L. Bocero, Agnelo M. Cassula</i>	183
Aplicaciones de energía solar en el nordeste argentino <i>Arturo J. Busso, Luis H. Vera, Manuel Caceres, Andrés D. Firman</i>	209
<b>Parte IV: Políticas energéticas</b>	
Planificación energética y condiciones de borde: Propuestas para el caso argentino <i>Carina Guzowski, Mariana Zilio, Marina Recalde, Ana L. Guerrero, Florencia Zabaloy</i>	243
Matriz energética y sistema eléctrico: Estrategia e integración <i>Patricia L. Arnera, M. Beatriz Barbieri, Mario Beroqui, Santiago Barbero</i>	263
Sistemas de innovación en energías renovables y eficiencia energética: Un análisis de políticas en la Argentina <i>Carolina Pasciaroni, Carina Guzowski, Florencia Zabaloy</i>	287



## PREFACIO

Es para mí un inmenso placer y honor poder presentar este libro, que espero sea el inicio de muchos más. Los temas tratados son de estratégica importancia para la soberanía energética de los países de la región. En efecto, temas de desarrollo energético donde quedan de manifiesto las amplias y variadas ramas de investigación y desarrollos de mis compañeros y amigos del Comité Académico de Energía (CAE).

El presente volumen presenta una diversidad interesante en temas relacionados con la energía. No obstante, están correctamente y estratégicamente desagregados en cuatro capítulos: biocombustibles, eficiencia energética, energía solar, y políticas energéticas, donde vemos el complejo y variado tema de la energía en sus diferentes matices. Contemplamos además, la dedicación exhaustiva de investigación que se ha realizado en los diferentes grupos académicos y de investigación que han presentado sus trabajos para la divulgación en la presente obra.

El objetivo del presente libro es divulgar la temática energética y el grado de avance en investigación y desarrollo de las universidades de los países que integran el CAE. En el mismo expresamos diferentes respuestas al complejo tema de energía, donde cada vez toma un protagonismo más relevante. En efecto, pretender extendernos con un desarrollo cada vez más acelerado y exacerbado utilizando recursos finitos, es una utopía y a la larga (o a la corta) un problema de escala mundial de consecuencias impredecibles. Sin dudas es una obligación del sector académico e investigador poder ofrecer alternativas al modelo actual de energía y las consecuencias que ello acarrea

## Prefacio

para el presente y las generaciones futuras que serán víctimas de nuestro accionar desaprensivo y especulador, donde nos hemos transformado como sociedad en depredadores de los recursos que nos ofrece nuestra única casa: el planeta Tierra.

Es un deseo compartido que sirva para colaborar en la resolución de cuestiones de desarrollo energético dentro de los países que integran la Asociación de Universidades del Grupo Montevideo (AUGM), como así también que fuera útil como material de consulta y estudio. Anhelamos poder llegar y que sea material de referencia y accesible a todas las personas que así lo requieran, especialmente a otros grupos de investigación y desarrollo con quienes podamos establecer futuros lazos de vinculación y articulación académica, como así también a los tomadores de decisión en cuestiones referentes a la energía y todos aquellos (alumnos, docentes, profesionales) que estén interesados en capacitarse en estos temas de trascendencia mundial.

La culminación de la presente publicación es la suma de voluntades y denodados esfuerzos de muchas personas, pero quiero mencionar mi especial agradecimiento a Héctor Chiacchiarini de la Universidad Nacional del Sur, por su enorme y valioso trabajo como coordinador de todo el material que conforma este libro. Espero que el mismo sea de agrado al lector y que los artículos relativos a trabajos de investigación y desarrollo puedan serle de utilidad.

Atentamente,

Marcelo Vega  
Coordinador del  
Comité Académico de Energías AUGM

# **OS DEZ ANOS DO COMITÊ ACADÊMICO DE ENERGIA DA ASSOCIAÇÃO DAS UNIVERSIDADES GRUPO MONTEVIDÉU (CAE/AUGM)**

Sexta-feira, 22 de junho de 2007, manhã típica de inverno com céu limpo e azul, estávamos prestes a adentrar à sala da reitoria da Universidade do Chile. Todos ansiosos na expectativa de conhecer novas pessoas, novas mentes que em comum tinham a curiosidade de buscar informações no tema que desde os primórdios da civilização vêm despertando a curiosidade do ser humano: “ENERGIA”.

Naquele encontro foi criado o Comitê Acadêmico de Energia da Associação Universidades Grupo Montevideú (CAE/AUGM), que iria trabalhar com muita energia. Literalmente!

Há 10 anos tínhamos planos ambiciosos para serem desenvolvidos e integrar as universidades pertencentes à AUGM, uma vez que estávamos iniciando um dos mais importantes Comitês Acadêmicos da Associação.

Este assunto, multidisciplinar e interdependente com muitas áreas do conhecimento, abre uma gama de possibilidades de interação com outros comitês e também com instituições de pesquisas, desenvolvimento e inovação do mundo inteiro.

Os dez anos do Comitê Acadêmico de energia da Associação das Universidades...

Quando o assunto é energia, logo se associa ao desenvolvimento, assim nos mostra a história da humanidade.

Com a descoberta do fogo pelo homem, por acaso ou não, houve o início de uma revolução no conhecimento. Estava realizado o primeiro vínculo entre energia e desenvolvimento.

Daquela época até os dias atuais, o homem busca novas fontes de energia, fóssil ou renovável.

Neste último século desde a revolução industrial em 1850 pouco foi modificado na aplicação e utilização das diversas fontes de energia.

Esta breve introdução alerta a importância do assunto “ENERGIA”.

Visando difundir novas informações, acordamos que teríamos duas reuniões anuais acompanhadas de um seminário internacional, levando aos alunos e professores das diversas universidades que nos acolheria e também à sociedade como um todo, as recentes novidades da área energética em suas distintas origens e categorias, com temas que associados entre si, gerariam mais conhecimentos em benefício da humanidade.

O assunto em pauta atualmente no mundo é a busca incessante de energias alternativas visando cumprir as metas traçadas pela COP21.

O nosso CAE/AUGM vem colaborando incessantemente com órgãos de pesquisa e desenvolvimento de todo o mundo através de acordos de cooperação ou parcerias público privadas (PPP) para gerar e colocar em prática os mais eficientes métodos de obtenção, geração, distribuição e consumo das diversas formas de energia, contribuindo para tornar o mundo justo, mais feliz e acima de tudo unido.

Este livro é uma pequena amostra do potencial do grupo em gerar conhecimento nestes anos de atuação. Notáveis, incansáveis e ilustres cientistas, personalidades mundialmente conhecidas em suas áreas de conhecimento, que integraram e integram este comitê, são privilegiados em trabalhar e se relacionar no melhor Comitê Acadêmico de todos os tempos.

Os dez anos do Comitê Acadêmico de energia da Associação das Universidades...

A missão em trabalhar em benefício e felicidade dos povos, nos nutre para continuar com muita ENERGIA na geração do saber.

Prof. Dr. Octavio Antonio Valsechi  
Ex-Coordenador del  
Comité Académico de Energías AUGM





## INTRODUCCIÓN

Este es el primer libro editado por el Comité Académico de Energías de la Asociación de Universidades del Grupo Montevideo. Tiene por objetivo la difusión de las actividades de investigación en materia de Energías en las Universidades que integran AUGM.

Los capítulos que lo integran fueron propuestos por los propios miembros del Comité contemplando la diversidad de temas, intereses académicos y visión de las Universidades participantes.

Este libro abarca cuatro áreas temáticas de singular importancia en el área energética:

### Parte I: Biocombustibles

Los Biocombustibles producidos a partir de recursos naturales sustentables permiten reemplazar en algunos aspectos a los combustibles producidos a partir de recursos no renovables. Gradualmente están siendo incorporados en la matriz energética mundial.

### Parte II: Eficiencia Energética

El constante incremento del PBI mundial requiere cada vez más del uso eficiente de la energía y de los recursos naturales disponibles. Ya no hay lugar para el derroche de recursos energéticos, tanto por las consecuencias ambientales negativas como por la escasez de los mismos frente a las necesidades mundiales.

### Parte III: Energía Solar

La energía solar directa es el recurso natural renovable primario que da origen a la vida terrestre e influye fuertemente en los fenómenos meteorológicos que también pueden ser aprovechados para obtener energía. Su utilización, tanto a través de su conversión a energía eléctrica como a energía térmica, permite un sustancial ahorro de recursos no renovables.

### Parte IV: Políticas Energéticas

El manejo de los recursos energéticos debe desarrollarse siguiendo políticas especialmente diseñadas para conseguir mejoras en la eficiencia de producción, distribución y utilización de ellos. La concepción de estas políticas es clave para el desarrollo futuro de los países.

Sin duda quedan muchas otras áreas por abordar, que podrán ser tratadas en el futuro.

PARTE I  
BIOCOMBUSTIBLES



# BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN LA ARGENTINA

Silvia D. Romano<sup>1,2</sup>

## RESUMEN

Los biocombustibles líquidos de uso automotor han tomado relevancia en el siglo XXI. En particular, durante la última década se ha estado utilizando en numerosos países el “corte obligatorio” de nafta con bioetanol y gasoil con biodiesel, en distintas proporciones.

Para que la implementación del uso de biocombustibles se pueda realizar es necesario que el país disponga de legislación que incluya requisitos de calidad del producto, de seguridad y control de efluentes en las instalaciones productoras, que asegure la disponibilidad de los biocombustibles para el mercado interno, que establezca una distribución adecuada, como también la clara determinación del precio de venta del biocombustible.

---

<sup>1</sup> Universidad de Buenos Aires (UBA), Facultad de Ingeniería, Grupo de Energías Renovables (GER), avda. Paseo Colón 850 (1063) CABA, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Tecnologías del Hidrógeno y Energías Sostenibles: ITHES (UBA - CONICET) - GER.

El objetivo de este capítulo es presentar un breve panorama sobre la producción y el uso de los biocombustibles líquidos en la Argentina, incluyendo el marco legal establecido para el desarrollo de los mismos.

**Palabras clave:** Biocombustibles líquidos, Biodiesel, Bioetanol, Calidad, Legislación

## INTRODUCCIÓN

A diferencia de los combustibles líquidos derivados del petróleo (nafta, kerosén, gasoil, fueloil), los biocombustibles provienen de la biomasa. Bioetanol, biodiesel y biooil (o bioaceite) son biocombustibles líquidos. Los dos primeros se utilizan como combustible automotor, en motores ciclo Otto y Diesel, mezclados con nafta (ciclo Otto) y gasoil (ciclo Diesel) respectivamente, mientras que el biooil generalmente se puede usar como combustible en calderas, hornos y turbinas, mezclado con fueloil.

En la República Argentina hay legislación desde 2006, para el corte obligatorio en todo el país, de petrocombustibles líquidos con biocombustibles líquidos.

La Ley n.º 26093 [1] y el Decreto reglamentario n.º 109/07 [2] fueron la base de la legislación argentina actual en biocombustibles. La Ley n.º 26093 establece el régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles e introduce conceptos generales sobre: \*) quién determinará la Autoridad de Aplicación (AA) y sus funciones, \*) creación de una Comisión Nacional Asesora, sus funciones e integrantes, \*) alcance de la ley (bioetanol, biodiesel y biogás, que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, y cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación), \*) habilitación de plantas productoras (que cumplan con los requerimientos de calidad), \*) evaluación de Impacto Ambiental que incluya el tratamiento de efluentes y la gestión de residuos por la Autoridad de Aplicación, \*) porcentaje de corte y fecha de implementación de la mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles (estableciendo un porcentaje mínimo del 5 % de biodiesel o bioetanol en mezcla con gasoil o nafta, respectivamente, con vigencia a partir del primer día del cuarto año calendario siguiente al de promulgación de la ley), \*) sujetos beneficiarios del régimen promocional



(requisitos para la selección, priorización y beneficios), \*) infracciones y sanciones por incumplimiento de la ley o las resoluciones que dictara la Autoridad de Aplicación, etc.

Es el Decreto n.º 109/07 quién establece los detalles sobre la reglamentación de las actividades alcanzadas por los términos de la Ley n.º 26093 (producción, mezcla, comercialización, distribución, consumo y uso sustentables de biocombustibles).

La implementación del corte obligatorio se realizó en la República Argentina a principios del año 2010. Desde entonces, las petroleras compran a los productores de biocombustibles habilitados por la AA, y realizan las mezclas con nafta o gasoil en el porcentaje que corresponda, distribuyendo las mismas a las estaciones de servicio. En consecuencia, los combustibles que salen de los surtidores de gasoil y nafta de las estaciones de servicio, están “cortados” con el biocombustible correspondiente.

El aumento del porcentaje de biocombustibles líquidos en las mezclas con combustible fósil fue creciendo paulatinamente en el tiempo, alcanzando valores actuales de 12 % de bioetanol en nafta, y 10 % de biodiesel en gasoil.

## **PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS EN LA ARGENTINA**

### **BIOETANOL EN LA ARGENTINA**

El uso del bioetanol en la Argentina para uso automotor data del año 1981 aunque el Programa Alconafta comenzó en 1978. Durante los 3 primeros años, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), ubicada en la provincia de Tucumán, realizó las investigaciones en el área industrial, y se iniciaron gestiones a nivel nacional para analizar la factibilidad de incorporar alcohol anhidro a las motonaftas, que se concretó en 1979, con el inicio de la Experiencia Alconafta [3].

En 1981 se implementó en Tucumán (provincia que lidera la producción de caña de azúcar del país) donde hubo legislación provincial desde el año anterior (Ley n.º 5224), por medio de la cual se eximía al alcohol anhidro que integraba la alconafta, del pago del impuesto a los ingresos brutos por su venta). El corte provincial obligatorio de bioetanol comenzó en la nafta común, extendiéndose en un par de años a la nafta súper

(de mayor calidad que la común). Distintas provincias se fueron sumando paulatinamente al corte de bioetanol en nafta (mezcla de combustible conocido en el país como “alconafta”).

En 1985 se reglamentó el Plan Nacional de Alconafta, a partir de la Ley n.º 23287 y el Decreto n.º 2044/85. A pesar de que el marco legislativo contemplaba la producción de alcohol etílico, hidratado o anhidro, cualquiera sea su origen, con destino a su uso como combustible para motores, solo o en mezcla con naftas, respectivamente, y la gradual incorporación de regiones del país a su uso (como se venía haciendo), fue abandonado paulatinamente hasta que desapareció por completo en 1989. En menos de una década (1987), eran 12 las provincias argentinas (norte y centro del país) que habían adherido al Plan Alconafta y utilizaban 15 % de corte de bioetanol en la mezcla.

Hubo diversas razones para abandonar el Programa Alconafta, entre las que se pueden mencionar: económicas (quita de beneficios impositivos a la producción alcoholera, falta de actualización del precio del alcohol anhidro en función de los incrementos que se fijaban para las motonaftas), técnicas (malas zafras como consecuencia de condiciones extremas de temperaturas que impidieron cubrir la fabricación de bioetanol necesario para el consumo), supuestas presiones de las empresas petroleras sobre el gobierno para suspender el corte, y una visión limitada sobre la necesidad de la producción y uso de biocombustibles (a diferencia de Brasil que comenzó con el plan Pro Alcohol en la misma fecha que la Argentina, y se convirtió en el mayor productor mundial de bioetanol de caña de azúcar; que todavía sostiene).

Casi 20 años después del cese del uso de la alconafta, en el año 2008 y en el marco de la Ley n.º 26093, se dictaron resoluciones abarcando diversos aspectos fundamentales para la producción, comercialización, mezcla y distribución de bioetanol como combustible automotor alternativo para “cortar” a la nafta: la Resolución n.º 1293/08 [4] describe los mecanismos de selección, aprobación y orden de prioridades a proyectos de producción de bioetanol; la Resolución n.º 1294/08 [5] define el cálculo del precio de adquisición de bioetanol; la Resolución n.º 1295/08 [6] sobre requisitos de calidad que debe cumplir el bioetanol de caña de azúcar para uso automotor, y la Resolución n.º 1296/08 [7] sobre aspectos de seguridad en plantas de producción de bioetanol.

En la tabla n.º 1 se indica la legislación en bioetanol de uso vehicular, cortado con nafta, en la República Argentina, desde su inicio en 2006.

**Tabla n.º 1.** Legislación de bioetanol como combustible automotor para corte con nafta

Legislación	Tema
Ley n.º 26093	Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles
Decreto n.º 109/07	Reglamentación de Ley n.º 26093
Resolución S.E. n.º 1293/08	Mecanismos de selección, aprobación y orden de prioridades a proyectos de producción de bioetanol – Beneficios promocionales
Resolución S.E. n.º 1294/08	Procedimiento para la determinación del precio de adquisición de bioetanol de caña de azúcar
Resolución S.E. n.º 1295/08	Especificaciones de calidad del bioetanol para uso automotor
Resolución S.E. n.º 1296/08	Seguridad en plantas de producción de biocombustibles líquidos para uso automotor
Resolución S.E. n.º 450/13	Calidad del bioetanol: clasificación de propiedades en Grupo I (ensayos obligatorios) y Grupo II (ensayos periódicos).
Resolución S.E. n.º 44/14	Prórroga del aumento programado del corte desde 8.5% a 10%, y procedimiento para la determinación del precio de adquisición del bioetanol de caña de azúcar y de maíz
Resolución S.E. n.º 170/14	Nuevo procedimiento para la determinación del precio de adquisición del bioetanol de caña de azúcar y de maíz
Disposición n.º 1/15 Subsecretaría de Combustibles	Modificación en la determinación del precio del bioetanol de maíz

**Fuente:** Elaboración propia.

En este contexto, se comenzaron a construir plantas de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, con el objeto de proveer bioetanol a partir del 2010, para el corte nacional.

Si bien, en principio, se había establecido un corte inicial de 5 % de bioetanol en nafta, al inicio de la implementación, el corte fue del 2 % ya que el volumen disponible de bioetanol solo alcanzó a cubrir ese porcentaje. En estos 6 años, con el establecimiento de más plantas de bioetanol de caña, la producción de bioetanol de maíz desde el 2012, y las modificaciones en los procedimientos para la determinación del precio de adquisición del bioetanol diferenciando la materia prima utilizada (Resolución n.º 170/14 y Disposición n.º 1/15 de Subsecretaría de Combustibles), el corte se elevó gradualmente al 10 % (Res. N.º 44/14) y al 12 % en mayo 2016.

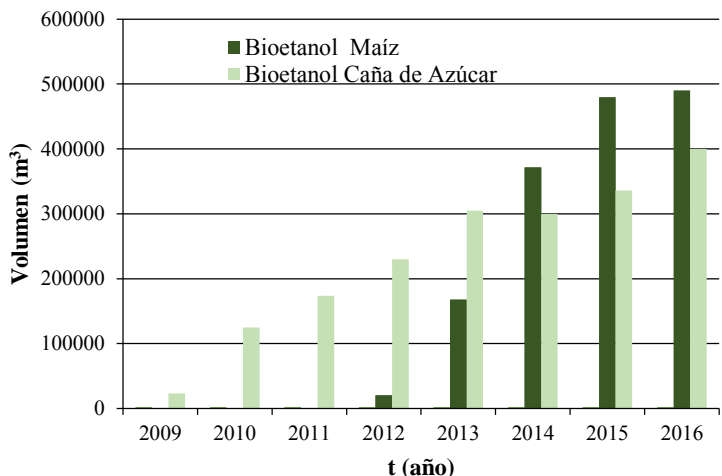
La producción de bioetanol de maíz creció en forma ininterrumpida desde su comienzo en el año 2012, como se puede apreciar en la figura n.º 1. De hecho, desde el año 2014,

el volumen de bioetanol de maíz producido (destinado en su totalidad al mercado interno) ha estado siendo superior al de bioetanol de caña (figura n.º 1).

La producción de bioetanol de maíz está concentrada en las provincias de Córdoba y San Luis, mientras que la producción de bioetanol de caña de azúcar lo está en el noroeste (región NOA), particularmente en la provincia de Tucumán.

En la República Argentina actualmente se producen aproximadamente 900 millones de litros de bioetanol (figura n.º 1). Hay 9 plantas de molienda azucarera en el noroeste argentino que producen alrededor de 400 millones de litros de etanol al año y 5 plantas productoras de bioetanol de maíz, entre las que producen casi 500 millones de litros.

**Figura n.º 1.** Volumen de producción de bioetanol de caña de azúcar, de maíz y total, en la Argentina desde 2009



**Fuente:** Elaboración propia.

## BIODIESEL EN LA ARGENTINA

El uso del biodiesel para automotores en la Argentina comenzó en el año 2010 en el marco de la Ley n.º 26093 [1] y del Decreto Reglamentario n.º 109/07 [2], que fijó un cupo para empresas con incentivos fiscales, con el objeto de favorecer: el desarrollo de las pequeñas y medianas empresas, productores agropecuarios y economías regionales. Además, se dictaron resoluciones abarcando diversos aspectos fundamentales para la

producción, comercialización, mezcla y distribución de biodiesel como combustible automotor alternativo para “cortar” al gasoil: \*) la Resolución n.º 1296/08 sobre aspectos de seguridad en plantas de producción de biodiesel, \*) la Resolución n.º 6/10 sobre requisitos de calidad que debe cumplir el biodiesel para uso automotor, modificada luego por la Resolución n.º 828/2010 [8] con las especificaciones de calidad del biodiesel, \*) la Resolución n.º 7/10 para ratificar el acuerdo de abastecimiento de biodiesel para su mezcla con combustibles fósiles en el territorio nacional y determinar el precio para elaboradoras, \*) la Resolución n.º 554/2010 para aumentar el porcentaje de corte de 5 al 7 %, y otras resoluciones que prorrogan el plazo del acuerdo de abastecimiento de biodiesel para su mezcla y asignación de cupo para el mercado interno.

Hay dos temas que cabe destacar: 1) las primeras plantas de biodiesel en la Argentina se comenzaron a construir en 2006, y en solo cinco años el país se convirtió en el mayor exportador mundial de biodiesel; 2) al llegar enero de 2010 no se pudo implementar el corte obligatorio de biodiesel en gasoil a pesar de la gran producción existente en el país a esa fecha.

La industria aceitera argentina es una de las más reconocidas y eficientes del mundo. En la campaña 2005-2006 el país fue uno de los mayores exportadores de aceite de soja y girasol. Dado que la materia prima fundamental para producir biodiesel es el aceite vegetal, el país estaba en condiciones ventajosas para instalar plantas de producción de biodiesel y exportar, en vez del aceite, un producto de mayor valor agregado. Eso se hizo a partir de 2006 y hasta que comenzó en 2010 el corte obligatorio, las plantas elaboradoras de biodiesel en la Argentina exportaban toda la producción, convirtiéndose el país, en solo 5 años, en el primer exportador de biodiesel a nivel mundial. En estos años se creó uno de los “polos” de biodiesel más importantes del mundo, alrededor de la ciudad de San Lorenzo, en la provincia de Santa Fe. Esta ubicación es estratégica no solo porque está en la zona de producción de aceites sino también por el acceso directo al río Paraná y de allí a los puertos del mundo, lo que facilita el trabajo de logística.

Si bien en la legislación mencionada de 2006 y 2007 se había establecido un corte inicial de 5 % de biodiesel en gasoil a partir de 2010, en enero de 2010 y a pesar de que la República Argentina era uno de los principales productores del mundo, no se pudo

implementar el corte. Esto se debió a que hasta esa fecha no se había promulgado la legislación con el procedimiento para la determinación del precio de venta del biodiesel. Esto fue realizado mediante la Resolución n.º 7/10. A partir de entonces comenzó el corte del 5 %, elevándose el mismo año al 7 % (Res. SE n.º 554/10). Actualmente el corte es de 10 % de biodiesel en gasoil.

En la tabla n.º 2 se indica la legislación en biodiesel de uso vehicular, cortado con gasoil, en la República Argentina, desde su inicio en 2006.

**Tabla n.º 2.** Legislación de biodiesel como combustible automotor para corte con gasoil

Legislación	Tema
Ley n.º 26093	Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles.
Decreto n.º 109/07	Reglamentación de Ley n.º 26093.
Resolución S.E. n.º 1296/08	Seguridad en plantas de producción de biocombustibles líquidos para uso automotor.
Resolución S.E. n.º 6/10	Especificaciones de calidad.
Resolución S.E. n.º 7/10	Procedimiento para la determinación del precio de adquisición del biodiesel.
Resolución S.E. n.º 554/10	Aumento del corte al 7 %
Resolución S.E. n.º 828/10	Especificaciones de calidad. Modifica a la Res. n.º 6/10. Clasificación de propiedades en Grupo I (ensayos obligatorios) y Grupo II (ensayos periódicos).
Resolución S.E. n.º 56/12	Asignación de cupos.
Resolución Conjunta n.º 438/12, n.º 269/12 y n.º 1001/12 de Ministerios	Creación de Unidad Ejecutiva Interdisciplinaria de Monitoreo (UEIM).
Resoluciones S.E. n.º 1436/12 y n.º 1725/12	Aumento de precio (precio fijo) y aumento de retenciones.
Acta n.º 6/12 UEIM	Clasificación de plantas productoras en 3 grupos según volumen de producción; distintos precios.
Resolución S.E. n.º 449/13	Clasificación en empresas integradas y no integradas; distintos precios.
Resolución S.E. n.º 450/13	Aumento del corte al 8 % como mínimo.
Resolución S.E. 1125/13	Aumento del corte al 9 % (1/14) y 10 % (2/14).

**Fuente:** Elaboración propia.

El complejo de producción de biocombustibles está conformado por empresas grandes, medianas y pequeñas, pudiendo ser estas integradas o no integradas. Las empresas pequeñas (con capacidad de producción de hasta 50.000 ton/año) destinan toda su producción al corte nacional. La totalidad de la producción se realiza con aceite de soja.

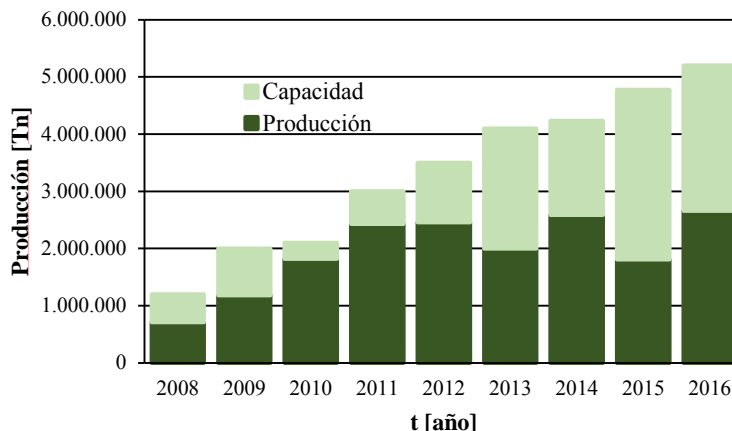
A partir del año 2012, hubo períodos con baja en la producción y una importante capacidad ociosa. En particular, durante el segundo semestre del año 2012, debido a la

creación de la Unidad Ejecutiva Interdisciplinaria de Monitoreo (UEIM) [9], la determinación de un precio fijo (menor al que vendían las elaboradoras hasta el momento), y el cierre de los mercados europeos bajo la acusación de *dumping* (a la Argentina y a Indonesia). Como consecuencia, se interrumpieron temporariamente las inversiones, las empresas disminuyeron su producción en 2013, y se pasó a operar por debajo del 40 % de la capacidad instalada, como se puede observar en la figura n.º 2.

Respecto al conflicto, la Unión Europea (UE) decidió aplicar un arancel compensatorio (30,5 %) como medida antidumping por 5 años para el biodiesel importado de la Argentina. La Argentina dejó de exportar a la UE y elevó el caso al Órgano de Solución de Diferencias de la Organización Mundial del Comercio (OMC) y la Corte Europea de Justicia. Se formó un panel para dirimir la situación en abril de 2014. Dos años después se conoció el fallo. Si bien la OMC no accedió a todos los aspectos planteados por la Argentina, se estableció que el método de la UE para determinar el precio de los derechos de importación no es del todo preciso y llama al bloque europeo a poner “sus medidas en conformidad con las obligaciones que le corresponden en virtud del Acuerdo Antidumping”. La UE apeló y luego salió un segundo fallo de la OMC en la misma línea que el primero.

Debido al cierre del mercado europeo (el importador más importante de biodiesel argentino), la UEIM decidió a fines de 2013 tomar medidas para favorecer al sector: aumentar de precios de venta en el mercado nacional, reducir los derechos de exportación, suspender la alícuota del 22 % en biodiesel destinado a generación eléctrica y la tasa del 19 % del impuesto a los combustibles líquidos y gas natural, mientras durara las restricciones para exportar a la UE o hasta diciembre de 2015. Este año, se extendieron los beneficios hasta el 31 de diciembre de 2016; más allá de ello, en 2015 la producción volvió a caer. Por otro lado, durante 2014 se buscaron nuevos destinos para exportar, se exportó mucho a menor precio y terminó siendo un muy buen año para exportación, como se puede apreciar en la figura n.º 2.

**Figura 2:** Volumen y capacidad de producción de biodiesel en función del tiempo, en la Argentina



**Fuente:** Elaboración propia.

En 2016, el destino del 90 % de las exportaciones de biodiesel fue Estados Unidos, mientras que 10 % restante fue Perú. En septiembre de 2016, en Perú se establecieron aranceles antidumping para el biodiesel argentino. Desde marzo de 2017, los productores de biodiesel de Estados Unidos están solicitando también la implementación de aranceles antidumping para las importaciones de biodiesel de nuestro país. Si esto sucediera, y además fuera antes que se reestablezcan las exportaciones a la Unión Europea, la industria de biodiesel en la Argentina pasaría por los momentos más críticos de su historia.

Actualmente, hay 36 plantas de elaboración de biodiesel en la República Argentina y la capacidad de producción es superior a los 5 millones de ton/año, como se puede apreciar en la figura n.º 2. Aproximadamente 1 millón de ton/año es lo que se produce para el mercado interno. En los últimos años, hubo una importante capacidad ociosa (figura n.º 2).

## CONCLUSIONES

La industria argentina de biocombustibles líquidos para uso automotor es sólida y eficiente. A partir de 2010, se utiliza el corte obligatorio, que actualmente es de 12 % de bioetanol en nafta y 10 % de biodiesel en gasoil.



En la Argentina, el bioetanol se produce a partir de caña de azúcar y maíz; en tanto el biodiesel, a partir de aceite de soja.

La producción de bioetanol de maíz es mayor que la de bioetanol de caña de azúcar, a pesar de que su producción se inició dos años después que la de este último.

La producción de biodiesel comenzó hace diez años en la Argentina y el país se posicionó rápidamente en un lugar de privilegio como exportador mundial. La industria de biodiesel, hace pocos años tuvo que enfrentar la imposición de aranceles en la Unión Europea. Si bien la Organización Mundial del Comercio falló sobre el tema, aún no se han reanudado las relaciones comerciales con dicha región. Actualmente, Estados Unidos (principal importador del biodiesel argentino, en reemplazo de la Unión Europea) también está evaluando la posibilidad de imponer aranceles antidumping al biodiesel argentino. Si esto sucediera, sería crítico para el sector productivo de biodiesel en la Argentina.

La producción argentina de bioetanol tiene una tendencia creciente, al igual que sucede en el mundo. La capacidad productiva de biodiesel en la Argentina ha aumentado a lo largo del tiempo, pero la producción no pudo sostener dicha tendencia.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Ley n.º 26093 Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles, Argentina, 2006. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [2] Decreto n.º 109/07. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [3] *En el mañana hoy: Un recorrido por los cien años de innovaciones tecnológicas de la EEAOC*, Capítulo 9, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, 2009.
- [4] Resolución SE n.º 1293/08. Establécese el mecanismo de selección, aprobación y orden de prioridades de proyectos de producción de bioetanol, mediante el cual se otorgarán los beneficios promocionales del Régimen de Regulación y

- Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [5] Resolución SE n.º 1294/08 Determinase el procedimiento para establecer el precio de adquisición del bioetanol, destinado a la mezcla para la Producción y Uso Sustentable de Biocombustibles creado por la Ley n.º 26093. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [6] Resolución SE n.º 1295/08: Determinanse las especificaciones de calidad que deberá cumplir el bioetanol, de conformidad con el artículo 3º, Inciso c) del Decreto n.º 109/07. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [7] Resolución SE n.º 1296/08 Establécense las condiciones mínimas que deben cumplir las Plantas de Elaboración, Almacenamiento y Mezcla de Biocombustibles en relación a la seguridad en caso de incendio. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [8] Resolución SE n.º 828/2010 Especificaciones de calidad del biodiesel. Modifícase la Resolución n.º 6/10. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [9] Resolución Conjunta n.º 438/2012, n.º 269/2012 y n.º 1001/2012 de Ministerio de Economía y Finanzas Públicas, Ministerio de Industria y Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios. Créanse el Registro de Operadores de Soja Autorizados (ROSA) y la “Unidad Ejecutiva Interdisciplinaria de Monitoreo”. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3026>.
- [10] Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina. En: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=4008>.

## **Silvia Daniela Romano**

Ingeniera Química (UBA, 1991), especializada en Higiene y Seguridad en el Trabajo (UBA, 2000) y Doctora en Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires (UBA, 2000). Desarrolló su carrera docente en la Facultad de Ingeniería de la UBA, donde es Profesora Titular desde 2012. Actualmente se desempeña en las siguientes asignaturas de grado: Técnicas Energéticas (desde 2003) y Combustión (1999-2003 y desde 2012), y en la asignatura Energías Renovables II, de la Maestría Inter-disciplinaria en Energía (Facultad de Derecho, UBA), desde 2012. Es investigadora de la UBA y el CONICET. En 2003 creó el Grupo de Energías Renovables (GER) en la UBA, que dirige desde entonces y se especializó en biocombustibles. Desde 2007 es investigadora del CONICET. Desde 2014 integra el Instituto del Tecnologías del Hidrógeno y Energías Sostenibles - ITHES (UBA-CONICET), donde se desempeña como Consejera Directiva. Dirigió siete proyectos de investigación desde 2003, y anteriormente integró seis más (1992-2003). Publicó 44 artículos científicos en revistas con referato, 21 capítulos de libros y editó cuatro libros. Obtuvo 13 becas. En su trayectoria se destacan las tareas de evaluación individual (más de 100) y la alta formación de recursos humanos de grado y posgrado (más de 60 desde 2003). Participó en 41 reuniones de gestión, planeamiento, evaluación, ejecución en Argentina y el exterior, en 2 Redes internacionales (2007-2011) y en 27 entrevistas en medios de prensa, televisión, radio y web. Fue Consejera Directiva Titular del Claustro de Profesores de la Facultad de Ingeniería de la UBA. (2010-2014), Miembro titular de la Comisión de Maestrías de la Facultad de Ingeniería de la UBA (2004-2009) y es representante de la UBA en el Comité Académico de Energía en América Latina de la Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM) desde 2007.



# EXPERIENCIAS CON CULTIVOS ENERGÉTICOS EN MENDOZA

Cecilia Rebora<sup>1</sup>, Leandra Ibareuren<sup>1</sup>, Alejandra Bertona<sup>1</sup>

## RESUMEN

En este capítulo se presentan experiencias de investigación sobre cultivos energéticos desarrolladas en la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, en la provincia de Mendoza. Los trabajos comenzaron en 2005, y se intensificaron a partir de la aprobación de la Ley n.º 26093, sobre biocombustibles. Se probaron distintas alternativas de oleaginosas como fuente de aceite para fabricar biodiesel (colza, cártamo, girasol) y topinambur como materia prima para fabricar bioetanol. Los primeros trabajos fueron en parcelas experimentales pequeñas y en todos los casos financiados por la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado de la Universidad Nacional de Cuyo. En el período 2007 a 2010 se trabajó en el marco del Programa de Bioenergía de la UNCuyo, en el que se sumó financiamiento de la empresa YPF. Otro tema al que se dedicó importante tiempo y esfuerzo de trabajo de experimentación fue el uso de aguas residuales urbanas (cloacales) para regar estos cultivos energéticos. En este aspecto se trabajó en convenio con el municipio de Tunuyán y

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, correo electrónico: [rebora@fca.uncu.edu.ar](mailto:rebora@fca.uncu.edu.ar).

AySAM (Agua y Saneamiento Mendoza). Los rendimientos de los cultivos regados con esta agua, fueron muy superiores a los obtenidos con agua subterránea. En este sentido se abre un panorama muy interesante ya que el agua es el factor limitante de la producción agropecuaria en la provincia.

**Palabras clave:** Biocombustibles, Bioetanol, Biodiesel, Aguas residuales

## INTRODUCCIÓN

Los cultivos energéticos, aquellos cuya biomasa se destina a la obtención de energía, se estudian cada vez más como alternativa al agotamiento ya sensible de energías fósiles, como el gas y el petróleo. La Argentina no escapa a esta realidad mundial, la Ley n.º 26093, sobre biocombustibles, estableció que los combustibles fósiles (nafta y gasoil) deberían ser cortados con alcohol y biodiesel, respectivamente.

Entre los cultivos energéticos destinados a la producción de biocombustibles líquidos se suelen distinguir:

- Cultivos oleaginosos. Destinados a la obtención de aceites vegetales, materia prima para la fabricación de biodiesel. Entre las especies vegetales que se mencionan como fuentes de aceite aparecen: colza, girasol, soja, etc.
- Cultivos ricos en hidratos de carbono (azúcares, almidones, fructanos). Estos hidratos de carbono fermentados dan alcohol (bioetanol), que puede ser mezclado con la nafta o sustituirla completamente.

Las condiciones ambientales de Mendoza limitan los cultivos energéticos factibles de ser desarrollados. Su clima es árido; las temperaturas presentan una importante oscilación anual y las precipitaciones son escasas. El verano es la época más lluviosa y la temperatura media supera los 25 °C; en esta estación es común que haya tormentas repentinas con abundante caída de agua, y hasta granizo. El invierno es frío y seco, con temperatura media por debajo de los 8 °C, heladas nocturnas periódicas y escasas precipitaciones.

La producción agrícola de la provincia se localiza en los oasis irrigados, los cuales representan un 4 % de la superficie provincial. La producción agrícola de Mendoza es

intensiva con gran demanda de mano de obra y capital. Este modelo productivo ha favorecido el desarrollo de numerosas explotaciones pequeñas.

Las condiciones del medio ambiente, principalmente el clima y los suelos, junto a la posibilidad de regar y a la gran afluencia de inmigrantes con conocimientos relacionados a la vitivinicultura, hicieron que en Mendoza el cultivo de la vid se desarrollara hasta convertirse en un monocultivo. Actualmente la viticultura re-presenta el 54 % de la superficie agrícola de la provincia. Con el objetivo de diversificar la producción agrícola, en respuesta a las frecuentes crisis del sector vitivinícola, en los últimos años fue estimulada la implantación de frutales. De este modo la fruticultura ocupa actualmente el segundo lugar en importancia re-presentando el 17 % de la superficie cultivada de la provincia. Los frutales de carozo como durazno y ciruela son los de mayor importancia, destacándose Mendoza a nivel nacional en la producción de durazno para industria. Las hortalizas ocupan el 11 % de la superficie cultivada en la provincia. Las especies de mayor importancia son: ajo, cebolla, tomate y papa. La producción mendocina de hortalizas está, básicamente, destinada al mercado local y a centros de abastecimiento de provincias vecinas. Por su parte, la presencia de olivos y forestales tienen una incidencia mucho menor, 2,5 % y 6 % respectivamente. Finalmente, el restante 9,5 % de la superficie cultivada está ocupada por forrajes y otros cultivos.

En esta publicación presentamos una síntesis de las experiencias que hemos llevado a cabo en investigación con cultivos energéticos en la provincia de Mendoza, desde 2005. Los trabajos fueron desarrollados por integrantes de la cátedra de Agricultura Especial de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo, en el marco de los proyectos que financia la Secretaría de Ciencia, Técnica y Posgrado de dicha Universidad. En la bibliografía se indican las publicaciones en las que se puede profundizar en algún tema que pueda despertar especial interés.

## **NUESTRAS PRIMERAS EXPERIENCIAS CON CULTIVOS PROVEEDORES DE ACEITE (BIODIESEL)**

### **a. CULTIVO DE COLZA**

El agua es el principal factor limitante de la producción agropecuaria en la provincia de Mendoza. La mayor demanda de este recurso está concentrada por los cultivos de verano (vid, frutales, algunas hortalizas, etc.). Escapando a esta gran demanda de agua estival, se estudió el rendimiento del cultivo de colza (*Brassica napus*), oleaginosa de ciclo invernal, en el oasis norte de la provincia, con el objetivo de valorar su aptitud para proveer aceite. Se probaron tres cultivares (Eclipse, Master e Impulse) en tres fechas de siembra (abril, mayo y junio), durante los ciclos 2005 y 2006. Las siembras de abril y mayo rindieron más que la de junio y estuvieron asociadas a mayor duración del ciclo del cultivo. El porcentaje de aceite de las semillas osciló entre el 48 % y 49 % y no hubo diferencia entre los tratamientos. El rendimiento de aceite por hectárea superó los 1.500 kg en las siembras de abril y mayo y estuvo algo por debajo en las de junio [1].

**Fotografía n.º 1.** Parcelas experimentales de colza. Se contrastaron 3 variedades y 3 fechas de siembra



**Fuente:** Rebora, Iburguren, Bertona.



## b. CULTIVO DE CÁRTAMO

El cártamo (*Carthamus tinctorius* L.), resulta especialmente interesante como proveedor de aceite para fabricar biodiesel en zonas de escasa disponibilidad de agua, debido a sus bajos requerimientos hídricos. Esta característica y la falta de antecedentes regionales motivó al equipo a evaluar el comportamiento agronómico y fenológico de dos cultivares de cártamo en el oasis norte de Mendoza.

**Fotografía n.º 2.** Capítulos de Cártamo previo a madurez de cosecha



**Fuente:** Rebora, Iburguren, Bertona.

Se ensayaron dos variedades, los componentes del rendimiento evaluados no mostraron diferencias significativas entre cultivares ensayados.

Se concluyó que es factible el cultivo de cártamo en el oasis norte de Mendoza, y que los rendimientos son mayores al promedio nacional de las últimas quince campañas.

La duración del cultivo desde siembra a madurez, para ambos cultivares, fue de cuatro meses (fin de septiembre a fin de enero). Para la cosecha debieron transcurrir veinte días más para lograr el secado de los capítulos, el desgrane fue nulo o despreciable.

El rendimiento de granos fue de 926,5 kg/ha; el contenido de aceite de 37,8 %, lo que representa un potencial de 346 litros de aceite por hectárea. Por transesterificación se obtienen 340 litros de biodiesel.

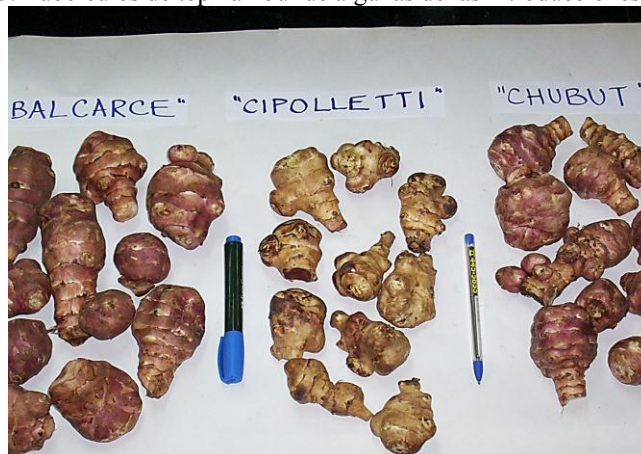
Para lograr mayores rendimientos sería conveniente, en futuras investigaciones, probar con siembras más tempranas, mejorar las estrategias de control de malezas y hacer una fertilización [2].

## NUESTRAS PRIMERAS EXPERIENCIAS CON CULTIVOS PROVEEDORES DE HIDRATOS DE CARBONO (BIOETANOL)

### a. TOPINAMBUR

El topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) es un cultivo con gran potencial de rendimiento de tubérculos (30.000 a 100.000 kg/ha), los que fermentados permiten obtener bioetanol. En el marco de una tesis de Maestría de la UNCuyo [3] se probaron cinco introducciones de topinambur provenientes de cinco provincias de la Argentina y se valoró su potencial para obtener bioetanol, que llegó a 4934 litros por hectárea, aunque sin diferencias entre introducciones.

Fotografía n.º 3. Tubérculos de topinambur de algunas de las introducciones evaluadas



Fuente: Rebora, Iburguren, Bertona.

## IV. PROGRAMA DE BIOENERGÍA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO

Las experiencias que se relatan en los puntos II y III fueron todas realizadas en parcelas experimentales pequeñas, y los investigadores involucrados muestran un perfil agronómico enfocado en la tecnología de cultivo y la factibilidad de producir los cultivos de referencia en las condiciones locales. Dichas experiencias generaron resultados muy interesantes que dieron impulso al Programa de Bioenergía de la

Universidad Nacional de Cuyo. Este surgió como una necesidad de generar conocimiento experto en el rubro de los biocombustibles.

Los objetivos del programa se dividían en cuatro pilares: cultivos energéticos, biocombustibles, calidad y trazabilidad de los productos. El programa integró varias unidades académicas de la UNCuyo e INTA. Nuestro equipo de trabajo estuvo dedicado al desarrollo de cultivos energéticos; se trabajó con colza, girasol y topinambur. En esta oportunidad el desafío fue cultivar en parcelas experimentales extensas, simulando lotes de producción; y de esta manera generar protocolos, determinación de rendimientos, costos, balances energéticos y detección de las principales limitantes de los cultivos.

**Fotografía n.º 4.** Lote de colza del Programa de Bioenergía de la UNCuyo. Los Ingenieros Emili y Antonini chequean el stand inicial de plantas



**Fuente:** Rebora, Iburguren, Bertona.

**Fotografía n.º 5.** Lote de girasol del Programa de Bioenergía de la UNCuyo



**Fuente:** Rebora, Iburguren, Bertona.

**Fotografía n.º 6.** Lote de topinambur del Programa de Bioenergía de la UNCuyo



**Fuente:** Rebora, Ibarguren, Bertona.

En los tres cultivos probados en este programa se obtuvieron rendimientos aceptables: colza (1500 a 2300 kg/ha), girasol (1900 a 2800 kg/ha) y topinambur (29.500 a 40.800 kg/ha), los balances energéticos fueron positivos para los tres cultivos y los costos de producción altos. Esto se debió al gran impacto del riego y la ineficiencia de las maquinarias de siembra y cosecha de granos que están diseñadas para trabajar en lotes sin impedimentos para la circulación, que en el medio local están limitados por la estructura necesaria para el riego, sistema de regueras y acequias [4].

## **EL USO DE LAS AGUAS RESIDUALES PARA REGAR CULTIVOS ENERGÉTICOS**

La mayor proporción del reúso de aguas cloacales en el mundo ocurre en regiones áridas donde otras fuentes de agua son escasas, situación que se plantea en los oasis irrigados de Mendoza. La principal desventaja que se asocia con el uso de este tipo de agua tiene que ver con el riesgo para la salud humana de los consumidores que comen frutas y verduras irrigadas con estas aguas. En este sentido, los cultivos energéticos tienen una ventaja comparativa, al igual que los forestales, ya que no se destinan al consumo humano directo. Teniendo en cuenta estos conceptos, y motivados por el interés del municipio de Tunuyán de pensar en alguna estrategia de uso para sus aguas residuales urbanas, es que durante dos años (2005-2007) se trabajó en el proyecto “Uso de aguas residuales urbanas para la producción de cultivos energéticos destinados a biocombustibles”. Se probaron dos cultivos, colza (cultivo invernal, proveedor de

aceite para elaborar biodiesel) y topinambur (cultivo estival, proveedor de hidratos de carbono para elaborar bioetanol).

**Fotografía n.º 7.** El director del proyecto, Ing. Agr. Horacio Lelio, entre el cultivo de colza (izq.) próximo a cosecha y el cultivo de topinambur (derecha) en la Planta de tratamiento de aguas residuales de Tunuyán, donde se desarrolló la experiencia



**Fuente:** Rebora, Iburguren, Bertona.

En ambos cultivos se contrastó el rendimiento de dos tratamientos de riego: riego con agua subterránea, provista por camión tanque del municipio en cada fecha de riego (AS) y riego con agua residual urbana (ARU).

**Tabla n.º 1.** Caracterización de las aguas de riego utilizadas, agua subterránea (AS) y agua residual urbana (ARU)

Determinación	AS	ARU
Conductividad eléctrica (dS/M)	0,42	1,10
Nitrógeno total (mg/l)	5,6	28,7
Nitrógeno mineral, NH <sub>4</sub> + NO <sub>3</sub> (mg/l)	1,05	14,7
Fósforo, P (mg/l)	0,13	11,51
Fósforo, PO <sub>4</sub> -3 (mg/l)	0,39	35,3
Potasio, K (mg/l)	11	20
Potasio, K <sub>2</sub> O(mg/l)	13,2	24
Materia orgánica(mg/l)	73,4	236

**Fuente:** Lelio *et al.*, 2009 [5].

Tanto en el cultivo de colza como de topinambur los rendimientos; fueron significativamente más altos cuando se regó con ARU. A continuación se detallan los principales resultados del proyecto:

En topinambur regar con ARU genera un 23,4 % más de producción, siendo el rendimiento de tubérculos de 177.750 kg/ha contra 144.000 kg/ha con riego de agua subterránea. El mayor potencial de producción de etanol, 17.601 l/ha, se obtuvo con el tratamiento de riego ARU. Adicionalmente, la biomasa aérea seca remanente del cultivo de topinambur también fue mayor cuando este se regó con ARU (23.250 kg/ha). El calor de combustión de la misma fue de 3668 Kcal/kg, lo que representaría un importante aporte energético que podría utilizarse en el proceso industrial de obtención del etanol [5].

La utilización de ARU para el riego de colza permitió obtener rendimiento de semilla 50 % superior al que se obtuvo regando con agua subterránea (7690 y 3886 kg/ha respectivamente). La cantidad de biodiesel factible de producir por cada hectárea de cultivo ascendió a 2800 kg en el tratamiento ARU y a 1400 kg en AS [6].

En síntesis, las aguas residuales urbanas pueden ser utilizadas para ampliar el oasis productivo de Mendoza y cultivar topinambur y colza con destino a la producción de biocombustibles, obteniendo muy altos rendimientos [7].

El uso de aguas residuales urbanas genera un nicho para la producción de biocombustibles de segunda generación, vale decir que no compitan con la producción de alimentos.

Posteriormente se evaluó el “Efecto de la densidad de plantación sobre el rendimiento de topinambur regado con aguas residuales urbanas”. Se compararon 6 tratamientos (que combinaban diferentes distancias entre hileras y entre plantas) y se observó que los mayores rendimientos se dieron con distancias entre plantas en la hilera de 0,30 o 0,40 m; no se presentaron diferencias en respuesta a la distancia entre hileras.

Los componentes del rendimiento (kg de tubérculos por planta, número de tubérculos por planta y tamaño medio de los tubérculos), respondieron a cambios en la densidad generados por la distancias entre plantas y fueron indiferentes a la variación de distancia entre hileras.

Los aspectos morfológicos evaluados (altura y número de tallos principales) no se modificaron ante variaciones de densidad [8].



## CONCLUSIONES

A partir de las experiencias realizadas en Mendoza con cultivos energéticos, es posible afirmar que es factible la incorporación de este tipo de cultivos en la provincia de Mendoza, permitiendo la diversificación y realizando incorporaciones en la matriz productiva. Las grandes dificultades encontradas fueron la adaptación de una siembra extensiva a superficies reducidas; falta de maquinarias y equipamiento; y la forma de riego de los cultivos en Mendoza complica la circulación de dicha maquinaria por el sistema de regueras y acequias. Siendo el agua un recurso caro en una zona árida, cualquier competencia por ella con cultivos regionales es complicada, por lo que debería pensarse en especies de ciclo invernal como, por ejemplo, la colza.

En este contexto de escasez hídrica, se propone producir cultivos energéticos con aguas residuales. Adicionalmente, se solucionaría el problema sobre el destino final de dichas aguas y se disminuiría el uso de fertilizantes químicos, debido a los nutrientes que el agua de reuso posee. Los rendimientos logrados con este tipo de aguas son muy superiores a los alcanzados con agua subterránea.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Reborá, C.; Lelio, H.; Gómez, L. y Barros, A. (2007). “Rendimiento de aceite de colza cultivada bajo riego en Mendoza (Argentina)”, *Rev. FCA UNCuyo*, Tomo XXXIX, n.º 2, pp. 101-108.
- [2] Ossa, F. y Reborá, C. (2013). “El cultivo de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en el oasis norte de Mendoza”, *Tercer Congreso Internacional de Ambiente y Energías Renovables. I Jornada Internacional de Biomasa*, pp. 253-258. En: <http://www.cayer.com.ar/descargas/IIICAYER-IJIB.pdf> .
- [3] Reborá, C. (2008). *Caracterización de germoplasma de topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) por aptitud agronómica e industrial*, Tesis de Maestría en Horticultura. En: <http://bdigital.uncu.edu.ar/2980>
- [4] Somoza, A.; Antonini, C.; Arenas, F.; Reborá, C.; Noreikat, S.; Emili, L.; Lelio, H. y Rojas, D. (2009). *Informe final Proyecto “Cultivos Agrícolas para la Producción de Biocombustibles en Mendoza”*, SECTyP, UNCuyo.

- [5] Lelio, H.; Rebor, C. y Gómez, L. (2009). “Potencial de obtención de bioetanol a partir de topinambur (*Helianthus tuberosus* L.) regado con aguas residuales urbanas”, *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, Tomo XLI, n.º 1, pp. 123-133.
- [6] Rebor, C.; 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.º 1, pp. 207-212. 15.
- [7] Rebor, C.; Lelio, H.; Gómez, L. e Iburguren, L. (2011a). “Waste-Water Use in Energy Crops Production, Waste Water - Treatment and Reutilization”, García Einschlag, Fernando Sebastián (eds.), InTech.  
En: <http://www.intechopen.com/articles/show/title/waste-water-use-in-energy-crops-production>.
- [8] Rebor, L.; Lelio, H.; Iburguren, L. y Gómez, L. (2011b). “Efecto de la densidad de plantación sobre el rendimiento de topinambur regado con aguas residuales urbanas”, *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 43(2): 83-90.



### **Cecilia Reborá**

Ingeniera Agrónoma egresada de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Nacional de Córdoba (1995). Magister Scientiae en Horticultura, Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo (2008).

Inició su labor docente en Agricultura Especial en 1999, como auxiliar de primera, luego fue JTP, Profesora adjunta y actualmente es Profesora Titular.

Ha participado y dirigido diversos proyectos de investigación en pastizales naturales, forajeras y cultivos energéticos.

Actualmente es directora de la Maestría en Horticultura de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Cuyo.

### **Leandra Iburguren**

Ingeniera Agrónoma egresada del Departamento de Agronomía de la Universidad Nacional de Sur, Bahía Blanca (2006). Magister Scientiae en Horticultura, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo (2015). Docente en la cátedra de Agricultura Especial, Facultad de Cs Agrarias - UNCuyo, desde 2009 a la actualidad. Participación en 7 proyectos de investigación en las temáticas de la cátedra, uno de ellos como directora y otro como codirectora.

Consultora FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). Consultora PROSAP (Programa de Servicios Agrícolas Provinciales) en desarrollo de áreas de riego en distintas provincias argentinas. Desde 2009 a 2013.

### **Alejandra Bertona**

Ingeniera Agrónoma, recibida en la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Cuyo (2010). Auxiliar de primera categoría, dedicación simple en la cátedra de Agricultura Especial. Participación en proyectos de investigación en forrajeras, cultivos energéticos y cultivos de granos. Asesora en cultivos de vid y en cultivos de alfalfa para la producción de heno.



# **BIORREFINERÍA MICROALGAL: UNA TECNOLOGÍA EN DESARROLLO PARA LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL Y CO- PRODUCTOS DE VALOR AGREGADO**

Cecilia Angelines Popovich<sup>1,2,3</sup> y Patricia Inés Leonardi<sup>1,2</sup>

## **RESUMEN**

El impacto ambiental y el paulatino agotamiento de los combustibles fósiles han incentivado la necesidad de diversificar las fuentes renovables y sustentables para la producción de biocombustibles. En particular, las microalgas poseen propiedades deseables para tal fin, tales como: alta producción de biomasa, alto contenido de aceites y tolerancia a ambientes extremos. Si bien la producción de biodiesel a partir de estos

---

<sup>1</sup> Laboratorio de Estudios Básicos y Biotecnológicos en Algas (LEBBA). Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS)-(CONICET-UNS), Camino La Carrindanga km 7, (8000) Bahía Blanca, Argentina, correo electrónico: [bmpopovi@criba.edu.ar](mailto:bmpopovi@criba.edu.ar).

<sup>2</sup> Laboratorio de Ficología y Micología. Dpto. de Biología, Bioquímica y Farmacia, Universidad Nacional del Sur (UNS). San Juan 670. (8000) Bahía Blanca, Argentina, correo electrónico: [leonardi@uns.edu.ar](mailto:leonardi@uns.edu.ar).

<sup>3</sup> Centro de Emprendedorismo y Desarrollo Territorial Sostenible (CEDETS)-(CIC-UPSO), Ciudad de Cali 320, Bahía Blanca.

aceites es técnicamente factible, su implementación a escala comercial sigue siendo costosa, por lo que se encuentra en plena etapa de investigación y desarrollo en todo el mundo. Una de las principales estrategias para mejorar los costos de producción consiste en la puesta a punto de biorrefinerías microalgales. Estas consisten en cultivos sustentables de especies de microalgas capaces de producir aceites para biodiesel, en forma simultánea con co-productos de valor agregado, los cuales aumentan la rentabilidad del proceso. A esto se suman las ventajas ambientales de los bio-combustibles microalgales, aumentando así su competitividad. Bajo este contexto, este capítulo abordará la línea de investigación que se desarrolla en el Laboratorio de Estudios Básicos y Biotecnológicos en Algas (LEBBA), perteneciente al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS-CONICET-UNS), relacionada con el cultivo de microalgas para la obtención de aceites aptos para biodiesel y co-productos de interés comercial. Estos estudios representan un marco de referencia para lograr un escalamiento piloto demostrativo y sustentable, y constituyen la base y punto de partida de eventuales desarrollos y/o transferencias a los sectores productivos y ambientales.

**Palabras clave:** Bioenergía, Biodiesel, Cultivo de microalgas, Biorrefinerías

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la demanda de energía mundial es cubierta casi en su totalidad por la explotación y producción de combustibles fósiles, como son el carbón, petróleo y gas natural, mientras que la energía hidroeléctrica y otras energías renovables re-presentan un 5 % y 2 %, respectivamente [1]. Sin embargo, la sustentabilidad de los combustibles fósiles ha ido disminuyendo en los últimos años, no solo por el agotamiento de las reservas convencionales, sino también por los efectos ambientales negativos asociados con su uso. En particular, su combustión, representa la principal fuente de gases de efecto invernadero (GEI), responsables del conocido cambio climático global [2]. Por ejemplo, en 2006 las emisiones de CO<sub>2</sub> fueron de 29 Gigatoneladas (Gt), y considerando que los procesos naturales solo remueven aproximadamente 12 Gt, cada vez se hace más inmediata la necesidad de implementar estrategias de mitigación para

neutralizar el exceso de CO<sub>2</sub> [3]. El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático estableció una reducción del 5 % como mínimo en las emisiones de GEI en todo el mundo a partir de los valores de 1990 [4]. En este sentido, es relevante el desarrollo y la transferencia de conocimientos científicos y tecnológicos vinculados con el campo de las energías renovables, que sean amigables con el medio ambiente, rentables y capaces de complementar los recursos fósiles [5]. Particularmente, se estima que la demanda global de energías renovables, incluyendo la biomasa tradicional, se debería duplicar hacia el año 2035 [6]. En este contexto, el desarrollo de tecnologías orientadas al cuidado del medio ambiente y a la generación de energías limpias se ha tornado indispensable.

Dentro de las energías renovables se encuentran la energía solar (térmica y fotovoltaica), eólica, hidroeléctrica, geotérmica, mareomotriz y la bioenergía [7]. En particular, el término bioenergía se aplica a la energía obtenida a partir de diferentes recursos biomásicos. Algunos ejemplos de estos recursos son: la madera, los cultivos agrícolas y forestales, los residuos ganaderos, así como también las plantas acuáticas y las algas [5]. Por su parte, los biocombustibles son el conjunto de combustibles líquidos o gaseosos usados para transporte y provenientes de la biomasa vegetal o animal, y también de sus residuos orgánicos. De acuerdo a la materia prima empleada, su nivel de desarrollo o el tipo de tecnología aplicada en su procesamiento, los biocombustibles pueden ser clasificados como de primera, segunda y tercera generación [8].

Para que una materia prima sea técnica y económicamente viable para producir biocombustibles, debe presentar las siguientes condiciones: 1) ser competitiva o costar menos que un combustible derivado del petróleo; 2) requerir un uso bajo a nulo de tierras cultivables; 3) permitir que la calidad del aire mejore (por ej. secuestrando CO<sub>2</sub>); y 4) no competir con el uso de agua apta para consumo humano o industrial. Actualmente los biocombustibles de primera generación son los únicos que se producen a escala industrial y se comercializan. Los principales son el biodiesel y el bioetanol. La ASTM (*American Society for Testing and Materials*) define al biodiesel como “el éster monoalquílico de cadena larga de triglicéridos (TAG) derivados de recursos renovables, como por ejemplo aceites vegetales o grasas animales, para utilizarlos en motores Diesel”. En particular, el uso de biodiesel de primera generación como combustible alternativo al gasoil ha crecido durante los últimos años en el mundo. Por

ejemplo, en la Argentina desde 2014 el gasoil debe contener un 10 % de biodiesel [9]. Sin bien estas medidas, que se toman con distintos niveles de corte de acuerdo al país, sirven para diversificar la matriz energética y ampliar la influencia de las llamadas energías renovables, no son suficientes para satisfacer la gran demanda de energía primaria. Además, la utilización de semillas para fines alimenticios, las enormes superficies cultivables necesarias, el agotamiento de los suelos, y el uso de agua, plantean la necesidad de buscar nuevas fuentes de materia prima. Esto en parte ha sido resuelto a través de los llamados biocombustibles de segunda y tercera generación, que si bien son prometedores, aún no son económicamente rentables. Los primeros hacen uso de fuentes de materia prima no comestible y los de tercera generación son aquellos producidos a partir de recursos derivados de biomasa microalgal y de otros microorganismos.

Las microalgas son organismos microscópicos (de 2-200  $\mu\text{m}$ ), procariotas o eucariotas y fotosintéticos (autótrofos), que requieren luz,  $\text{CO}_2$ , nutrientes y agua para crecer. Las microalgas presentan las siguientes ventajas para producir biocombustibles con respecto a los cultivos convencionales: 1) poseen un crecimiento exponencial que les permite, en términos de horas, duplicar su biomasa; 2) algunas especies, llamadas oleaginosas, pueden acumular contenidos de TAG de 20 a 50 % respecto a su biomasa seca; 3) pueden ser cultivadas en aguas salobres o marinas, sobre tierras no cultivables; 4) no compiten con la producción de alimentos, forrajes y otros productos derivados de la agricultura; 5) son excelentes captadoras de  $\text{CO}_2$  (por ej. 1 kg de biomasa seca microalgal utiliza aproximadamente 1,83 kg of  $\text{CO}_2$ ), el cual puede provenir de la atmósfera, de gases industriales o de carbonatos solubles; 6) en relación a las emisiones de GEI, el ciclo de vida de la producción de biomasa microalgal no produce  $\text{CO}_2$  y el valor de este parámetro (-183  $\text{KgCO}_2/\text{MJ}$ ) es el más negativo respecto a los otros bioenergéticos; 7) no requieren del uso de herbicidas o pesticidas; 8) pueden crecer en aguas residuales, usando los nutrientes para su crecimiento y consecuentemente provocando un efecto de biorremediación; 9) pueden producir co-productos de valor agregado, los cuales aumentan la rentabilidad de los cultivos y 10) su composición de aceites puede ser regulada variando las condiciones ambientales o las unidades de cultivo [1,10,11]. Sin embargo, el biocombustible microalgal no ha alcanzado una producción a gran escala debido a diversas barreras, como: métodos de cultivo no optimizados, baja tasa de retorno energético, altos costos de capital, y competencia con

otros *commodities*. Actualmente la producción industrial de microalgas a nivel mundial está orientada a la obtención de productos de alto valor agregado, como son los antioxidantes, pigmentos, vitaminas y ácidos grasos esenciales, los cuales requieren volúmenes menores de cultivos. Por su parte, el salto de escala que es necesario dar en el cultivo de microalgas para poder competir en el mercado de los biocombustibles es mucho mayor y por ende costoso. Sin embargo, las ventajas ambientales asociadas a estos cultivos bioenergéticos son un incentivo para avanzar en investigación y desarrollo (I&D) en pro de una tecnología económicamente viable.

En particular, este trabajo abordará las líneas de investigación que se desarrollan en la ciudad de Bahía Blanca (Argentina), en el laboratorio de Estudios Básicos y Biotecnológicos en Algas (LEBBA), perteneciente al Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS-CONICET-UNS), relacionadas con el cultivo de microalgas para la obtención de aceites, aptos para la producción de biodiesel, operando bajo el modelo de biorrefinería. Esto implica, el cultivo de microalgas que presentan la capacidad de sintetizar en forma simultánea TAG, aptos para biodiesel y co-productos de valor agregado. Las investigaciones en esta temática son llevadas a cabo por un grupo interdisciplinario y consolidado, e incluyen: 1) selección de especies microalgales nativas oleaginosas, 2) optimización de los cultivos, 3) desarrollo de metodologías de extracción y caracterización lipídica, 4) puesta a punto de técnicas de producción de biodiesel y 5) obtención de co-productos de valor agregado. Además se analiza el diseño, construcción y operación de los sistemas de cultivo, los métodos de cosecha y los distintos procesos ingenieriles de producción de biodiesel.

## **CONFORMACIÓN DEL GRUPO DE TRABAJO**

El grupo interdisciplinario se formó a fines de 2008 con la aprobación y financiamiento de un Proyecto Exploratorio de la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva, del Programa de Energía y Transporte, titulado: “Obtención de aceites para la producción de biodiesel a partir de microalgas”, dirigido por la Dra. Patricia Leonardi. Este proyecto fue el inicio de la conformación de un equipo de trabajo integrado por investigadores del LEBBA, la Universidad Nacional del Sur

(UNS) y de la Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI-CONICET-UNS). A partir del año 2013, este grupo se enriqueció con la inclusión de investigadores del Instituto de Química del Sur (INQUISUR-CONICET-UNS), Instituto de Investigaciones Bioquímicas de Bahía Blanca (INIBIBB-CONICET-UNS) y del Centro de Investigación en Hidratos de Carbono (CIHIDECAR-CONICET-UBA). Paralelamente se realizan estudios en colaboración con investigadores de las universidades de Pavia y de Ferrara, Italia, a través de proyectos de Cooperación Internacional. El grupo está conformado por investigadores, becarios y personal de apoyo, y como parte de la formación de recursos humanos, en el año 2015 se obtuvieron los dos primeros doctorandos con una formación interdisciplinaria en esta temática [12, 13]. En cuanto a los subsidios nacionales e internacionales recibidos para desarrollar esta línea de investigación, se detallan los más relevantes al final del capítulo.

## **LÍNEAS DE TRABAJO Y PRODUCCIÓN CIENTÍFICA**

Para seleccionar una especie microalgal apta para producir biodiesel, la literatura señala que algunas de las principales características a tener en cuenta son: 1) su origen y robustez; 2) su capacidad para producir biomasa y lípidos en una forma eficiente; 3) la calidad de sus lípidos; 4) la resistencia que ofrece su pared celular a los métodos de extracción lipídica y 5) el grado de dificultad que implica su cosecha [10]. También se deben considerar las condiciones de estrés necesarias para que la microalga acumule triglicéridos, las cuales generalmente comprenden la carencia de nutrientes, altas radiaciones lumínicas o envejecimiento celular. Además, todo esto debe desarrollarse en un contexto sustentable. Así, el primer paso para realizar una bioprospección de un cultivo a escala masiva, es la selección de la especie a cultivar.

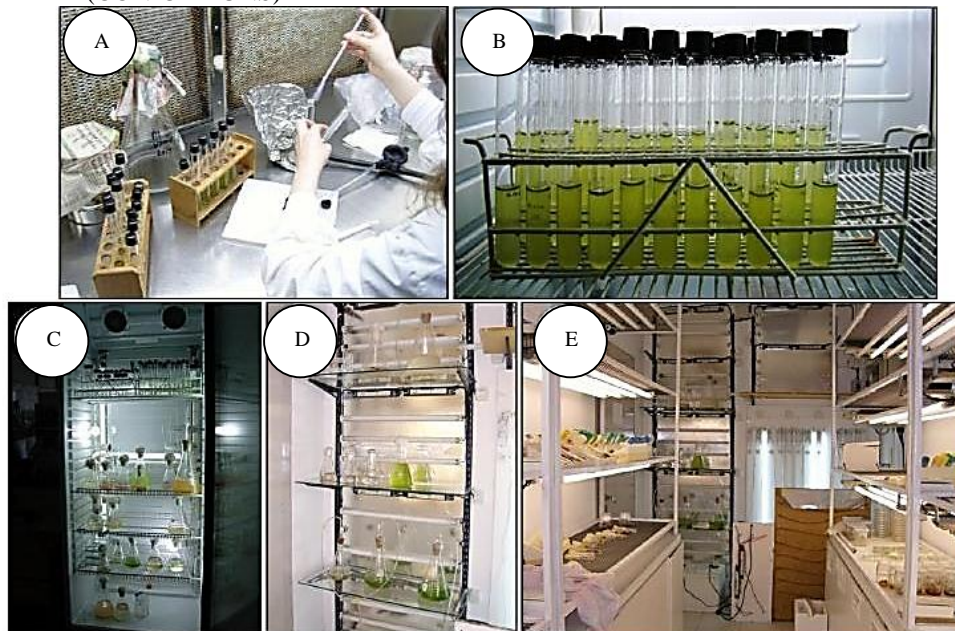
En el LEBBA, se ha desarrollado un cepario de especies microalgales nativas, como también algunas provenientes de ceparios internacionales, con el fin de seleccionar las más robustas (figura n.º 1). Las especies aisladas provienen de distintos cuerpos de agua, tanto marinos como continentales. Las microalgas en estudio comprenden algas verdes, diatomeas y eustigmatófitas [14]. Algunas de estas especies han sido depositadas en el cepario internacional Culture Collection of Autotrophic Organisms (CCALA), Instituto de Botánica, Academia de Ciencia, en República Checa.



Los estudios de microalgas del estuario de Bahía Blanca, que abarcan una trayectoria de más de 20 años, han indicado que las diatomeas son el grupo dominante [15, 16, 17, 18, 19]. Estos microorganismos están compuestos por una pared silíceo y presentan la capacidad de acumular TAG naturalmente. Las especies de diatomeas que fueron aisladas de este ambiente, como son *Skeletonema costatum* y *Navicula gregaria* [20], *Navicula cincta* [21] y *Halamphora coffeaeformis* [22] presentan niveles altos de TAG que pueden alcanzar hasta un 41 % respecto a la biomasa seca libre de cenizas [12, 21], lo cual indica su buena capacidad oleaginoso. Estos aceites, bajo las condiciones testeadas, presentan una dominancia del ácido graso monoinsaturado, ácido palmítico (C16:1), el cual no es común en vegetales superiores [20, 21 y 22]. Las cualidades de este ácido graso han sido señaladas por mejorar la calidad de los aceites destinados a biodiesel, dado que mejoran la fluidez a bajas temperaturas y la estabilidad oxidativa de este biocombustible [23].

Otra ventaja importante que presentan las diatomeas, es que acumulan TAG en forma natural por envejecimiento celular durante su fase estacionaria de crecimiento. Esta característica las favorece frente a otras especies de microalgas que fueron estudiadas, las cuales requieren de un factor de estrés extrínseco para acumular TAG, como son las altas radiaciones lumínicas o la deficiencia de nitrógeno. Algunos ejemplos incluyen: *Haematococcus pluvialis* [24]; *Neochloris oleoabundans* [25]; *Scenedesmus acutus* [26] y *Nannochloropsis oceanica* [13, 27, 28].

**Figura n.º 1.** Aislamiento de especies (A), Cepario (B-C), y Cámaras de cultivo (D-E) del LEBBA (CONICET-UNS)

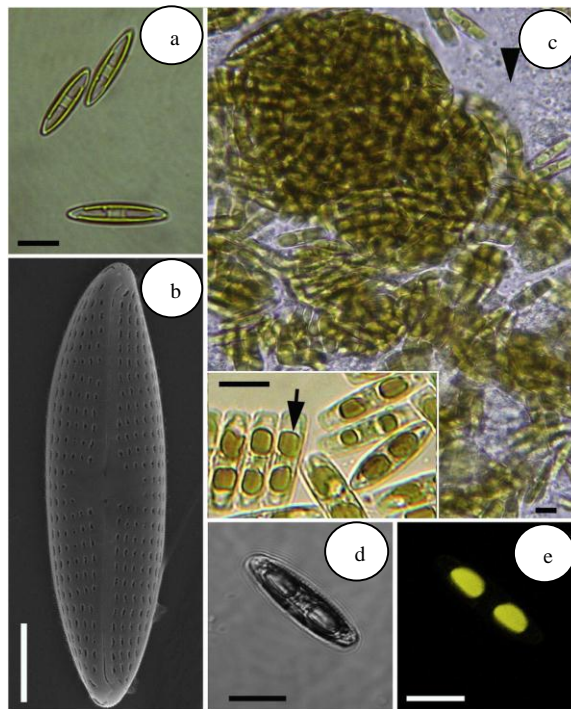


**Fuente:** [13].

En forma paralela con los estudios lipídicos, se analizan la cantidad y calidad de los co-productos obtenidos, para evaluar su aplicación industrial. Entre ellos se han identificado: 1) sustancias poliméricas extracelulares (EPS), sintetizadas por la diatomea *Navicula cincta* (figura n.º 2) [21]. Estos polímeros pueden ser muy útiles para la obtención de complejos interpolielectrolitos, usados para la liberación controlada de principios activos de interés farmacéutico o agronómico, como también en procesos de biorremediación por su capacidad de unirse a sustancias tóxicas; 2) óxido de silicio (comúnmente llamado sílice), presente en las paredes celulares de las diatomeas (figura n.º 2) [21, 22], el cual de acuerdo a su calidad puede ser utilizado en industrias de materiales (filtración, abrasión, absorción), químicas (insecticidas, pesticidas) y nanotecnológicas (biosensores, implantes médicos) [29]; 3) astaxantina, un antioxidante producido por *Haematococcus pluvialis* [30] con importantes aplicaciones en la industria nutracéutica, cosmética y alimenticia; y 4) fitoesteroles, también producidos por *H. pluvialis*, con propiedades antioxidantes y potenciales aplicaciones antiproliferativas [31]. Con respecto a estos co-productos, se están desarrollando estudios en

colaboración con investigadores de la Universidad de Pavia (Italia), con el CIHIDECAR y el INIBIBB para dilucidar la calidad de la astaxantina, y de los EPS y conocer las propiedades de los fitoesteroles, respectivamente.

**Figura n.º 2.** Observación de la diatomea nativa *Navicula cincta* en distintos estadios de cultivo. (a) Células jóvenes en fase de crecimiento exponencial. (b) Detalle de la pared celular silíceica. (c) Agregados celulares en fase de crecimiento estacionaria con abundante EPS (punta de flecha) y numerosas gotas de lípidos teñidos con Sudan IV (figura insertada, flecha). (d–e) Célula en fase de crecimiento estacionaria observada con contraste de fases (d) y con microscopio de epifluorescencia (e). La coloración dorada indica acumulación de TAG dentro del citoplasma, teñidos con el fluoróforo Rojo Nilo. (a,c) Microscopio óptico. (b) Microscopio electrónico de barrido. Escala de las barras = 10 µm.



**Fuente:** [21].

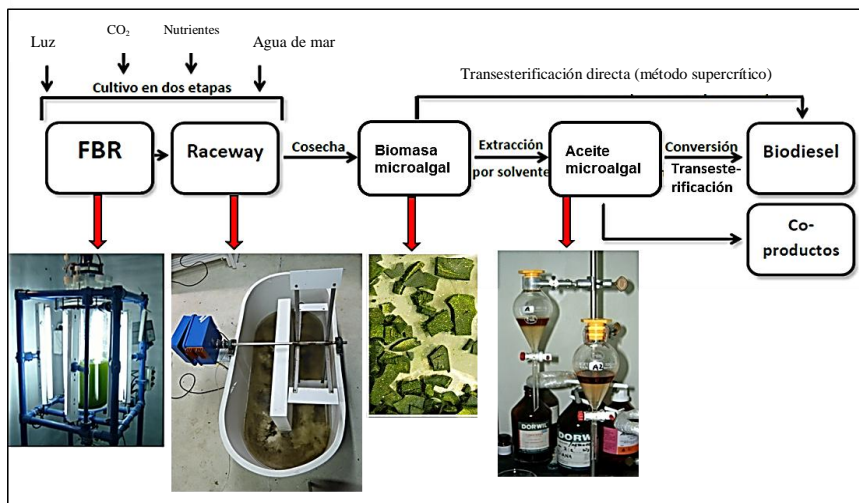
Todos estos resultados a escala de laboratorio, permitieron determinar que las especies más adecuadas para la realización de cultivos a escala piloto-experimental son aquellas que hemos aislado del estuario de Bahía Blanca, tanto por su posibilidad de crecimiento en aguas marinas como por su robustez. Para lo cual, estamos poniendo a punto un

diseño de cultivo *híbrido* en dos etapas con agua proveniente de la zona interna del estuario de Bahía Blanca, debidamente acondicionada y enriquecida con nutrientes (figura n.º 3). En la primera etapa, usamos fotobiorreactores (FBRs) (figura n.º 3), con el fin de optimizar la producción de biomasa suficiente (inóculo) para proseguir el escalado. Mientras que en la segunda etapa, trabajamos con piletas tipo *raceway* (figura n.º 3), en donde los cultivos son sometidos a envejecimiento celular, con el objeto de estimular la producción de TAG y co-productos de valor agregado. Los FBR son sistemas cerrados que permiten mantener el cultivo bajo condiciones controladas de mezcla, luz, nutrientes y contaminación. En general, son sistemas costosos, por lo que su implementación es aconsejada solo para la obtención de los inóculos. Por otro lado, las piletas tipo *raceway*, consisten en un sistema de canales de poca profundidad suplementados con un equipo de agitación por paletas. Estas piletas son sembradas con el inóculo proveniente de los FBR, y usadas para inducir la acumulación de TAG. Son las unidades de cultivo masivo a cielo abierto más comúnmente usadas en acuicultura. Las ventajas de estas piletas radican en su bajo costo y facilidad de construcción y operación, así como en la alta durabilidad [32]. Como desventajas, la evaporación y la exposición a la contaminación, son dos problemas que pueden llegar a limitar la producción de estos sistemas. De acuerdo a los resultados obtenidos, los rendimientos alcanzados en sistemas *raceways*, llevados a cabo con una especie nativa del estuario de Bahía Blanca y con agua de mar de este ambiente, permiten sugerir un balance energético positivo. Esto indica que la cantidad de energía recuperada en el proceso de conversión de biomasa a bioproductos sería superior a la energía invertida [22].

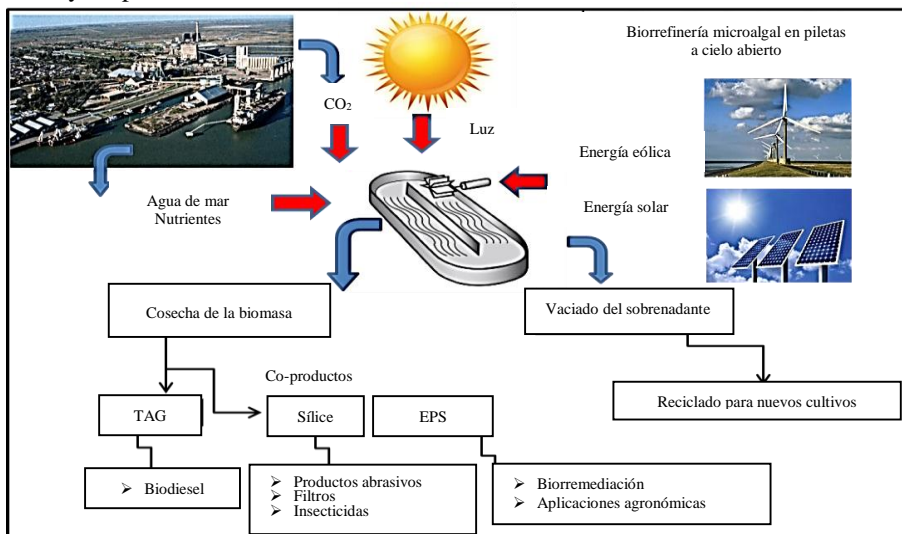
En cuanto a la producción de biodiesel, estudios experimentales recientes sobre transesterificación de aceites vegetales para la producción de alquil ésteres de ácidos grasos (biodiesel), muestran que trabajando en condiciones supercríticas es posible obtener altas velocidades de reacción sin el uso de catalizadores [33]. Los resultados que se han obtenido hasta el momento son alentadores. Por un lado, los primeros ensayos realizados con minireactores supercríticos nos permitieron encontrar las condiciones de temperatura y presión necesarias para extraer los aceites microalgales y, a partir de ellos, realizar la transesterificación [34]. Por otro lado, las últimas experiencias realizadas indican que la transesterificación se puede efectuar óptimamente a partir de la biomasa oleaginosa (figura n.º 3), es decir, sin la necesidad de realizar la extracción previa del aceite [35, 36, 37].

Un punto clave a tener en cuenta a la hora de establecer una planta piloto para el cultivo a gran escala de microalgas para producir biodiesel es el espacio físico más adecuado. El estuario de Bahía Blanca constituye una pieza fundamental para el desarrollo de la región sudeste de la provincia de Buenos Aires. Como otros sistemas de humedal se trata de un área de altísima productividad y con una gran diversidad biológica. Aparte del valor intrínseco del estuario, este ambiente presenta numerosas ventajas para futuros emprendimientos relacionados con la producción de microalgas a mayor escala. Por ejemplo, la zona interna presenta extensas planicies de marea, no aptas para la agricultura y con potencialidad para el desarrollo de cultivos masivos; es de fácil acceso; provee el agua salobre necesaria para el sostenimiento de los cultivos llevados a cabo en el LEBBA y presenta una zona portuaria que ofrece servicios ágiles, flexibles y adaptables a los requerimientos y cambios tecnológicos que exigen las economías internacionales. Por otro lado, Bahía Blanca ha sido considerada una de las ciudades argentinas que mayor cantidad de gases de efecto invernadero lanza a la atmósfera [38]. Estos autores, determinaron que las emisiones de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a los consumos del sector industrial de la ciudad, el cual se concentra, en su mayor parte, en el veril norte de la zona interna del estuario de Bahía Blanca. Bajo este escenario y por su potencial de mejora, el desarrollo de cultivos masivos de microalgas en esta zona podría contribuir a mitigar los gases de efecto invernadero de la región, generando materia prima renovable para la producción de aceite para biodiesel junto con co-productos de valor agregado (figura n.º 4) [39].

**Figura n.º 3.** Esquema de un diseño de biorrefinería microalgal a escala piloto, desarrollado en el LEBBA (CERZOS-CONICET-UNS), para la obtención de biodiesel y co-productos de valor agregado



**Figura n.º 4.** Esquema hipotético de una biorrefinería microalgal para la producción de biodiesel y co-productos, localizado en la costa Norte del estuario de Bahía Blanca



**Fuente:** adaptado de [21].

Considerando que se ha entrado en una era ambientalmente comprometida y con escasez de energía convencional, es de destacar que los estudios obtenidos por el grupo del LEBBA han generado en poco tiempo una fuente importante de conocimientos científicos en cultivos bioenergéticos de microalgas nativas. Sin embargo, para que estos estudios puedan alcanzar una etapa productiva-industrial, aún se requiere de un esfuerzo importante en el desarrollo de tecnologías innovadoras que optimicen el funcionamiento de estas biorrefinerías con el objetivo de obtener biodiesel de una manera sustentable.

## **FUENTES DE FINANCIAMIENTO**

2015-2017. Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica = PICT 2015-0800. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. FONCyT. Tema: Biorrefinería de microalgas: obtención de aceites para la producción de biodiesel y co-productos de valor agregado. Director: P. I. Leonardi. Investigador Responsable: C. A. Popovich.

2015-2017. Proyecto de Investigación Plurianual = PIP 112-2015 01-00510. CONICET. Tema: Cultivo de algas y análisis de bioproductos con aplicaciones bioenergéticas, nutraceuticas y/o industriales. Titular: P. I. Leonardi, Co-titular: C. Matulewicz.

2014-2015. Proyecto de Grupos de Investigación en Temas de Interés Regional (PGI-TIR 24/TB13). Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur. Tema: “Escalado en el cultivo de microalgas del estuario de Bahía Blanca para la obtención de aceite y la producción de biodiesel”. Director: P. I. Leonardi, Co-director: C. A. Popovich.

2012-2014. Proyecto de Investigación Plurianual = PIP 112-201101-00208. CONICET “Polisacáridos y lípidos de algas de fuentes naturales y/o cultivos con potenciales aplicaciones farmacotécnicas y/o bioenergéticas”. Director: C. Matulewicz, Co-director: P. I. Leonardi.

2012-2013. Programma di Ricerca. Consorzio Universitario Italiano per L'Argentina (CUA). Tema: “Tecnologie per la produzione di biocombustibili da biomasse

vegetali” Universidades participantes: Ferrara, Pavia, Roma (Italia), UNS, UNP (Argentina). Partners: R. Cella (Italia), P. I. Leonardi (Argentina).

2011-2012. Proyecto de Grupos de Investigación de Interés Regional, PGI-TIR 24/TB08. Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur. Tema: “Cultivo de microalgas del Estuario de Bahía Blanca para la obtención de aceite y evaluación de su potencial aplicación para la producción de biodiesel”. Director: P. I. Leonardi.

2012-2014. Proyecto UniFe entre las Universidad de Ferrara (Italia), Universidad Nacional del Sur (Argentina) y Chemical Process and Energy Resources Institute (Grecia). Tema: “Proposal of a partnership for the development of technologies using microalgae as a source of biofuel”. Partners: S. Pancaldi (Italia), C. A. Popovich (Argentina).

2010-2013. Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica, PICT-2010-0959. Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. FONCyT. Tema: “Bioenergía: Cultivo de microalgas para la obtención de aceite y análisis de su factibilidad para la producción de biodiesel”. Director: P. I. Leonardi. Investigador responsable: C. A. Popovich.

2009-2011. Proyecto de Investigación Plurianual, PIP 112-200801-00234. CONICET. Tema: “Polisacáridos, lípidos y pigmentos de algas con potencial uso biotecnológico”. Director: C. Matulewicz, Co-director: P. I. Leonardi.

2009-2010. Programma di Ricerca. Consorzio Universitario Italiano per L'Argentina (CUIA). Tema: “Sviluppo per l'impiego di metodologie per di microalghe come fonte rinnovabile di biocombustibile”. Universidades de Ferrara, Padova y Pavia (Italia). Universidades de Buenos Aires, Nacional del Sur y Patagonia (Argentina). Partners: S. Pancaldi (Italia), P. I. Leonardi (Argentina).

2007-2008. Proyecto Programa de Energía y Transporte. Estudio Exploratorio N° E658/07PET29. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SeCyT). Tema: “Obtención de aceites para la producción de biodiesel a partir de microalgas”. Director: P. I. Leonardi.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brennan, L. y Owende, P. (2010). "Biofuels from microalgae, a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 557-577.
- [2] Naik, S. N.; Goud, V. V.; Rout, P. K. y Dalai, A. K. (2010). "Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 578-597.
- [3] Bilanovic, D.; Andargatchew, A.; Kroeger, T. y Shelef, G. (2009). "Fresh-water and marine microalgae sequestering of CO<sub>2</sub> at different C and N concentrations-response surface methodology analysis", *Energy Conversion and Management*, 50, pp. 262-67.
- [4] Wang, B.; Li, Y.; Wu, N. y Lan, C. (2008). "CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae". *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), pp. 707-18.
- [5] Demirbas, A. (2009). "Production of Biodiesel from Algae Oils". *Energy Sources*, 31, pp. 163-168.
- [6] World Energy Outlook, 2012. <http://www.worldenergyoutlook.org/>.
- [7] Mata, T. M.; Martins, A. A. y Caetano, N. S. (2010). "Microalgae for biodiesel production and other applications: a review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, pp. 217-232.
- [8] Nigam Singh P. y Singh A. (2011). "Production of liquid biofuels from renewable resources", *Progress in Energy and Combustion Science*, 37, pp. 52-68.
- [9] NextFuel, Portal de información y noticias sobre biodiesel y energías renovables. 22 septiembre 2014, <http://biodiesel.com.ar/tag/corte-obligatorio>.
- [10] Hu Q.; Sommerfeld M.; Jarvis E.; Ghirardi M.; Posewitz M.; Seibert M. y Darzins A. (2008). "Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances", *The Plant Journal*, 54, pp. 621-639.
- [11] Huntley, M. E.; Johnson, Z. I.; Brown, S. L.; Sills, D. L; Gerber, L.; Archibald, I.; Machesky, S. C.; Beal, C. M.; Granados, J. y Greene, C.H. (2015). "De-

- monstrated large-scale production of marine microalgae for fuels and feed”. *Algal Research*, 10, pp. 249-265.
- [12] Barnech Bielsa, G. (2015). Aislamiento, cultivo y análisis de lípidos de diatomeas del estuario de Bahía Blanca: evaluación del potencial uso biotecnológico, Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, 194 pp.
- [13] Bongiovani, N. (2015). Evaluación del potencial de una cepa nativa de *Nannochloropsis oceanica* CCALA 978 (Eustigmatophyta) como fuente de materia prima para la producción de biodiesel, Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, 175 pp.
- [14] Leonardi P. I.; Popovich, C. A. y Damiani, M. C. (2011). “Feedstocks for second-generation biodiesel: microalgae's biology and oil composition”, en: dos Santos Bernardes, Marco Aurélio (ed.). *Economic effects of biofuel production*, In Tech Publisher, Croacia. pp. 318-346.
- [15] Popovich, C. A. (2004). “Fitoplancton”. En: Piccolo, M. C. y Hoffmeyer, M. S (eds.). *El ecosistema del Estuario de Bahía Blanca*, 2da. Edición, Bahía Blanca: Ediuns, pp. 91-100.
- [16] Popovich, C. A. y Marcovecchio, J. E. (2008). “Spatial and Temporal Variability of Phytoplankton and Environmental Factors in a Temperate Estuary of South America (Atlantic Coast, Argentina)”, *Continental Shelf Research*, 28 (2), pp. 236-244.
- [17] Popovich, C. A.; Guinder, V. A. y Pettigrosso, R. (2008). “Composition and dynamics of phytoplankton and aloricate ciliate communities from Bahía Blanca Estuary”. Chapter 4, en: Neves, R.; Baretta, J. y Matteus, M. (eds.). *Perspectives on integrated coastal zone management in South America*, Lisboa: IST Press, Scientific Publishers, pp. 255-270.
- [18] Guinder, V. A.; Popovich, C. A.; Molinero, J. C. y Perillo, G. M. E. (2010). “Long-term changes in phytoplankton phenology and community structure in the Bahía Blanca Estuary, Argentina”, *Marine Biology*, 157 (12), pp. 2703-2716.
- [19] Guinder, V. A.; Popovich, C. A.; Molinero, J. C. y Marcovecchio, J. E. (2013). “Phytoplankton summer bloom dynamics in the Bahía Blanca Estuary in relation to changing environmental conditions”, *Continental Shelf Research*, 52, pp. 150-158.

- [20] Popovich, C. A.; Damiani, C.; Constenla, D. y Leonardi P. I. (2012a). "Lipid quality of *Skeletonema costatum* and *Navicula gregaria* from South Atlantic Coast (Argentina): evaluation of its suitability as biodiesel feedstock", *Journal of Applied Phycology*, 24, pp. 1-10.
- [21] Barnech Bielsa G.; Popovich, C. A.; Rodríguez, M. C.; Martínez, A. M.; Martín, L.; Matulewicz, M. C.; Leonardi, P. I. (2016). "Simultaneous production assessment of triacylglycerols for biodiesel and exopoly-saccharides as valuable co-products in *Navicula cincta*", *Algal Research*, 15, pp. 120-128.
- [22] Martín L.; Popovich C. A.; Martínez A. M.; Damiani M. C.; Leonardi P. I. (2016). "Oil assessment of *Halamphora coffeaeformis* diatom growing in a hybrid two-stage system for biodiesel production", *Renewable Energy*, 92, pp. 127-135.
- [23] Knothe, G. (2010). "Biodiesel derived from a model oil enriched in palmitoleic acid, macadamia nut oil", *Energy & Fuels*, 24, pp. 2098-2103.
- [24] Damiani, C.; Popovich, C. A.; Constenla, D. y Leonardi, P. I. (2010). "Lipid analysis in *Haematococcus pluvialis* to assess its potential use as biodiesel feedstock", *Bioresource Technology*, 101, pp. 3801-3807.
- [25] Popovich, C. A.; Damiani, C.; Constenla, D.; Martínez, A. M.; Freije, R. H.; Giovanardi, M.; Pancaldi, S. y Leonardi, P. I. (2012b). "Evaluation of growth and biochemical composition of *Neochloris oleoabundans* grown in enriched natural seawater for biodiesel feedstock", *Bioresource Technology*, 114, pp. 287-293.
- [26] Damiani, M. C., Popovich, C. A., Constenla, D., Martínez, M. A.; Freije, H.; Doria, E.; Longoni, P.; Cella, R.; Nielsen, E. y Leonardi, P. I. (2014). "Triacylglycerol content, productivity and fatty acid profile in *Scenedesmus acutus* PVUW12", *Journal Applied Phycology*, 26, pp. 1423-1430.
- [27] Bongiovani, N.; Popovich, C. A.; Martínez, A. M.; Freije, H.; Constenla, D.; Leonardi, P. I. (2013). "In vivo measurements to estimate culture status and neutral lipid accumulation in *Nannochloropsis oculata* CCALA 978: implications for biodiesel oil studies", *Algological Studies*, 142, pp. 3-16.
- [28] Bongiovani N.; Sanchez Puerta M. V.; Popovich C. A. y Leonardi P. I. (2014). "Molecular and phylogenetic identification of an oil-producing strain of *Nannochloropsis oceanica* (Eustigmatophyceae) isolated from the southwestern

- Atlantic coast (Argentina)", *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 49(3), pp. 615-623.
- [29] Lopez P. J.; Descles J.; Allen A. E.; Bowler C. (2005). "Prospects in diatom research", *Current Opinion in Biotechnology*, 16(2), pp. 180-186.
- [30] Damiani, M. C; Leonardi, P. I. y Cáceres, E. J. (2013). "Precisiones en el ciclo de vida de *Haematococcus pluvialis* con énfasis en los estadios involucrados en la síntesis de bioproductos", *Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica*, 48, p. 167.
- [31] Scodelaro Bilbao P.; Damiani, C.; Salvador G. y Leonardi, P. I. (2016). "Haematococcus pluvialis as a source of fatty acids and phytosterols: potential nutritional and biological implications", *Journal of Applied Phycology*, 28, pp. 3283- 3294.
- [32] Rawat, K. R.; Ranjith,T.; Mutanda, F. y Bux (2013). "Biodiesel from microalgae: a critical evaluation from laboratory to large scale production". *Applied Energy*, 103, pp. 444-467.
- [33] Kusdiana, D. y Sak, S. (2004). "Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment", *Bioresource Technology*, 91, pp. 289-295.
- [34] Leonardi, P. I. (2008). Primer informe. Proyecto Programa de Energía y Transporte. Estudio Exploratorio n.º E658/07PET29. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (SeCyT). Tema: "Obtención de aceites para la producción de biodiesel a partir de microalgas".
- [35] Soto, G., Hegel, P., Popovich, C. A., Damiani, M. C., Pereda, S. y Leonardi, P. I. (2012). "Biodiesel Production from Microalgae by Supercritical Methanolysis". 10th International Symposium on Supercritical Fluids, San Francisco, Estados Unidos.
- [36] Hegel, P.; Montero, R.; Damiani, D.; Popovich, C. A.; Pereda, S. y Leonardi, P. I. (2013). "Direct production of biodiesel from *Haematococcus pluvialis* by supercritical methanol", VIII Encuentro Latinoamericano y del Caribe de Biotecnología, Mar del Plata, Argentina.
- [37] Montero, R; Hegel, P; Popovich, C. A.; Damiani, C.; Pereda, S. y Leonardi, P. I. (2013). "Fatty acids recovery from microalgae for biodiesel production", R. III Iberoamerican Conference on Supercritical Fluids. Prosciba 2013, Cartagena, Colombia, pp. 1-8.

- [38] Ferraro, R.; Gareis, C. y Zulaica, L. (2013). “Aportes para la estimación de la Huella de Carbono en los grandes asentamientos urbanos de Argentina”. *Revista Colombiana de Geografía*, 22, pp. 87-106.
- [39] Martín, L. A.; Popovich, C.; Damiani, C.; Revale, H. y Leonardi, P. (2016). “Biorrefinería algal: cultivo de microalgas oleaginosas del Estuario de Bahía Blanca (Pcia. Bs. As.) para la producción de biodiesel y co-productos de valor agregado”, 2° Congreso de Energías Sustentables, 26 al 28/10/2016, Bahía Blanca, Argentina, Anales de los trabajos completos 1ª ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: edUTecNe, 2016, pp. 356-360.

### **Cecilia Angelines Popovich**

Licenciada en Ciencias Biológicas y Dra. en Biología en la Universidad Nacional del Sur (UNS). Actualmente es docente del Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia de la UNS e Investigadora Adjunta de la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC). Su área de interés incluye la biología, ecología y bioquímica de microalgas con potenciales aplicaciones biotecnológicas.

### **Patricia Inés Leonardi**

Licenciada en Ciencias Biológicas y Dra. en Biología en la UNS. Actualmente es Profesora Asociada del Departamento de Biología, Bioquímica y Farmacia de la UNS, Investigadora Principal del CONICET y Vicedirectora del Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (CERZOS-CONICET-UNS). Su área de interés incluye la biología, ultraestructura y bioquímica de algas con potenciales aplicaciones biotecnológicas.

# LA PRODUCCIÓN DEL CARBÓN VEGETAL

Paulo César da Costa Pinheiro<sup>1</sup>

## RESUMEN

Brasil es el mayor productor de carbón vegetal del mundo, con la producción de 6,1 millones de toneladas métricas (24 millones de m<sup>3</sup>), 13 % de la producción mundial. La importante producción de carbón vegetal es la consecuencia de un gran parque de fabricación de acero, que consume el 80 % de este carbón vegetal. Para este uso intensivo del carbón, ha sido necesario desarrollar una tecnología moderna de producción industrial. Este trabajo muestra una revisión de la teoría de la carbonización, y un análisis de los factores que influyen en la producción de carbón vegetal y en la operación de los hornos de carbonización. Muestra también un comparativo de los varios hornos de carbonización utilizados en Brasil.

**Palabras clave:** Carbón vegetal, Carbonización, Pirólisis, Energía.

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Federal de Minas Gerais - UFMG.

## INTRODUCCIÓN

La producción de carbón vegetal data desde la pre-historia, en todas las partes del mundo. Los hallazgos arqueológicos de 600.000 años, mostraron puntas de flecha pegadas a los tallos de los árboles con alquitrán, un material que solo puede obtenerse a través de la carbonización de la madera. Hace más de 30.000 años ya fue utilizado por el hombre primitivo en algunas de las pinturas más antiguas, como en Perigord, Francia. En el valle de Neandertal (Alemania) fueron descubiertos los sitios de producción de carbón que datan de 20.000 AC.

El final de la Edad de Piedra y el inicio de la metalurgia, hace más de 5500 años, solo fue posible con la producción del carbón vegetal. La combustión de la madera no llega a temperaturas lo suficientemente altas para fundir los metales. La combustión del carbón vegetal, produce altas temperaturas ( $> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), que permiten fusionar el mineral y por lo tanto separar el metal de la roca. El primer metal reducido fue el cobre, en alrededor de 3000 AC, iniciando la Era del Bronce. El hierro, debido a la necesidad de temperaturas más altas y una mayor corriente de aire y se obtuvo en cerca 1200 AC, marcando el comienzo de la Edad del Hierro. Sin el carbón vegetal las Edades de Bronce y Hierro no habrían ocurrido y el hombre hubiera seguido en la Edad de Piedra. El uso de carbón vegetal permitió la aparición de la primera tecnología desarrollada por el hombre: la fundición y forja de metales.

Hasta 1700 toda la producción de hierro en el mundo se había obtenido a partir de carbón vegetal. En 1709 el inglés Abraham Darby I logró producir arrabio fundido a partir de coque de carbón bituminoso. Como resultado de esta innovación, y debido a la abundancia de carbón y la escasez de madera en Europa, se disminuyó la demanda de carbón vegetal en la industria.

La FAO estimó la producción mundial de carbón vegetal en 47 millones de toneladas (2009), un aumento de 7,7 % en la década. Es utilizado principalmente para cocinar. El precio del carbón vegetal en los países en desarrollo es de entre US\$ 90 a US\$ 400/ton. Tomando un precio promedio de US\$ 150/ton, el mercado mundial de carbón vegetal se estima en US\$ 7 mil millones.

Brasil es el mayor productor de carbón vegetal del mundo. En 2015 el país produjo 6,1 millones de toneladas (24 millones de  $\text{m}^3$ ) [1], aproximadamente 13 % de la producción



mundial. La madera de reforestación es utilizada en aproximadamente 88 % de la producción de carbón vegetal [2], y el eucalipto es utilizado en 77 % de los bosques plantados en Brasil. Alrededor del 86 % del carbón vegetal producido en Brasil es utilizado en el sector industrial en la producción de arrabio o de acero (4,3 Mton), ferro aleaciones (0,61 Mton) y cemento (0,2 Mton) [1]. El sector residencial consume 12 % y el sector comercial (pizzerías, panaderías y asadores) alrededor del 2 %. Brasil es el único país en condiciones de mantener una siderurgia a carbón vegetal, produciendo hierro y acero de alta calidad, debido al bajo nivel de impurezas de este reductor. El carbón vegetal se utiliza en la producción nacional de 33 % de arrabio y 98 % de las de ferro aleaciones.

## **CARBÓN VEGETAL**

**Nombre científico:** Carbo lignis, Carbo vegetalis.

**Nombre vulgar:** Carbón Vegetal

El carbón vegetal es el resultado de la descomposición térmica de la biomasa en ausencia de aire (pirólisis) a una temperatura por encima de 300 °C. Todos los tipos de biomasa se pueden utilizar en la producción de carbón vegetal, pero se utiliza principalmente la madera. El carbón vegetal es un combustible con un poder calorífico y reactividad mucho más altos que la madera. Sin embargo, el proceso de carbonización tiene baja eficiencia energética (< 50 %), y su uso disminuye la eficiencia global de los procesos que utilizan el carbón vegetal como fuente de energía.

La pirólisis es el proceso de conversión térmica a temperaturas entre 300-800 °C, en la ausencia total de aire (o con una pequeña cantidad de aire, que no causa una combustión significativa). La pirólisis es un proceso llamado por lo general carbonización, destilación destructiva, o destilación de la madera. Por lo general, es llamado de carbonización el proceso en que el carbón vegetal es el principal producto de interés, de destilación de la madera cuando se desea para producir líquido, de destilación destructiva para producir tanto líquido como carbón, y de gasificación para producir gas. El calor necesario en el proceso puede ser introducido indirectamente, o generado por una combustión parcial de la biomasa (calentamiento directo). La pirólisis realizada a altas

temperaturas (1000 °C) maximiza la producción de gas (gasificación), mientras que la pirólisis a temperaturas más bajas (< 500 °C) maximiza la producción de carbón vegetal (carbonización) (figura n.º 1, tabla n.º 1).

La pirólisis puede ser clasificada en:

**Pirólisis lenta:** utiliza bajas temperaturas y mucho tiempo de reacción. Maximiza la producción de carbón vegetal (alrededor de 35 % en peso, que contiene aproximadamente 50 % del contenido de energía de la biomasa que se utiliza).

**Pirólisis rápida:** El calentamiento rápido de pequeñas partículas de biomasa de bajo contenido de humedad, a una temperatura entre 450-550 °C. Las velocidades de reacción son altas y el tiempo de residencia de típicamente menos de 1 segundo. Maximiza la producción de alquitrán, 65 a 80 % del peso seco inicial.

**Pirólisis flash:** Similar a la pirólisis rápida. Utiliza temperaturas más altas (> 700 °C). Maximiza la producción de líquido y gas (más de 80 % en masa).

**Pirólisis convencional:** Utiliza temperaturas moderadas (< 600 °C) y velocidades de reacción moderadas. Se producen cantidades casi iguales de líquido, de gas y de carbón.

**Tabla n.º 1.** Métodos de pirólisis y sus variantes

Metodo de pirólisis	Tiempo de residencia	Tasa de calefacción	Presión (Atm)	Temperatura max. (°C)	Producto principal
Carbonización	Horas – días	Muy bajas	1	450	Carbón vegetal
Convencional	5-30 min.	Baja	1	600	Sólidos, líquidos, gases
Fast	0,5-5 s.	Promedio	1	650	Bio-aceite
Flash-Líquido <sup>a</sup>	< 1 s	Alta	1	< 650	Bio-aceite
Flash-Gas <sup>b</sup>	< 1 s	Alta	1	< 650	Gas, líquidos
Hidropirólisis <sup>c</sup>	< 10 s	Alta	~ 20	< 500	Bio-aceite
Metanopirólisis <sup>d</sup>	0,5-1,5 s	Alta	~ 3	>750	Químicos
Ultra pirólisis <sup>e</sup>	< 0,5 s	Muy alta	1	1000	Gas, químicos
Vacuo	2-30 s	promedio	< 0,1	400	Bio-aceite

<sup>a</sup> Flash-líquido: líquido obtenido de la pirólisis flash que se lleva a cabo en un tiempo < 1seg.

<sup>b</sup> Flash-gas: gas producto obtenido a partir del tiempo de pirólisis de inflamación < 1 seg.

<sup>c</sup> Hidropirólisis: pirólisis con agua.

<sup>d</sup> Metanopirólisis: pirólisis con metanol.

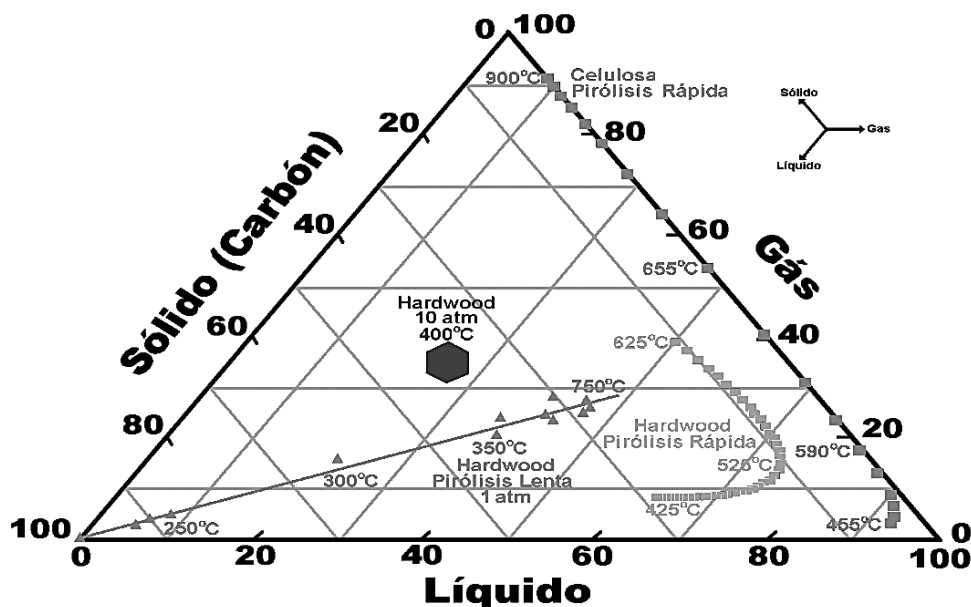
<sup>e</sup> Ultra pirólisis: pirólisis con velocidad de degradación muy alta.

**Fuente:** Bridgewater, 1989 [3].

Las temperaturas empleadas en la carbonización son típicamente entre 350 y 500 °C. Mientras que la madera tiene un gran peso y su combustión produce una gran cantidad de humo, el carbón vegetal tiene un alto valor calórico, bajo peso y se quema sin humo. El carbón vegetal producido en 400 °C contiene aproximadamente 80 % de carbono fijo, 12-15 % de materia volátil, y 0,5-3 % de cenizas. Las cenizas presentes en el carbón vegetal proceden de la madera, y su contenido depende del tipo de madera, la cantidad de corteza, la contaminación con tierra o arena, etc. Además del carbón, son liberadas una fracción volátil que consiste en gases, vapores orgánicos y componentes de alquitrán. Estos componentes volátiles se pueden condensar en la forma de un aceite líquido (aceite piroleñoso). Los gases no condensables pueden ser quemados para producir energía térmica. La proporción de estos productos depende del tipo de biomasa, de la temperatura de carbonización, presión, velocidad de calentamiento y tiempo de residencia en la zona de reacción.

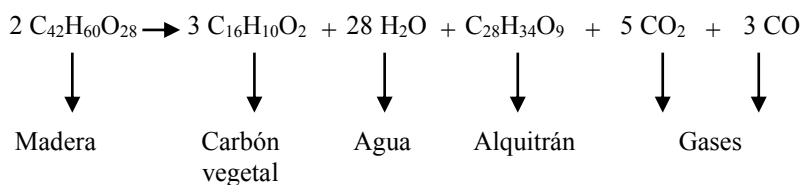
Muchos fenómenos físicos y reacciones químicas que ocurren durante el proceso de carbonización son una función de la temperatura del proceso. El proceso de pirólisis es un proceso químico bastante complicado que consiste en una serie compleja de reacciones paralelas y consecutivas que implican la formación de radicales intermedios, lo que resulta en la destrucción de la materia orgánica de la biomasa, la polimerización, condensación y aromatización de los productos. Hay una fuerte evidencia de que la mayor parte del carbono de la biomasa restante en el carbón proviene de las reacciones de descomposición de los productos secundarios formados durante la descomposición térmica de la madera. Otros factores que influyen en los productos de descomposición primaria y reacciones secundarias son: propiedades físicas y químicas de la madera, las dimensiones y la forma, el contenido de humedad, la velocidad de calentamiento, la presión externa, etc. La carbonización es un proceso físico-químico, los cambios físicos más comunes son los cambios de color, la aparición de grietas, la reducción del volumen, el aumento de la porosidad, la disminución de la densidad, la disminución de la resistencia mecánica y los cambios en la estructura cristalográfica.

Figura n.º 1. Triángulo de pirólisis



Fuente: Elaboración propia.

El proceso de carbonización teórico a 400 °C puede ser representado por la siguiente ecuación [4], donde  $C_{42}H_{60}O_{28}$  y  $C_{16}H_{10}O_2$  son composiciones de madera y carbón vegetal.

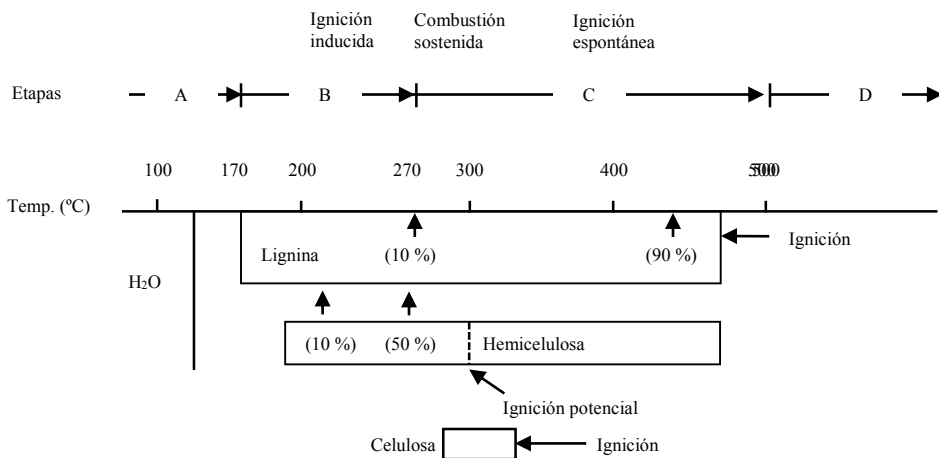


Esta ecuación es una simplificación del proceso de carbonización y no muestra todos los productos involucrados. El carbón producido a 400 °C tiene un contenido de carbono fijo de 82,1 %, y el rendimiento en masa es de aproximadamente 34,7 %. Se puede comprobar que la madera tiene 49,5 % de carbono, 44,0 % de oxígeno y el carbón vegetal 82,1 % y 13,7 %. Por lo tanto, la carbonización es sobre todo un proceso de concentración de carbono (1,7x) y de liberación de oxígeno. El carbón vegetal contiene alrededor del 57 % del carbono de la madera, siendo el resto se encuentra en el condensado y gas de

carbonización. 89 % del oxígeno de la madera es incorporado en los condensados y en los gases que son liberados.

De hecho, el proceso de carbonización es mucho más complejo que la que se muestra en la ecuación anterior. La biomasa contiene hemicelulosa, celulosa y lignina. La celulosa y la hemicelulosa son los azúcares que se descomponen generando componentes volátiles durante la carbonización. Una vez iniciada la pirólisis, la celulosa y la hemicelulosa son casi completamente descompuestas (volatilizadas) a 400 °C. La lignina es el componente más estable y se descompone más lentamente, siendo el principal contribuyente a la formación del carbono (carbono fijo) (figura n.º 2, tabla n.º 2).

**Figura n.º 2.** Etapas de la carbonización



**Fuente:** Elaboración propia.

La celulosa y la semicelulosa se separan inicialmente en forma de compuestos de bajo peso molecular denominada “celulosa activada”. La celulosa y la semicelulosa activada se descomponen térmicamente por reacciones concorrentes, consecutivas y bastante complejas que forman los volátiles (anhidro-azúcares), carbón y gases.

A pesar de que la carbonización a baja temperatura produce una mayor cantidad de carbón vegetal, este carbón tiene un alto contenido de materia volátil produciendo una combustión con llama y humo. Con la carbonización a temperaturas más altas, a pesar

de aumentar el contenido de carbono fijo del carbón, más hidrocarburos son liberados en los gases. Por encima de 500 °C comienza a la gasificación y la disociación del carbón producido, lo que disminuye el rendimiento en masa y energético de la producción de carbón, y disminuye la vida útil del equipo. Por lo tanto, la temperatura ideal de la carbonización debe estar dentro del rango de 380-450 °C, porque el carbón producido tiene buen carbono fijo ( $\approx 84\%$ ) y el contenido de hidrocarburos en los gases es de alrededor de 49 %, con cantidades apreciables de alquitranes.

**Tabla n.º 2.** Etapas del proceso de carbonización de la biomasa

<b>Fase</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Energía</b>
<b>I Secado</b>	<b>20 a 110 °C</b>	<b>Endotérmico</b>
La madera absorbe calor y se seca, liberando la humedad en forma de vapor de agua. La temperatura se mantiene alrededor de 100 °C hasta que la madera esté completamente seca. Una madera verde contiene de 50 a 70 % de agua que debe ser evaporado antes de que la temperatura de la madera se pueda aumentar.		
<b>II</b>	<b>110 a 170 °C</b>	<b>Endotérmico</b>
El contenido final de agua se libera, pocas reacciones importantes. Reacciones de deshidratación que implican los grupos -OH presentes en las moléculas de los polisacáridos.		
<b>III Pre-Carbonización</b>	<b>170 a 270 °C</b>	<b>Endotérmico</b>
Torrefacción. Aumento de la velocidad de reacción e inicio de la liberación de los volátiles. Pequeña eliminación de gases. La madera comienza a descomponerse, liberando CO, CO <sub>2</sub> , ácido acético y metanol.		
<b>IV Transición</b>	<b>270 a 290 °C</b>	
Las reacciones de descomposición se mantienen y se convierten en reacciones exotérmicas.		
<b>V Carbonización</b>	<b>290 a 380 °C</b>	<b>Exotérmica</b>
La reacción se hace exotérmica (desprendimiento de calor). La reacción se convierte en auto-sostenible y la temperatura del medio aumenta debido a la liberación de calor a hasta 380-450 °C. El proceso de descomposición térmica acelera, liberando más calor, por lo que la temperatura no baja de ese valor mientras que la carbonización continúa. Es una etapa importante de reacciones de descomposición y gran eliminación de gases. La composición del gas cambia, disminuyendo los gases oxigenados y surgiendo un gas combustible que contiene CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , CO <sub>2</sub> y vapores condensables. La velocidad de descomposición alcanza su máximo a 360 °C (pico en la curva DTG). El residuo final de esta fase es el carbón vegetal con alto contenido de volátiles.		
<b>VI Carbonización</b>	<b>380 a 500 °C</b>	<b>Exotérmica</b>
Elevando la temperatura a 380 °C la transformación de la madera es casi completa, reduciendo la salida de gases. El carbon a esta temperatura contiene alto contenido volátil, alrededor de 30 % (masa). Para reducir el contenido de volátiles y aumentar el contenido de carbono fijo a aproximadamente 75 %, que es estándar para los carbones de buena calidad es necesario, un calentamiento adicional a cerca de 500 °C para completar la carbonización.		
<b>VII Gasificación</b>	<b>&gt; 500 °C</b>	<b>Exotérmica</b>
Con el calentamiento del carbón por encima de 500 °C se inicia la gasificación y la degradación de carbón.		

**Fuente:** Elaboración propia.

## **EL PROCESO DE CARBONIZACIÓN EN LOS HORNOS USUALES**

En la práctica usual la pirólisis es realizada en hornos con combustión interna. En tales hornos se introduce una cantidad controlada de aire para quemar una porción de la carga de madera (combustión), para calentar el horno y proporcionar energía para el secado, calentamiento y carbonización del resto de la madera. Este principio de funcionamiento se utiliza en los hornos más comunes: hornos de tierra y hornos de cerámica. Este proceso se denomina comúnmente la carbonización. En estos hornos se puede separar el proceso de producción de carbón en 4 etapas: combustión, secado, carbonización (pirólisis) y enfriamiento.

La carbonización comienza con la combustión parcial de la madera existente dentro del horno. Esta etapa proporciona calor para iniciar la carbonización de la madera. Los productos de combustión llevan el calor de la combustión para dentro del horno, calentando la madera, secándola y llevándola a la temperatura de carbonización. En estos hornos aproximadamente 10 a 20 % (masa) de la madera es consumida en la combustión.

La segunda etapa es el secado, cuando la madera comienza a calentarse y se libera el agua de la madera. Un calentamiento posterior libera el agua residual y lleva la madera a la temperatura de carbonización.

La tercera etapa es cuando se produce la carbonización. La carbonización se inicia a aproximadamente 270 °C, después que la humedad de la madera llega a cerca de cero, y es una reacción exotérmica resultante de la descomposición de la celulosa y la lignina. Como esta etapa es exotérmica, ya no es necesaria una la fuente de calefacción para continuar el proceso. La entrada de aire es parcialmente cerrada y el proceso de carbonización procede hasta que toda la madera se ha transformado en carbón. Los gases y compuestos volátiles producidos en la carbonización (ácido acético, agua, alcohol metílico, alquitrán, CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>) se liberan a la atmósfera, restando en el horno el carbón vegetal.

La etapa final, el enfriamiento se alcanza cuando la temperatura del carbón vuelve a la temperatura ambiente.

En los hornos de carbonización por lote, la carbonización y el enfriamiento se llevan a cabo en diferentes instantes, de forma que la energía liberada durante la carbonización

y el enfriamiento no se puede utilizar para el calentamiento y el secado. Además, como los compuestos volátiles no se recuperan, se utiliza menos de 50 % del contenido energético de la biomasa. El valor energético del gas es de aproximadamente 40 % de la energía de la madera original seca.

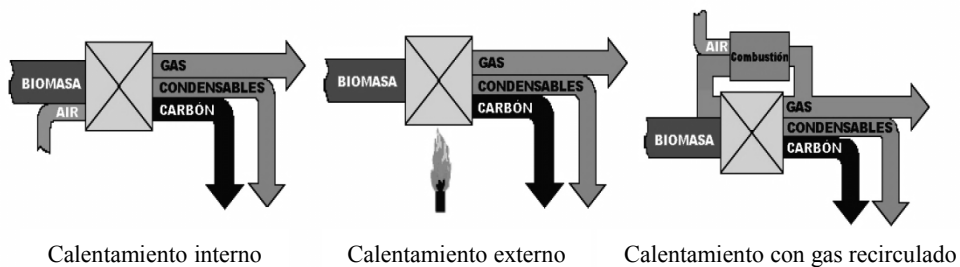
## HORNOS Y TECNOLOGÍAS DE CARBONIZACIÓN

El uso generalizado de carbón vegetal a lo largo de la historia, ha permitido el desarrollo de diversos tipos de hornos de carbonización, y muchos todavía se utilizan en la actualidad. El primer método de producción de carbón vegetal fue probablemente el horno de tierra, que todavía se utiliza hoy en día, donde se coloca la madera en un agujero, cubierto con tierra y se quema lentamente.

En cuanto al método de generación de calor los hornos de carbonización pueden ser clasificados en (ver figura n.º 3):

- a) Calentamiento interno (combustión controlada del material);
- b) Calentamiento externo (cámara de combustión externa);
- c) Retorta (gases de recirculación o de calentamiento indirecto).

**Figura n.º 3.** Tipos de calentamiento del horno de carbonización



**Fuente:** Elaboración propia.

Los hornos de carbonización de calentamiento interno son los más comunes. La carbonización comienza con la introducción controlada de aire en el horno para quemar parte de la biomasa contenida y calentar el horno hasta que alcanza la temperatura de



carbonización. Una vez iniciada la carbonización, la entrada de aire es parcialmente cerrada y el proceso de carbonización continúa hasta que todo el combustible se ha transformado en carbón vegetal. Los gases y los volátiles producidos en la carbonización se liberan a la atmósfera. En estos hornos aproximadamente 10 a 20 % (masa) de la madera que se pone en el horno se consume en la combustión. Este es uno de los métodos más antiguos para hacer carbón vegetal y los hornos que funcionan sobre este principio son los hornos de tierra, hornos de ladrillos y hornos metálicos.

En los hornos de calentamiento externo, la combustión se realiza en una cámara de combustión externa al horno de carbonización. Los gases calientes de los productos de combustión se introducen en el horno para secar la madera y para la realización de la carbonización. Pueden ser quemados en esta cámara: corteza, ramas, alquitrán, aceite combustible o gas natural. Este sistema es de construcción un poco más cara y más complicada, pero tiene un mejor control de la operación, consume menos madera para iniciar el proceso de carbonización, y produce un carbón de mejor calidad y mayor rendimiento.

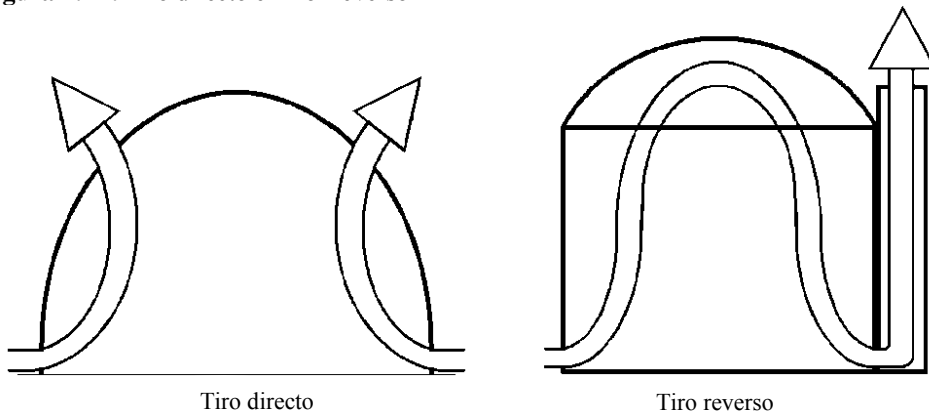
Las retortas son hornos que utilizan una fuente de calor externa para calentar la biomasa contenida en una cámara cerrada. Pueden ser de proceso continuo o por lotes. Permiten la recuperación de aceites volátiles y gases que son co-productos de la pirólisis, y también permiten un mejor control del proceso, y la producción de carbón de alta calidad con un alto rendimiento con un mínimo de emisiones. Las retortas continuas tienen la ventaja de reducir la mano de obra y aumentar de la producción de carbón vegetal y las desventajas de los altos costos de implementación, la velocidad de carbonización, la complejidad operativa, y la necesidad de una fuente de alimentación externa para mantener el proceso. Debido a la gran inversión en instalaciones a gran escala, no son económicamente viables si el único objetivo es la producción de carbón vegetal.

Los hornos de carbonización pueden tener 2 tipos de tiro natural (ver figura n.º 4):

**Tiro directo:** El aire entra a través de aberturas en el piso del horno y los gases son liberados por los agujeros en la parte superior. Como los humos producidos no pasan a través del lecho de pirólisis, no pueden ser craqueados o quemados. Como los condensables no se queman en el horno, este tipo de dibujo facilita la producción de condensables. Este tipo de dibujo facilita la ignición, pero no permite un fácil control

de la carbonización, que puede causar la quema de la carga. Cuanto mayor sea la temperatura dentro del horno, mayor es el tiro, lo que aumenta la entrada de aire, que a su vez aumenta la combustión y aumenta la temperatura del horno. Debido a este control inestable, si el horno no está supervisado de forma continua, en pocas horas se quema gran parte de la carga de madera en el horno. En general, ya que no se supervisa el horno de forma continua, especialmente a la noche, hay una quema de madera importante que resulta en un bajo rendimiento de carbonización.

**Figura n.º 4.** Tiro directo e Tiro Reverso



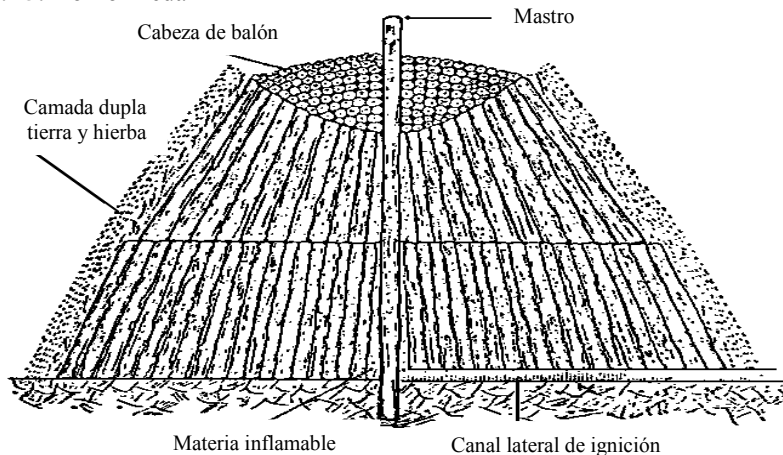
**Fuente:** Elaboración propia.

**Tiro reverso:** La toma de aire y extracción del humo se lleva a cabo en el nivel del piso del horno. Por lo tanto, los humos productos de la combustión (y carbonización) deben bajar antes de salir por la chimenea, y pasar a través de la carga del horno. Como el humo pasa en la camada de pirólisis antes de ser evacuado, los humos son parcialmente carbonizados, lo que aumenta el rendimiento de la carbonización. Este tipo de tiro produce un cierto grado de auto-control de la operación del horno. Si aumenta la combustión, mayor volumen de humo producido tiende a volver hacia las aberturas de entrada, lo que impide la entrada de más aire. Si la combustión disminuye, se produce una depresión en el interior del horno, causando más entrada de aire.

## HORNOS DE TIERRA

El horno de tierra es el método más antiguo de producción de carbón vegetal, y probablemente el más extendido en todo el mundo. En este horno la madera a ser carbonizada se apila o se colocan en zanjas cavadas en el suelo y es completamente cubierta con tierra, dejando algunas aberturas para entrada de aire. No requiere inversión de capital y se construye en el sitio de la extracción de la madera. Sin embargo, requiere gran incorporación de mano de obra para cubrir las pilas de madera con la tierra y para limpiar el carbón de la tierra que cae sobre él durante la carbonización. El control de la carbonización de este horno es difícil y la eficiencia es muy baja, alrededor del 10 %. La evaluación de cientos de hornos tradicionales en África, encontró una la eficiencia de carbonización de 8-9 % [5], además de la contaminación del carbón por la tierra.

**Figura n.º 5.** Horno Meda



**Fuente:** Elaboración propia.

La versión brasileña del horno de tierra es el horno meda (figura n.º 5), que actualmente se encuentra en desuso. La construcción del horno meda comienza con el armado de una estructura de madera en forma circular de 40 a 50 m<sup>3</sup> (balón) en una superficie plana y limpia. Entonces, se cubre la pila de madera con una cobertura de hierba, y sobre esta se coloca otra capa de 10-25 cm de tierra, dejando el frente abierto para iniciar el fuego. El tiempo de carbonización es de 8 a 12 días; el rendimiento en masa es 20 %, y la productividad 30 m<sup>3</sup>/hombre/mes [6].

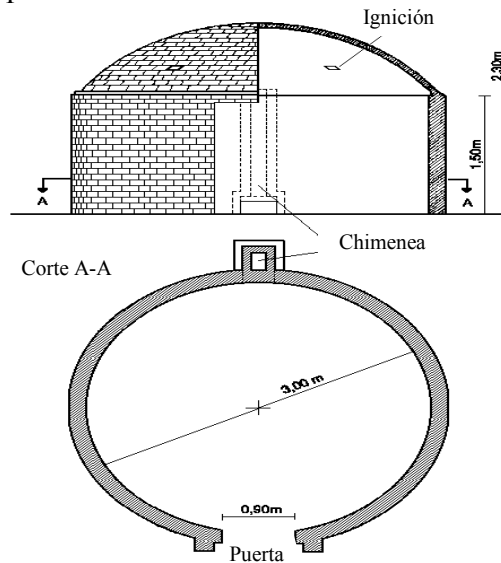
Los hornos meda utilizan gran cantidad de mano de obra, y requieren de atención y de reparaciones especialmente durante las primeras 24 horas, debido al peligro de que la camada de tierra se rompa y caiga, lo que permite la entrada de aire y la combustión de la madera, y la pérdida total de la misma. Los hornos de tierra son generalmente utilizados en las zonas pobres y sin recursos, y aún se emplean en los estados de Maranhão y Para.

## **HORNOS DE LADRILLOS**

Los hornos de ladrillos pueden variar en forma, tamaño, número de chimeneas, etc. Los ladrillos se asientan sin cemento, con una mezcla de marga de arcilla y suelo arenoso. A menudo, los ladrillos se fabrican en el sitio de carbonización. El costo de la construcción es pequeño, el rendimiento es razonable y son fáciles de operar, lo que extendió su uso.

Más del 60 % de carbón vegetal de Brasil los producen pequeños productores en hornos de ladrillos del tipo Rabo-Quente (cola caliente). Este tipo es un simple horno semiesférico, construido con ladrillos cocidos y fijados con arcilla. Tiene una puerta de acceso, donde es hecha la carga de madera y descarga del carbón. La carga del horno es manual, la madera se corta en piezas entre 1,0 y 1,8 m de longitud y diámetro de 3 a 30 cm.

Como los hornos Rabo-Quente son de tiro directo, de difícil control, y semiesféricos de difícil carga, están siendo reemplazados por los hornos del tipo PP (figura n.º 6). El horno PP es un horno cilíndrico parabólico con una bóveda, construido con ladrillos cocidos y con lechada de arcilla, con una puerta, una entrada de aire y una chimenea (tiro reverso). El diámetro de la base es 3,00 m y una altura máxima de 2,30 m. La carga del horno es manual, la madera es cortada en piezas de 1,2 a 1,5 m de longitud y diámetro de 3 a 30 cm.

**Figura n.º 6.** Horno PP

**Fuente:** Elaboración propia.

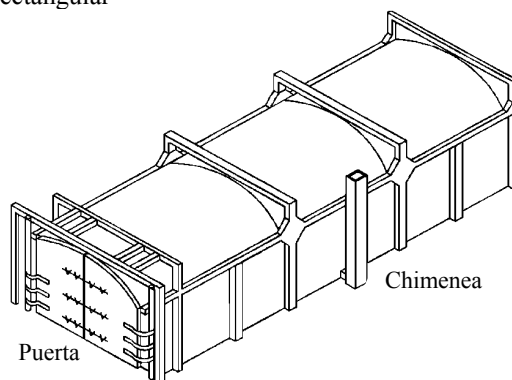
El encendido es realizado por las 4 aberturas de la bóveda, que son cerradas cuando comienza la carbonización. La operación de control es realizada por el cierre progresivo de la entrada de aire o de la chimenea. El progreso de la carbonización se mide por el color de los humos. Esta configuración permite una mejor carga del horno, facilidad de control y mayor rendimiento de carbonización. El ciclo de carbonización es de 6 días. Un operador maneja 12 hornos, y un horno ( $14 \text{ m}^3$ ) produce  $22 \text{ m}^3$  carbón/mes.

## HORNOS RECTANGULARES

Los hornos rectangulares fueron introducidos en Brasil en 1990 por Acesita. Su principal ventaja son las grandes dimensiones que permiten los camiones y tractores entrar en el horno para cargar la madera y descargar el carbón (figura n.º 7). Estos hornos son construidos con ladrillos y tienen una estructura de hormigón para apoyar la cúpula. Tienen varias entradas de aire y 1 chimenea. La puerta del horno es de metal recubierto con lana de cerámica o arcilla expandida. La carga de madera del horno puede ser llevada por un tractor. La descarga del carbón vegetal se realiza mediante tractores cargadores de ruedas directamente en un camión jaula de  $100 \text{ m}^3$ . La carga se

realiza en 1 día, la carbonización y el secado en 5-6 días y el enfriamiento en 12-14 días. Algunos de estos hornos tienen un sistema de nebulización de agua (15.000 litros), lo que permite reducir el tiempo de enfriamiento a 6-7 días, pero el carbón se torna más frágil. Alrededor del 20 % de la madera puesta en el horno se consume para calentar la madera e iniciar el proceso de carbonización. Un sistema de instrumentación permite controlar el progreso de carbonización y la entrada de aire falso. Estos hornos tienen un sistema de recuperación de alquitrán y aceite piroléñoso.

**Figura n.º 7.** Horno rectangular



**Fuente:** Elaboración propia.

La gran ventaja de estos hornos en relación con los hornos de ladrillos es la producción de hasta 70 toneladas de carbón/mes, y el menor empleo de mano de obra. Sin embargo, debido a las grandes dimensiones, la carbonización no es homogénea, y el carbón vegetal tiene diferente calidad de acuerdo con la posición en el horno: desde madera no carbonizada en el piso, hasta carbón con carbono fijo de 80 % en la parte superior. En promedio, el horno rectangular produce carbón con carbono fijo 78 %, rendimiento en masa de 30 a 35 % y se recuperan 84 kg alquitrán por tonelada de carbón. El coste medio de construcción es US\$ 25.000.

## COMPARACIÓN DE LOS VARIOS TIPOS DE HORNO DE CARBONIZACIÓN

Una comparación de los varios tipos de hornos de carbonización (tabla n.º 3) reveló algunos resultados interesantes. Los hornos de tierra son la tecnología más rudimentaria;

de-mandan una menor inversión inicial, pero tienen menor rendimiento de carbonización, y son mano de obra intensivos.

Los hornos de ladrillos son simples, de fácil construcción y operación, además de la baja inversión que suponen. Pueden ser construidos y operados cerca de la operación forestal, lo que permite la reducción de los costos de transporte. Pueden ser desmantelados y los ladrillos utilizados en la construcción de un nuevo horno. Producen un carbón con rendimiento y calidad comparables a los producidos por las grandes retortas. La carga de la madera y descarga de carbón se realizan de forma manual, lo que implica un trabajo intensivo de mano de obra no calificada. Como no hay recuperación de alquitrán, hay una gran emisión de contaminantes.

**Tabla n.º 3.** Comparación de los Procesos de Producción Carbón Vegetal [7]

Proceso	Costo u\$s	Producción m <sup>3</sup> /mes	Rendimiento % masa	Tiempo días	Vida útil años
Horno de tierra	0	30	10-22	30	0,1
Horno de ladrillos	130	18-22	22-28	5-7	3
Horno rectangular	2500	220	28-30	12-14	10
Retorta Lambiotte	9.000.000	650	30-35	continuo	30

**Fuente:** Elaboración propia.

Los hornos rectangulares permiten la mecanización de la carga y descarga, lo que minimiza el uso de mano de obra. La instalación de un sistema de recuperación de alquitrán y aceite piroleñoso permite una mayor eficiencia energética y generan un menor impacto ambiental.

## CONCLUSIONES

En Brasil, los hornos de ladrillos con calentamiento interno son los más comunes. La eficiencia del proceso y la calidad del carbón dependen de las condiciones locales, del tipo de biomasa, condiciones climáticas y sobre todo de la experiencia del operador. Los hornos de ladrillos utilizados en Brasil tienen un rendimiento en masa de 25-30 %, mucho mayor que los utilizados en otras partes del mundo, el 10-15 %.

El control de la carbonización en los hornos depende exclusivamente de la experiencia del operador. Estos hornos no tienen ningún control de presión o temperatura, ni siquiera una simple medición. La operación de carbonización se realiza sin base científica, y se vincula directamente al conocimiento empírico del operador. Hay una dificultad en la normalización de la rutina de operación en los hornos de ladrillos, debido al gran número de variables que intervienen. Las bajas eficiencias logradas en la práctica pueden ser aumentadas considerablemente mediante la mejora de los hornos existentes y la mejor formación de los operarios.

La mejora de la eficiencia de los hornos no requiere gran inversión de capital; pero, es necesario garantizar una mejor comprensión y control del proceso de carbonización. Sin embargo, hay una dificultad en la aplicación de nuevas tecnologías debido al costo para mejorar el horno, el empirismo con la que se lleva la carbonización (el color del humo, la temperatura de la pared externa, la apariencia de las entradas de aire, etc). El secado de la madera, la instrumentación de mejores métodos de tiro, y un mejor control del proceso, combinados con el uso de chimenea para forzar el tiro reverso, pueden aumentar la eficiencia de la carbonización de 20 a 30 %.

La industria del carbón vegetal ofrece muchos puestos de trabajo no calificados en Brasil. Se estiman 186.000 puestos de trabajo directos e indirectos, de los cuales 127.000 corresponden a la producción y el transporte de carbón, cantidad comparable al empleo generado en los sectores de la industria y la minería.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] EPE Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional BEN 2016: Ano base 2015. Rio de Janeiro, Empresa de Pesquisa Energética EPE, 2016, 292 págs.
- [2] IBGE. Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2015. IBGE, 2016.
- [3] Bridgewater, A. V. "Pyrolysis Technologies and Cost". In: Energy from Biomass. Proceedings of 3th Contractor's Meeting Paestum, 25-27 May 1988, Elsevier, 1989, pp. 620-627, v.4.



- [4] Klason, P.; Heidenstam, G. y Norlin, E. Untersuchungen zur Holzverkohlung. I. Die trockene Destillation der Cellulose. *Z. Angewandt Chemie*, v.22, n.º 25, 1909, p.1205-1214.
- [5] Van der Plas, Robert. “Burning Charcoal Issues”. *FPD Energy Note*, n.º 1, Abril 1995.
- [6] Baêta, Galileu Pereira. “Produção de Carvão de Madeira em Minas Gerais”. *Boletim da Associação Brasileira de Metais*, v.2, n.º 2, pp. 101-116, Janeiro 1946.
- [7] Pinheiro, Paulo César da Costa. *A Produção de Carvão Vegetal: Teoria e Prática*. Belo Horizonte: Edição do Autor, 2010, 120 p.

## **Paulo Cesar da Costa Pinheiro**

Se graduó de Ingeniero Mecánico en el Instituto de Tecnología de Governador Valadares, Brasil, en 1979, recibió el título de Master en Ingeniería Térmica en la Universidad Federal de Minas Gerais, Brasil, en 1982 y recibió el título de Doctor en Ingeniería de Procesos Industriales en la Université de Technologie de Compiègne, Francia en 1987. Realizó estadía académica en China, Israel y Japon. Desde 1982 es profesor Titular en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidade Federal de Minas Gerais UFMG, Belo Horizonte, Brasil, en las cátedras de Termodinámica, Transmisión de Calor, Instrumentación y Energías Renovables. Tiene más de 100 trabajos científicos publicados en conferencias internacionales y revistas. Sus principales intereses incluyen Carbonización y Combustión de la Biomasa, Simulación computacional de equipos térmicos y Enseñanza de Ingeniería.

<http://lattes.cnpq.br/483543963873198>

PARTE II  
EFICIENCIA ENERGÉTICA



**LA EFICIENCIA ENERGÉTICA  
COMO FACTOR CLAVE EN LAS  
CONSTRUCCIONES SUSTENTABLES.  
ESTUDIO DE CASO DEL  
EDIFICIO SUSTENTA,  
ROSARIO, ARGENTINA**

Marcelo Vega<sup>1</sup>, Natalia Feldman<sup>1</sup>, Rubén D. Piacentini<sup>1,2</sup>

**RESUMEN**

El consumo de energía en el mundo en general y en la Argentina en particular, está creciendo. Dado que está basado esencialmente en combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), también está aumentando significativamente la emisión de CO<sub>2</sub>, el mayor gas de efecto invernadero, responsable del calentamiento global del planeta. En consecuencia, resulta de gran importancia desarrollar acciones tendientes a *reducir este*

---

<sup>1</sup> Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático (LESyC), IMAE, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Física Rosario, CONICET-Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.

*consumo*. Una de ellas es el aumento en la eficiencia en el empleo de energía en las construcciones. A ese respecto, la ciudad de Rosario (32° 57' S, 60° 42' W, 24 m sobre el nivel del mar), Argentina, ha sido pionera a nivel nacional en la reglamentación de las construcciones habitacionales, imponiendo valores mínimos de la transmitancia térmica de paredes, techos y aberturas y protecciones solares. Un ejemplo de este tipo de edificios es Sustenta, ubicado en el centro de la ciudad de Rosario (calle San Juan n.º 1455). Ha sido diseñado teniendo en cuenta los siguientes criterios: alta aislación en la envolvente [ $K_{\text{pared}} = 0,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $K_{\text{techos}} = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  y  $K_{\text{aberturas}} = 2,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ], protección solar mediante aleros al Norte y postigos en todas las aberturas que otorgan un Factor de exposición solar (Fes) igual a 0,18 e iluminación con diodos LED en espacios de uso común, con encendido por sensores de movimiento. De este modo, empleando modelización RETScreen se obtuvo un ahorro de energía de todo el edificio, cuando entra en régimen de funcionamiento, de 28,6 %, respecto de un edificio convencional de las mismas dimensiones. En cuanto al *uso responsable del agua*, el edificio incorpora: recuperación de agua de lluvia en un depósito de 1000 litros para el regado de la terraza jardín con riego inteligente, depósitos de inodoros con doble descarga y grifería con aereadores en cocina y baños, el agua de lluvia de los techos y el de condensación de los equipos de aire acondicionado se acumulan en la planta baja en un tanque de 1500 litros, para limpiar veredas y regar jardines en el ingreso. Las *áreas verdes* incluyen: terraza jardín con vegetación autóctona y canteros en balcones y jardines verticales en el hall de ingreso. En relación a la *sustentabilidad de los materiales*, se priorizan los de origen regional, se emplean en forma racional y lo que se desecha, se recupera a través de un plan de gestión de residuos. El edificio cumple además con el criterio de ser lo más sustentable posible, sin incrementar en gran medida los costos de construcción. Un estudio al respecto, indica que el incremento de costos por las medidas adoptadas es menor del 10 %, respecto de valores de referencia. Es posible concluir que los edificios construidos de este modo, pueden colaborar: al uso racional de energía, materiales y agua, a mejorar la calidad de vida de las personas (por mejores condiciones de habitabilidad) y a mitigar el aumento de la temperatura global del planeta.

**Palabras clave:** Eficiencia energética, Cambio climático, Sustentabilidad, Construcciones, Rosario, Argentina.

## INTRODUCCIÓN

El consumo de energía está creciendo en el mundo en general y en la Argentina en particular. Este consumo, que está basado esencialmente en combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), ha determinado que también esté aumentando significativamente la emisión de CO<sub>2</sub>, el mayor gas de efecto invernadero, responsable del calentamiento global del planeta [1]. Por consiguiente, es de gran importancia desarrollar acciones tendientes a reducir este consumo.

Una de estas acciones es el aumento en la eficiencia en el empleo de energía en las construcciones. A ese respecto, la ciudad de Rosario [2] (32° 57' S, 60° 42' W, 24 m sobre el nivel del mar), de alrededor de 1 millón de habitantes, figura n.º 1) ha sido pionera a nivel nacional en la reglamentación de las construcciones habitacionales, imponiendo valores máximos de la transmitancia térmica de paredes, techos, aberturas y protecciones solares.

**Figura n.º 1.** Vista aérea de la ciudad de Rosario, Argentina



**Fuente:** <http://www.rosario.tur.ar/es/ciudad/>.

## CERTIFICACIONES Y NORMATIVAS

### CERTIFICACIONES INTERNACIONALES

Existen diversas certificaciones de difusión internacional, tales como LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y Green Point en EUA, BREEAM en UK,

HQE en Francia, AQUA en Brasil (<http://vanzolini.org.br/aqua/>), etc. Analizamos a continuación la más renombrada que es LEED [3] [4] otorgada por el US Green Building Council. Asigna un máximo de 100 puntos, estableciendo los siguientes niveles: 40-49 puntos Certificado, 50-59 Plata, 60-79 Oro, 80 o más puntos Platino. La distribución de los puntos en diferentes ítems establece distintos puntajes máximos: a) *26 puntos* para un Emplazamiento Sostenible, debiendo cumplirse previamente el prerequisite: Prevención de la contaminación por actividades de construcción, b) *10 puntos* para Eficiencia en Agua, con el prerequisite de Reducción del consumo de agua, c) *35 puntos* para Energía y Atmósfera, con 3 prerequisites: Puesta en marcha de los sistemas energéticos del edificio, Nivel mínimo de eficiencia energética y Gestión de los refrigerantes, d) *14 puntos* para Materiales y Recursos, con el prerequisite de Almacenamiento y recogida de materiales reciclables y e) *15 puntos* para Calidad del aire interior, con 2 prerequisites: Nivel mínimo de eficiencia de calidad de aire interior y Control del humo de tabaco. También se asignan puntos complementarios a la innovación.

#### **NORMATIVA LOCAL DE LA MUNICIPALIDAD DE ROSARIO, ARGENTINA: ORDENANZA N.º 8757/11**

Con el fin de tender hacia una ciudad más sustentable y colaborar con el esfuerzo mundial en reducir el Calentamiento global [1], la Municipalidad de Rosario ha establecido la disposición legal *Ordenanza 8757: Aspectos higrotérmicos y demanda energética de las construcciones* [5], que establece una normativa para la construcción de viviendas y edificios del tipo detallado en la tabla n.º 1.



**Tabla n.º 1.** Tipo y uso de locales a los cuales se aplica la Ordenanza n.º 8757 con carácter obligatorio en las nuevas construcciones en realización o a realizarse en Rosario, Argentina. A la derecha se detalla el logotipo que se otorga, al finalizar la verificación técnica de la obra [6].

Usos	Locales
Vivienda unifamiliar	Bibliotecas
Multivivienda	Billares
Oficinas	Comedores
Estudios	Consultorios
Salones comerciales	Dormitorios
Clínicas	Escritorios
Sanatorios	Living-rooms
Hospitales	Oficinas
Supermercados	Salas
Auditorios	Salas para juegos infantiles
Casas velatorias	Confiterías
Casinos	Gimnasios
Centros comerciales	Locales deportivos
Cines	Laboratorios
Confiterías bailables	Locales comerciales
Hoteles y teatros	



**Fuente:** Elaboración del Programa de Construcciones Sustentables junto con el Comité Asesor de la municipalidad de Rosario.

La Ordenanza establece valores máximos de **transmitancia térmica**, lo cual implica construir incorporando aislación térmica, con materiales de elevada resistencia térmica en **techos y paredes exteriores** y la colocación de **protección solar en los cerramientos transparentes según las orientaciones** (tabla n.º 2).

**Tabla n.º 2.** Valores máximos admisibles de transmitancia térmica (K máximo) para techos, paredes exteriores y superficies semitransparentes de las construcciones en Rosario, Argentina

	K máximo [W/m <sup>2</sup> K]
Techos	0,38
Paredes exteriores	0,74
Superficies semitransparentes	2,80/+60 % 1,80

**Fuente:** Elaboración del Programa de Construcciones Sustentables junto con el Comité Asesor de la Municipalidad de Rosario.

Las exigencias de **protección solar** se establecen **en relación a las orientaciones de cada una de las superficies semitransparentes** (tabla n.º 3). El factor de exposición

solar (Fes) relaciona el tipo de protección solar propuesta, con el valor correspondiente a un vidrio incoloro de 3 mm de espesor, sin protecciones ni obstrucciones.

**Tabla n.º 3.** Factor de protección solar máximo admisible (Fes) en las construcciones en Rosario, Argentina, para distintas orientaciones

Orientaciones	Fes máximo
Cuadrante Norte (NNE-NNO) 340° a 20°	0,45
Cuadrante Este y Oeste 21° a 160° y 201° a 340°	0,30
Cuadrante Sur (SSE-SSO) 161° A 200°	0,90
Lucernarios y planos inclinados con ángulo inferior a 60°	0,25

**Fuente:** Elaboración del Programa de Construcciones Sustentables junto con el Comité Asesor de la Municipalidad de Rosario.

## ESTUDIO DE CASO: EDIFICIO SUSTENTA

Un ejemplo de este tipo de edificios es Sustenta, el cual se encuentra ubicado en el centro de la ciudad de Rosario (calle San Juan n.º 1455). Ha sido diseñado considerando los siguientes criterios: alta aislación en la envolvente [ $K_{\text{pared}} = 0,43 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  $K_{\text{techos}} = 0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  y  $K_{\text{aberturas}} = 2,15 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ], protección solar mediante aleros al Norte y postigos en todas las aberturas que otorgan un  $F_{\text{es}} = 0,18$  e iluminación con diodos LED de espacios de uso común, con encendido por sensores de movimiento.

El edificio de viviendas consta de 9 pisos y 1480 m<sup>2</sup> de superficie, se encuentra en su etapa final de ejecución (al momento de la redacción del presente trabajo), en el centro de la ciudad de Rosario y su entrega está prevista para el segundo semestre de 2017. Es un muy buen ejemplo de la factibilidad de construir en la Argentina un edificio con criterios de sustentabilidad, que tenga una buena relación eficiencia/ costo, que brinde condiciones de habitabilidad superiores a la construcción tradicional y que al mismo tiempo contribuya a mitigar el Cambio Climático.

“La Arquitectura Sustentable es aquella que busca colaborar con la mitigación del Cambio Climático y mejorar la calidad de vida de los habitantes”. Conscientes de la necesidad de replicar este concepto a gran escala, se consideró el desafío de investigar y determinar cuáles criterios de sustentabilidad eran los de mayor impacto ambiental positivo a menor costo para nuestra ciudad [7].

**Diseño bioclimático:** Se consideró un volumen inserto en un entorno lleno de edificios ya construidos. Esto dio origen a la disposición de los balcones que dan al Norte y a sus techos inclinados. El cálculo de Dinámica de Fluidos Computacional nos ayudó a diseñar la posición de las aberturas para facilitar la ventilación cruzada Norte-Sur y se comprobó que mejoraba aún más si las puertas interiores se construían de piso a techo. A su vez se verificó la iluminación natural interior, para evitar puntos de discomfort visual.

**Aislación térmica:** Se consideraron los exigentes valores de IRAM (Instituto Argentino de Normalización y Certificación) [8] [9] para aislar la envolvente del edificio. A todas las aberturas con DVH (Doble Vidrio Hermético) se le incorporaron postigos exteriores. Para reducir el consumo de energía en la producción de agua caliente sanitaria y calefacción por radiadores, se aislaron montantes, bajadas y tanques de reserva [10].

**Energías renovables:** Se calculó con el programa RETScreen una pérgola de paneles solares fotovoltaicos en la terraza, que ocupa una superficie de 15 m<sup>2</sup>, para que abastezca de energía a las luces LED automatizadas con sensores de movimiento en todos los espacios comunes y a una bomba que suba agua a los tanques, en caso de corte prolongado de luz. Se incorporan en una primera etapa 4 paneles de 250 W, totalizando una potencia pico instalada inicial de 1 KW, pudiendo extenderse en una etapa posterior, ya que se ha reservado lugar en la zona Norte de la terraza.

**Cuidado del agua:** Se seleccionaron inodoros con doble descarga y griferías con aireadores. Los techos de las salas de máquina se diseñaron de modo tal que permita recolectar el agua de lluvia para regar la terraza jardín, que solo se riega si los sensores de humedad de la tierra lo indican. Luego, el agua de las terrazas y el agua de condensación de aires acondicionados se acumulan en un tanque ubicado al frente de la planta baja, donde se reutiliza para regar los jardines de ingreso y limpiar la vereda.

**Materiales:** La prioridad de compra es de productos hechos en la Argentina. Se seleccionaron pisos y revestimientos que posean un alto porcentaje de material reciclado en masa y se utilizaron maderas con certificado de reforestación y maderas biosintéticas.

**Flexibilidad:** Pensando a futuro, si el día de mañana hace falta agregar instalaciones, el edificio tiene previsto espacios técnicos conectados desde la planta baja a la terraza para tal fin.

**Gestión sustentable y construcción:** Con la meta de conseguir un equilibrio en los tres aspectos fundamentales de la Sustentabilidad: el económico, el social y el ambiental, durante el proceso de diseño y construcción de la obra, diariamente se prestó particular atención en disminuir el impacto negativo que conlleva este trabajo. Se analizó con cada especialista, ya sean ingenieros civiles, sanitarios, electricistas, incluso yeseros, cómo optimizar los materiales que ingresan a la obra, para reducir desperdicios. Posteriormente, se acordó con cada contratista para que se rijan por las *Buenas Prácticas en la Construcción*, en particular separando la basura que generan y que a su vez ayuden a reciclarla [11].

**Proyecto:** La aislación térmica de la envolvente fue Certificada por la Municipalidad de Rosario, mediante el cumplimiento de la Ordenanza n.º 8757/11: Aspectos higro-térmicos y demanda energética de las construcciones.

**Demolición:** Si bien el demolidor está acostumbrado a separar solo por el hecho de la reventa de materiales (que forma parte de su negocio), igualmente se acordó por contrato que debe comprometerse a realizar dicha separación.

**Estructura:** Fue ejecutada con un sistema alemán de encofrados deslizantes que se reutiliza por años. Los carpinteros del hormigón separaron chatarra y escombros. La chatarra fue donada a un hombre que se dedica a su compra-venta, recorriendo la ciudad con un megáfono en busca de este material. El escombros limpio lo retira la empresa de volquetes que, en vez de llevarlo a disposición final, lo vuelca en un corralón para su posterior reventa como granza.

**Albañilería:** Los albañiles separaron escombros de los pocos ladrillos desperdiciados. Las bolsas de cemento y cal fueron donadas a un recolector informal de cartón. Las maderas de los pallets las aprovechó una Cooperativa de construcción natural. Los recortes sobrantes de aislación térmica de EPS (Poliestireno Expandido), fueron devueltos al proveedor, que los procesa y revende. Los colocadores de cerámicos separaron recortes que luego fueron donados.

**Sanitarios:** Los sanitarios que colaboran en la obra realizaron las pruebas hidráulicas de los desagües con agua de lluvia y separaron los recortes de caños y latas vacías de aerosoles lubricantes, pero la fábrica de caños aún no sabe qué solución de reciclado brindarles.

Gestión de residuos: Gracias al trabajo del equipo de construcción, fue posible recuperar 2/3 de los residuos de obra. El 1/3 restante fue depositado en relleno sanitario.

Capacitaciones: El Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático de IMAE, FCEIA, Universidad Nacional de Rosario [12], desarrollará un manual de uso del edificio, con criterios de sustentabilidad, que será abierto a la comunidad y dictará cursos de capacitación sobre el tema.

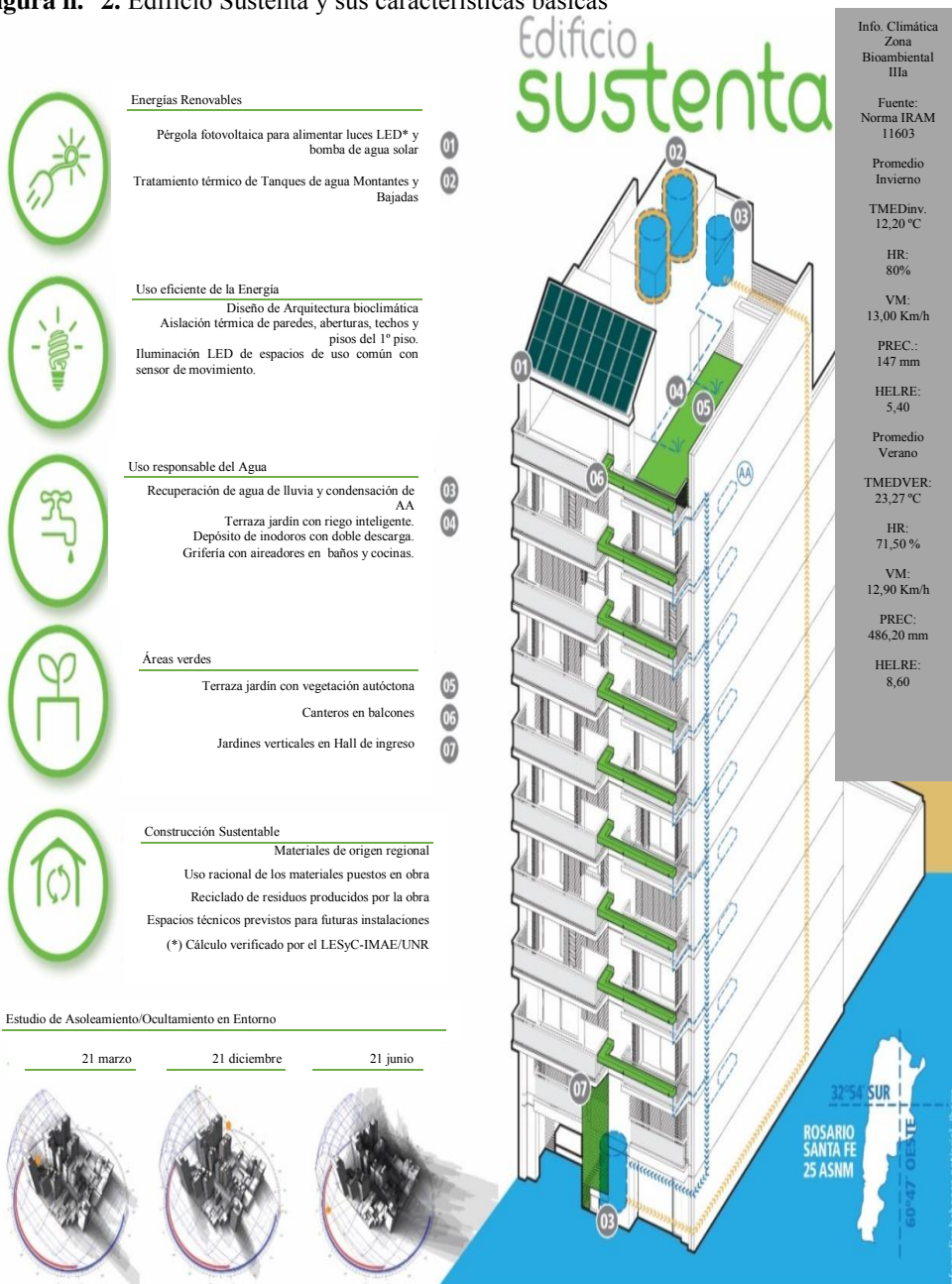
A través de las redes sociales [13] se comparte la información relativa a la construcción del edificio Sustenta, para quien esté interesado replicar y/o mejorar la experiencia.

Para la compra de la vegetación de tipo nativa que llevan los canteros de todo el edificio, se concretó un convenio con el Programa de Agroindustrias Urbanas Sociales de la Municipalidad de Rosario [14], cuyo Director se ofreció a capacitar a los futuros moradores en agricultura urbana.

La figura n.º 2 presenta una vista general del edificio Sustenta y de sus características básicas, tales como: a) Energías renovables, b) Uso eficiente de la energía, c) Uso responsable del agua, d) Áreas verdes, e) Construcción sustentable y f) Estudio de asoleamiento/ocultamiento del entorno.

Un detalle con vista desde la parte superior del edificio está dado en la figura n.º 3, donde puede apreciarse el módulo fotovoltaico, la terraza verde, los balcones con plantas y las aberturas hacia el Norte, protegidas con postigos.

**Figura n.º 2.** Edificio Sustenta y sus características básicas



**Fuente:** Elaboración del Estudio Feldman.

**Figura n.º 3.** Detalle del edificio Sustenta con vista desde su parte superior



**Fuente:** Elaboración del Estudio Feldman.

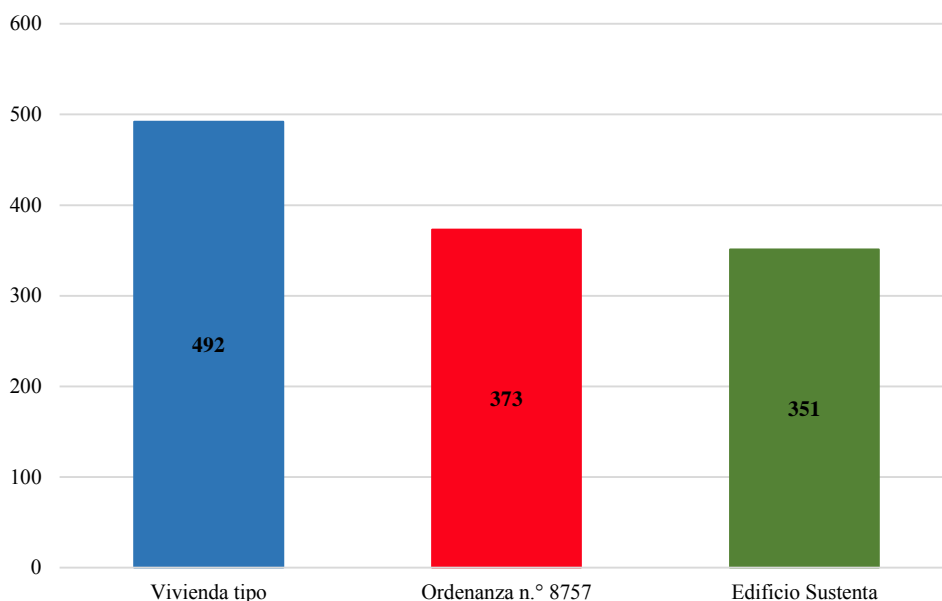
### **MODELIZACION: ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA UTILIZANDO RETSCREEN**

El software RETScreen V4 [15] de análisis de proyectos de energía limpia, patrocinado por el Gobierno de Canadá, es una herramienta basada en Excel que ayuda a determinar, de manera rápida y económica, la viabilidad técnica-financiera de potenciales proyectos de energía renovable, eficiencia energética y/o co-generación. Es ampliamente utilizado en más de 220 países con más de 415.000 usuarios [16] [17] [18]. Fundamentalmente compara un caso Base (una medida de tecnología convencional) y un caso propuesto (donde se propone una tecnología de energía limpia). Para la información relativa al clima, utiliza una red de estaciones meteorológicas terrestres y energía solar de la NASA [19].

En la figura n.º 4 se detalla el consumo de combustible anual del edificio Sustenta, en comparación con un edificio que verifica la Ordenanza n.º 8757 de la ciudad de Rosario y un edificio construido de manera tradicional (Viv. Tipo). Las medidas de eficiencia

energéticas aplicadas al edificio Sustenta dieron por resultado un consumo anual de 351 GJ, mientras que el mismo edificio, si fuera construido verificando la Ordenanza n.º 8757, el consumo anual resultaría de 373 GJ y un edificio construido de manera convencional arrojaría valores de 492 GJ de combustible consumido anualmente en climatización. En conclusión, el edificio Sustenta tiene un 6 % menos de consumo de combustible frente al edificio de la Ordenanza n.º 8757 y un 28,6 % menos al de un edificio convencional construido en la ciudad de Rosario.

**Figura n.º 4.** Consumo de combustible anual (en GigaJulio) para los tres casos en estudio (ver texto)



**Fuente:** Elaboración propia.

Empleando el coeficiente de conversión de Energía fósil determinado en particular para la Argentina a la masa de contaminantes gases de efecto invernadero (denominado  $\text{CO}_2\text{eq}$ , dado que incluye tanto  $\text{CO}_2$  como los otros gases  $\text{CH}_4$ , el metano y  $\text{N}_2\text{O}$ , el óxido nitroso), que es:  $0,367 \text{ TnCO}_2\text{eq/GJ}$ , se obtuvo que las emisiones anuales del edificio Sustenta son de  $31 \text{ TnCO}_2\text{eq}$ , mientras que el edificio de la Ordenanza n.º 8757 emitiría  $32,6 \text{ TCO}_2\text{eq}$  y el edificio convencional inyectaría a la atmósfera  $40,5 \text{ TnCO}_2\text{eq}$ . Considerando el coeficiente de conversión:  $2,79 \text{ kg CO}_2/\text{litro de gasoil}$ , esto



corresponde a un ahorro de emisiones equivalentes al consumo de 573 litros de gasoil frente al edificio de la Ordenanza n.º 8757 y de emisiones de 3045 litros de gasoil, frente al edificio construido de manera convencional.

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

Se ha demostrado, empleando modelización RETScreen, que el ahorro de energía de todo el edificio es 28,6 %, respecto de un edificio convencional de las mismas dimensiones. En cuanto al *uso responsable del agua*, el edificio incorpora: recuperación de agua de lluvia en un depósito de 1000 litros para el riego de la terraza jardín con riego inteligente, depósitos de inodoros con doble descarga y grifería con aireadores en cocina y baños; el agua de lluvia de los techos y el de condensación de los equipos de aire acondicionado se acumulan en la planta baja en un tanque de 1500 litros, para limpiar veredas y regar jardines en el ingreso. Las *áreas verdes* incluyen: terraza jardín con vegetación autóctona, canteros en balcones y jardines verticales en el hall de ingreso. En relación a la *sustentabilidad de los materiales*, se priorizan los de origen regional, se emplean en forma racional y lo que se desecha, se recupera. El edificio cumple además con el criterio de ser lo más sustentable posible, sin incrementar en gran medida el costo de construcción, ya que con las medidas adoptadas, dicho costo es menor del 10 %, respecto de valores de referencia. Es posible concluir que los edificios construidos de este modo, pueden colaborar: al uso racional de energía, materiales y agua, a mejorar la calidad de vida de las personas (por mejores condiciones de habitabilidad) y a mitigar el aumento de la temperatura global del planeta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a CONICET, a la Universidad Nacional de Rosario y a la Dirección de Innovación y Cambio Climático de la Municipalidad de Rosario, por el apoyo brindado al presente Proyecto. Además, a todos los que colaboraron para que el Edificio Sustenta pueda concretarse.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Informe del Grupo de Trabajo 1: “Climate Change 2013. The Physical Science Basis”. Cambridge University Press. Disponible on line en: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> y el Resumen de Síntesis en <http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>.
- [2] Municipalidad de Rosario. <http://www.rosario.gov.ar/web/ciudad/caracteristicas/informacion-territorial-y-datos-demograficos>.
- [3] LEED, or Leadership in Energy and Environmental Design (<http://www.usgbc.org/leed>).
- [4] LEED v4 for BUILDING DESIGN AND CONSTRUCTION. Updated to reflect the April 5, 2016 LEED v4 Building Design and Construction Addenda. 161 pages.  
[http://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC\\_04.05.16\\_current\\_0.pdf](http://www.usgbc.org/sites/default/files/LEED%20v4%20BDC_04.05.16_current_0.pdf).
- [5] Ordenanza n.º 8757/2011, Decreto n.º 985/ 2013 “Aspectos Higrotérmicos y Demanda Energética de las Construcciones” <http://www.rosario.gov.ar/normativa/ver/visualExternado?accion=verNormativa&idNormativa=75004>.
- [6] Certificado de aspectos higrotérmicos y eficiencia energética, ([www.rosario.gov.ar/web/ciudad/planeamiento-urbano/edificacion/arquitectura-sustentable/certificado-de-aspectos](http://www.rosario.gov.ar/web/ciudad/planeamiento-urbano/edificacion/arquitectura-sustentable/certificado-de-aspectos) ).
- [7] Piacentini, R. D.; Schmidt, J.; Budini, N.; Vega, M.; Giandoménico, E.; Feldman, N. y Buitrago, R. “Photovoltaic materials and solar power plant optimization design in relation to its environmental impact”. Capítulo del libro: *Energy Book Series - Volume # 1: Materials and processes for energy: communicating current research and technological developments*, Editorial Formatex, Madrid, 2013.
- [8] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Acondicionamiento térmico de edificios. IRAM 11625; 11630; 11658-1/2; 11659-1 (<http://www.iram.org.ar/index.php?vernorma&id=1797>).
- [9] Instituto Argentino de Normalización y Certificación. Aislamiento térmico de edificios. IRAM 11559; 11564; 11603; 11605; 11659-2 (<http://www.iram.org.ar/index.php?vernorma&id=1760>).

- [10] Vega, M.; Baqué, M.; Goñi, H.; Bassi, V. y Piacentini, R. D. *Proyecto de vivienda de alta aislación, carbono neutra y con energía solar*; agosto 2012. ASADES 2012. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 16, 2012.
- [11] Piacentini, R. D.; Adué, J.; Vega, M.; Feldman, N.; Cervera, C. y González, A. *Manual de viviendas construidas y habitadas con criterios de Sustentabilidad*. Proyecto n.º 2010 153- 13. Secretaría de Estado de Ciencia y Tecnología e Innovación de la Provincia de Santa Fe, 26 páginas. Publicado en marzo 2016.
- [12] Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE), Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario. <http://www.imaefceia.unr.edu.ar>.
- [13] Edificio Sustenta. Dirección Facebook. <https://www.facebook.com/Edificio-Sustenta-674720945897723>.
- [14] Agroindustria Urbana Social (AUS) - Municipalidad de Rosario, [www.rosario.gov.ar/sitio/desarrollo\\_social/empleo/industrias.jsp](http://www.rosario.gov.ar/sitio/desarrollo_social/empleo/industrias.jsp).
- [15] RETScreen Software\_Clean Energy Management Software. Disponible en: <http://www.nrcan.gc.ca/energy/software-tools/7465>.
- [16] RETScreen - Introduction Clean Energy Project - e-Textbook chapter. RETScreen International. Clean Energy Decision Support Centre. [www.etscreen.net/ang/12.php](http://www.etscreen.net/ang/12.php), Natural Resources Canada
- [17] RETScreen International. Centro de apoyo a la decisión de energía limpia. [www.etscreen.net](http://www.etscreen.net), Curso de análisis de proyectos de energía limpia. RETScreen Engineering & Cases. Textbook-entire e-Textbook.
- [18] Efficient Windows Collaborative. Measuring Performance <http://www.efficientwindows.org/nfrc.php>.
- [19] NASA Surface meteorology and Solar Energy Data Set website at: <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen>.

## **Marcelo Vega**

Coordinador Comité Académico de Energía Asociación Universidades Grupo Montevideo.

Docente. Carrera Ingeniería Civil/ Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería, y Agrimensura. Universidad Nacional de Rosario.

Docente Investigador Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático.

Coordinador Programa Innovación. Secretaría Ambiente y Espacio Público. Municipalidad de Rosario.

Miembro Titular del Foro Nacional de Uso Racional y Eficiente de la Energía (UREE). Grupo Hábitat; Miembro del RETScreen Users International. Support for RETScreen Project; Miembro del Organismo de Estudio de Normas IRAM. Subcomité: Acondicionamiento Térmico de Edificios y Subcomité: Eficiencia Energética Edificios; Miembro ASADES (Asociación Argentina de Energías Renovables y Ambiente); Miembro Comisión Medioambiente Colegio de Ingenieros 2° Circunscripción. Provincia Santa Fe; Miembro de Centro Ingenieros Rosario (CIR); Miembro de Ingeniería Sin Fronteras.

## **Rubén D. Piacentini**

Investigador Superior de CONICET en temas de Física de la Atmósfera (principalmente ozono, aerosoles y nubes), Radiación solar (principalmente componente UV) y Cambio climático.

Profesor Honorario de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura de la Universidad Nacional de Rosario.

Director del Area Física de la Atmósfera, Radiación Solar y Astropartículas del Instituto de Física Rosario (CONICET – Universidad Nacional de Rosario).

Jefe y Fundador del Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático, IMAE, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario (FCEIA/UNR).

Director de la Maestría en Energía para el Desarrollo Sostenible (FCEIA/UNRosario)  
Miembro de Comisiones evaluadoras de Universidades, Instituciones científicas y Organismos de Ciencia y Tecnología; Jurado e integrante del Comité editorial de Revistas científicas y tecnológicas; Miembro correspondiente de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Argentina.

### **Natalia Feldman**

Arquitecta, Asesora Externa del Laboratorio de Eficiencia Energética, Sustentabilidad y Cambio Climático – IMAE/FCEIA/UNR.

Docente universitaria de Cursos de grado y posgrado.

Miembro de la Comisión de Desarrollo Sostenible y Vocal Suplente del Colegio de Arquitectos de la Provincia de Santa Fe.

Representa al Colegio de Arquitectos en la Comisión que reglamenta la Ordenanza 8757 de la Municipalidad de Rosario y en el Subcomité de “Eficiencia Energética de Edificios” - IRAM.

Directora del estudio Feldman, trabaja desde el año 2003 en el desarrollo, proyecto, dirección, administración y mantenimiento de edificios de vivienda, comercios y residencias individuales.



# **DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS HÍBRIDOS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA**

Justo J. Roberts<sup>1,2,3</sup>, Agnelo M. Cassula<sup>1,2</sup>, José L. Silveira<sup>1,2</sup>, Pedro O. Prado<sup>3</sup>

## **RESUMEN**

Los Sistemas Híbridos de Generación de Energía (SHGE), cuando son dimensionados de forma correcta, presentan menor costo de la energía generada, mayor confiabilidad, además de beneficios ambientales en relación a sistemas basados en una única fuente renovable o sistemas de generación tradicionales. Sin embargo, el dimensionamiento de este tipo de sistemas se presenta como una tarea compleja, debido a la característica variable de los recursos renovables (solar y eólica) y de la carga, el comportamiento no lineal de algunos componentes del sistema y la alta interacción entre las variables del sistema. Varias técnicas de optimización han sido aplicadas para resolver este problema. Los métodos tradicionales de optimización presentan dificultades para tratar problemas con esta complejidad, por otro lado técnicas más modernas como los algoritmos evolutivos muestran buen desempeño en estas aplicaciones. Sin embargo se evidencia que no existe un método ampliamente aceptado para resolver el problema.

---

<sup>1</sup> Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP).

<sup>2</sup> Instituto de pesquisa em Bioenergia - IPBEN-UNESP.

<sup>3</sup> Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y energía (UNMdP).

En el presente trabajo se propone un método de optimización basado en simulación para el dimensionamiento de SHGE autónomos solar-eólico-diesel-batería. El algoritmo propuesto se compone de un módulo de simulación y un módulo de optimización, los cuales interactúan continuamente con el objetivo de encontrar la configuración de SHGE con el menor Valor Presente Neto de los Costos. El método propuesto fue utilizado para el dimensionamiento de dos SHGE en comunidades rurales de la región Amazónica brasilera. Los resultados muestran la capacidad del algoritmo para resolver un problema de optimización complejo en tiempos de procesamiento reducidos.

**Palabras Clave:** Algoritmo genético - Comunidad rural - Energías renovables - Simulación - Optimización.

## INTRODUCCIÓN

La energía es considerada un factor clave en el desarrollo de la humanidad. El acceso a formas modernas de energía, en particular la energía eléctrica, trae beneficios sociales que mejoran la calidad de vida de la población. Sin embargo, existen aún, en el siglo XXI, casi 1,5 billones de personas (22 % de la población mundial) que no tienen acceso a electricidad, de las cuales 85 % viven en comunidades rurales [1]. En regiones remotas, el abastecimiento de energía eléctrica a través de medios tradicionales como la extensión de la red eléctrica no se justifica debido al elevado costo que implica la construcción de líneas de transmisión de gran longitud para el abastecimiento de un pequeño grupo de consumidores.

Actualmente, la alternativa más utilizada para el atendimento de comunidades aisladas es generación térmica, principalmente grupos generadores cuyo combustible es de origen fósil [2]. Sin embargo, a medida que la demanda de energía crece, también lo hace el consumo de combustible, incrementando los costos de logística, transporte y almacenamiento del mismo. Adicionalmente, existen impactos ambientales derivados de la quema de combustibles fósiles y el potencial peligro de derrame de los mismos.

El abastecimiento de energía utilizando sistemas autónomos de generación de energía basados en fuentes renovables se constituye como una alternativa viable. Sistemas que integran dos o más fuentes de generación, renovables o no, para el abastecimiento de

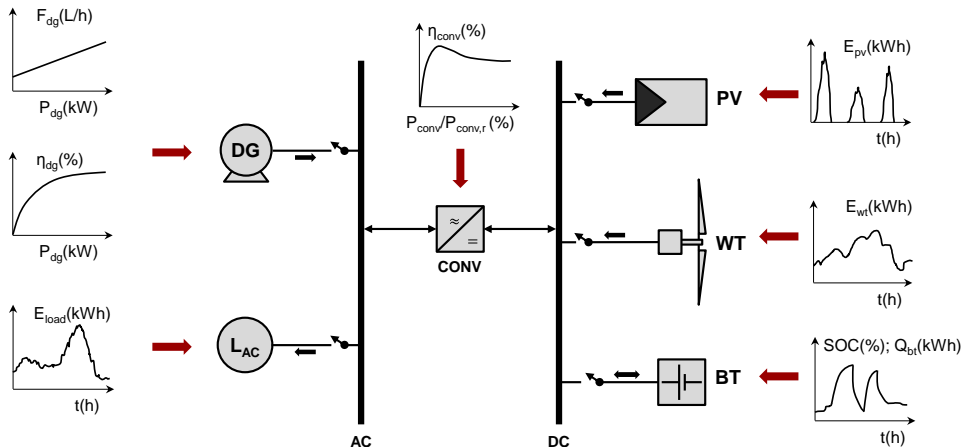


diferentes tipos de carga son denominados Sistemas Híbridos de Generación de Energía (SHGE) [3]. Los SHGE, cuando dimensionados de forma correcta, presentan ventajas técnicas, económicas y ambientales en relación a sistemas que utilizan una única fuente renovable o sistemas tradicionales. Sin embargo, el dimensionamiento óptimo de este tipo de SHGE no es una tarea trivial.

El principal desafío en el proyecto de SHGE es igualar de forma económica la producción y el consumo de energía. Este problema, que es relativamente simple de resolver en el caso de sistemas integrados por fuentes despachables, se torna crítico en sistemas que integran generación renovable. La complejidad del problema radica en el comportamiento estocástico de los recursos renovables (solar y eólico) y de la demanda de energía, además de las características no lineares de los componentes del sistema y la alta interacción entre las variables del sistema (ver figura n.º 1). Varios métodos para el dimensionamiento de SHGE han sido propuestos, sin embargo no existe una técnica ampliamente aceptada para resolver el problema [4].

En el presente trabajo se propone un método de optimización basado en simulación para el dimensionamiento óptimo de SHGE solar-eólico-diesel-baterías. El algoritmo desarrollado busca la mejor configuración de SHGE que minimice el Valor Presente Neto de los Costos del sistema (NPVC). Se utiliza como método de optimización un Algoritmo Genético. El método propuesto fue utilizado para el dimensionamiento de SHGE en dos comunidades rurales ubicadas en la región Amazónica brasilera, la Villa Campinas y la Villa São Tomé. Los resultados muestran la capacidad del método para resolver un problema de optimización complejo en tiempos de procesamiento reducidos.

**Figura n.º 1.** Dimensionamiento general del SHGE estudiado. DG: grupo generador diesel; LAC: carga AC; PV: generador solar fotovoltaico; WT: generador eólico; BT: banco de baterías; CONV: inversor bidireccional



**Fuente:** Elaboración propia.

## MÉTODO PROPUESTO

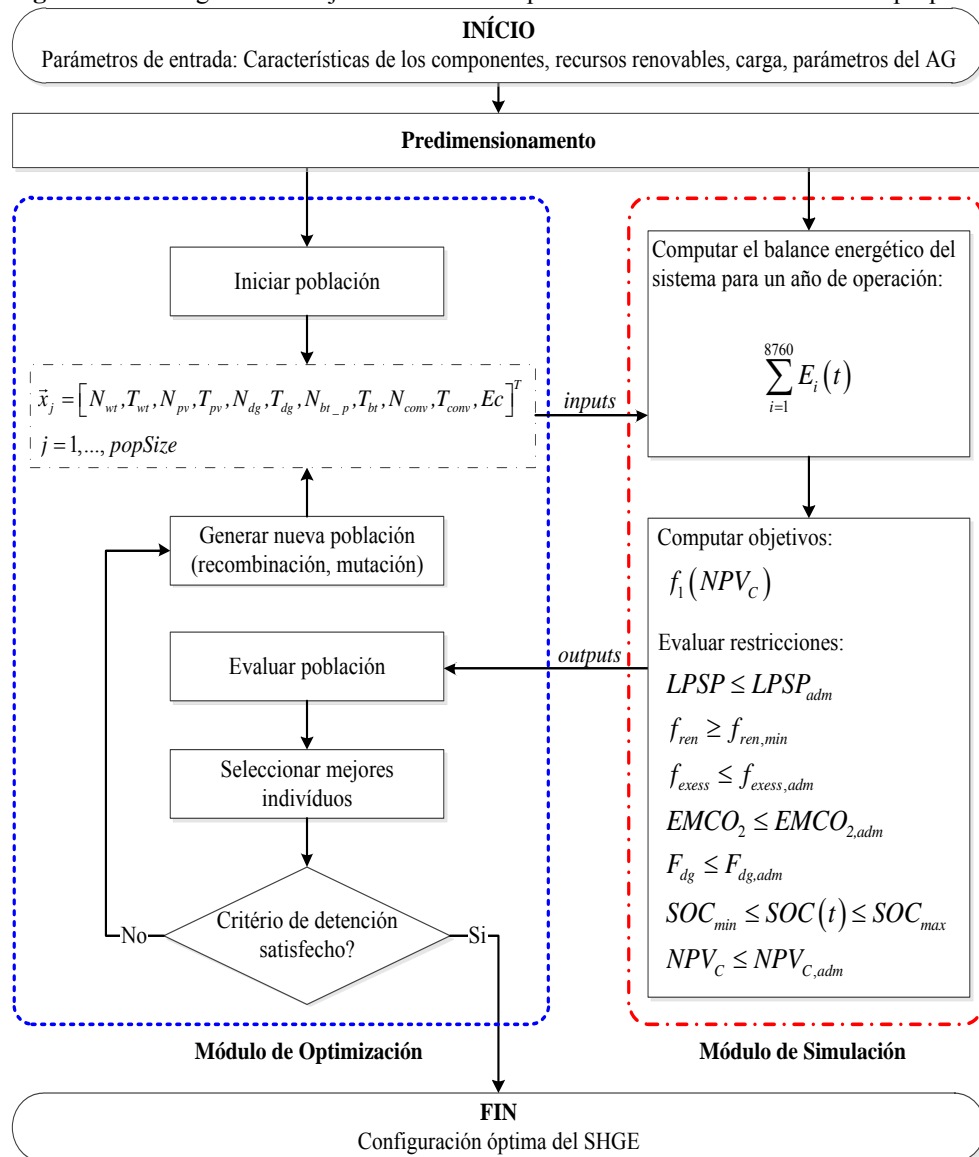
La simulación es una herramienta eficaz para analizar sistemas cuya complejidad no permite establecer un modelo matemático simple de los mismos. Por otro lado, las técnicas de optimización precisan de una representación matemática explícita del problema para ser aplicadas. La implementación conjunta de modelos de simulación y técnicas de optimización en un enfoque de optimización basada en simulación permite superar estas limitaciones, es decir, este enfoque permite representar las características complejas del sistema así como obtener una solución optimizada del problema [5]. En el presente trabajo se propone resolver el problema de dimensionamiento de un SHGE solar-eólico-diesel-batería (figura n.º 1) a través del método de optimización basado en simulación que se muestra en la figura n.º 2.

El algoritmo consta con dos módulos principales, el módulo de optimización y el módulo de simulación, adicionalmente existe un módulo de predimensionamiento. En las siguientes secciones se explica brevemente la función de cada uno de estos módulos.

## **MÓDULO DE PREDIMENSIONAMIENTO**

La correcta definición del intervalo de variación de las variables de decisión de un problema de optimización permite reducir el espacio de búsqueda, e por lo tanto, disminuir el tiempo de simulación. El módulo de predimensionamiento tiene como función definir estos intervalos y se basa en el método propuesto por [6]. A partir de la información de entrada relacionada con la disponibilidad de los recursos renovables y las características de la carga, es posible estimar de forma rápida los valores máximos del número de componentes,  $N_{wt}$ ,  $N_{pv}$ ,  $N_{dg}$ ,  $N_{bt\_p}$  y  $N_{conv}$ , los cuales son utilizados para definir el espacio de búsqueda.

**Figura n.º 2.** Diagrama de flujo del método de optimización basado en simulación propuesto



**Fuente:** Elaboración propia.

## MÓDULO DE SIMULACIÓN

El método de optimización basado en simulación requiere de un modelo de simulación del sistema estudiado que permita calcular, con la precisión deseada, los indicadores de interés que serán utilizados por el algoritmo de búsqueda. El módulo de simulación (figura n.º 2) es el encargado de realizar esta tarea. En este módulo se efectúa la simulación de un año completo de operación de cualquier configuración de SHGE derivada de la configuración general mostrada en la figura n.º 1. El intervalo de cálculo adoptado es de una hora ( $\Delta t = 1h$ ), considerado adecuado para simulaciones de largo plazo [7]. El funcionamiento del SHGE depende de la estrategia de operación seleccionada, cuya función es administrar la interacción entre los diferentes componentes del sistema.

En cada intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) la estrategia de operación evalúa las informaciones de entrada relacionadas con la disponibilidad de los recursos renovables, las características de la carga y el estado de carga de las baterías. Seguidamente, toma decisiones sobre el flujo de energía en el sistema, determinando que componentes deben entrar en operación, cuáles deben ser desconectados, dónde debe ser almacenada la energía excedente, y, si es necesario accionar las cargas disipadoras. Al final de cada intervalo de simulación ( $\Delta t$ ) el balance de energía debe ser cero, i.e. la suma de las fuentes de generación debe ser igual a la suma de los consumos de energía, considerando las pérdidas y el exceso/déficit de energía cuando sea necesario.

El resultado es una serie de indicadores de desempeño relacionados con aspectos técnicos, económicos y ambientales de la operación del SHGE. Estos indicadores son utilizados por el módulo de optimización para evaluar la función objetivo y las restricciones guiando el proceso de búsqueda de la mejor configuración.

Informaciones más detalladas sobre los modelos matemáticos que componen el modelo de simulación del SHGE pueden ser encontradas en la referencia [8].

## MÓDULO DE OPTIMIZACIÓN

El módulo de optimización tiene la función básica de buscar la configuración óptima de SHGE en el universo de posibles soluciones. En otras palabras debe resolver el problema de optimización definido como:

$$\begin{aligned} & \text{Minimizar: } f(\vec{x}) \\ & \text{Sujeto a: } g_j(\vec{x}) \geq 0, \quad j = 1, \dots, J + K \\ & \quad \quad \quad x_i^{lb} \leq x_i \leq x_i^{ub}, \quad i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $\vec{x}$  es el vector de variables de decisión de dimensión  $n$ ,  $f(\vec{x})$  es la función objetivo a ser minimizada,  $g_j(\vec{x})$  son las funciones de restricción representadas por  $J$  desigualdades y  $K$  igualdades, y  $[x_i^{lb}, x_i^{ub}]$  establece el intervalo de valores que las variables de decisión pueden adoptar. Seguidamente se definen cada uno de estos parámetros para el problema de optimización de SHGE.

## VECTOR DE VARIABLES DE DECISIÓN

Las variables de decisión son el número de componentes, el modelo de componente y la estrategia de operación. Dado que el presente estudio considera un SHGE del tipo solar-eólico-diesel-batería, el vector de variables de decisión cuenta con 11 variables:

$$\vec{x} = [x_i]^T = [N_{wt}, T_{wt}, N_{pv}, T_{pv}, N_{dg}, T_{dg}, N_{bt\_p}, T_{bt}, N_{conv}, T_{conv}, Ec]^T \quad (2)$$

donde  $N_{wt}$ ,  $N_{pv}$ ,  $N_{dg}$ ,  $N_{bt\_p}$  y  $N_{conv}$  es el número de turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, generadores diesel, arreglo de baterías en serie y convertidores;  $T_{wt}$ ,  $T_{pv}$ ,  $T_{dg}$ ,  $T_{bt}$  y  $T_{conv}$  es el modelo de turbinas eólicas, paneles fotovoltaicos, generadores diesel, baterías y convertidores; y  $Ec$  es la estrategia de operación.

## FUNCIÓN OBJETIVO

Se adopta como criterio de optimización, i.e. función objetivo, el Valor Presente Neto de los Costos (NPVC) del sistema. Este indicador económico tiene en cuenta el valor temporal del dinero y es adecuado para la evaluación de proyectos de generación basados en fuentes renovables, los cuales se caracterizan por tener altas inversiones iniciales, tiempos de vida largos y bajos costos de operación y mantenimiento. El NPVC es utilizado por el algoritmo de optimización como parámetro de comparación entre las diferentes alternativas de SHGE; se calcula con la ecuación (3):

$$NPV_C = \frac{C_{level,tot}}{CRF(d_r, LT_{proj})} \quad (3)$$

donde  $C_{level,tot}$  es el costo anual equivalente, representado por la suma de los costos anualizados de todos los componentes del sistema (\$/año);  $CRF(\cdot)$  es el factor de recuperación de capital, utilizado para calcular el valor presente de una serie de pagos anuales;  $d_r$  es la tasa de interés anual (%); y  $LT_{proj}$  es el tiempo de vida del proyecto (años).

## RESTRICCIONES

Además de la función objetivo, existen otros criterios que deben ser cumplidos por el SHGE, estos criterios son definidos a través de las funciones de restricción que representan los límites dentro de los cuales el sistema debe operar. Las restricciones consideradas son las siguientes:

- 1) La confiabilidad mínima del sistema es evaluada a través del indicador denominado Probabilidad de Pérdida de Suministro de Energía (LPSP), su valor debe permanecer menor o igual al límite predefinido por el proyectista:  $LPSP \leq LPSP_{adm}$ .
- 2) Se definen dos restricciones relacionadas con la generación de energía, una de ellas se vincula con la participación mínima de generación renovable  $fren \geq$

fren,min y la otra con la cantidad máxima de energía excedente  $f_{exess} \leq f_{exess,adm}$ .

- 3) En ocasiones se debe limitar la cantidad de combustible utilizada por el grupo generador diesel, Fdg. De este modo se define la siguiente restricción:  $F_{dg} \leq F_{dg,adm}$ .
- 4) Cuando existen reglamentaciones ambientales puede ser necesario establecer un límite máximo para la cantidad de gases contaminantes emitida, EMCO<sub>2</sub>. Así, se define la siguiente restricción:  $EMCO_2 \leq EMCO_{2,adm}$ .
- 5) Para preservar la vida útil de las baterías es recomendable que estas trabajen dentro de los límites de estado de carga, SOC(t), definidos por el fabricante. En cada intervalo de tiempo se debe cumplir la condición:  $SOC_{min}(t) \leq SOC(t) \leq SOC_{max}(t)$ .
- 6) Puede ser necesario también limitar el valor máximo del valor presente neto del sistema, por lo cual se define la siguiente restricción:  $NPVC \leq NPVC_{adm}$ .
- 7) Finalmente, se definen las restricciones relacionadas con los límites inferior y superior de las variables de decisión mostradas en la ecuación (2), estableciendo así el espacio de búsqueda.

## **ALGORITMO GENÉTICO DE OPTIMIZACIÓN**

El método de optimización adoptado para resolver el problema de dimensionamiento de SHGE es Algoritmos Genéticos (AG). Los AG pertenecen a la familia de los algoritmos evolutivos siendo su principio de funcionamiento inspirado en la teoría de evolución natural propuesta por Darwin [9]. Los AG manipulan una población de individuos, cada uno asociado a un valor de aptitud con respecto a una función objetivo, para una nueva generación utilizando los principios evolutivos de reproducción y supervivencia de los más aptos, a través de los operadores genéticos de selección, recombinación y mutación (ver módulo de optimización en la figura n.º 2). La aplicación repetida (generacional) de estos operadores promueve la evolución de los



individuos hacia un estado de mayor aptitud y, finalmente, a la identificación del óptimo global del problema.

Luego de realizar varias simulaciones utilizando diferentes configuraciones de operadores y parámetros del AG [10], se llegó a la conclusión que la mejor configuración para el problema estudiado en el presente trabajo es la que se muestra en la tabla n.º 1.

**Tabla n.º 1.** Parámetros del AG mono-objetivo utilizado para las simulaciones

Operador	Método	Parámetro
Codificación de variables	Real	--
Tamaño de la población	Fijo	Npop
Asignación de aptitud	Método de Coello Coello y Montes	Sr = 0,8
Método de selección	Torneo	Tamaño de torneo = 2
Estrategia de reemplazo	Mejores “Nbest” individuos	Nbest
Criterio de detención	Número máximo de generaciones	maxGen
Operador de recombinación	BLX- $\alpha$	$\alpha = 0,5$
Operador de mutación	No-uniforme	b = 5

**Fuente:** Elaboración propia.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación del método de dimensionamiento de SHGE propuesto en dos casos de estudio. Fueron seleccionadas dos comunidades de la región Amazónica brasilera con características diferentes en lo que respecta a la demanda de energía y disponibilidad de los recursos renovables. Esto permite evaluar el desempeño del método propuesto en diferentes escenarios de operación. Las características principales de las comunidades estudiadas son:

Caso Villa Campinas: se trata de una comunidad rural localizada en las coordenadas geográficas 3° 17' S y 61° 5' O en el municipio de Manacupuru, estado de Amazonas [10]. La comunidad cuenta con cerca de 1010 habitantes y es accesible únicamente por vía fluvial. Actualmente la comunidad cuenta con abastecimiento de energía eléctrica a través de un sistema solar-diesel-batería que provee energía a 120 unidades consumidoras 24 horas por día. Considerando el consumo a lo largo de todo el año la demanda media diaria de energía es de 474,9 kWh y la potencia máxima es de 43,3

kW. La figura n.º 3(a) muestra el perfil de consumo de un día típico de la Villa Campinas y en la figura n.º 4(a) se presentan los valores medios mensuales de irradiación solar, velocidad de viento y temperatura para esta localidad.

Caso Villa São Tomé: es una comunidad rural localizada en el litoral del estado de Pará, específicamente en las coordenadas geográficas  $0^{\circ} 44' S$  y  $47^{\circ} 28' O$  [11]. El acceso a la comunidad es por vía fluvial o por camino rural en condiciones precarias. Actualmente consta con un sistema híbrido solar-eólico-diesel-batería que abastece de energía eléctrica a 67 unidades consumidoras durante 24 horas por día. En la figura n.º 3(b) se muestra el perfil de consumo diario típico de la Villa São Tomé. A lo largo del año la demanda media diaria de energía en la villa resulta igual a 55,5 kWh y la potencia máxima demandada es de 6,0 kW. Se observa que el formato de la curva de carga en ambas comunidades coincide con el perfil típico de una comunidad rural, caracterizado por un consumo bajo durante la mayor parte del día y un pico de consumo sobre el final de la tarde, coincidente con el momento en que los habitantes regresan a sus casas luego de la jornada de trabajo. En la figura n.º 4(b) se muestra la variación anual de las medias mensuales de las variables meteorológicas para la Villa São Tomé.

En la tabla n.º 2 se muestra la configuración del problema de optimización estudiado. Los límites superior e inferior de las variables de optimización relacionadas con el número de componentes ( $N_{i,min}$ ,  $N_{i,max}$ ) son definidos en la etapa de predimensionamiento (ver figura n.º 2). Los cuatro posibles modelos de cada componente ( $T_i$ ) fueron seleccionados en función de la disponibilidad de equipos en el mercado local brasilero. Para ambos casos de estudio, hay disponibles cuatro estrategias de control ( $E_c$ ), dos estrategias padrón Seguimiento de la Demanda (SD) y Ciclo de Carga (CC) [12], y dos estrategias que surgen de la combinación de una estrategia Definida por el Usuario (DU) y las dos anteriores. Los sistemas fueron dimensionados considerando la restricción de máxima confiabilidad  $LPSP_{adm} = 0\%$ . El resto de las restricciones adoptan los siguientes valores:  $f_{ren,min} = 0\%$ ,  $f_{exess,adm} = 0\%$ ,  $F_{dg,adm} = \inf(L/año)$ ,  $EMCO_{2,adm} = \inf(t/año)$  y  $NPVC_{adm} = \inf(\$/año)$ .

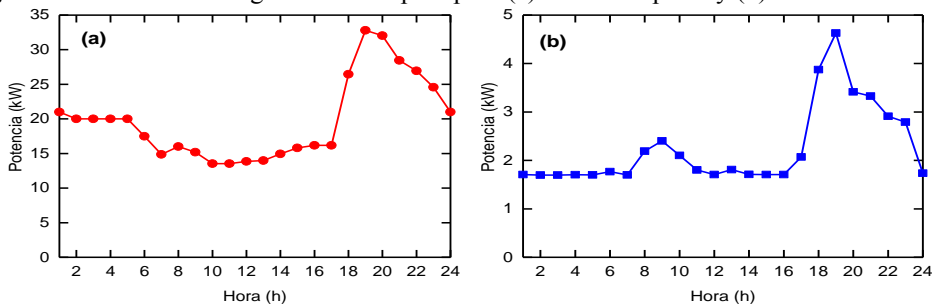
Los costos utilizados para el análisis económico del SHGE se muestran en la tabla n.º 3. Estos costos se obtuvieron a través de consultas a proveedores del mercado local brasilero. Las ecuaciones de capital inicial específico surgen de ajustar una función

exponencial a los datos relevados. Los costos de reemplazo y operación y mantenimiento fueron asumidos en función de valores citados en la bibliografía consultada. Otros datos utilizados para el análisis económico son la tasa de interés real de 4,8% a.a. El costo del combustible diesel fue adoptado igual a 0,734 \$/L [13] para Villa Campinas y 0,927 \$/L para Villa São Tomé [14].

Para que el modelo de simulación pueda calcular los indicadores ambientales relacionados con la emisión de gases contaminantes es necesario definir los factores de emisión de dióxido de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>-eq) para cada componente del sistema híbrido. Los valores adoptados en el presente trabajo se muestran en la tabla n.º 4.

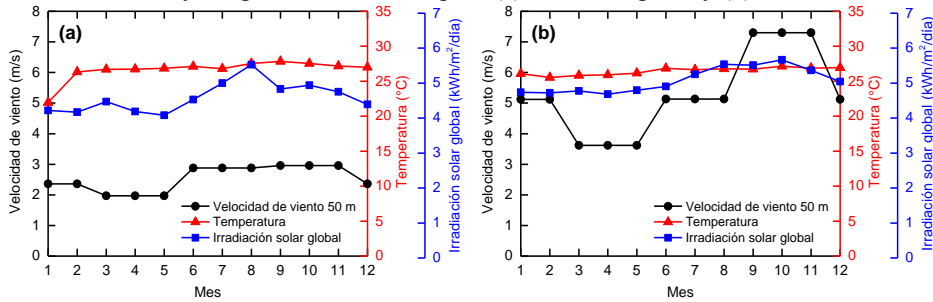
Finalmente, para realizar las simulaciones el AG fue configurado con un tamaño de población de  $N_{pop} = 100$  individuos, probabilidad de recombinación  $pr = 0,9$ , probabilidad de mutación  $pm = 1/n$  y número máximo de generaciones  $maxGen = 40$ . Estos valores fueron definidos a partir de experimentos que resultaron en el mejor desempeño del AG [8].

**Figura n.º 3.** Curva de carga de un día típico para (a) Villa Campinas y (b) Villa São Tomé



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 4.** Valores medios mensuales de las variables meteorológicas irradiación solar, velocidad de viento y temperatura ambiente para (a) Villa Campinas y (b) Villa São Tomé



**Fuente:** Elaboración propia.

En la figura n.º 5 se muestra la evolución de la función objetivo (NPVC) del problema de optimización mono-objetivo así como la media de la población de individuos para ambos casos de estudio. El AG converge rápidamente para el valor final, en ambos casos a partir de la generación 36 la función objetivo no presenta variación, i.e. el valor medio de la población coincide con el mejor individuo. Fueron realizadas cuatro simulaciones (réplicas) para cada caso de estudio obteniéndose los mismos resultados. El tiempo medio de cálculo en un computador equipado con Windows 7, 64 Bits, procesador Intel Core i7 2,5GHz y 8GB de RAM fue de 49 y 39 minutos para el caso de Villa Campinas y Villa São Tomé, respectivamente. Programas de optimización comerciales como el HOMER® [15] utilizan el método de búsqueda exhaustiva. Si bien este método asegura la obtención del óptimo global del problema, el tiempo de procesamiento resulta excesivamente elevado cuando el espacio de búsqueda es amplio. Experimentos realizados por [8] indican que HOMER® requiere 10 veces más tiempo para obtener los mismos resultados que el algoritmo aquí propuesto.

**Tabla n.º 2.** Configuración del problema de optimización mono-objetivo. Los valores entre corchetes indican el rango de variación de las variables relativas al número de componentes y los valores entre llaves representan los valores discretos que pueden adoptar las variables relativas al modelo de componente y la estrategia de operación

Variable	Caso Villa Campinas	Caso Villa São Tomé
[Nwt,min , Nwt,max]	[0,250]	[0,15]
Twt	{1; 6; 7; 10} kW	{1; 6; 7; 10} kW
[Npv,min , Npv,max]	[0,2400]	[0,400]
Tpv	{0,064; 0,08; 0,11; 0,12} kWp	{0,04; 0,08; 0,11; 0,12} kWp
[Ndg,min , Ndg,max]	[0,6]	[0,3]
Tdg	{2,8; 10; 16; 48} kW	{2,8; 4; 7; 16} kW
[Nbt_p,min , Nbt_p,max]	[0,30]	[0,4]
Tbt	{198; 226; 1192; 3565} kWh	{198; 226; 1192; 3565} kWh
[Nconv,min , Nconv,max]	[0,5]	[0,2]
Tconv	{5; 7; 17; 50} kW	{5; 7; 7; 15} kW
Ec	{SD; CC; DU+SD; DU+CC}	{SD; CC; DU+SD; DU+CC}
Nº de combinaciones posibles	3,21x10 <sup>12</sup>	7,83x10 <sup>9</sup>

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla n.º 3.** Costos utilizados en análisis económico

Componente	Capital inicial (\$)	Reemplazo (\$)	Operación y mantenimiento
PV	$C_{icap,pv} = 10,06 (P_{pvr})^{-0,39}$	$C_{rep,pv} = C_{icap,pv} 0,75$	$C_{o\&m,pv} = C_{icap,pv} * 0,001$ (\$/año)
WT	$C_{icap,wt} = 4064,97 (P_{wtr})^{-0,1656}$	$C_{rep,wt} = C_{icap,wt} - 501,44 H_{torre}$	$C_{o\&m,wt} = C_{icap,wt} * 0,002$ (\$/año)
CONV	$C_{icap,conv} = 617,49 (P_{convr})^{0,224}$	$C_{rep,conv} = C_{icap,conv}$	$C_{o\&m,conv} = 0$ (\$/año)
BT	$C_{icap,bt} = 148,74 (P_{btr})^{-0,275}$	$C_{rep,bt} = C_{icap,bt}$	$C_{o\&m,bt} = 10$ (\$/año)
DG	$C_{icap,dg} = 325,39 (P_{dgr})^{-0,0051}$	$C_{rep,dg} = C_{icap,dg}$	$C_{o\&m,dg} = 0,25$ (\$/h)

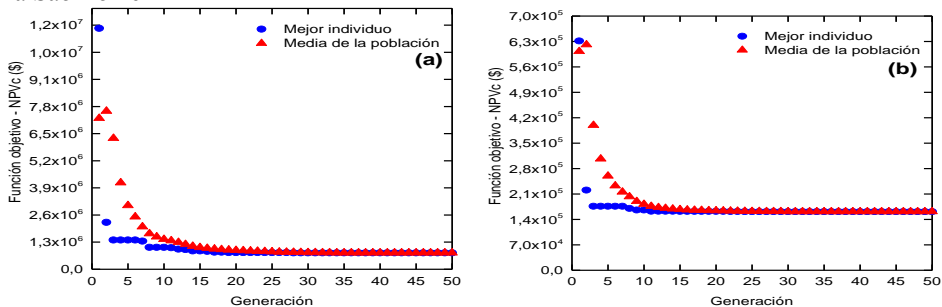
**Fuente:** Roberts, J. J. (2016) [8]

**Tabla n.º 4.** Factores de emisión utilizados para el análisis ambiental

Componente	Factor de emisión indirecta(1)		Factor de emisión directa(2)	
PV	0,059	kgCO <sub>2</sub> -eq/kWh	--	
WT	0,02	kgCO <sub>2</sub> -eq/kWh	--	
CONV	42,835	kgCO <sub>2</sub> -eq/kW	--	
BT	59,42	kgCO <sub>2</sub> -eq/kWh	--	
DG	454,293	kgCO <sub>2</sub> -eq/kW	2,64	kgCO <sub>2</sub> -eq/L
Combustible diesel	0,530	kgCO <sub>2</sub> -eq/L	--	

(1) Emisiones generadas durante etapas de fabricación, transporte y descarte; (2) Emisiones generadas durante la operación.

**Fuente:** Roberts, J. J. (2016) [8].

**Figura n.º 5.** Evolución de la población de individuos del AG (a) Villa Campinas y (b) Villa São Tomé

**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla n.º 5 se muestran los resultados numéricos de las configuraciones óptimas de SHGE obtenidas con el algoritmo de dimensionamiento propuesto. Los indicadores mostrados se relacionan con diferentes aspectos de la operación del sistema. En ambos casos la configuración obtenida es de tipo solar-diesel-batería, no se incluye generación eólica. La excelente disponibilidad de recurso solar en ambos locales, sumado a la reducción del precio de los paneles fotovoltaicos ocurrida en los últimos años y el menor costo de operación y mantenimiento de esta tecnología hacen de la generación fotovoltaica una alternativa más atractiva que la generación eólica, para los casos estudiados.

En ambos casos de estudio, la configuración óptima de SHGE considera la estrategia de control Seguimiento de la Demanda (SD). Esta estrategia resulta adecuada para sistemas con alta participación de generación renovable, como acontece en ambos casos donde la fracción de generación renovable (fren) resultó de 86,24 % para Villa

Campinas y 99,66 % para Villa São Tomé. La alta penetración de generación renovable intermitente provoca exceso de energía cuando la generación resulta mayor que la demanda y se alcanza el límite de capacidad de almacenamiento del banco de baterías. En los casos estudiados este exceso (fexess) resultó igual a 4,33 % y 5,32 % para Villa Campinas y Villa São Tomé, respectivamente. Para evitar el exceso de energía se puede reemplazar la generación renovable por generación despachable (generación diesel por ejemplo), o aumentar el tamaño del banco de baterías, sin embargo estas alternativas resultarían en un sistema más costoso.

La autonomía del sistema (BTBaut) hace referencia al tiempo que el SHGE puede abastecer a la carga sin generación de ningún tipo, es decir utilizando apenas la energía almacenando en el banco de baterías. En ambos casos este valor resultó superior a un día, lo que es deseable para permitir el acceso de equipos de mantenimiento a las comunidades en caso de avería del SHGE.

El grupo generador diesel opera esporádicamente en el caso de Villa São Tomé, totalizando apenas 105 horas/año. Este equipo es únicamente accionado en los momentos pico de consumo cuando el banco de baterías no consigue entregar la potencia demandada por la carga. En el caso de Villa Campinas, el banco de baterías alcanza el estado de mínima carga con mayor frecuencia, y como consecuencia el grupo generador opera 1797 horas/año.

El costo nivelado de la energía (LCOE) resultó mayor para el sistema de Villa São Tomé. Este sistema tiene mayor participación de generación renovable, la cual corresponde a 86,99 % de la potencia total instalada. Como consecuencia el costo de inversión inicial (Cicap) en relación a la energía demandada por la carga resulta mayor que en el caso de Villa Campinas, y esto impacta en el costo final de la energía.



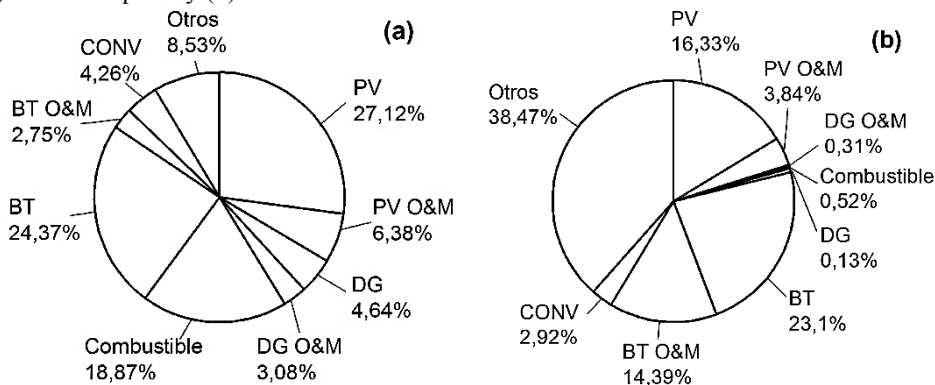
**Tabla n.º 5.** Resultados numéricos del problema de optimización de los SHGE

	<b>Caso Villa Campinas</b>	<b>Caso Villa São Tomé</b>
Potencia del WT (Kw)	0,00	0,00
Potencia del PV (kWp)	149,40 (1245x0,12 kWp)	18,72 (156x0,12 kWp)
Potencia del DG (Kw)	48,00 (3x16 kW)	2,80 (1x2,8 kW)
Capacidad del banco BT (kWh)	855,60 (120 bat. 3565Ah)	286,08 (120 bat. 1192 Ah)
Potencia del CONV (Kw)	35,00 (7x5 kW)	5,00 (1x5 kW)
Estrategia de operación	SD	SD
Energía consumida por la carga (kWh/año)	178253,48	20272,83
Probabilidadde energía no atendida, $LPSP$ (%)	0,00	0,00
Exceso de energía, $f_{excess}$ (%)	4,33	5,32
Fracción de energía renovable, $f_{ren}$ (%)	86,24	99,66
Autonomía del sistema, $BTB_{aut}$ (día)	1,23	3,61
Horas de operación del DG, $H_g$ (h/año)	1797,00	105,00
Combustible consumido por el DG, $F_g$ (L/año)	11263,85	46,48
Emisiones en el ciclo de vida, $EMCO_2$ (tCO <sub>2</sub> -	29,76	0,14
Inversión inicial, $C_{icap}$ (\$)	524.288,75	140.584,12
Costos operativos, $C_{operating}$ (\$/año)	20.281,88	1656,83
Costo nivelado de energía, $LCOE$ (\$/kWh)	0,345	0,627
Valor presente neto, $NPV_C$ (\$)	782.227,44	161.655,13

**Fuente:** Elaboración propia..

En la figura n.º 6 se muestra la participación de los diferentes costos en el valor presente neto (NPVC) del SHGE. Para el caso de Villa Campinas, figura n.º 6(a), la mayor parcela está relacionada al sistema fotovoltaico, la inversión inicial (PV) más el costo de operación y mantenimiento (PV O&M) representan el 33,5 % del NPVC. El segundo mayor costo se debe al banco de baterías, la inversión inicial (BT) más operación y mantenimiento (BT O&M) del banco de baterías representan el 27,12 % del NPVC. El costo asociado a la inversión inicial del generador diesel (DG) representa apenas el 4,64 %, sin embargo cuando se considera el costo de operación y mantenimiento (DG O&M) y el costo del combustible, este porcentaje aumenta para 26,59 %. En el caso de Villa São Tomé, el mayor aporte en el NPVC se debe a los costos relacionados con materiales eléctricos, construcción, servicios y accesorios englobados en la categoría “Otros”. La inversión inicial más el costo de operación y mantenimiento de los sistemas fotovoltaico y baterías en conjunto representan 57,66 % del NPVC para el sistema de Villa São Tomé y 60,62 % para Villa Campinas, evidenciando el impacto que tienen estos componentes en el costo final del sistema.

**Figura n.º 6.** Participación del costo de los componentes en valor presente neto del sistema (a) Villa Campinas y (b) Villa São Tomé



**Fuente:** Elaboración propia.

## ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En el proceso de dimensionamiento de SHGE existen incertezas con respecto al valor que pueden adoptar ciertas variables del problema, ya sea por falta de información o

por la propia característica estocástica de las variables. El análisis de sensibilidad permite estudiar la influencia de la variación de los parámetros inciertos sobre los indicadores de desempeño del sistema y la función objetivo. En el presente estudio se realizó un análisis de sensibilidad con respecto al costo del combustible diesel.

El combustible utilizado en los sistemas aislados del sistema interconectado brasilero se encuentra subvencionado a través de la Conta de Consumo de Combustível (CCC). Por lo tanto el valor del combustible pagado por los generadores no se corresponde con el costo real del combustible utilizado en estos sistemas. Según [16] se estima que por cada litro de combustible utilizado en los sistemas aislados del Amazonas brasilero, se consumen otros tres litros en el transporte desde las refinerías hasta el punto de consumo. Basados en esta información, se realizó el análisis de sensibilidad considerando el costo del combustible diesel 1,5; 2; 2,5 y 3 mayor al valor pagado actualmente.

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la tabla n.º 6 y en las figuras n.º 7, 8 y 9, para ambos casos de estudio. El grado de influencia de la variación del costo del combustible es diferente en los dos sistemas estudiados. En el caso de Villa Campinas, el aumento del valor del combustible deriva en una configuración óptima de SHGE con mayor inversión inicial (Cicap) y NPVc como se ve en la figura n.º 7a, también disminuye el consumo de combustible a lo largo del año y el LCOE aumenta levemente figura n.º 8b. Estos resultados se relacionan con el aumento de la participación de generación renovable, figura n.º 9a.

En el caso de Villa São Tomé también se observa un aumento de la generación renovable con el aumento del precio del combustible, figura n.º 9b, sin embargo esta variación es muy leve debido a que la configuración original del sistema ya cuenta con 99,66 % de participación de renovables. La variación del resto de los indicadores con respecto al aumento del costo del combustible no sigue una tendencia tan marcada, sin embargo se evidencia un aumento del NPVc, figura n.º 7b, y un aumento de LCOE, figura n.º 8b, como ocurre en el caso de Villa Campinas.

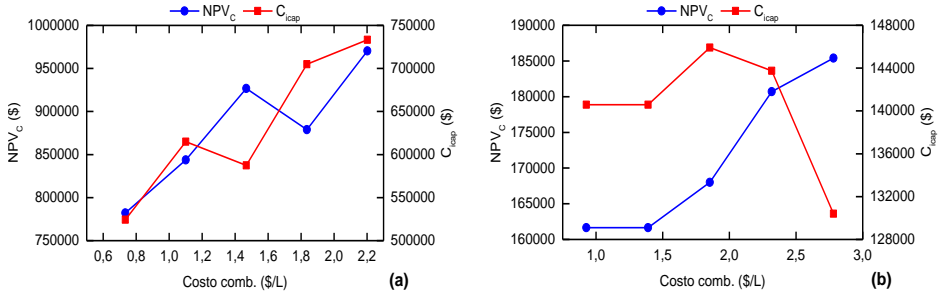
**Tabla n.º 6.** Resultados del análisis de sensibilidad con respecto al valor del combustible diesel

<b>Caso Villa Campinas</b>					
Costo de combustible (\$/L)	0,734(*)	1,101	1,468	1,835	2,202
WT (kW)	0	0	0	0	0
PV (kWp)	149,40 (1245x0,12)	186,01 (1691x0,11)	175,68 (1464x0,12)	179,04 (1492x0,12)	189,24 (1492x0,12)
DG (kW)	48 (3x16)	48 (3x16)	48 (3x16)	448 (3x16)	32 (2x16)
BT (kWh)	855,60 (120x3565 Ah)	855,60 (120x3565Ah)	858,24 (360x1192 Ah)	1711,20 (240x3565 Ah)	1716,48 (720x1192 Ah)
CONV (kW)	35 (7x5)	34 (2x17)	34 (2x17)	35 (7x5)	34 (2x17)
Ec	SD	SD	SD	SD	SD
<b>Caso Villa São Tomé</b>					
Costo de combustible (\$/L)	0,927(*)	1,391	1,854	2,318	2,781
WT (kW)	0	0	0	7 (1x7)	0
PV (kWp)	18,72 (156x0,12)	18,72 (156x0,12)	18,64 (2336x0,08)	12,54 (233x0,11)	19,92 (166x0,12)
DG (kW)	2,80 (1x2,8)	2,80 (1x2,8)	2,80 (1x2,8)	2,80 (1x2,8)	2,8 (1x2,8)
BT (kWh)	286,08 (120x1192 Ah)	286,08 (120x1192 Ah)	286,08 (120x1192 Ah)	108,48 (80x226 Ah)	162,72 (120x226 Ah)
CONV (kW)	5 (1x5)	5 (1x5)	5 (1x5)	8 (2x4)	5 (1x5)
Ec	SD	SD	SD	SD	SD+DU

(\*) Valor pagado actualmente por los generadores.

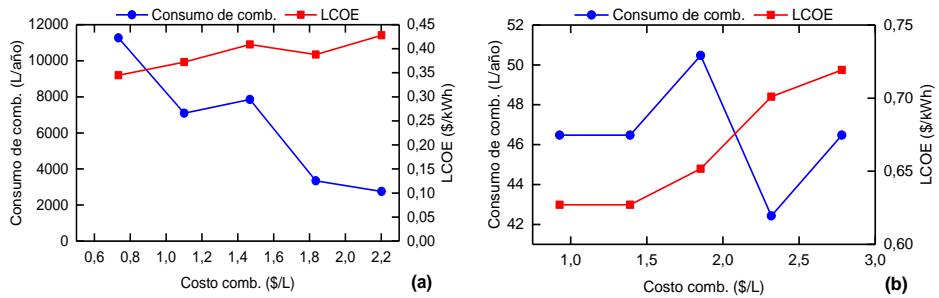
**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 7.** Sensibilidad del valor presente neto (NPV<sub>c</sub>) y la inversión inicial (C<sub>cap</sub>) en función del precio del combustible diesel para Villa Campinas (a) y Vila São Tomé (b)



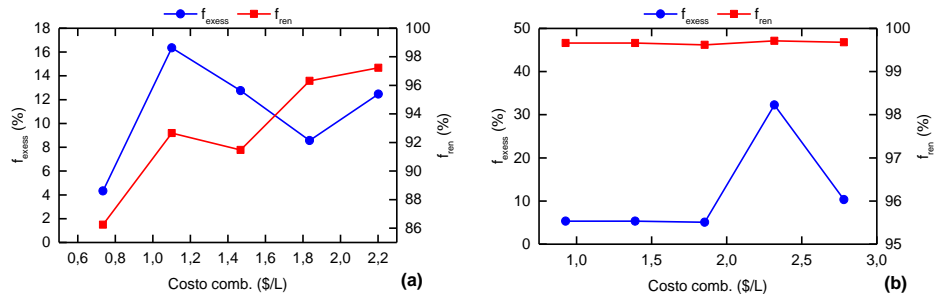
Fuente: Elaboración propia.

**Figura n.º 8.** Sensibilidad del consumo de combustible y el costo nivelado de la energía (LCOE) en función del precio del combustible diesel para Villa Campinas (a) y Vila São Tomé (b)



Fuente: Elaboración propia.

**Figura n.º 9.** Sensibilidad de la fracción de energía renovable (f<sub>ren</sub>) y el exceso de energía (f<sub>excess</sub>) en función del precio del combustible diesel para Villa Campinas (a) y Vila São Tomé (b)



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se propone un método de dimensionamiento de SHGE autónomos basados en fuentes de generación renovables. Se utiliza el concepto de optimización basada en simulación para dimensionar de forma optimizada un SHGE solar-eólico-diesel con almacenamiento en baterías. El algoritmo propuesto se compone de un módulo de simulación y un módulo de optimización; ambos módulos interactúan intercambiando informaciones con el objetivo de obtener la mejor configuración de SHGE dadas las condiciones de contorno establecidas. El método propuesto fue utilizado para el dimensionamiento de SHGE para el abastecimiento eléctrico de dos comunidades rurales ubicadas en la región Amazónica brasilera, la Villa Campinas y la Villa São Tomé.

Los resultados muestran la capacidad de la herramienta desarrollada para resolver un problema de optimización complejo como es el dimensionamiento de SHGE en tiempos de procesamiento reducidos. La utilización de Algoritmos Genéticos como método de optimización permite resolver el problema con mínimo conocimiento de las características de la función objetivo. El Algoritmo Genético, integrado en el módulo de optimización, utiliza una serie de indicadores de desempeño calculados por el módulo de simulación para guiar la búsqueda de la mejor configuración de SHGE.

La aplicación del método de optimización en los casos de estudio de Villa Campinas y Villa São Tomé demostró que la configuración de SHGE solar-diesel-batería es la más adecuada en ambos casos. La presencia de un excelente recurso solar a lo largo de todo el año sumado a la disminución en el costo de los paneles fotovoltaicos ocurrida en los últimos años, hacen de la generación solar fotovoltaica una opción atractiva desde el punto de vista económico. Sin embargo, para cumplir con la condición de máxima confiabilidad (LPSP = 0%), los sistemas deben necesariamente incluir almacenamiento de energía en baterías y generación de backup.

Finalmente fue realizado un estudio de sensibilidad para estudiar la influencia del costo del combustible en la configuración óptima del SHGE. Se observa que un aumento en el costo de combustible deriva en una mayor participación de generación renovable, pero también en un aumentando de la inversión inicial y el NPVc del sistema. Este resultado sugiere que sería más interesante utilizar los subsidios que actualmente tiene

el combustible fósil para incentivar la utilización de energías renovables en los sistemas aislados, promoviendo de este modo una solución más sustentable a largo plazo.

## AGRADECIMIENTOS

El autor J. J. Roberts agradece el apoyo de la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) por el apoyo financiero recibido durante la elaboración de la presente pesquisa a través de beca de doctorado tipo CAPES/DS.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEA, World Energy Outlook (2013). International Energy Agency (IEA), Paris, p. 708.
- [2] Pinho, J. T. (2008). *Sistemas Híbridos - Soluções Energéticas para a Amazônia*, 1st ed. Brasília: Ministério de Minas e Energia.
- [3] Thibaud, S. M.; Roberts, J. J. and Prado, P. O. (2015). “Proyecto de un Sistema Híbrido de Generación con Energías Renovables para un Establecimiento Rural Aislado,” in *Book of Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2015*, p. 73.
- [4] Kondili, E. (2013). “Design and performance optimisation of stand-alone and hybrid wind energy systems,” in *Stand-alone and Hybrid Wind Energy Systems. Technology, energy storage and applications*, 1st ed., J. K. Kaldellis, Ed. Oxford: CRC Press, pp. 81-101.
- [5] Sharafi, M. and Elmekawy, T. Y. (2014). “Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using PSO-simulation based approach,” *Renew. Energy*, vol. 68, pp. 67-69, Aug.
- [6] Pinho, J. T.; de Oliveira Barbosa, C. F.; da Silva Pereira, E.; Silva Souza, H. M.; Blasques Macedo, L. C.; Barros Galhardo, M. A. and Macêdo, W. N. (2008). *Manual de Implantação de Sistemas Híbridos Fotovoltaico-Eólico-Diesel*, Belém.

- [7] Manwell, J. F.; Rogers, A.; Hayman, G.; Avelar, C. T.; McGowan, J. G.; Abdulwahid, U. and Wu, K. (2006). *Hybrid2 - A Hybrid System Simulation Model - Theory Manual*, Massachusetts.
- [8] Rober, J. J. (2016). *Otimização de Sistemas Híbridos de Geração de Energia Solar-Eólico-Diesel através de Métodos Metaheurísticos e Função Multiobjetivo*, Universidade Estadual Paulista (UNESP).
- [9] Bäck, T.; Fogel, D. B. and Michalewicz, Z. (2000). *Evolutionary Computation I: Basic Algorithms and Operators*, 1st ed. Bristol, Philadelphia: Institute of Physics Publishing.
- [10] Cartaxo Ferreira, E. (2000). *Fornecimento de Serviço de Energia Elétrica Para Localidades Isolada da Amazônia: reflexões a partir de um estudo de caso*, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).
- [11] de Oliveira Barbosa, C. F. (2006). *Avaliação tecnológica, operacional e de gestão de sistemas híbridos para geração de eletricidade na região amazônica*, Universidade Federal do Pará.
- [12] Barley, C. D. and Winn, C. B. (1996). «Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems», *Sol. Energy*, vol. 58, n.º 4-6, pp. 165-179, Oct.
- [13] ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A., Eletrobras - Centrais Elétricas Brasileiras S.A., 2016. [Online]. Available: <http://www.eletrobras.com/elb/data/Pages/LUMIS293E16C4PTBRIE.htm>. [Accessed: 27-Aug-2014].
- [14] de Oliveira Barbosa, C. F. and Pinho, J. T. (2008). “Avaliação Econômica de Sistemas Híbridos Fotovoltaicos-Eólico-Diesel para Geração de Eletricidade na Amazônia,” in I Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES, p. 12.
- [15] HOMER Energy LLC. Boulder Colorado, *Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*, 2015. [Online]. Available: <http://homerenergy.com>. [Accessed: 25-May-2015].
- [16] Severino, M. M. (2008). *Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia*, Universidade de Brasília.



### **Justo José Roberts**

Doctor en Ingeniería Mecánica y Magister en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá, San Pablo, Brasil. Ingeniero Electromecánico por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ingeniería, Argentina. Integrante del Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP); Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP) y Grupo de Pesquisa em Bionergia - IPBEN-UNESP Guaratinguetá. e-mail: [justo@feg.unesp.br](mailto:justo@feg.unesp.br)

### **Agnelo Marotta Cassula**

Doctor en Ingeniería Eléctrica, Magister en Ingeniería Eléctrica e Ingeniero Eléctrico por la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil. Integrante del Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP) y del Grupo de Pesquisa em Bionergia – IPBEN-UNESP Guaratinguetá. Profesor adjunto en el Departamento Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Guaratinguetá. e-mail: [agnelo@feg.unesp.br](mailto:agnelo@feg.unesp.br).

### **José Luz Silveira**

Doctor en Ingeniería Mecánica pela Universidade de Campinas (UNICAMP). Magister en Ingeniería Mecánica e Ingeniero Mecánico por la pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Graduación en Matemática, Fundación de educación de Itajubá, Brasil. Director del Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP) y coordinador del Grupo de Pesquisa em Bionergia – IPBEN-UNESP Guaratinguetá. Profesor titular en el Departamento de Energía, Facultad de Ingeniería, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Guaratinguetá. Investigador Nivel 1A de la CNPq. e-mail: [joseluz@feg.unesp.br](mailto:joseluz@feg.unesp.br).

## **Pedro Osvaldo Prado**

Magister en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Facultad de Ingeniería de Guarantiguetá, San Pablo, Brasil. Ingeniero Eléctrico por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ingeniería, Mar del Plata, Argentina. Director del Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP). Profesor adjunto del Área Instalaciones Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). e-mail: [poprado@fi.mdp.edu.ar](mailto:poprado@fi.mdp.edu.ar).

# ENERGIA E EQUIPAMENTOS WLEDi PARA ILUMINAÇÃO VIÁRIA

Elvo Calixto Burini Junior<sup>1</sup>

## RESUMO

Aspectos e considerações sobre a transição tecnológica da iluminação pública/viária entre fonte convencional tipo HID para WLEDi é o foco principal do presente trabalho. São apresentados dados sobre equipamentos para IP obtidos em laboratório do IEE/USP e em campo na CUASO. A expansão da utilização da tecnologia SSL (WLEDi) está introduzida, dados coligidos sobre projeto na cidade de São Paulo estão apresentados e discutidos

**Palavras-chave:** Educação, Métodos laboratoriais de medição, Dados fotométricos sobre WLEDi.

## LISTA DE ABREVIATURAS

CUASO - Campus da Universidade de São Paulo, Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira;

---

<sup>1</sup> Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo - IEE/USP, correo electrónico: [elvo@iee.usp.br](mailto:elvo@iee.usp.br).

$D_{uv}$  – Dimensão sobre isotérmica em espaço colorimétrico u'v' CIE 1976;

FP – Fator de Potência;

GAC - Goniômetro Auxiliado por Computador (braço de robô);

HID – Lâmpada elétrica a descarga de alta intensidade (do inglês, High Intensity Discharge);

IEE – Instituto de Energia e Ambiente;

IP – Iluminação Pública/Viária;

IRC – Índice de Reprodução de Cor;

LVSAP – Lâmpada a Vapor de Sódio a Alta Pressão;

MVM – Multivapores Metálicos (Halogenetos, tecnologia de Lâmpada a Alta Pressão);

PPP - Parceria entre o setor Público e o setor Privado;

SICADEE – Serviço Técnico de Sistemas de Iluminação, Condicionamento Ambiental e Desempenho Energético de Edificações;

SPD – Radiação em região do espectro electromagnético (do inglês, Spectral Power Distribution);

SSL – Dispositivo a estado sólido (do inglês, Solid State Lighting);

$T_{cp}$  – Temperatura de Cor Correlata;

THDi - Distorção Harmônica total da corrente elétrica;

USP – Universidade de São Paulo;

WLEDi - Diodo emissor de luz branca inorgânico (Inorganic White Light Emitting Diode).

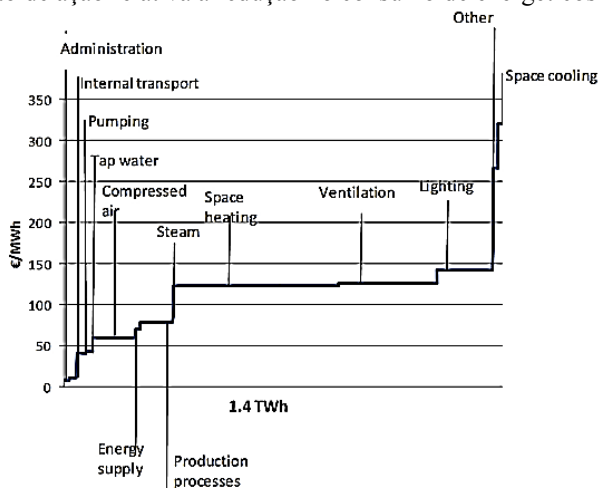
## **INTRODUÇÃO**

A utilização de dispositivos SSL, em substituição a tecnologia da LVSAP, como o WLEDi tem avançado na IP durante a segunda década do século 21. Um objetivo do presente trabalho está em abordar o assunto e disponibilizar dados coligidos tanto em laboratório quanto de projetos implementados em campo. As inovações em ilu-

minação pela difusão da tecnologia emergente (WLEDi), a possibilidade de novos serviços para as denominadas cidades inteligentes, a possibilidade da IP eficiente poder colaborar com o incremento do índice de desenvolvimento humano (IDH) no meio urbano brasileiro poderão acelerar a mudança da tecnologia atual (LVSAP) dominante no setor de iluminação. Uma situação presente, o acervo e também o serviço da IP no Brasil não são mais realizados pelas concessionárias de energia elétrica. As normas técnicas e o conhecimento local foram estabelecidos a partir das fontes puntiformes e tecnologias tradicionais como da incandescência e descarga elétrica em gases (baixa e alta pressão), cuja fabricação no país está sendo des-continuada. Discutir necessidades com base em situações acessadas da IP brasileira também norteia o presente trabalho. Uma instalação que contém certa quantidade de pontos de luz como < 10 mil talvez possa ser classificada como experimental, dada a relativa facilidade de intervenção e que uma quantidade maior de pontos de luz possa ser denominada de instalação extensa, basicamente, devido o maior período necessário para realizar correção ou regularização do serviço. Os custos por unidade de energia (\$/MWh) para ações que objetivam redução de consumo a partir de melhoria da eficiência energética no uso final podem ser determinados, arranjados na ordem crescente, plotados para comparação, e revelar potencial para a energia economizada. A figura n.º 1 apresenta um cenário elaborado e que ilustra esse tema, a partir de auditoria energética, conforme Programa da Agencia de Energia da Suécia (SEAP) [1].

Em termos de custos médios para investimentos em melhorias da eficiência energética, conforme apresentado pela figura n.º 1, o custo mais elevado é para o arrefecimento de ambientes (cerca de 320 Euros/MWh), em segundo “outros”, ainda que ambos representam abrangência bastante reduzida em relação a meta total prevista (no caso 1,4 TWh). Em terceiro lugar encontra-se a iluminação com custo acima de 140 Euros/MWh. Ainda que a iluminação represente fração significativa da energia a ser economizada em interiores, na Suécia, o custo é o mais elevado quando comparado as outras demais dez ações que foram consideradas pelo Programa da Agencia de Energia sueca (SEAP) [1].

**Figura n.º 1.** Custo de ação relativa a redução no consumo de energéticos na Suécia [1]



A cidade de Manaus, estado do Amazonas - AM (Brasil), recebeu destaque na imprensa local como a segunda cidade brasileira que mais investiu na IP tipo WLEDi (ref. ano 2016). Foram relatados 36.675 pontos de luz (entre Maio a Novembro) que propiciaram redução de R\$ 327 mil [2]. Tais dados possibilitam estimativa de redução do dispêndio com energia na ordem de R\$ 8,92/ponto (durante o mês de Maio) ou R\$ 107,04/ponto-ano. Também foi divulgada meta para atingir 60 mil pontos do tipo WLEDi no ano 2017 e que propiciarão redução de mais de R\$ 15 milhões no período de 4 anos [2] ou seja, mais de R\$ 102,25/ponto-ano. Neste caso não foi feita a divulgação sobre o investimento realizado pela prefeitura de Manaus, necessário para a troca preconizada (VSAP por WLEDi). Quanto de recurso público foi empenhado, e/ou quanto tempo seria admissível para retornar o investimento. Estas são questões que já deveriam estar respondidas. Ao investir em luminárias com maior eficiência luminosa o município poderá reduzir a conta de energia elétrica, e quando o investimento estiver justificado/amortizado quem irá se apropriar do benefício? Atendida a demanda da expansão demográfica/vegetativa, outra questão: haverá redução na Contribuição (ou taxa) de IP - CIP? Num empreendimento com recurso público, em particular sobre a utilização de energia há que se avaliar e quantificar os benefícios ao setor público, setor produtivo e também ao usuário final. O custo para produzir radiação visível por uma fonte de luz artificial possui ligação estreita com a eficiência luminosa da fonte utilizada. Na próxima seção este trabalho aborda dentro do tema produção de

luz a eficiência luminosa de diferentes tecnologias para iluminação artificial, com adaptações feitas pelo autor no que tange à tecnologia WLEDi.

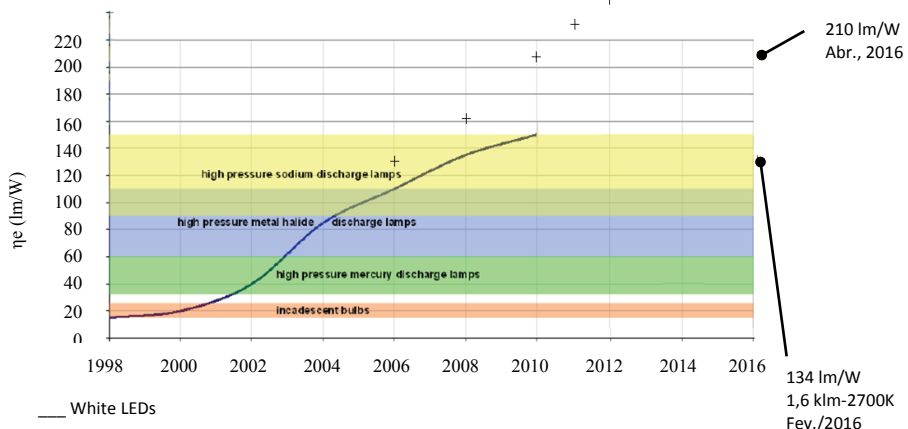
## PRODUÇÃO DE LUZ

Em IP o processo da produção de luz envolve uma tecnologia da fonte de luz primária, que foi selecionada, luminária, equipamentos auxiliares (*driver*, proteção) e a utilização de energia elétrica. Uma característica importante da fonte primária é a capacidade de conversão energética da lâmpada ou a eficiência luminosa. Este tema está considerado abaixo, conjuntamente, com a depreciação luminosa. A seção é finalizada pela consideração do tema externalidades, o qual está pontuado com poluição luminosa e dados experimentais sobre atratividade a inseto por fonte de luz artificial.

## EFICIÊNCIA LUMINOSA DE FONTE ARTIFICIAL

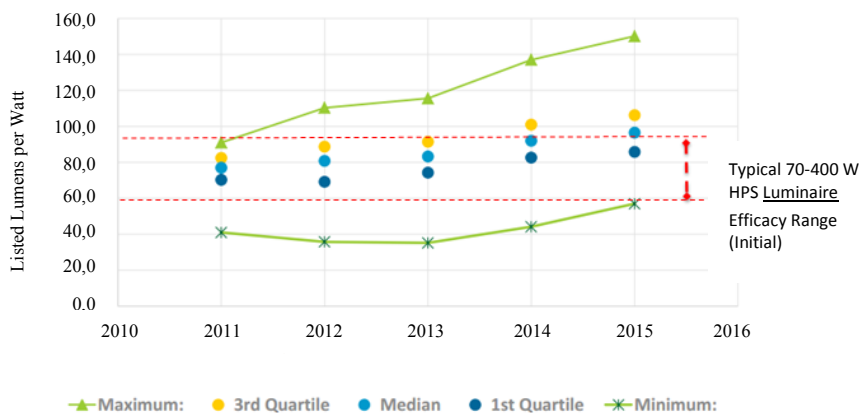
A eficiência luminosa ao longo do tempo (até o ano 2010), para as principais tecnologias foi reunida, ordenada e está apresentada pela figura n.º 2 (outros dados foram incluídos pelo autor).

**Figura n.º 2.** Eficiência Luminosa, ao longo do tempo, para cinco diferentes tecnologias, inclui dados para WLEDi atualizados e agregados pelo autor [3]



Segundo dados divulgados por fabricante de WLEDi a eficiência luminosa do dispositivo (chip) já havia vencido a barreira dos 220  $\ell\text{m}/\text{W}$  antes do ano 2011 (ver pontos “+”, figura n.º 2), ainda que no ano 2016 dois produtos do mercado apresentavam 134  $\ell\text{m}/\text{W}$  (2700 K) e 210  $\ell\text{m}/\text{W}$  (ver figura n.º 2). Para o período de 2011 – 2015 a figura n.º 3 apresenta dados típicos para a eficiência luminosa inicial de luminária LVSAP (HPS) 70 – 400 W e dados para 3.441 amostras do mercado norte-americano que estão agrupadas segundo o ano correspondente [4].

**Figura n.º 3.** Eficiência luminosa: equipamentos (WLEDi) no mercado dos EUA [4]



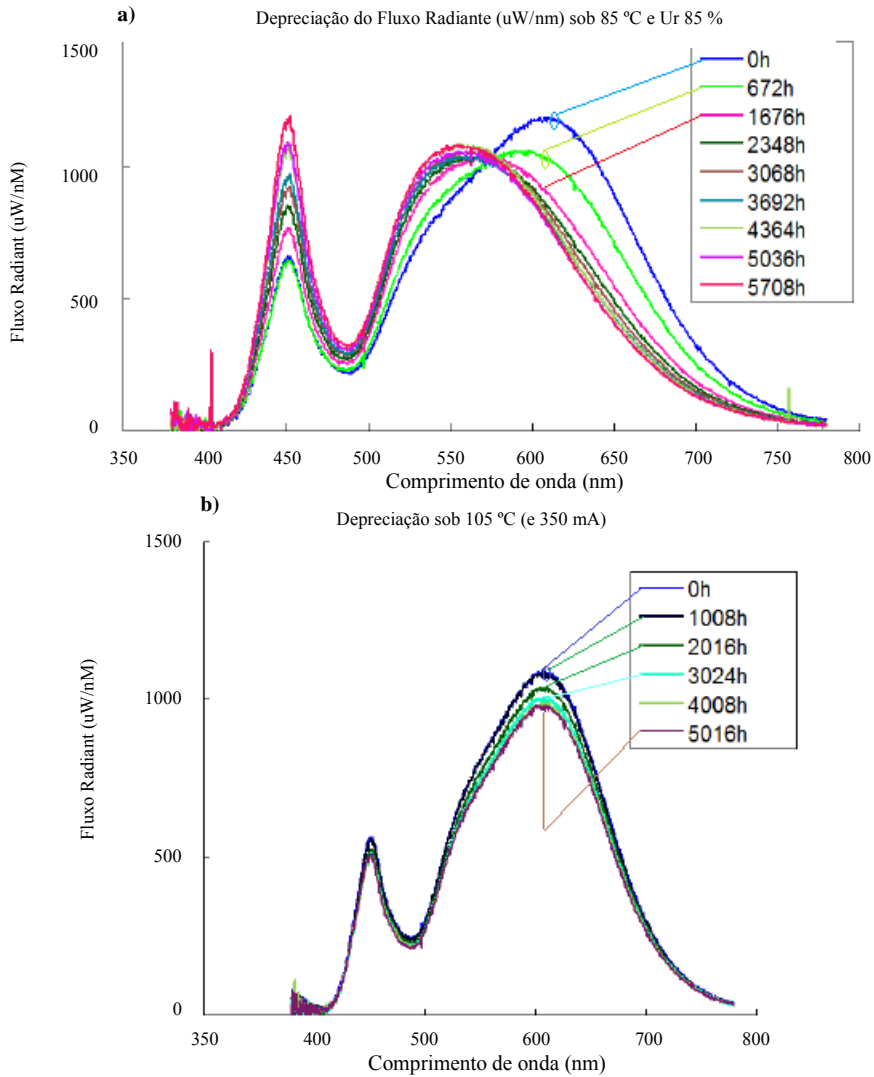
Para o mercado dos EUA é possível verificar que o valor médio das amostras de luminária WLEDi, relativo ao ano 2015, ultrapassou o limite superior da faixa estabelecida para a tecnologia VSAP, indicando a possibilidade de competitividade para o produto WLEDi.

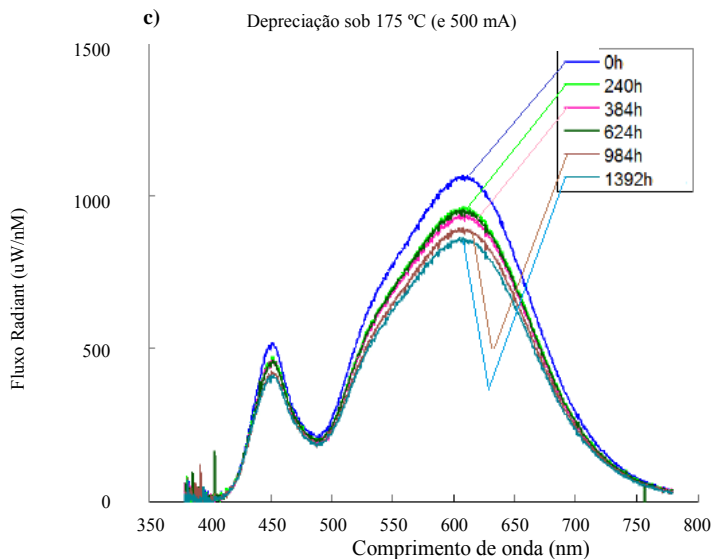
## DEPRECIAÇÃO LUMINOSA DO WLEDi

O resultado de experimentos (degradação acelerada) sobre efeito da temperatura e umidade para WLEDi está apresentado pela Figura 4(a), (b), (c) [5].



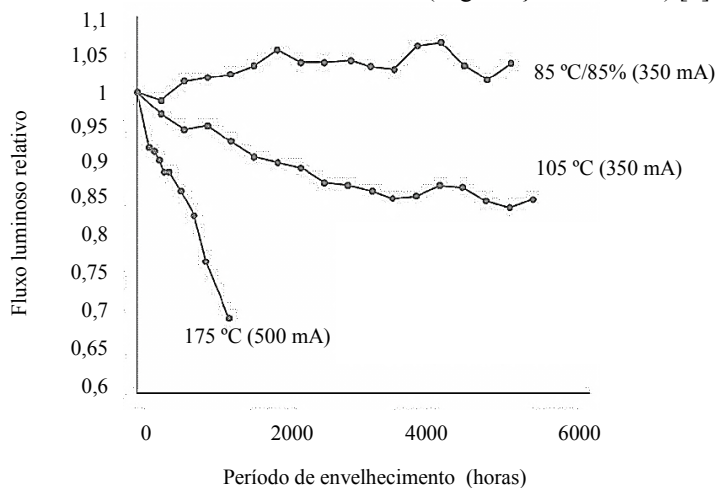
**Figura n.º 4 (a), (b), (c).** Efeito da temperatura e umidade no SPD da saída de luz (fluxo radiante) para três tipos de WLEDi em diferentes experimentos (degradação acelerada) [5]





A figura n.º 4 apresenta alterações ocorridas ao longo do tempo (durante ensaio de degradação acelerada) no espectro da saída de luz para WLEDi e sob diferentes condições de temperatura, dois níveis de corrente elétrica (figura n.º 4a, b sob 350 mA) e umidade. O parâmetro de interesse é o comportamento do fluxo luminoso ao longo do período de funcionamento, ele está apresentado pela figura n.º 4(d).

**Figura n.º 4(d).** Comportamento do fluxo luminoso ao longo do tempo devido efeito da temperatura e umidade em tres amostras de WLEDi (degradação acelerada) [5]

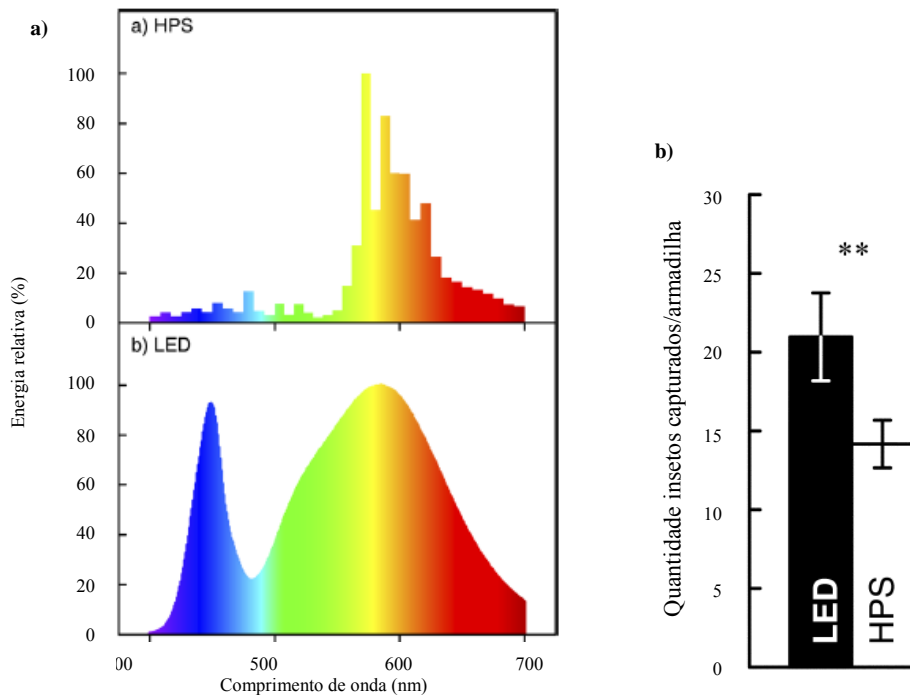


A degradação mais severa do fluxo luminoso no experimento relatado [5] ocorreu para a condição de temperatura mais elevada e corrente elétrica de 500 mA. Isto enfatiza a necessidade de ser estabelecido um compromisso entre a temperatura de funcionamento do dispositivo e a depreciação luminosa admissível durante a etapa de projeto da luminária.

## **EXTERNALIDADES DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA/VIÁRIA**

Os dados obtidos de imagens de satélite e que foram avaliados por agente do Banco Mundial permitiram rejeitar a hipótese de que o aumento temporal dos pontos de luz noturna de determinada área esteja correlacionado com o crescimento da população ou da população urbana [6]. A poluição luminosa, os possíveis efeitos aos ecossistemas devido à presença da iluminação noturna [7], seja devido à intensidade luminosa elevada (em direções indesejáveis), seja devido à composição espectral da radiação, atualmente são considerados externalidades. A atratividade a insetos é outra externalidade relevante e que em alguns casos deverá ser considerada, pois em processo de substituição de fonte de luz primária é prudente verificar a ocorrência da atratividade diferencial da nova fonte à insetos, em particular aqueles que são nocivos ao ser humano. Numa comparação experimental realizada sobre a atratividade por fontes de luz artificial no setor residencial foi revelada atratividade reduzida para a fonte tipo WLEDi testada em relação a fontes convencionais [7]. Em outro experimento sobre a atratividade de insetos pela utilização de dois tipos de fonte de luz primária: LVSAP (HPS) e WLEDi, revelou resultado que está apresentado pela figura n.º 5.

**Figura n.º 5. (a), (b).** Espectro de duas fontes de luz primária consideradas: LVSAP (HPS) e WLEDi (à esquerda) e resultado de um experimento sobre atratividade a insetos (à direita) [8]



**Fonte:** Pawson *et al.*, 2014.

Para um tipo de LVSAP e WLEDi o experimento relatado indicou maior quantidade de captura para armadilha com WLEDi, em relação a outra fonte utilizada em experimento pareado, LVSAP (HPS), e sem preferência em relação a  $T_{cp}$  [8].

## AMOSTRAGENS DA TECNOLOGIA WLEDi EM LABORATÓRIO

Nesta seção estão considerados dois importantes tipos de equipamentos do laboratório SICADEE/IEE/USP e apresentado resultado de experimentos conduzidos a partir de ambos (esfera de Ulbricht e goniômetro). Diferentemente de fontes de luz cuja distribuição espacial é isotrópica, denominada tipo  $4\pi$ , como da LVSAP e MVM, em geral, o dispositivo WLEDi irradia em  $2\pi$ . Outro diferencial entre as fontes primárias é

quanto ao espectro (SPD), geralmente, em relação à fonte incandescente (referência), a distribuição espectral da energia visível emitida. Conforme for a resposta espectral do fotoelemento utilizado para amostrar a radiação luminosa poderá ser necessário a utilização de fator para a correção em relação ao espectro. O dispositivo tipo WLEDi que possui distribuição de intensidade luminosa geralmente restrita ao ângulo sólido de  $2\pi$ , ou meio hemisfério, conforme o equipamento (e montagem) a ser utilizado pode haver necessidade de correção adicional.

### **ESFERA INTEGRADORA (ULBRICHT)**

Em geral a esfera integradora (ver figura n.º 6) é equipamento provido de superfície interna na cor branca e acabamento difuso, isto destina-se a auxiliar em relação à distribuição do fluxo (uniformidade).

**Figura n.º 6.** Duas esferas integradoras (Ulbricht) do SICADEE/IEE/USP [9]



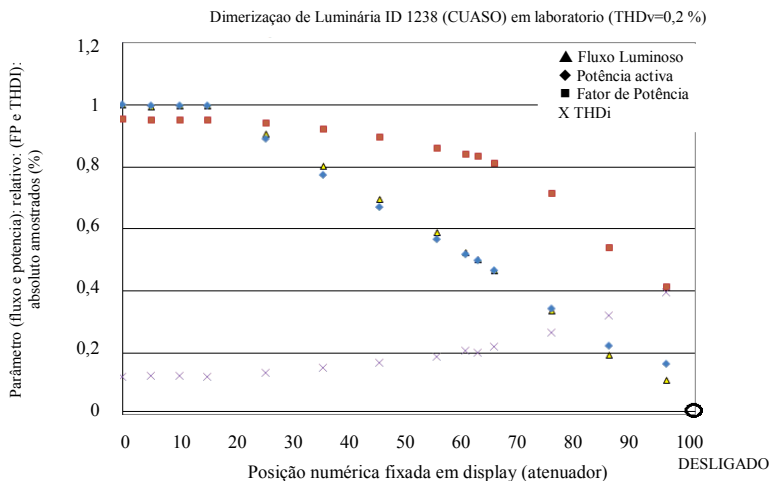
A presença de anteparo no interior da esfera (entre a fonte de luz e o sensor) deve-se a impedir luz direta sobre o sensor. A teoria sobre o funcionamento fixa ser a iluminância na superfície interna da esfera proporcional ao fluxo luminoso da fonte montada na região central. Uma necessidade que deve ser apontada, em relação as esferas integradoras, é quanto à manutenção ou repintura da parede interna. No caso do IEE/USP utiliza-se tinta a base em Sulfato de Bário tanto para aplicação na esfera maior cujo diâmetro nominal está na ordem de 2 m quanto na outra (diâmetro 1 m).

A necessidade de utilização de fator de correção devido à degradação da uni-formidade espacial de luz representa dificuldade adicional a ser superada na determinação do fluxo luminoso de dispositivo LED e com incerteza de determinação reduzida, a partir de esfera de Ulbricht.

### “DIMERIZAÇÃO” DE WLEDi EM ESFERA DE ULBRICHT

Na esfera com maior diâmetro (2 m) foi montada uma luminária provida de WLEDi, a qual foi caracterizada sob o regime de “dimerização” utilizando-se equipamento próprio e comunicação sem fio para comutação de estado. A luminária foi energizada a partir de fonte regulada com baixa distorção harmônica total de tensão elétrica (0,2 %) e sob valor nominal. Após a saída de luz (e potência) ter sido considerada estável (são os primeiros quatro registros, à esquerda, figura n.º 7) a saída de luz passou a ser reduzida em passos de 10 %, tendo sido amostrado o fluxo luminoso, a potência elétrica ativa, o fator de potência e a distorção harmônica total da corrente elétrica. Os dados amostrados estão apresentados pela figura n.º 7.

**Figura n.º 7.** Resultado de experimento sobre a “dimerização” de equipamento WLEDi instalado em esfera de Ulbricht (SICADEE/IEE/USP) Fonte [10]



A “dimerização” ou alteração da saída de luz passou a ocorrer para valor, na escala de ajuste (atenuador, abscissa), acima de 15 % e deixou de atuar abaixo do valor de 10 % do fluxo luminoso. Enquanto o fluxo luminoso ficava reduzido, o fator de potência também experimentou redução e o THDi aumentou. A condição na qual o fluxo luminoso fica reduzido a metade do valor inicial está relacionada ao valor de “62 %” (escala do equipamento de ajuste).

### **BRAÇO DE ROBÔ (GONIÔMETRO AUXILIADO POR COMPUTADOR)**

O equipamento (goniômetro manual) que foi agregado ao patrimônio e utilizado pelo IEE/USP, Seção Técnica de Fotometria (período: 1991-2014), inicialmente, para realizar amostragens com luminárias tipo tubular fluorescente 1,2 m, T8, está apresentado pela figura n.º 8 [11].

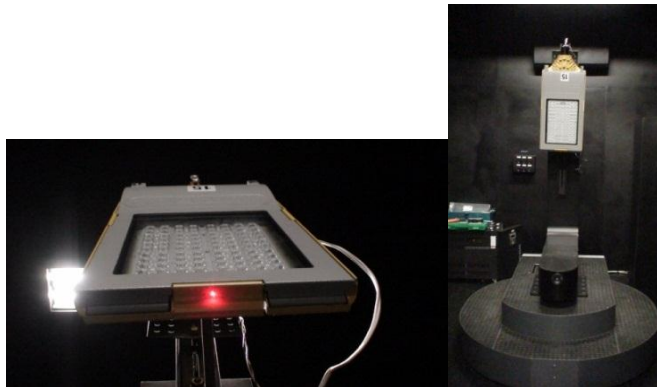
**Figura n.º 8.** Luminária WLEDi montada em goniômetro manual utilizado nas instalações do IEE/USP, na CUASO, até o ano 2014 [11]



O gônio-fotômetro manual (com dois graus de liberdade) apresentado recebeu várias melhorias, entre elas destaca-se fotoelemento em Silício e classe de exatidão definida pelo fabricante. Ainda que com limitação para a posição de montagem e peso da luminária, passos nos planos de amostragem, período de ensaio demasiado longo, o equipamento manual foi extensivamente utilizado. A partir do ano 2015 os trabalhos de levantamentos em fotometria, radiometria e colorimetria passaram a contar com o auxílio de goniômetro computadorizado/informatizado (LGS 1000) e software proprietário (Instrument Systems, SpecWin Pro). Duas imagens de luminária WLEDi

montada no goniômetro auxiliado por computador (informatizado) estão apresentadas pela figura n.º 9.

**Figura n.º 9.** Luminária montada no goniômetro informatizado ora utilizado nas instalações do SICADEE/IEE/USP, na CUASO, à esquerda é visível a marca de centro (plano vertical)



Em relação ao goniômetro manual e luminárias convencionais (LVSAP/MVM), o levantamento fotométrico auxiliado por computador de equipamento/luminária tipo WLEDi, geralmente, necessita período relativamente elevado apenas para a luminária ser considerado estabilizada (saída de luz e potência elétrica). Um levantamento típico foi realizado com WLEDi, a partir de 75 minutos desde a energização inicial, tendo sido obtido: 195,0 W; THDi 11,87; FP 0,9713; fluxo de 19,42 klm (para ângulo gama com passos de um grau), eficiência luminosa calculada de 99,6 lm/W; e fluxo de 19,49 klm (para ângulo gama com passos de cinco graus) e eficiência luminosa calculada 99,9 lm/W. O ângulo (C), sistema (C- $\gamma$ ), neste caso foi fixado para passos de dez graus [11]. A diferença relativa entre os dois valores de fluxo luminoso obtido não foi superior a 0,4 %. O resultado obtido entre diferentes laboratórios e mesmo corpo de prova, a partir da tecnologia SSL (WLEDi) e goniômetro auxiliado por computador (GAC) está apresentado na próxima seção.

## FLUXO E EFICIÊNCIA LUMINOSA

Para uma luminária WLEDi produzida em Israel foi obtida informação sobre a determinação da potência elétrica e eficiência luminosa, amostrados por outro



laboratório, valor 155,40 W e 140,55  $\text{lm/W}$  [11], tendo sido o fluxo calculado em 21,84  $\text{klm}$ . A luminária foi amostrada no IEE/USP, repetidamente, pelo auxílio do GAC, tendo sido obtido: a) potência elétrica na faixa de (156,5 a 157,3) W, devendo ser considerado o valor de 157 W como sendo o valor mais provável; e b) para a eficiência luminosa foi calculada a faixa de (137 a 140)  $\text{lm/W}$ , similarmente, considerar o valor mais provável como 138  $\text{lm/W}$ . A partir dos valores mais prováveis o fluxo foi calculado em 21,67  $\text{klm}$ . A diferença relativa entre os valores para a saída de luz (fluxo luminoso com correção) está estimada em 0,8 %. A luminária utilizada montada no goniômetro (posição inicial) está apresentada pela figura n.º 10.

**Figura n.º 10.** Luminária WLEDi montada no GAC, posição inicial (plano C =  $0^\circ$  -  $180^\circ$ ) vertical de simetria, data da realização: 22/Ago./2016 [11]



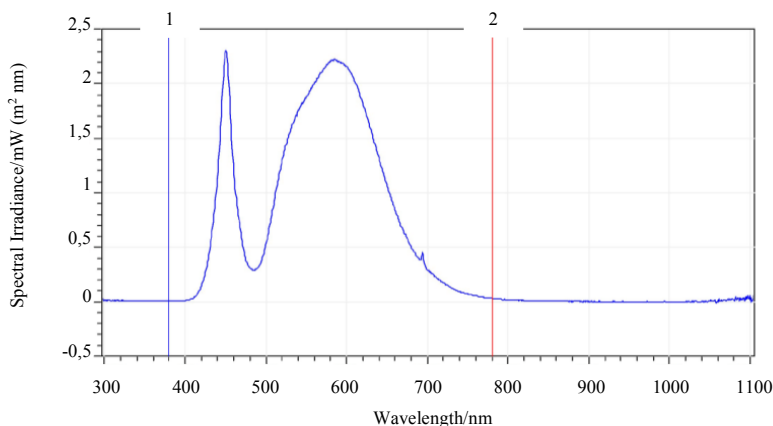
Outra facilidade é que a amostragem da irradiância espectral pode ser realizada sem a luminária ser removida do goniômetro LGS 1000, apenas pela substituição do sensor fotométrico pelo difusor acoplado a fibra óptica do espectrorradiômetro. Este outro arranjo denomina-se gônio-radiômetro devido o levantamento poder ser rea-lizado na direção de interesse e em base de comprimento de onda (na banda de 297nm a 1105nm). O espectro da luminária da figura n.º 10 foi obtido na direção do eixo óptico e está apresentado pela figura n.º 11 [11].

A  $T_{cp}$  da luminária WLEDi cuja emissão espectral foi amostrada conforme o conteúdo da Figura 11 está avaliado em 3762 K, a  $D_{UV}$  igual a  $1,16 \times 10^{-3}$  e o IRC 74,1 [11].

## DADOS DO WLEDi EM CAMPO

Nesta parte estão considerados resultados amostrados a partir da instalação WLEDi da CUASO após período de funcionamento, desde o início, estimado em 12 kh e informações coligidas sobre o projeto “LED nos bairros” da cidade de São Paulo (período 2015-2016).

**Figura n.º 11.** A irradiância espectral amostrada a partir da luminária WLEDi da Figura 10 [11]



## A LUZ BRANCA NA CUASO

Na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira (CUASO-USP), desde o ano 2013 a luz amarelada (LVSAP) foi removida das vias e da maioria de logradouros, houve retorno para a “luz branca”. A tecnologia emergente SSL (WLEDi) foi implantada na CUASO, em lugar dos sistemas existentes, nas vias, com lâmpada a vapor de sódio a alta pressão – LVSAP, multivapores metálicos – MVM e energizada, inicialmente, em Set./2013. A tecnologia a vapor de Sódio a alta pressão (250 W) era dominante na iluminação de exteriores na CUASO, com estimativa de aproximadamente 3500

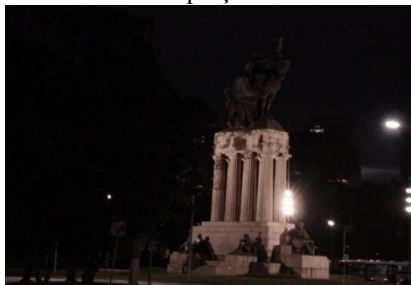
unidades (altura de montagem típica: 9 m). A luz branca (WLEDi) e a luz amarela (LVSAP), no pátio do IEE/USP, foram capturadas no ano 2012 conforme a figura n.º 11(a).

**Figura n.º 11(a).** A luz branca na CUASO (eletroposto no IEE/USP, ano 2012) [12]



A nova instalação na CUASO tinha previsto, inicialmente, a tecnologia MVM para a iluminação de destaque (monumentos e prédios) e para a parte viária três tipos principais de equipamentos SSL (WLEDi). Para os três tipos principais, aproximadamente 5500 unidades, foram estabelecidos requisitos para aceitação lastreados em norma técnica brasileira e dos EUA, dentre eles estão a potência elétrica nominal nas faixas de:  $(55 \pm 5)$  W;  $(105 \pm 5)$  W e  $(195 \pm 5)$  W e o limite mínimo de  $85 \text{ lm/W}$  [13]. A luz branca (WLEDi) foi utilizada também na iluminação de destaque na CUASO (ver figura n.º 11(b)).

**Figura n.º 11 (b).** A luz branca na CUASO: praça Ramos de Azevedo



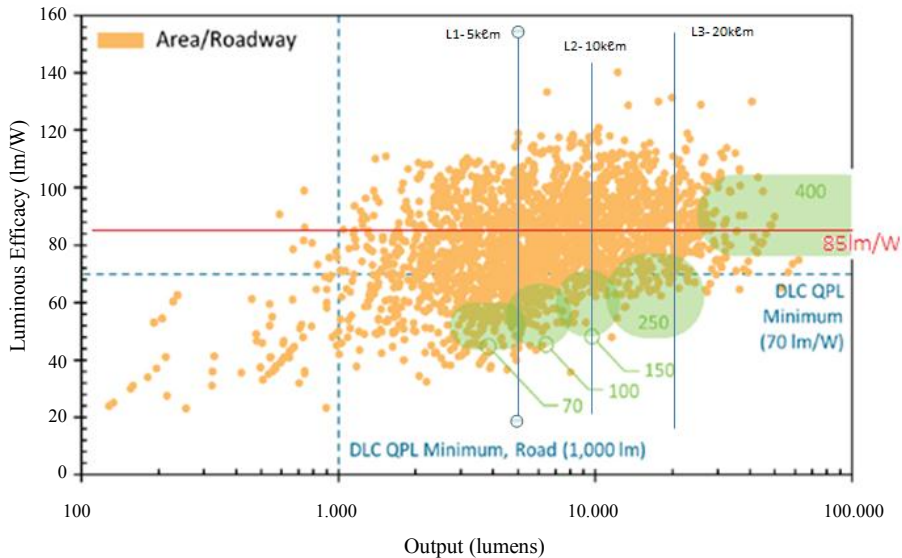
**Fonte:** Elvo C. Burini Junior, 2015.

A eficiência luminosa limite ( $85 \text{ lm/W}$ ) e as faixas de potência elétrica nominais definiram três patamares para o fluxo luminoso mínimo de  $L1= 5$  (4,7)  $\text{k lm}$ ;  $L2= 10$

(8,9) klm e  $L_3 = 20$  (16,6) klm. Nota: Os valores entre parêntesis foram obtidos para o centro da faixa definida pela potência elétrica.

Os valores de referência para os equipamentos WLEDi instalados na CUASO, 85 lm/W e os fluxos luminosos ( $L_1$  a  $L_3$ ) estão marcados sobre dados amostrados no mercado dos EUA, e estão apresentados pela figura n.º 12.

**Figura n.º 12.** Equipamentos WLEDi instalados na CUASO e amostras do mercado dos EUA [14]



**Fonte:** McCullough, J., feb. 2015.

Durante a implantação dos novos equipamentos para iluminação WLEDi na CUASO, pouca informação estava disponível sobre o desempenho desse tipo de instalação, ao longo do tempo, e entre as qualidades de interesse, naquela oportunidade destaque foi dado à manutenção do fluxo luminoso (saída de luz). Trata-se de parâmetro importante quando fontes de luz elétrica artificial são cotejadas. Uma redução precoce da saída de luz poderá impactar a visibilidade (segurança) do usuário e elevar custos. A qualidade do WLEDi não deve ficar centrada exclusivamente numa manutenção de fluxo luminoso com taxa reduzida. A alteração na cor da luz emitida, ao longo do tempo, poderá representar causa de falha, sendo importante a consideração deste parâmetro em

aplicações onde a aparência visual é relevante ou crítica. A figura n.º 13 apresenta situação na qual não é possível apreciar diferença cromática da luz capturada.

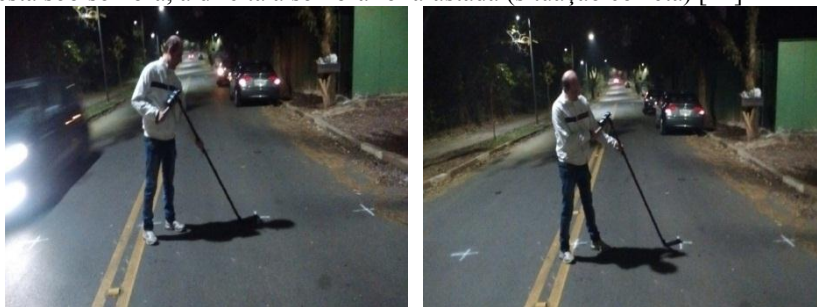
**Figura n.º 13.** CUASO-USP, Av. Prof. Luciano Gualberto, lado par (EPUSP)



**Fonte:** Elvio C. Burini Junior, 18/Abr./2015.

Na auditoria realizada em campo na CUASO, (08/Set./2016; 12,1 kh) uma maior quantidade de registros foi obtida por medições ao nível do pavimento, sendo os resultados apresentados a partir de cada malha de iluminâncias, cujos valores estão estratificados pelas linhas longitudinais a direção da via. Durante o procedimento das amostragens realizadas, em campo, está apontando a necessidade de ser observada a influência indesejável de sombra (ver figura n.º 14).

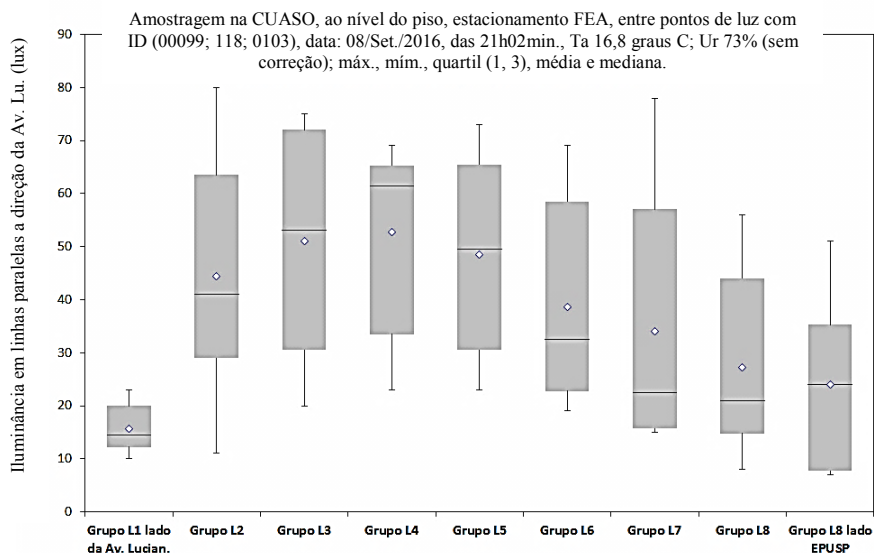
**Figura n.º 14.** Imagens realizadas na Rua do Lago, CUASO, em 08/Set./2016, à esquerda o sensor está sob sombra, à direita a sombra foi afastada (situação correta) [12]



Na campanha, em campo (a 12,1 kh), a iluminância foi amostrada em malha de pontos, cujo local poderá ser acessado, em campo, a partir do número de identificação (ID) dos pontos de luz/luminárias. Os valores de iluminância coletados na CUASO, estacionamento da Faculdade de Economia e Administração - FEA, na noite de

08/Set./2016 foram processados, estatisticamente, segundo conjunto definido por linhas longitudinais a direção da via, conforme cada local e estão apresentados pela figura n.º 15 [12, 15].

**Figura n.º 15.** Iluminância amostrada, em campo, no estacionamento da FEA/CUASO-USP, em 08/Set./2016



**Fonte:** [12], [15].

Na Rua do Matão, CUASO, existe um declive topográfico acentuado, tendo sido naquela amostra que ocorreu o menor valor médio (e para a mediana), as demais localidades apresentaram valor médio e a mediana acima de 30 lux [12,15].

## PROJETO PAULISTANO “LED NOS BAIRROS”

A prefeitura da cidade de São Paulo (PMSP), no período de 2015-2016, realizou licitação (PPP), oferecendo a concessão (por período de 24 anos) dos serviços de IP e a troca/substituição de todos os pontos de luz pela tecnologia LED [16]. Segundo o anuário estadual, ano 2014 [17], a cidade de São Paulo possuía um total de cerca de 4,72 milhões de consumidores de energia elétrica, sendo que o setor residencial é

tarifado atualmente no valor de R\$ 9,32/ligação-mês (valor alterado para R\$ 6,72/ligação-mês conforme [18]). A fração entre o total de consumidores e 560 mil pontos de luz conduz ao valor médio de 8,4 consumidor/ponto de luz. O valor da cobrança da tarifa de IP, setor residencial difere bastante entre municípios, a falta de uniformidade não possui justificativa conhecida. No litoral paulista o valor tarifado, setor residencial, em uma localidade ele é dimensionado por uma fração do consumo de energia e pode ser tão elevado quanto R\$ 34,93/ligação-mês [19]. No período de Dez./2015 a Mai./2016 ocorreu divulgação de informações e dados sobre a implantação de luminárias a WLEDi (projeto “LED nos bairros”) pela prefeitura da cidade de São Paulo. A Figura 16 apresenta tanto uma luminária para LVSAP (acima) quanto uma luminária que foi instalada durante o projeto “LED nos bairros” (abaixo, próxima a rede elétrica de baixa tensão (ver no detalhe).

**Figura n.º 16.** Luminária para LVSAP (acima) e um tipo de luminária instalada durante o projeto “LED nos bairros” (abaixo e no detalhe), em Maio/2016, cidade de São Paulo [12]



A metodologia adotada para a substituição (do inglês, retrofit) constituiu da retirada de luminária, geralmente, LVSAP juntamente com equipamento auxiliar e braço. A luminária tipo WLEDi que já se encontrava montada em novo braço foi fixada e a ligação elétrica realizada, numa ação relativamente expedita. Alguns números divulgados sobre o projeto “LED nos bairros”, cidade de São Paulo, estão apresentados pela tabela n.º 1.

**Tabela n.º 1.** Projeto paulistano “LED nos bairros”: custo médio por ponto de luz LED instalado

Bairro (data ref.)	valor	pontos	R\$/pto.
	(R\$ x10 <sup>6</sup> )		(x10 <sup>3</sup> )
Heliópolis (Dez./15)	3,0	1,277	2349,26
Jd. Monte Azul (Jan./16)	2,478	0,546	4538,46
Sapopemba (Abr./16)	40,1	11,3	3548,67
Pq. E. rad. (Mar./16)	0,9	0,134	6716,42
Beco Bat. (Mai./16)	0,065	0,013	4615,38
R. Tavares (Mai./16)	18,6	5,100	3647,06
Jd. Angela (Abr./16)	38,9	5,9	6593,22
fase um (Mai./16)	200	55	3636,36
Cid. Tirad. (Mai./16)	29,5	7,719	3821,74
Notas: - altura de montagem diferente em relação aos bairros,			
M. Pinheiros (Dez./15)	24,7	3,409	7245,53
em Jan./2016, o parque de pontos de luz da cidade de São Paulo continha 618 mil lâmpadas, sendo 20 mil a LED, (9.074 lâmp. Foram instaladas nos 2 últimos anos).			

**Fonte:** <http://www.capital.sp.gov.br/portal/noticia/10932#ad-image-0>.

Na tabela n.º 1, quando não são considerados os dois valores mais elevados por tratar-se de aplicação na marginal Pinheiros (altura de montagem elevada) e num parque, cujas características podem divergir das instalações no setor residencial, é possível identificar para o custo médio por ponto a faixa de R\$ (2,35 a 6,59) mil. Uma análise aprofundada, caso a caso, não foi realizada, porém, tomando o caso de Sapopemba (até Abr./16) cujo valor empenhado foi 40,1 milhões (investimento WLEDi), a energia elétrica (gasto mensal anterior) era cerca de R\$ 225 mil e o valor previsto após a troca por WLEDi seria R\$ 162 mil, indicando uma diferença de R\$ 63 mil (“...economia de 28 %”). Ao realizar cálculo simples sobre o período para o retorno do investimento (investimento/economia anual) verifica-se que para ocorrer o retorno do investimento, mantidas as condições atuais serão necessários 53 anos! “Algo pode estar errado”? Outro caso tomado ao acaso, para o Jd. Ângela foi divulgado aporte de 38,9 milhões (investimento WLEDi), sendo “a potência instalada (tradicional) 2.424.548 W e que deveria passar com WLEDi para 927.475 W” (cerca de 157 W/ponto), o dispêndio com a energia elétrica (gasto mensal) cerca de R\$ 323 mil, gasto de energia previsto após implantação do WLEDi de R\$ 123,5 mil (diferença de R\$ 199,5 mil), “...uma economia anual R\$ 2394 mil”. Neste caso é possível constatar redução significativa no período do retorno simples, para ocorrer o retorno do investimento, mantidos os parâmetros utilizados estima-se necessidade de 16,2 anos. Caso o equipamento WLEDi instalado



possa ser mantido durante 50 mil horas (11,4 anos), haverá necessidade de ao menos uma substituição antes que o investimento possa estar amortizado. Não é usual a aceitação de períodos de retorno mais elevados que 2 a 4 anos, conforme o setor/finalidade do projeto. Considerando a potência nominal de 150 W para um ponto de IP típico/médio, utilização diária média de 12 horas e a tarifa “bruta” de R\$ 0,59/kWh [18] foi possível estimar custo de energia no valor de R\$ 32,47/ponto-mês e que a contribuição de cada 3,5 (4,83 no caso da tarifa ser menor) consumidores responderão por custear a energia da IP (um ponto). A diferença entre o valor de 8,4 consumidor/ponto de luz (ver dado apresentado acima) e aqueles que respondem pela fração de energia conduz a estimativa de que 4,9 consumidores (3,6 no caso da tarifa ser menor) estariam custeando outros encargos como manutenção no valor (antigo) de R\$ 45,89/ponto-mês. Assim é possível estimar o valor de R\$ 78,36/pto-mês (considerada média ou valor típico de potência nominal: 150 W/ponto).

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O conteúdo do presente texto constitui a primeira versão revisada a partir do conteúdo da apresentação realizada durante o XXI Seminário internacional de energia CAE/AUGM[12]. Aspectos teóricos sobre a produção de luz por fonte artificial foram considerados, como depreciação luminosa, e também externalidades ambientais: poluição luminosa e resultado de experimentos sobre atratividade de insetos pela utilização de diferentes tipos de fonte de luz primária, assim como as principais facilidades laboratoriais disponíveis no IEE/USP (esferas de Ulbricht e goniômetro auxiliado por computador). Foram apresentados resultados de medições e determinações sobre a tecnologia WLEDi. A diferença entre os valores para a saída de luz (fluxo luminoso, corrigido) foi cotejado com resultado obtido em outro laboratório paulista, ambos acreditado junto ao INMETRO, sendo que a diferença foi avaliada em 0,8 %.

A instalação WLEDi da CUASO está considerada, a partir de resultados de medições de iluminância, em campo, após transcorridos 12,1 kh de início de funcionamento (em Set./2013). Dados coligidos sobre o projeto “LED nos bairros” foram apresentados e discutidos. A PPP para a IP paulistana está paralisada a partir de argumentos bastante

simples (Tribunal de Contas do Município), a não consideração/subtração dos pontos WLEDi já instalados, 55 mil pontos foram instalados por R\$ 200 milhões (fase I, ver tab. N.º 1). Outro argumento é a possibilidade, inevitável, do avanço tecnológico ocorrer e o parque tornar-se obsoleto. Existe previsão para existir no mercado já no ano 2020 luminárias com mais de 180 lm/W. Caso a PPP houvesse sido implantada e conforme estimativas, poderia ter representado a necessidade de desembolso da ordem de R\$ 544,64 por ponto-ano pelo vencedor do certame enquanto que o mesmo poderia arrecadar com base na tarifa residencial, cerca de 1,7 vezes o valor investido (8,4 consumidor/ponto de luz). O custo médio de R\$ 3636/ponto, projeto “LED nos bairros”, fase I se for estendido para 598 mil pontos de luz conduzirá a dispêndio para implantação da ordem de 30,2 %, em relação aos 7,2 bilhões da PPP paulistana [20], valor percentual que difere da estimativa feita para a condição atual de dispêndios com manutenção, gestão e outros (sem a energia) de 58,6 % (a diferença: 28,4 %). O montante avaliado para a energia/por ponto foi estimado em 41,4 %. Sem considerar a provável redução no valor da conta de energia elétrica devido a troca pela tecnologia WLEDi, considerada na troca a substituição por potência inferior e troca ponto por ponto (retrofit) a diferença ou sobre preço estimado da PPP [20] teria sido superior a 2 bilhões, valor este equivalente ao custo estimado para a substituição do parque como um todo (598 mil pontos).

Focar apenas na economia do dispêndio do município por ponto, ou seja, uma possível redução da conta de energia é uma visão bastante simplista e equivocada.

O custo total do empreendimento deve ser explicitado e estar transparente para a sociedade, ela é que está sendo onerada.

Recomenda-se maior disseminação e ampliação do número de experimentos que estão sendo realizados a partir do WLEDi, com atenção ao desempenho em relação às condições do ambiente; aos parâmetros elétricos, tanto do equipamento quanto da rede elétrica durante as avaliações e também a saúde.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Backlund, S. y Thollander P. (2015). «Impact after three years of the Swedish energy audit program», *Energy*, v.82(C), pp. 54–60,  
Disponível em <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214014480>.
- [2] Manaus é destaque nacional como cidade que mais investe em iluminação a LED, AM, Brasil, 28/Nov./2016.  
Disponível em: <http://www.emtempo.com.br/manaus-e-destaque-nacional-como-cidade-que-mais-investe-em-iluminacao-a-led/>.
- [3] Burini Junior, E. C. *et al.* (2016). *Equipamentos para iluminação pública: novas tecnologias e tendencias*. 15ª edição da Expolux - Simpolux, Expo-center Norte, SP, Capital.
- [4] Kinzey, B. (2015). Remaining Barriers to LED. Street Lighting DOE Technology Development Workshop, USA, November 17.
- [5] Lall, P. *et al.* (2016). *A comparison of temperature and humidity effects on phosphor converted LED package and the prediction of remaining useful life with state estimation*. 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), pp. 207-217, Las Vegas, NV, USA, 2016.
- [6] Addison, D. *et al.* (2015). «Nighttime Lights Revisited: The Use of Nighttime Lights Data as a Proxy for Economic Variables». *Policy Research Working Paper 7496*. Macroeconomics and Fiscal Management Global Practice Group, World Bank, Washington, DC, November,  
Disponível em <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/23460>.
- [7] Wakefield, A. *et al.* (2016). «Experimentally comparing the attractiveness of domestic lights to insects: Do LEDs attract fewer insects than conventional light types?», *Ecology and Evolution*, 00:1-9 v. 6, n. 22, pp. 8028–8036.
- [8] Pawson, S. M. *et al.* (2014). «LED lighting increases the ecological impact of light pollution irrespective of color temperature». *Ecological Applications*, v. 24, n. 7, pp. 1561-1568.

- [9] Burini Junior, E. C. *et al.* (2015). «Tecnologia SSL (WLEDi) em campi da Universidade de São Paulo». *Anais do Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica - CLAGTEE 2015*, 7 pp., 08 - 11 November, São José dos Campos, Brazil.
- [10] Burini Junior, E. C. *et al.* (2016). Apresentação oral realizada na 2ª Reunião do projeto Sistemas para iluminação viária WLEDi na USP, PUSP-C, PUERHESEF, IEE-USP, Prédio E, CUASO, SP, Capital, Brasil, 40 pp.
- [11] Burini Junior, E. C. *et al.* (2016). *Novos Referenciais e Procedimentos para Avaliação de Luz no IEE/USP: Radiação Visível*. Anais da XIII Conferência Panamericana de Iluminação - LUX AMÉRICA 2016, pp. 371-378, La Serena, Chile, 8 pp.
- [12] Burini Junior, E. C. (2016). *Iluminação SSL (LEDi) em São Paulo, Brasil*. Apresentação oral realizada no XXI Seminário Internacional de Energia CAE/AUGM – São Pedro (São Paulo - Brasil), 25/Outubro.
- [13] Burini Junior, E. C. *et al.* (2014). *Avaliação em sistemas para iluminação viária na cidade universitária Armando de Salles Oliveira*. Anais da XII Conferência Panamericana de Iluminação - LUX AMÉRICA 2014, Juiz de Fora, Brasil, 07 a 10/Dez./2014, pp. 44-48,
- [14] Burini Junior, E. C. (2016). *Determinações de fluxo luminoso em esfera integradora e goniofotômetro: a lâmpada a vapor de sódio a alta pressão e o LEDi*. Apresentação oral realizada no Ilumexpo, São Paulo, Brasil, 13 a 15 de Junho.
- [15] Burini Junior, E. C. *et al.* (2016). *A Iluminação WLEDi na CUASO - USP*. Anais da XIII Conferência Panamericana de Iluminação - LUX AMÉRICA 2016, pp. 365-370, La Serena, Chile, 20 a 25/Nov.
- [16] Consulta Pública do Edital da PPP da Iluminação – Aviso de consulta pública - 2013-0.270.788-0.  
Disponível em [http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/inovacao/participacao\\_social/consultas\\_publicas/index.php?p=182594](http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/inovacao/participacao_social/consultas_publicas/index.php?p=182594).
- [17] Anuário Estatístico de Energéticos por Município no estado de São Paulo - ano base 2014.  
Disponível em <http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/722.pdf>.

- [18] AES Eletropaulo, conta de energia elétrica (NF, Capital, SP, Brasil), Maio/2017.
- [19] ELEKTRO, conta de energia elétrica (NF, SP, Brasil), Out./2016.
- [20] Bergamin Junior, G. (2016). *Licitação de PPP da iluminação pública opõe Doria e Haddad em SP*. 03/Dez.  
Disponível em <http://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2016/12/1838084-licitacao-de-ppp-da-iluminacao-publica-opoe-doria-e-haddad-em-sp.shtml>.

## **Elvo Calixto Burini Junior**

É graduado pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP (1984), local onde concluiu o curso de especialização em Mecânica Fina (1985). Recebeu o grau de Mestre (1993) e Doutor em Energia pela USP (2002). A experiência profissional inclui atividades de engenharia no setor privado e público, setor de normalização técnica nacional e internacional; ensino e formação de pessoal. Iluminação contemporânea está incluída entre os principais campos de seu interesse. Atualmente é coordenador das atividades de ensino e pesquisa no SICADEE/ IEE/USP.

# CONVERSIÓN ELECTRÓNICA DE POTENCIA PARA LA GESTIÓN EFICIENTE DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Héctor G. Chiacchiarini<sup>1,2</sup>, Jorge A. Solsona<sup>1,2</sup>,  
Alejandro R. Oliva<sup>1,2</sup>, Claudio A. Busada<sup>1,2</sup>

## RESUMEN

La gestión eficiente de la energía eléctrica requiere de tecnología electrónica específica que permita la conversión entre distintos niveles y formas de onda de tensión. Se cuenta ya con muchos años de desarrollo y experiencia internacional en la aplicación de electrónica de potencia, sin embargo las nuevas tecnologías disponibles para llaves semiconductoras, y las crecientes capacidades de cómputo disponibles en hardware de bajo costo, hacen posible el desarrollo e implementación de estrategias novedosas de conversión de la energía, de procesamiento de datos y de control, que junto con el desarrollo de nuevas topologías, técnicas de modulación y comunicaciones permiten el

---

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

<sup>2</sup> Instituto de Inv. en Ing. Eléctrica “Alfredo Desages” (IIIE), Universidad Nacional del Sur (UNS) - CONICET, Bahía Blanca, Argentina.

Los investigadores son miembros del grupo GISEE.

desarrollo de redes eléctricas inteligentes, sistemas de transporte eléctrico, y sistemas de generación eléctrica en base a energías renovables.

**Palabras clave:** Electrónica de potencia - Convertidores electrónicos - Energía.

## INTRODUCCIÓN

Los convertidores electrónicos de potencia están tomando un rol fundamental para habilitar las tecnologías asociadas a los nuevos paradigmas de generación, distribución y uso de la energía eléctrica. Por caso, hoy en día estamos siendo testigos del cambio de paradigma en el diseño sobre cómo la energía eléctrica es generada y consumida. Mientras que el siglo XX estuvo dominado por el diseño de sistemas de transmisión y distribución basados en el uso de corriente alterna, preferiblemente empleando grandes plantas generadoras, alejadas de los centros de consumo y empleando largas líneas de transmisión, está claro que en las dos últimas décadas la generación distribuida ha ganado un espacio mucho mayor que el que tenía y lo que es más importante, existe una tendencia a incrementarla en los próximos años, siendo uno de los pilares de la “smart grid”. Este nuevo modelo recibe continuamente incentivos en los países industrializados y se desarrollan nuevas tecnologías para mejorarla [1].

En el siglo pasado, el modelo dominante en la transmisión y distribución fue emplear una tensión de alterna con forma de onda sinusoidal, donde los transformadores permiten cambiar los niveles de amplitud de la onda senoidal, pero no cambian la forma de onda. Sin embargo, en la actualidad, en el nuevo escenario de conversión de energía eléctrica es necesario cambiar no solamente los niveles de corriente y tensión, sino también la forma de onda misma. Esto se debe a varios motivos, por ejemplo, algunos relacionados con la eficiencia y/o con los costos. Un factor, no menor, es la penetración de tecnologías emergentes para la generación, basadas en generadores de tensión continua, como son las celdas fotovoltaicas y las celdas de combustible.

En línea con la misma problemática, asistimos a cambios en el sistema de transporte, donde los vehículos de tracción eléctrica y/o híbridos están gradualmente abarcando distintos segmentos del mercado, trayendo consigo nuevas necesidades tecnológicas



(almacenadores de energía, sistemas de recarga, sistemas para administrar el recurso energético y para asociarlo con la red eléctrica, etc.)

También se observa un notable incremento de la popularidad de dispositivos electrónicos portátiles que dependen de baterías, en los cuales el desafío tecnológico es minimizar el consumo energético y maximizar la vida útil y duración de carga del almacenador de energía.

En este nuevo escenario, aparece la necesidad de contar con convertidores electrónicos de tensión que realizan la función de la conversión de la forma de onda (ver [2] y las referencias en ese trabajo). Su aplicación en diferentes campos se puede ver en [3], [4], [5] y [6] y referencias en esos trabajos. Cada vez es más frecuente encontrar topologías de generación distribuida donde los mencionados convertidores juegan un rol preponderante a la hora de conectar generadores, almacenadores de energía y cargas.

Con el propósito de reducir costos y mejorar el desempeño, es necesario trabajar, fundamentalmente, cuatro aspectos del convertidor, a saber: la topología, la metodología de modulación, la estrategia de control y obviamente, la electrónica con que se implementa todo esto.

Un tema que ha surgido recientemente, es el análisis de la estabilidad y el control de los convertidores cuando alimentan una carga de potencia constante. Esto ocurre, por ejemplo, en aplicaciones de transporte [7,8,9], en sistemas de integración de generadores eólicos y fotovoltaicos [10,11], en nano-redes de edificios y en centros de datos [12] y en sistemas de distribución en corriente continua (CC) [13].

Cuando los convertidores alimentan cargas de potencia constante, presentan un comportamiento de resistencia negativa. Este comportamiento complica la situación desde el punto de vista del control, ya que aunque los convertidores son sistemas inherentemente no lineales, hablando en sentido amplio, se puede decir que la carga de potencia constante incrementa el grado de alinealidad [14].

En los años recientes, varios investigadores han propuesto diferentes estrategias de control con el propósito de obtener un alto desempeño de los convertidores CC-CC cuando los mismos alimentan una carga de potencia constante. Es posible encontrar artículos donde se ha aplicado amortiguamiento pasivo [15], pseudolinealización [16], interconexión y asignación de amortiguamiento [17], control por modo deslizante [18]

y [19], ajuste de ganancia usando control difuso [20], amortiguamiento activo [21] y planitud [22].

En estos trabajos el problema de hacer una compensación feedforward para mejorar el desempeño no ha sido considerado o ha sido considerado parcialmente. En particular, en los mismos, la fuente de alimentación se considera constante (equivalente a resistencia interna nula) y esta suposición puede deteriorar el desempeño en varios casos donde la fuente primaria varía el valor de la tensión, en función de la corriente entregada. Además, la mayoría de ellos usa como filtro de salida un filtro LC, a pesar de que es posible disminuir el tamaño de los inductores, manteniendo la especificación del ripple, y consecuentemente el costo, si se emplea un filtro LCL en la etapa de salida. Sin embargo, el empleo de este filtro da aparición al problema de la presencia de resonancias a dadas frecuencias, siendo conveniente amortiguar las mismas para preservar el buen funcionamiento del equipo. Existen, principalmente, dos formas de amortiguamiento, la pasiva y la activa. La pasiva se logra empleando métodos disipativos, por ese motivo la mayoría de los investigadores, en pos de mejorar el rendimiento, prefieren usar la activa, que utiliza técnicas de realimentación.

## **PERSPECTIVA**

El estado actual del consumo y la generación de energía ha pasado a ser un problema importante en un mundo en continuo desarrollo. En este marco, el diseño de aparatos y equipos que permitan optimizar el proceso de conversión/transformación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica, es de vital importancia para el desarrollo humano. Uno de los principales objetivos de este grupo es investigar posibles soluciones al problema del manejo de la energía, empleando tecnología electrónica, con el propósito de mejorar el rendimiento y reducir el costo de convertidores electrónicos de potencia que son empleados en sistemas de conversión eléctrica, procurando obtener un uso eficiente de la energía.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El propósito es diseñar convertidores electrónicos de potencia que sirvan para el manejo eficiente de la energía eléctrica. Por casos, la integración y/o generación aislada de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables no convencionales (por ejemplo, fotovoltaica, eólica y celdas de combustibles), aplicaciones móviles o autónomas (por ejemplo, dispositivos electrónicos portátiles, automóviles eléctricos y/o híbridos), y otros. Se busca proponer una mejora en el desempeño de los mismos, a través del empleo de nuevas topologías que se adapten a cada caso específico y los controladores asociados a estas topologías. Se busca formar recursos humanos, prestando especial atención a la formación a nivel de grado, maestría y doctorado; fomentar la interrelación con el medio productivo, en vista a hacer viable la futura transferencia de conocimientos; y mantener e incrementar la vinculación y colaboración con otros grupos en temas similares o complementarios.

## **PRINCIPALES CONTRIBUCIONES AL TEMA POR PARTE DEL GRUPO DE INVESTIGACION**

El grupo de investigadores en los últimos años ha orientado sus trabajos a analizar topologías de diferentes tipos de convertidores, ya sea para su uso en sistemas trifásicos, monofásicos, para aplicaciones de inyección a red de energías renovables no convencionales y el uso en elementos almacenadores de energía en volantes de inercia. Además, han trabajado en el empleo de nuevas técnicas de modulación y en la miniaturización de la electrónica de potencia. Han desarrollado estrategias para controlar convertidores multinivel y también microinversores. Los principales resultados de estas investigaciones han sido difundidas a nivel de importantes revistas y congresos de la especialidad (ver [23]-[49] para los trabajos más recientes y los CV de los investigadores para más datos).

El grupo ha realizado varios aportes en la temática bajo estudio. En particular, en trabajos anteriores puede verse como se han aplicado técnicas de control no lineal con compensación feedforward que incluyen sensores virtuales a convertidores CC-CC del

tipo reductor y al inversor fuente de tensión. En estos casos se ha considerado la estimación de distintos tipos de carga, ya sea de corriente constante o de potencia constante. Sin embargo, en la mayoría de ellos la fuente primaria ha sido considerada constante, lo que se diría en primera aproximación, es que la resistencia interna ha sido despreciada.

Se ha trabajado sobre técnicas de modulación para aplicación en convertidores, principalmente la modulación “Click”). Además, se ha analizado la integración de componentes de los filtros y la posibilidad de aplicación a convertidores CC-CC.

Sin perjuicio de que a partir de las investigaciones realizadas surjan nuevos e interesantes puntos que merezcan ser estudiados, creemos que algunos de los interrogantes que surgen, considerando el estado actual del arte, y sobre los que se trabaja, son:

- Existen algunos casos de aplicación donde la tensión primaria no se mantiene constante (por ejemplo, celdas de combustibles) y se piensa que es posible mejorar el desempeño del sistema general a partir de compensar de manera feedforward las variaciones que se producen a partir de diferentes estados de carga. De este modo, se podría lograr un esquema de generación que incluya la adaptación de nivel de CC y luego, si es necesario, obtener tensión alterna a través de un inversor.
- Incluir etapas de salida LCL que soporten estrategias de amortiguamiento activo y que alimenten cargas de potencia constante, buscando reducir el tamaño de los elementos pasivos y analizando su integración cuando se trate de convertidores de baja potencia.
- Reducción del tamaño y mejora de la eficiencia de la electrónica de potencia dedicada a este tipo de circuitos.

## **RESULTADOS PRELIMINARES**

Ya se han obtenido los primeros resultados planteando el control de un convertidor Boost con filtro de salida LC, empleando una ley de control basada en control por modo

deslizante y la compensación feedforward de la carga, considerando la misma como una fuente de corriente, y usando una estima de la misma. Se ha considerado una fuente de tensión de entrada variable. El desempeño del esquema se encuentra testado a nivel simulación.

También se ha reformulado el esquema que surge de usar un filtro LCL a la salida de un convertidor cuando se alimenta una carga de potencia constante. Actualmente se está desarrollando la estrategia de control para la misma.

Se viene trabajando en técnicas circuitales para incrementar la atenuación de filtros de potencia LC. Hasta ahora se ha podido incrementar en un 50 % la atenuación que se consigue con un volumen determinado de filtro. Hay perspectivas de poder conseguir hasta un 400 % más de atenuación.

Varias fuentes alternativas de energía, como las fotovoltaicas y celdas de combustible, requieren que el circuito electrónico que extrae la máxima potencia disponible de ellas posea una curva de eficiencia plana para un amplio rango de variación de la tensión de entrada. Se está trabajando en técnicas de diseño de convertidores tipo flyback obteniendo una eficiencia por encima del 90 % para un rango de variación de la tensión de entrada que va del 20 % al 100 %.

Se está trabajando sobre el problema de maximización de potencia extraída de paneles solares bajo condiciones de sombreado parcial, utilizando convertidores tipo Buck-boost y/o Cuk para balancear las corrientes del arreglo serie de celdas solares, buscando que cada una trabaje en su punto de máxima potencia.

## **FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS**

El grupo forma estudiantes de posgrado inscriptos en los programas específicos de la UNS guiándolo para el desarrollo de investigaciones conducentes a publicaciones y a la elaboración de sus tesis respectivas. Para ello se utilizan los mecanismos habituales que ofrecen CONICET, CIC-PBA, UNS y otras instituciones con programas de becas de posgrado, u otras fuentes de financiamiento existentes que permiten sustentar la actividad de estudio de los tesisistas. En cuanto a la formación de estudiantes de grado, los integrantes del grupo son profesores en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y

de Computadoras de la UNS en cátedras de las carreras de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Electricista, y en cátedras de Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecánica como servicio al Departamento de Ingeniería.

## **FINANCIAMIENTO DISPONIBLE**

El grupo recibe financiamiento de diversas fuentes. En principio son fondos concursables ofrecidos como subsidios para investigación, para cuya asignación las diversas instituciones abren convocatorias específicas destinadas a la recepción de propuestas de proyectos. La Universidad Nacional del Sur ofrece financiamiento a través de sus PGI (Proyectos para grupos de investigación). El CONICET ofrece financiamiento a través de sus PIP (Proyectos de investigación Plurianuales). Actualmente el grupo es responsable del proyecto PGI/K079 de la UNS y del PIP 112 201101 00671 de CONICET, e integra el grupo responsable de diversos otros proyectos.

El grupo realiza en general actividades de vinculación y transferencia. En los últimos años, las actividades se han enmarcado, principalmente, en tareas desarrolladas dentro de un Proyecto FONARSEC de la ANPCYT que lleva el nombre de Tecnología Electrónica de Alta Complejidad (TEAC), declarado como PDTS 62 por CONICET. Dentro del mismo se realizan proyectos específicos propuestos por empresas o en relación a posibles empresas adoptantes vinculadas al Consorcio Asociativo Público Privado “Tecnópolis del Sur”.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Directorate General for Research Sustainable Energy Systems (2006). “European technology platform smartgrids vision and strategy for europe’s electricity networks of the future”, *RTD Info*.

- [2] Boroyevich, D.; Cvetkovi, I.; Burgos, R. y Dong, D. (2013). “Intergrid: A future electronic energy network?”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, n.º 3, pp. 127-138, Sep.
- [3] Pahlevaninezhad, M.; Hamza, D. y Jain, P. (2014). “An improved layout strategy for common-mode emi suppression applicable to high-frequency planar transformers in high-power dc/dc converters used for electric vehicles”, *IEEE Trans. on Power Electr.*, vol. 29, no. 3, pp. 1211-1228, March.
- [4] Yilmaz, M. y Krein, P. (2013). “Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utilities interfaces”, *IEEE Trans. on Pow. Electr.*, vol. 28, n.º 12, pp. 5673-5689.
- [5] Silva-Ortigoza, R.; Hernandez-Guzman, V.; Antonio-Cruz, M. y Munoz-Carrillo, D. (2014). “Dc/dc buck power converter as a smooth starter for a dc motor based on a hierarchical control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-1.
- [6] Sebastian, J.; Fernandez-Miaja, P.; Ortega-Gonzalez, F.; Patino, M. y Rodriguez, M. (2014). “Design of a two-phase buck converter with fourth order output filter for envelope amplifiers of limited bandwidth”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n.º 11, pp. 5933-5948, nov.
- [7] Smithson, S. C. y Williamson, S. S. (2012). “Constant power loads in more electric vehicles-an overview”, in *Proceedings of the 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (IECON2012)*, pp. 2914-2922.
- [8] Rahimi, A. M. y Emadi, A. (2009). “An analytical investigation of dc/dc power electronic converters with constant power loads in vehicular power systems”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 6, Jul., pp. 2689-2702.
- [9] Rivetta, C. H.; Emadi, A.; Williamson, G. A.; Jayabalan, R. y Fahimi, B. (2006). “Analysis and control of a buck dc-dc converter operating with constant power load in sea and undersea vehicles,” *IEEE Trans. on Industry Appl.*, vol. 42, n.º 2, pp. 559-572, Mar/Apr.
- [10] Kai Strunz, E. A. y Huu, D. N. (2014). “Dc microgrid for wind and solar power integration”, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 2, n.º 1, pp. 115-126, Mar.

- [11] Kwasinski, A. y Onwuchekwa, C. N. (2011). “Dynamic behavior and stabilization of dc microgrids with instantaneous constant-power loads”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, n.º 3, pp. 822-834, Mar.
- [12] Becker, D. J. y Sonnenberg, B. (2011). “Dc microgrids in buildings and data centers”, in *Proc. of the 2011 IEEE 33rd Int. Telecommunications Energy Conference* (INTELEC).
- [13] Wang, J. y Howe, D. (2008). “A power shaping stabilizing control strategy for dc power systems with constant power loads”, *IEEE Trans. on Pow. Electron.*, vol. 23, n.º 6, pp. 2982-2989.
- [14] Emadi, A.; Khaligh, A.; Rivetta, C. H. y Williamson, G. A. (2006). “Constant power loads and negative impedance instability in automotive systems: Definition, modeling, stability, and control of power electronic converters and motor drives”, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 55, n.º 4, Jul., pp. 1112-1125.
- [15] Cespedes, M.; Xing, L. y Sun, J. (2011). “Constant-power load system stabilization by passive damping”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 26, n.º 7, July, pp. 1832-1836.
- [16] Ciezki, J. G. y Ashton, R. W. (1998). “The design of stabilizing controls for shipboard dc-to-dc buck choppers using feedback linearization techniques”, in *Proceedings of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference* (PESC1998), pp. 335-341.
- [17] Zeng, J.; Zhang, Z. y Qiao, W. (2013). “An interconnection and damping assignment passivity-based controller for a dc-dc boost converter with a constant power load”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IEEE Early Access Articles.
- [18] Zhao, Y.; Qiao, W. y Ha, D. (2014). “A sliding-mode duty-ratio controller for dc/dc buck converters with constant power loads”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, n.º 2, Mar/Apr., pp. 1448-1458,
- [19] Tahim, A. P. N.; Pagano, D. J. y Ponce, E. (2012). “Nonlinear control of dc-dc bidirectional converters in stand-alone dc microgrids,” in *Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control*, Hawaii, USA, Dec., pp. 3068-3073.



- [20] Kakigano, H.; Miura, Y. e Ise, T. (2013). “Distribution voltage control for dc microgrids using fuzzy control and gain-scheduling technique,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n.º 5, May., pp. 2246-2258.
- [21] Rahimi, A. M. y Emadi, A. (2009). “Active damping in dc/dc power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, n.º 5, May., pp. 1428-1439.
- [22] Gensior, A.; Woywode, O.; Rudolph, J. y Guldner (2006). “On differential flatness, trajectory planning, observers, and stabilization for dc-dc converters”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 53, n.º 9, Sep., pp. 2000-2010.
- [23] Gómez Jorge, S.; Busada, C. y Solsona, J. (2013). “Frequency adaptive current controller for three phase grid connected converters”, en *IEEE Trans. on Ind Electr.*, vol. 60, n.º 10, Oct., pp.4169-4177.
- [24] León, A. E.; Solsona, J. A.; Busada, C.; Chiacchiarini, H. y Valla, M. I. (2009). “High-performance control of a three-phase voltage-source converter including feedforward compensation of the estimated load current”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, August, pp. 2000-2008.
- [25] Amodeo, S. J.; Chiacchiarini, H. G.; Solsona, J. A. y Busada, C. A. (2009). “High-performance sensorless nonlinear power control of a flywheel energy storage system”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, July, pp. 1722-1729.
- [26] Amodeo, S.; Chiacchiarini, H. y Oliva, A. (2012). “High-Performance Control of a DC-DC Z-Source Converter used for an Excitation Field Driver”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, n.º 6, pp. 2947-2957.
- [27] Gómez Jorge, S.; Busada, C. A. y Solsona, J. (2013). “Low Computational Burden Grid Voltage Sensorless Current Controller”, *IET Power Electronics*, Vol. 6, Issue: 8, Publication Year, pp. 1592- 1599.
- [28] Gomez Jorge, S.; Solsona, J. A. y Busada, C. A. (2013). “Sequences detection of an unbalanced sinusoidal voltage of unknown frequency using a reduced order observer”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 28, Issue: 3, Year, pp. 1499- 1507.

- [29] Escobar, A.; Guzman, D.; Balda, J. C. y Busada, C. (2013). *New Control Technique for Sensor-less Grid Synchronization of Modular Multilevel Converters for HVDC Systems*, 2013 IEEE ECCE Energy Conversion Congress and Exposition, USA, Sept. 15-19, pp. 5273-5279.
- [30] Escobar, A.; Hayes, J.; Balda, J. C. y Busada, C. (2013). *New Control Strategy for Indirect Matrix Converters Operating in Boost Mode*, 2013 IEEE ECCE Energy Conversion Congress and Exposition, USA, Sept. 15-19, pp. 2715-2720.
- [31] Soto, A. J.; Lindstrom, E.; Oliva, A. R.; Mandolesi, P. S. y Dualibe, F. C. (2013). *Fully Integrated Single-Inductor Multiple-Output (SIMO) DC-DC Converter in CMOS 65 nm Technology*. 4th IEEE LASCAS - Latin American Symposium on Circuits and Systems - LASCAS 2013, CUSCO, PERU from 27th February to 1st March.
- [32] Miguez, M.; Arnaud, A.; Oliva, A. y Julian, P. (2015). "Step Down DC/DC converter for Micro-Power Medical Applications", *VI IEEE LASCAS - Latin American Symposium on Circuits and Systems*. Febrero 24-27, Montevideo, Uruguay.
- [33] Sánchez, L. S.; Di Federico, M. y Oliva, A. R. (2013). "Diseño de una fuente de corriente programable". *Congreso Microelectrónica Aplicada*, Trabajo estudiantil, Universidad Tecnológica Nacional (UTN-FRBB), 25 al 27 de septiembre.
- [34] Garcia-Rodriguez, L.; Williams, E.; Balda, J. C.; Gonzalez-Llorente, J.; Lindstrom, E. y Oliva, A. (2013). "Dual-stage microinverter design with a GaN-based interleaved flyback converter stage", *Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2013 IEEE, 15-19 Sept., pp. 4496-4502.
- [35] Garcia-Rodriguez, L.; Lindstrom, E.; Gonzalez-Llorente, J.; Jones, V.; Oliva, A. R. y Balda, J. C. "Design of a GaN-Based Microinverter for Photovoltaic Systems", *5th IEEE Int. Symposium on Power Electronics for Distribution Generation (PEDG2014)* June 24-27 in Galway, Ireland.
- [36] Stefanazzi, L.; Paolini, E. y Oliva, A. (2013). "Alias-free digital click modulator". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 9, n.º 2, May, pp. 1074-1083.

- [37] Chierchie, F.; Stefanazzi, L.; Paolini, E. y Oliva, A. (2013). "Frequency Analysis of PWM Inverters with Dead-Time for Arbitrary Modulating Signals", *IEEE Trans. on Power Electr.* n.º 99, pp. 1,1,0.
- [38] Stefanazzi, L.; Chierchie, F.; Paolini, E. E. y Oliva, A. R. (2014). "Low distortion switching amplifier with discrete-time click modulation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, n.º 7, July, pp. 3511-3518.
- [39] Chierchie, F.; Paolini, E. E.; Stefanazzi, L.; Oliva, A. R., (2014). "Simple Real-Time Digital PWM Implementation for Class-D Amplifiers With Distortion-Free Baseband", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.61, n.º 10, Oct., pp. 5472-5479.
- [40] Gómez Jorge, S.; Busada, C. y Solsona, J. (2014). "Reduced order generalized integrator based current controller applied to shunt active power filters" *IET Power Electronics*, vol. 7, issue 5, May, pp. 1083-1091.
- [41] Gómez Jorge, S.; Solsona, J. y Busada, C. (2014). "Control scheme for a single-phase grid-tied voltage source converter with reduced number of sensors", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, issue 7, July, pp. 3758-3765.
- [42] Busada, C. y Solsona, J. (2014). "Nonlinear Dynamic Average Model of a DC-DC Converter", *IEEE Latin America Trans.*, Vol. 12, n.º 5, Aug., pp. 904-909.
- [43] Solsona, J.; Gómez Jorge, S. y Busada, C. (2014). "Nonlinear Control of a Buck Converter Feeding a Constant Power Load", *IEEE Latin America Transactions*, Vol. 12, n.º 5, Aug., pp. 899-903.
- [44] Solsona, J.; Gómez Jorge, S. y Busada, C. (2015). "Nonlinear Control of a Buck Converter Which Feeds a Constant Power Load", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol: 30, n.º 12, pp. 7193-7201.
- [45] Fantino, R.; Busada, C. y Solsona, J. (2015). "Current controller for a bidirectional boost input stage equipped with an LCL (inductance-capacitance-inductance) filter", *Energy*, Vol. 84, 1, May, pp. 91-97.
- [46] Busada, C.; Gómez Jorge, S. y Solsona, J. (2015). "Full-state feedback equivalent controller for active damping in LCL filtered Grid Connected Inverters using a reduced number of sensors", *IEEE Transactions on Industrial Electronics.*, Vol. 62, n.º 10, October, pp. 5993-6002.

- [47] Leon, A. E. y Solsona, J. A. (2015). “Sub-Synchronous Interaction Damping Control for DFIG Wind Turbines”, *IEEE PES Transactions on Power Systems*, Vol. 30, n.º 1, Jan., pp. 419-428.
- [48] Fantino, R.; Solsona, J. y Busada, C. (2016). “Nonlinear observer-based control for PMSG wind turbine”, *Energy*, Vol. 113, October, pp. 248-257.
- [49] Fantino, R.; Busada, C. y Solsona, J. (2017). “Optimum PR Control applied to LCL filters with Low Resonance Frequency”, aceptado en *IEEE Transactions on Power Systems*, February.

## **Héctor Gerardo Chiacchiarini**

Se graduó de Ingeniero Electrónico en la Universidad Nacional del Sur en 1990 y recibió el título de Doctor en Control de sistemas en la misma universidad en 1996. En 2001 realizó una estadía académica en ETH, Zurich y en 2004 en la Universidad de Arkansas, Estados Unidos. Actualmente es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, en las cátedras de Electrónica de Potencia y en Robótica Industrial. Desde 1999 es investigador del Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica “Alfredo Desages” (UNS-CONICET). Tiene más de 80 trabajos científicos en coautoría, publicados en revistas internacionales y conferencias. Ha participado en más de 20 proyectos de investigación, siendo director en 10 de ellos. Sus principales intereses incluyen Electrónica de Potencia, Mecatrónica, sistemas de Control automático, y Robótica.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#!/resultados?tipo=Persona&start=0&rows=15&q=Chiacchiarini,%20Hector%20Gerardo>.

## **Jorge A. Solsona**

Se graduó de Ingeniero en Electrónica y Doctor en Ingeniería en la Universidad Nacional de La Plata en 1986 y 1995, respectivamente. Actualmente es Profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur e Investigador del CONICET en el Instituto de Investigaciones en Ingeniería Eléctrica “Alfredo Desages” (UNS-CONICET). Es Editor Asociado del IEEE Transactions on Industrial Electronics y Editor Asociado de la IET Electric Power Applications. Su área de interés incluye la docencia y la investigación en control y electrónica de potencia y su aplicación en los sistemas electromecatrónicos y la smart grid.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#!/resultados?tipo=Persona&start=0&rows=15&q=Solsona%20Jorge>.

## **Alejandro Raul Oliva**

Es Profesor del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina, desde 1999. En 2005 ingresó a la Carrera de Investigador del CONICET y actualmente es Investigador Independiente. Obtuvo su título de Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional del Sur en 1987; y los de Master (1996) y Ph.D. (2004) en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Arkansas, en Fayetteville, Arkansas, Estados Unidos. Es autor de un libro sobre convertidores conmutados que va por su tercera edición y que fue publicado en idiomas inglés y chino. Sus principales intereses de investigación son la electrónica de potencia y administración de energía. Ha trabajado en temas de calidad de energía eléctrica, energía renovable, amplificadores conmutados de audio y convertidores cc-cc, entre otros. Actualmente trabaja en microinversores, manejo de potencia e integración de circuitos electrónicos de potencia.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#/resultados?tipo=Persona&start=0&rows=15&q=Oliva,%20Alejandro%20Raul>.

## **Claudio Alberto Busada**

Se graduó de Ingeniero Electricista y de Doctor en Control de Sistemas en la Universidad Nacional del Sur, en los años 1989 y 2004 respectivamente. Actualmente es Profesor Adjunto en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras de la Universidad Nacional del Sur. Su área de interés actual incluye el control y la electrónica de potencia asociados a sistemas con conexión a red, a las máquinas eléctricas y a los filtros activos de potencia.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#/resultados?tipo=Persona&start=0&rows=15&q=Busada&vertodos=false> .

PARTE III  
ENERGÍA SOLAR





# **CENTRALES SOLARES FOTOVOLTAICAS EN ÁREAS CON PASIVOS AMBIENTALES**

Jorge L. Schnarwiler<sup>1</sup>, Justo J. Roberts<sup>1,2</sup>, Pedro O. Prado<sup>1</sup>,  
Silvia L. Bocero<sup>3</sup>, Agnelo M. Cassula<sup>2</sup>

## **RESUMEN**

En el presente trabajo se propone la identificación de áreas que presentan un pasivo ambiental para ser utilizadas como sitios de instalación de centrales fotovoltaicas de potencia utilizando la Tecnología de la Información Geográfica (GIS). Se realizó un estudio de prefactibilidad de un parque solar fotovoltaico de 2 MW, localizada en el partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, Argentina. Para tal fin se desarrolló el software SEPER (Software para estudio de Prefactibilidad de Proyectos de Energía Eólica y Solar), integrado por una serie de programas con funciones específicas en la metodología propuesta. La tecnología GIS se utilizó para los diferentes estudios y análisis vinculados con el área territorial, localización de los terrenos (cavas, parcelas fuera de uso o empobrecidas por las actividades extractivas), las redes eléctricas, accesos viales, geomorfología, etc. Se estableció una zona óptima de

---

<sup>1</sup> Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP).

<sup>2</sup> Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP).

<sup>3</sup> Grupo de Investigación en Desarrollo Rural, Ambiente y GeoTecnologías (UNMdP).

emplazamiento, próxima a una red eléctrica de media tensión. Posteriormente fueron realizados estudios de viabilidad técnica, económica y ambiental. Los resultados permiten inferir que es posible realizar una evaluación y caracterización de los terrenos que han sido impactados por la actividad extractiva permitiendo su utilización como zonas de instalación de energías renovables. El estudio de pre-factibilidad realizado demuestra que en esta región de la Argentina un parque de generación solar fotovoltaico de potencia cumple con los requisitos técnicos, ambientales y económicos para proyectos de estas características.

**Palabras clave:** Energías renovables - Tecnología de la información geográfica - Planificación energética - SIG/GIS.

## INTRODUCCIÓN

En la Argentina los niveles de insolación se presentan favorables para el aprovechamiento de la energía solar, si bien existen diferencias regionales y estacionales muy significativas. La región central del país posee una insolación media de 1,5 kWh/m<sup>2</sup>/día en invierno y 6,5 kWh/m<sup>2</sup>/día durante el período de verano [1]. Estos niveles de insolación son propicios para la instalación de proyectos solares considerando que la región más insolada de Alemania, el líder mundial en potencia solar fotovoltaica instalada, es de 3,5 kWh/m<sup>2</sup>/día [2]. Sin embargo, este gran potencial permanece en su mayoría desaprovechado [1].

Para la correcta utilización de las energías renovables es imprescindible evaluar y caracterizar el recurso a fin de contar con información relevante para estimar el potencial energético disponible en el lugar [3]. Por otra parte, también es necesario determinar los terrenos óptimos para instalar los emprendimientos energéticos, esto involucra evaluar el territorio considerando criterios geográficos, ambientales, de infraestructura, entre otros. De este modo, identificar el potencial de las energías renovables y sus emplazamientos se ha convertido en un tema estratégico dentro de la planificación energética [4].

La generación de energía por medio de sistemas fotovoltaicos está relacionada con las características del recurso energético en el lugar, la eficiencia de conversión de los

módulos y el área disponible para la instalación del parque solar [5]. En el caso particular de las instalaciones fotovoltaicas centralizadas conectadas a la red se requieren importantes extensiones de terreno para poder ofrecer una producción de energía técnica y económicamente viable [6].

En el partido de General Pueyrredón, provincia de Buenos Aires, la minería de rocas de aplicación y de suelos da cuenta de la existencia de canteras y cavas diseminadas en áreas periurbanas y rurales. Una vez alcanzado el final de la vida útil productiva de estas cavas son, generalmente, abandonadas. Se verifican de este modo importantes pasivos ambientales, representados por excavaciones de superficie y profundidad diversas, localizadas en zonas con distintos usos (producción agropecuaria intensiva y extensiva, expansión urbana, turismo, etc.) y variadas condiciones ambientales [7]. Cabe la posibilidad de aprovechar estos terrenos degradados a través del uso de energías renovables, promoviendo de esta forma la revalorización de las áreas con pasivo ambiental.

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es realizar un estudio de prefactibilidad de una instalación solar fotovoltaica conectada a la red de 2 MW ubicada en terrenos que presentan un pasivo ambiental. Se utiliza la tecnología de la información geográfica para localizar terrenos degradados en el Partido de General Pueyrredón para ser usados como sitios de instalación de centrales fotovoltaicas de potencia.

Para realizar el estudio de prefactibilidad del proyecto solar, se utilizó el software SEPER (Software para estudio de Prefactibilidad de Proyectos de Energía Eólica y Solar), desarrollado por integrantes del Grupo de Investigación en GeoTecnologías y Energía de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Argentina. El programa integra diferentes programas de análisis geográfico, cálculo numérico, CAD y programación, conformando una herramienta de planeamiento y toma de decisión de gran utilidad para proyectos fotovoltaicos y eólicos [8], [9].

A través del SEPER fue posible identificar las áreas con pasivo ambiental, evaluar la disponibilidad del recurso solar, determinar la disposición aproximada en el terreno de los diferentes componentes de la instalación (paneles solares, cables, etc.) y efectuar el análisis económico correspondiente. Para lograr una óptima distribución espacial de los paneles solares en terrenos irregulares, el SEPER incorpora un método de cálculo basado en Algoritmos Genéticos. De esta forma es posible maximizar el área cubierta

y por lo tanto, la producción energética de la instalación. Definido el local de instalación del parque solar y la disposición de los equipos en el terreno se realizaron diseños computarizados fotorealísticos sobre una imagen del terreno permitiendo obtener una visión global de la instalación y su referencia espacial.

## **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

El procedimiento metodológico propuesto para realizar el estudio de prefactibilidad del proyecto de generación solar se muestra en la figura n.º 1. Esta metodología fue implementada utilizando el software SEPER, ambiente computacional integrado por un conjunto de programas que cumplen funciones específicas de la metodología. Los programas que forman parte del SEPER son: Matlab® [10], AutoCAD Civil 3D 2012® [11], Google Earth® [12], DigSilent Power Factory® [13], Visual Basic® [14] y Microsoft Excel® [15]. En la Figura 1 se indica con diferentes colores las funciones desarrolladas por cada programa dentro del ambiente SEPER.

Las fuentes primarias de información aportaron los datos para generar la cartografía temática y las bases de datos. Se clasificaron en tres grupos principales: información del recurso renovable, información geográfica y de infraestructura e información temática complementaria. Los datos se obtuvieron de varias fuentes: bases de datos de instituciones estatales, empresas de electricidad, institutos meteorológicos, mapas, fotografías aéreas e imágenes de satélites.

La Tecnología de los sistemas de Información Geográfica (GIS) se utilizó en los procesos de evaluación de los terrenos que han sido impactados por las actividades extractivas y en la selección de los sitios de instalación del parque solar. Las técnicas y los procesos de selección se basaron en la modelización espacial y en el análisis geográfico. También como elemento de integración en el estudio de los recursos energéticos renovables existentes en la zona de trabajo.

En la caracterización de la zona se analizaron distintos aspectos, entre ellos, las características del recurso energético, distancia a la red e infraestructura eléctrica disponible, ubicación geográfica, accidentes del terreno, núcleos urbanos, futuro desarrollo de infraestructuras y limitaciones o restricciones geográficas. El estudio de

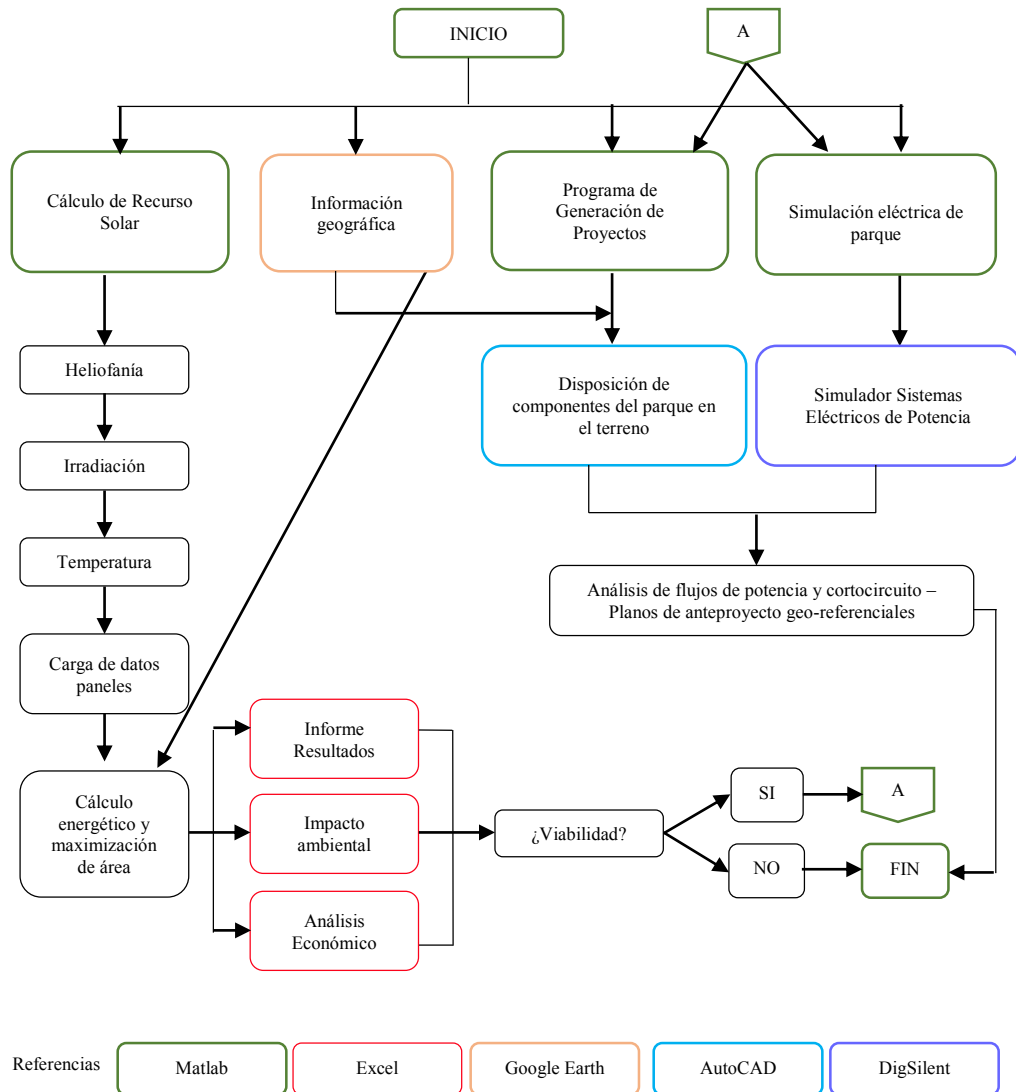
prefactibilidad implica la evaluación del recurso energético renovable, búsqueda y evaluación del sitio de instalación, disposición los equipos en el terreno seleccionado, cálculo de la producción energética del parque, verificación de condiciones técnicas necesarias para la instalación del parque solar y análisis económico. Los resultados de estas etapas permiten evaluar la viabilidad del proyecto.

### **TERRITORIOS CON PASIVOS AMBIENTALES: POSIBILIDAD PARA INSTALAR CENTRALES FOTOVOLTAICAS**

Una alternativa viable para la instalación de centrales fotovoltaicas es la utilización de terrenos que presentan pasivos ambientales. En el partido de General Pueyrredón estos sitios se asocian a la explotación minera, la misma puede dividirse en dos grandes grupos: minería de rocas de aplicación y minería de suelos (cavas ladrilleras), actividades diseminadas en áreas periurbanas y rurales [16].

En el primer caso, las actividades de canteras de explotación de áridos imprimen un registro en la geomorfología territorial, ya sea como canteras activas o bien como canteras inactivas o abandonadas o desafectadas de la explotación.

**Figura n.º 1.** Metodología de estudio de prefactibilidad de parques solares implementada en el programa de cálculo SEPER



**Fuente:** Elaboración propia.

Por otra parte, la dinámica de la extracción de suelos para la producción de ladrillos avanza sobre el territorio generando degradación ambiental durante y después de la explotación, representada por excavaciones de superficie y profundidad diversas, localizadas en zonas con distintos usos (producción agropecuaria intensiva y extensiva, expansión urbana, turismo, etc.) y variadas condiciones ambientales [17]. Las cavas, en un alto porcentaje, se encuentran abandonadas (inactivas) presentando escenarios muy heterogéneos, que van desde situaciones que han sido asimiladas por el entorno —cavas que han tenido procesos de recuperación natural— hasta escenarios muy desfavorables [7]. Las cavas abandonadas son una consecuencia histórica de la minería de suelos que se incrementa, no tanto por un mayor dinamismo de la actividad, sino debido a que una vez que se agota el recurso extraído es necesario impulsar la puesta en producción de nuevos predios, abandonando los anteriores.

La minería configura localmente pasivos ambientales, el conjunto de daños en el ambiente en términos de deterioro de los recursos y de distintos tipos de contaminaciones, producidos por una empresa a lo largo de su historia, que pueden presentar alteraciones progresivas a través del tiempo y la exposición a riesgos actuales, permanentes o potenciales para la población, por la falta de manejo. Se trata no solo de superficies afectadas, sino también de grandes volúmenes de suelo que son incorporados a los bienes producidos por la industria de la construcción.

Lo antes mencionado promueve la puesta en marcha de estrategias de rehabilitación de las áreas degradadas, alentando la posibilidad de potenciar el uso de las energías renovables.

## **ESTUDIO DE PREFACTIBILIDAD**

El propósito de este estudio de prefactibilidad es realizar una evaluación de la instalación de un parque solar fotovoltaico de potencia conectado a la red utilizando los terrenos degradados por la actividad minera y ladrillera.

En primer lugar se realiza la evaluación del recurso energético solar procesando los datos meteorológicos obtenidos para la zona y en base a los mismos se evalúa la

viabilidad del lugar escogido para la generación solar fotovoltaica. Las etapas de este procedimiento se detallan en las siguientes secciones.

## **EVALUACIÓN DEL RECURSO**

La evaluación del potencial energético es clave en la planificación de un proyecto de generación de energía basado en fuentes renovables, independiente de su magnitud. La calidad de la información meteorológica es de fundamental importancia en esta etapa, resultando necesario contar con mediciones confiables de la zona estudiada [18].

## **INFORMACIÓN METEOROLÓGICA**

La fuente principal de datos utilizada en el presente trabajo son mediciones provenientes de la estación meteorológica situada en la Ciudad de Balcarce, perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria —INTA Balcarce— ( $37,75^\circ$  S;  $58,31^\circ$  W). Estos datos fueron utilizados para el estudio de viabilidad del parque solar ubicado en el partido de General Pueyrredón, particularmente en las cercanías de la ciudad de Mar del Plata. Dado que ambos puntos distan 65 km, se considera que las mediciones del INTA Balcarce pueden ser extrapoladas al local de estudio sin incurrir en errores significativos [19].

La información aportada por el INTA corresponde a valores diarios de irradiación, heliofanía y temperaturas máximas y mínimas del periodo 2000-2010.

## **PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

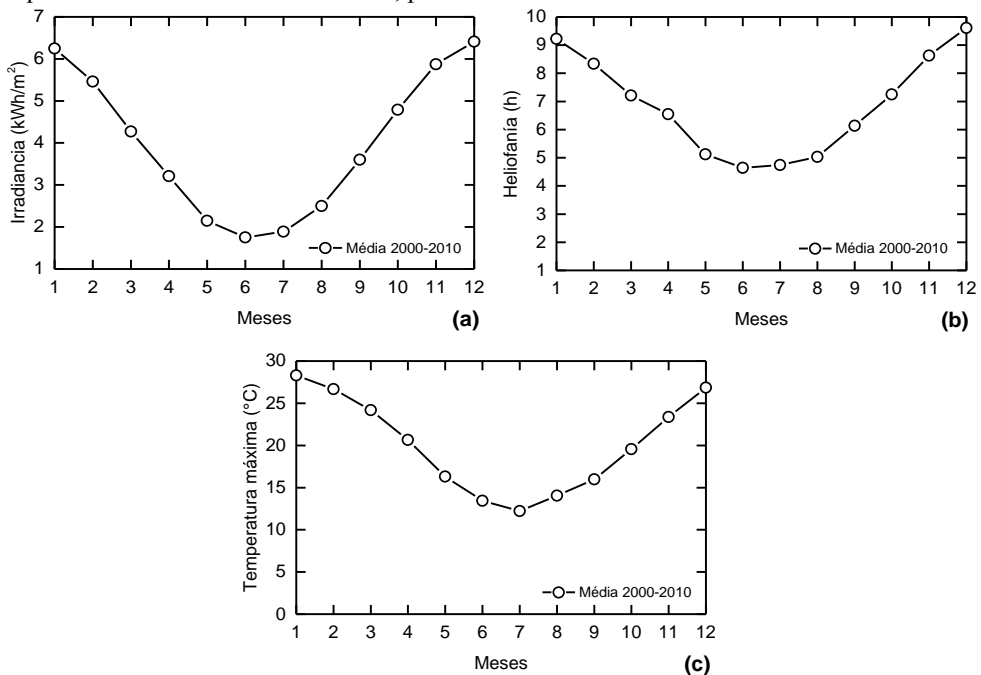
Se efectuó un pre-procesamiento de los datos de la estación INTA Balcarce para evaluar la calidad de las mediciones y eliminar registros erróneos. Seguidamente, se llevó a cabo un análisis estadístico a través de la construcción de gráficos de progresión temporal mediante promedios mensuales que conlleven a un estudio anual del recurso.



Las variables irradiancia y heliofanía permiten caracterizar de forma adecuada el recurso solar [3]. Por otro lado, la elección de utilizar la temperatura máxima como referencia térmica de la zona se debe a que un aumento de la temperatura trae aparejado una disminución de la eficiencia del panel fotovoltaico [20], y por consiguiente, de la producción energética de la instalación, lo cual implica que se está adoptando el peor escenario operativo posible para este estudio.

Se obtuvieron los valores medios de irradiancia, heliofanía y temperaturas máximas para cada uno de los meses del año, para la región de estudio. En las figuras n.º 2(a), (b) y (c) se aprecia el comportamiento de las tres variables a lo largo de año, representado a partir de las medias mensuales históricas de la serie de datos 2000-2010.

**Figura n.º 2.** (a) Irradiación media mensual, (b) heliofanía efectiva media mensual, (c) temperaturas máximas media mensual, periodo 2000-2010



**Fuente:** Elaboración propia.

## PRODUCCIÓN ENERGÉTICA

Para lograr un mejor aprovechamiento del recurso solar se adoptó la estructura de montaje de los paneles solares de un seguidor de dos ejes. La elección del tipo de módulo fotovoltaico utilizado en la instalación depende tanto de la ecuación económica como de la producción de energía. De este modo, es necesario un proceso iterativo de cálculo que busca maximizar la eficiencia de la instalación. Durante este procedimiento es necesario lograr compatibilidad entre la estructura final de los arreglos fotovoltaicos y el inversor seleccionado, lo cual implica analizar la tensión, corriente y potencia de cada arreglo en los diferentes meses del año.

A partir del procedimiento antes mencionado, se seleccionó el módulo fotovoltaico A-280P de la empresa Atersa cuya potencia nominal es de 280 Wp, los datos técnicos del módulo se presentan en la tabla n.º 1.

**Tabla n.º 1.** Datos técnicos del panel fotovoltaico seleccionado

Modelo - fabricante	A-280P - Atersa	--
Potencia nominal	280	Wp
Voc	44,37	V
Isc	8,39	A
Coefficiente de variación de tensión	-0,126	V/°C
Coefficiente de variación de corriente	0,0021	A/°C
NOCT	47	°C
Nº celdas por panel	72	--
Dimensión de la celda	156x156	mm
Dimensión de panel	1965x990x50	mm
Temperatura de referencia	25	°C

**Fuente:** Elaboración propia.

Se diseñó el arreglo de paneles para lograr un óptimo aprovechamiento energético y un nivel adecuado de tensión para alimentar el bus de CC del inversor. Se procuró que la tensión de operación del arreglo de los paneles posea una tensión de salida del orden de los 600 V. De acuerdo con este requerimiento se optó por una configuración rectangular de 8 x 6 módulos, es decir, un total de 48 módulos por arreglo. Por su parte la conexión eléctrica se encuentra conformada por tres bloques de 16 módulos en serie. Cada una de estos conjuntos serie se encuentran conectados en paralelo entre

sí. Esta configuración permite alcanzar los valores eléctricos mostrados en la tabla n.º 2.

**Tabla n.º 2.** Valores eléctricos para la configuración de paneles fotovoltaicos adoptada

Tensión CC máxima	600	V
Corriente CC máxima	15	A
Potencia máxima	10000	W

**Fuente:** Elaboración propia.

Una vez definida la configuración del arreglo de paneles de módulos fotovoltaicos, se procede a calcular la producción energética. Utilizando el software SEPER con los datos de entrada presentados en la sección Información meteorológica se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla n.º 3.

## SELECCIÓN DEL SITIO Y DISPOSICIÓN DE EQUIPOS EN EL TERRENO

Una vez evaluado el potencial del recurso solar en la región de estudio, es preciso identificar el terreno en el cual se instalarán los equipos. Es importante conocer la topografía del sitio para así poder definir la cantidad de arreglos de módulos fotovoltaicos a instalar y la disposición de los equipos en el terreno. En este proceso también se debe maximizar la producción energética.

## SELECCIÓN DEL SITIO

La cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para cumplir con la potencia instalada preestablecida de 2 MW implica la búsqueda de un terreno de dimensiones importantes, con vías de acceso y cercanía a un punto de conexión adecuado.

**Tabla n.º 3.** Producción de energía del arreglo fotovoltaico

Meses	Energía (Wh/día)	Días/Mes	Energía (kWh)
1	80.358	31	2491,098
2	72.242	28	2022,776
3	58.839	31	1824,009
4	47.545	30	1426,350
5	35.358	31	1096,098
6	31.224	30	936,720
7	34.297	31	1063,207
8	42.204	31	1308,324
9	57.704	30	1731,12
10	71.681	31	2222,111
11	82.317	30	2469,510
12	84.519	31	2620,089
<b>Total</b>			<b>21.211,412</b>

**Fuente:** Elaboración propia.

Considerando el objetivo del presente estudio de aprovechar terrenos con pasivo ambiental, se considera como área adecuada la zona periurbana del suroeste de la ciudad de Mar del Plata, aledaña a la ruta n.º 88, cercana al parque industrial y a la ciudad de Batán. La selección del emplazamiento final se realizó con la interacción de Google Earth® y AutoCAD Civil 3D 2012® en el entorno del SEPER. Fueron evaluadas varias opciones y finalmente se encontró un sector próximo a la ciudad de Batán que cumple con las siguientes condiciones:

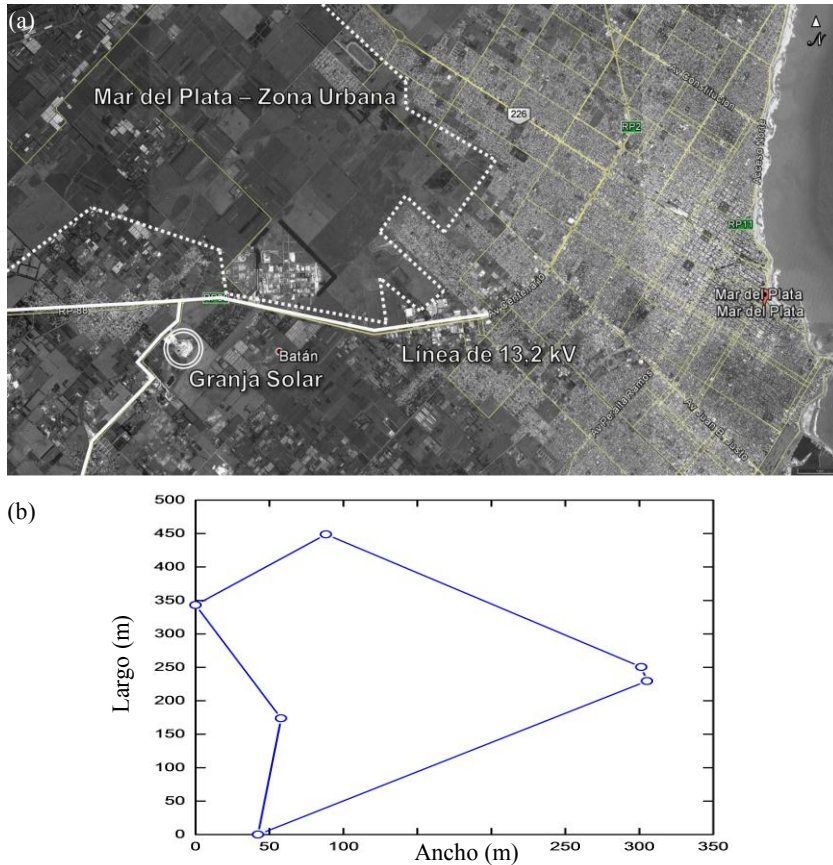
- Buena exposición al Sol debido a las favorables condiciones del terreno y ubicación respecto de los obstáculos en las inmediaciones.
- Vías de acceso propicias para la llegada de las maquinarias necesarias para la instalación.
- Cercanía a las líneas de 13,2 kV.
- Áreas poco pobladas.

La figura n.º 3(a) muestra la región de estudio y el sitio escogido para la instalación del parque solar.

Una vez definido el local de instalación, es necesario definir la geometría del terreno a partir de los puntos característicos del mismo. Esta operación se efectuó mediante el uso de AutoCAD Civil 3D®, el cual provee las herramientas adecuadas para extraer la latitud y longitud de los puntos en diferentes formatos. Posteriormente esta

información se exporta al programa SEPER para analizar la disposición óptima de los equipos fotovoltaicos. La figura n.º 3 (b) presenta la geometría del terreno seleccionado.

**Figura n.º 3.** (a) Emplazamiento elegido para la ubicación del parque solar, (b) geometría del terreno del parque solar



**Fuente:** Elaboración propia con base en fotografías de [12].

### DISPOSICIÓN DE EQUIPOS EN EL TERRENO

En esta etapa, se utiliza un método de cálculo basado en Algoritmos Genéticos para definir la disposición óptima de los paneles solares según la geometría del terreno y la

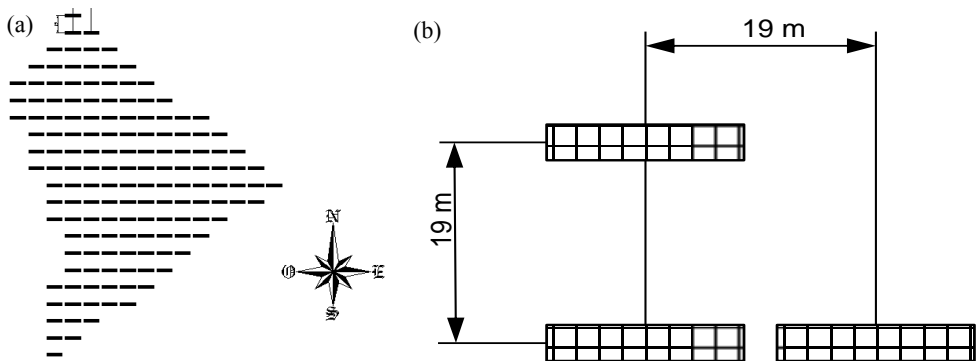
distancia mínima recomendada entre los equipos; este algoritmo es ejecutado dentro del ambiente SEPER. El objetivo de este cálculo es maximizar el área cubierta y, por lo tanto, la producción energética de la instalación solar. En la figura n.º 4(a) se puede apreciar la disposición final de los arreglos de módulos fotovoltaicos considerando una inclinación de  $57^\circ$  con respecto a la horizontal y disposición enfrentada al norte. En total, el terreno elegido es capaz de albergar hasta 150 arreglos de paneles de forma adecuada, respetando el espaciamiento mínimo necesario para minimizar la proyección de sombra entre los paneles, como mostrado en la figura n.º 4(b).

Una vez definida la cantidad de arreglos fotovoltaicos, se procede a determinar las características y cantidad de inversores. Se optó por crear módulos de 100 kW cada uno, con lo cual se requiere un total de 15 inversores de 100 kW, fue elegido el modelo Siel-Solei perteneciente a la empresa Atersa.

Una vez definidas las características de la instalación, es posible graficar las variaciones de potencia y energía del parque solar, como se muestra en la figura n.º 5(a) y figura n.º 5(b). La energía total generada por el parque al cabo de un año de operación resultó en 3.181,711 MWh.

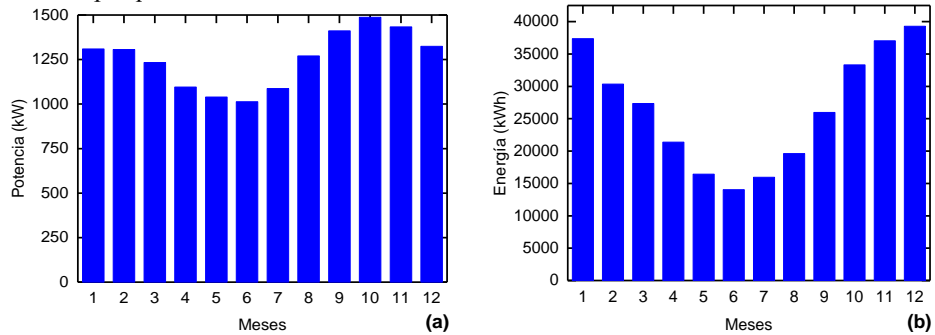
A partir de la ubicación y disposición definitiva de la instalación se procede a hacer una representación gráfica de la misma. En la figura n.º 6 se muestra el esquema general del parque solar dispuesto sobre la imagen satelital del terreno. Se muestra la disposición de caminos internos, inversores y líneas eléctricas de la instalación.

**Figura n.º 4.** (a) Disposición final de los arreglos fotovoltaicos, (b) espaciamento entre arreglos fotovoltaicos



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 5.** (a) Variación de la potencia anual del parque solar, (b) variación de la energía anual del parque solar



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 6.** Disposición del parque solar fotovoltaica en el terreno seleccionado

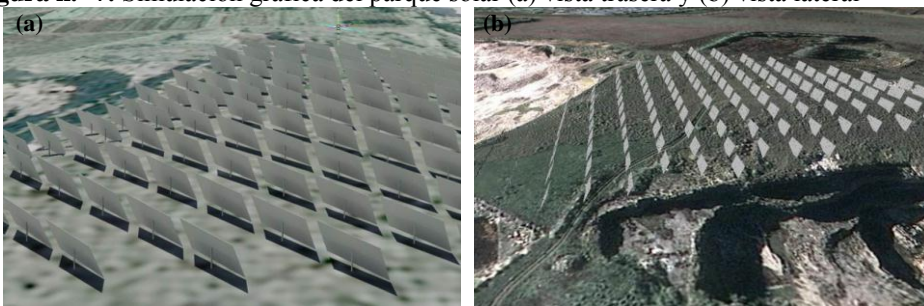


**Fuente:** Elaboración propia con base en fotografías de [12].

## SIMULACIÓN GRÁFICA

Una vez definida la disposición de los arreglos en el emplazamiento, se realizó una representación gráfica de la instalación mediante el uso de AutoCAD Civil 3D® y Google Earth®. El modelo geo-referenciado de la instalación permite observar el parque durante las diferentes épocas del año permitiendo identificar la influencia de las sombras proyectadas por los equipos. En las figuras n.º 7(a) y (b) se puede observar el parque solar desde dos puntos de observación diferentes.

**Figura n.º 7.** Simulación gráfica del parque solar (a) vista trasera y (b) vista lateral



**Fuente:** Elaboración propia con base en fotografías de [12].



## INSTALACIÓN ELÉCTRICA DEL PARQUE SOLAR

La energía generada por el parque solar será inyectada a través de una línea aérea de 13,2 kV en el tendido perteneciente a la empresa distribuidora de la ciudad de la región. Debido a las características de la red eléctrica de la zona, la interconexión del parque solar proyectada es técnicamente viable. En la tabla n.º 4 se resumen los parámetros del punto de conexión.

**Tabla n.º 4.** Características de la red de conexión de Batán

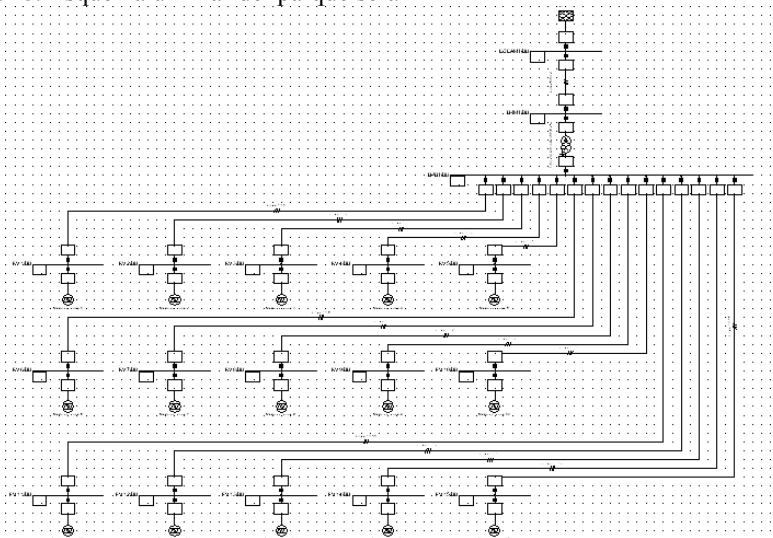
Tensión Nominal	13,2	kV
Potencia de cortocircuito máxima	1000	MVA
Potencia de cortocircuito mínima	500	MVA
Líneas 13,2	30/7 mm <sup>2</sup>	kV

**Fuente:** Elaboración propia.

## ESQUEMA UNIFILAR DEL PARQUE SOLAR

Para realizar el diseño del esquema eléctrico del parque solar se utilizó el software de modelización de sistemas de potencia DigSilent Power Factory V14®. En función de la disposición de los paneles solares en el terreno se buscó un máximo aprovechamiento de los conductores y se evaluaron los niveles de caída de tensión. Los arreglos de paneles fotovoltaicos fueron modelados como generadores estáticos agrupados de forma a alcanzar la potencia requerida por el inversor de 100 kW, cada uno de estos arreglos se conecta posteriormente al juego de barras principal. La conexión a la red se realiza a través de un transformador de 13,2/0,4 kV conexión Dyn11. El esquema unifilar de la instalación se presenta en la figura n.º 8.

**Figura n.º 8.** Esquema unifilar del parque solar



**Fuente:** Elaboración propia.

## FLUJOS DE POTENCIA Y CÁLCULO DE CORTOCIRCUITO

Definidos los parámetros eléctricos de la instalación se procedió a efectuar el cálculo de los flujos de potencia utilizando el método numérico de Newton-Raphson. De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones se concluye que los niveles de caída de tensión interna resultan admisibles ya que no superaban el 5 % de la tensión nominal. El criterio tomado para el diseño del alimentador se basó en la necesidad de conectar todos los inversores del sistema a un mismo punto, siendo que la separación en quince grupos de arreglos admite que uno de los grupos generadores se encuentre fuera de servicio sin comprometer la confiabilidad del sistema.

Seguidamente, se efectuó el cálculo de cortocircuito para cada una de las barras del sistema. Los niveles de corto circuito se encuentran dentro de los límites admisibles.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico fue realizado en base a los parámetros económicos mostrados en la tabla n.º 5. Para los cálculos fue adoptado un valor de kWh vendido de 0,5716 \$, este

dato ha sido tomado de las adjudicaciones llevadas a cabo por el gobierno argentino a través del plan GENREN [21].

En la tabla n.º 6 se presentan los resultados del análisis económico, se puede concluir que el proyecto resulta viable dado que:

- La TIR resulto en 10,50 % superando el valor de la tasa de retorno mínima aceptable para este tipo de proyectos.
- El tiempo de repago es de 9 años, la inversión se recupera en poco más de un cuarto de la vida útil del proyecto.

## **IMPACTO AMBIENTAL**

Las instalaciones solares fotovoltaicas se caracterizan por provocar mínimo impacto en el medio ambiente durante la etapa de operación. Uno de los impactos más importantes de esta tecnología es el uso de suelo, la magnitud del efecto depende de las características del terreno donde se instalará el parque solar. Terrenos con alto valor económico debido a su capacidad productiva difícilmente sean propicios para la instalación de proyectos solares, así como terrenos con restricciones ambientales localizados en áreas protegidas. En el caso del presente proyecto, el impacto relacionado con el uso de suelo es, por el contrario, positivo, pues se busca utilizar terrenos degradados por la actividad minera para revalorizarlos.

Otro efecto relacionado a las instalaciones fotovoltaicas es el impacto visual, el cual depende de la escala del proyecto solar, de las características del terreno circundante y de la opinión subjetiva de los moradores locales. Para analizar el impacto visual de esta instalación y su integración en el paisaje, se utilizaron las herramientas de modelaje digital del AutoCAD Civil 3D® combinado con imágenes del Google Earth®. La figura n.º 9 muestra el resultado de representación gráfica del proyecto permitiendo evaluar el impacto visual del mismo. Debido a que no hay asentamientos cercanos al lugar de instalación, no se prevén problemas con los moradores de la región relacionados con el impacto visual del proyecto.

**Tabla n.º 5.** Parámetros para análisis económico del parque solar

Paneles Solares		
Valor kW instalado	5.000	\$/kWp
Nº paneles	7.200	-
Transmisión y Distribución		
Precio cables	30.000	\$/km
Longitud cables	3	km
Precio línea aérea	15.000	\$/km
Longitud línea aérea	5	km
Precio inversor	690	\$/kVA
Potencia inversor	1.000	kVA
Precio transformador	15	\$/kVA
Potencia transformador	1.000	kVA
Datos de Mercado		
Cotización del dólar americano	16,00	AR\$
Tasa impositiva	35	%

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 9.** Visualización geo-referenciada del parque solar que permite evaluar el impacto visual de la instalación



**Fuente:** Elaboración propia con base en fotografías de [12].

**Tabla n.º 6.** Resultados del análisis económico del parque solar

Vida del proyecto	25	años
Tasa impositiva	35	%
Factor de depreciación interna	5	%
Valor del kW instalado	5.000	\$
Potencia nominal	2.016	kW
Costo total en paneles fotovoltaicos	10.080.000	\$
Inversión fija	13.382.626	\$
Valor de la energía vendida	0,5716	\$/kW
Producción anual de energía del generador	3.181.712	kWh
Recupero por leyes nacionales y provinciales	15.333	\$/kW
Venta de energía en el año	1.834.000	\$/kW
Costos de Producción		
Mantenimiento	13.7841	\$
Seguros	70.927	\$
Contingencias	0	\$
Total costos de producción	208.768	US\$

**Fuente:** Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

Los resultados permiten concluir que es posible realizar una evaluación y caracterización de los terrenos que han sido impactados por la actividad extractiva — presentando un pasivo ambiental— permitiendo su revalorización como zonas de instalación de fuentes de generación renovables. La metodología presentada resulta adecuada para evaluar y caracterizar los terrenos para su uso en instalaciones solares fotovoltaicas.

A través de los resultados del estudio de prefactibilidad es posible concluir que en esta región de la Argentina un parque de energía solar fotovoltaica de potencia cumple con los requisitos técnicos, ambientales y económicos para viabilizar proyectos de estas características.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Centro de Información Meteorológica (CIM) del Servicio Meteorológico Nacional y al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) por la información brindada para la realización del presente trabajo.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] REEEP, Secretaria de Energia (Republica Argentina) y Fundacion Bariloche, *Republica Argentina. Energias renovables: Diagnostico, barreras y propuestas*, Buenos Aires, 2009.
- [2] Loschi, H. J.; Ferrarezi, R. y Rocha, N. M. (2014). “Solar Tracking System Installed with photovoltaic (PV) Panels to Connection Grid Tie Low Voltage (Sunflower)”, *Energy and Power*, vol. 4, n.º 3, pp. 49-53.
- [3] Roberts, J. J.; Marotta Cassula, A.; Prado, P. O. y Freire Junior, J. C. (2011). “A Methodology to Identify Most Promising Areas for the Implementation of Hybrid Photovoltaic Wind Energy Systems”, en *21st Barazilian Congress of Mechanical Engineering (COBEM)*.
- [4] Brewer, J.; Ames, D. P.; Solan, D; Lee, R. y Carlisle, J. (2015). “Using GIS analytics and social preference data to evaluate utility-scale solar power site suitability”, *Renew. Energy*, vol. 81, pp. 825-836.
- [5] Roberts, J. J.; Marotta Cassula, A.; Freire Junior, J. C. and Prado, P. O. (2015). “Simulation and Validation of Photovoltaic System Performance Models”, in *Book of Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2015*, p. 82.
- [6] Yates, T and Hibberd, B. (2010). “Production Modeling for Grid-Tied PV”, *SolarPRO*, pp. 30-56.
- [7] Vorano, C. and Bocero, S. L. (2011). *Riesgo ambiental de la actividad ladrillera en el Partido de General Pueyrredón. Las cavas como pasivo ambiental*, Tesis de Licenciatura (Inédito). Facultad de Humanidades. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP).

- [8] Schnarwiler, J. L.; Prado, P. O. and Roberts, J. J. (2015). "Evaluación del Recurso Eólico Mediante Herramienta Informática Desarrollada en Matlab®", in *Book of Abstracts and Proceedings of 11th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission: CLAGTEE 2015*, p. 70.
- [9] Schnarwiler, J. L. y Prado, P. O. (2011). *Energía Eólica y Solar Fotovoltaica. Software para el estudio de pre-factibilidad de proyectos*, Tesis de Grado (Inédito). Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP).
- [10] MathWorks, "Matlab", The Language of Technical Computing, 2016. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/products/matlab>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [11] Autodesk, "AutoCAD Civil 3D", Model in 3D with civil engineering software, 2016. [Online]. Available: <http://www.autodesk.com/products/autocad-civil-3d/overview>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [12] Google, "Google Earth", 2016.
- [13] DIGSILENT, "PowerFactory", 2016. [Online]. Available: <http://www.digsilent.de/index.php/products-powerfactory.html>. [Accessed: 01-oct-2016].
- [14] Microsoft, "Visual Studio", 2016. [Online]. Available: <https://www.visualstudio.com>. [Accessed: 01-oct-2016].
- [15] Microsoft, "Excel", 2016. [Online]. Available: <https://products.office.com/en-us/excel>. [Accessed: 01-oct-2016].
- [16] Witkin, G.; Bó, M. J.; Giampietri, L.; del Río, J. L. y Vorano, C. (1997). *Diseño de un SIG como herramienta para la gestión ambiental de la minería en el partido de general Pueyrredón: aplicación al inventario, diagnóstico y cartografía de canteras de toscas y suelos*. [Online]. Available: <http://www.mardelplata.gob.ar/documentos/gestionambiental/sigparalagestionde la mineria.pdf>. [Accessed: 27-Sep-2016].
- [17] Singh, A. L. y Asgher, M. S. (2005). "Impact of brick kilns on land use/landcover changes around Aligarh city, India", *Habitat Int.*, vol. 29, n.º 3, pp. 591-602.
- [18] Thevenard, D. y Pelland, S. (2013). "Estimating the uncertainty in long-term photovoltaic yield predictions", *Sol. Energy*, vol. 91, pp. 432-445.

- [19] Suckling, P. W. (1985). "Estimating daily solar radiation values in selected mid-latitude regions by extrapolating measurements from nearby stations", *Sol. Energy*, vol. 35, n.º 6, pp. 491-495.
- [20] Dubey, S.; Sarvaiya, J. N. and Seshadri, B. (2013). "Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV production in the world - A review", *Energy Procedia*, vol. 33, pp. 311-321.
- [21] Ministerio de Planificación Federal, Secretaría de Energía de la Nación (Argentina), 2014. .



### **Jorge Leonardo Schnarwiler**

Ingeniero Electricista por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ingeniería, Mar del Plata, Argentina. Integrante adscripto al Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP). Actualmente se desempeña como ingeniero de productos en Tenaris Siderca, Argentina. Correo electrónico: [leojls2004@yahoo.com.ar](mailto:leojls2004@yahoo.com.ar).

### **Justo José Roberts**

Doctor en Ingeniería Mecánica y Magister en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá, San Pablo, Brasil. Ingeniero Electromecánico por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ingeniería, Argentina. Integrante del Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP); Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP) y Grupo de Pesquisa em Bionergia - IPBEN-UNESP Guaratinguetá. Correo electrónico: [justo@feg.unesp.br](mailto:justo@feg.unesp.br).

### **Pedro Osvaldo Prado**

Magister en Ingeniería Mecánica por la Universidade Estadual Paulista (UNESP), Facultad de Ingeniería de Guaratinguetá, San Pablo, Brasil. Ingeniero Eléctrico por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Facultad de Ingeniería, Mar del Plata, Argentina. Director del Grupo de Investigación y Desarrollo en GeoTecnologías y Energía (UNMdP). Profesor adjunto del Área Instalaciones Eléctricas, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP). Correo electrónico: [poprado@fi.mdp.edu.ar](mailto:poprado@fi.mdp.edu.ar).

### **Silvia Liliana Bocero**

Magíster en Ciencias Sociales con Orientación en Desarrollo Rural y Geógrafa por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Mar del Plata, Argentina. Directora

Jorge L. Schnarwiler, Justo J. Roberts, Pedro O. Prado, Silvia L. Bocero, Agnelo M. Cassula

del Grupo de Investigación en Desarrollo Rural, Ambiente y GeoTecnologías. Profesora Regular en las Cátedras Política y Economía de los Recursos Naturales y Geografía Rural (Departamento de Geografía) UNMdP. Profesora de postgrado en la Maestría en Políticas Ambientales y Territoriales (UBA). Correo electrónico: [slbocero@gmail.com](mailto:slbocero@gmail.com).

### **Agnelo Marotta Cassula**

Doctor en Ingeniería Eléctrica, Magister en Ingeniería Eléctrica e Ingeniero Eléctrico por la Universidad Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil. Integrante del Grupo de Otimização de Sistemas Energéticos - GOSE (UNESP) y del Grupo de Pesquisa em Bionergia - IPBEN-UNESP Guaratinguetá. Profesor adjunto en el Departamento Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus de Guaratinguetá. Correo electrónico: [agnelo@feg.unesp.br](mailto:agnelo@feg.unesp.br).

# APLICACIONES DE ENERGÍA SOLAR

## EN EL NORDESTE ARGENTINO

Arturo J. Busso<sup>1</sup>, Luis H. Vera<sup>1</sup>, Manuel Caceres<sup>1</sup>, Andrés D. Firman<sup>1</sup>

### RESUMEN

En el presente capítulo se expondrán aplicaciones de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, implementadas en el Nordeste Argentino. De esta manera se aborda el uso de calefones solares, secaderos solares, sistemas de generación eléctrica fotovoltaica, tanto autónomo como conectados a red, experiencias en Generación Distribuida, mobiliario urbano, bombeo de agua solar y desarrollos tecnológicos encarados en el área de instrumentación para medición de irradiancia solar. En ningún momento se pretende ahondar en los detalles de los procesos físicos involucrados y exponer los desarrollos matemáticos que describen los mismos ya que, para los interesados, esto puede ser encontrado en la extensa bibliografía existente al respecto.

**Palabras clave:** Aplicaciones de energía solar - Generación fotovoltaica - Calefón solar - Secado solar - Bombeo solar.

---

<sup>1</sup> GER - Grupo en Energías Renovables – FACENA UNNE, correo electrónico: [www.ger-unne.com.ar](http://www.ger-unne.com.ar)

## INTRODUCCIÓN

Es interesante reconocer que a través de la historia el hombre usó de las energías que ahora llamamos “*no convencionales*” (solar, biomasa, viento, agua) y muchos siglos después empezó a hacer uso de lo que ahora se conoce como energías *convencionales* (carbón, petróleo, gas). Ello resulta paradójico, ya que el término *convencional*, puede hacer referencia tanto a la costumbre como también puede hacer referencia a la precedencia. Con este concepto se presenta a las energías provenientes de recursos renovables (no convencionales) como algo novedoso, cuando en realidad lo más novedoso es el uso de recursos no renovables.

Las energías renovables son entonces las energías que se obtienen a partir de recursos que son considerados como ilimitados o, que se encuentran en una cantidad demasiado grande y además no son consumidos en mayor medida en proporción a la cantidad de energía que se puede obtener a través de ellos [1]. Esta variedad de recursos hace que se pueda contar con diferentes tipos de energía renovable como energía solar (sol), eólica (viento), geotérmica (calor del interior de la tierra), hidráulica (agua), biomasa (materia orgánica), entre otras. Por lo cual, para su implementación es necesario evaluar y cuantificar la disponibilidad de estos recursos en diferentes regiones del país.

Nuestro planeta recibe del sol una cantidad de energía anual de aproximadamente 1,6 millones de kWh de los cuales solo un 40 % es aprovechable, una cifra que representa varios cientos de veces la energía que se consume arma mundial, por lo tanto el sol representa una fuente de energía descentralizada, limpia e inagotable. En este contexto, la región Nordeste de la Argentina no es ajena a esta realidad. La misma está cercada por los ríos Paraná y Uruguay, posee un clima que el portal del gobierno Argentino define como “subtropical sin estación seca, con precipitaciones abundantes y temperaturas elevadas de escasas variaciones diarias y estacionales. Grossi Gallegos y Righini (2007) [2], en el *Atlas de Energía Solar de la República Argentina*, determinan para la región valores del promedio de la irradiación global diaria sobre superficie horizontal de 6,5 kWh/m<sup>2</sup> en enero (época estival) y de 2,5 kWh/m<sup>2</sup> en julio (época invernal), por lo que se puede inferir que es una zona geográfica que posee un gran recurso energético a partir del recurso renovable solar.

El aprovechamiento de la energía solar requiere de la utilización de dispositivos que capturen la energía proveniente del sol y la transformen en otra forma de energía compatible con la demanda y finalidad útil que se pretende satisfacer.

En base a la clasificación anterior, existen dos alternativas posibles para realizar estas transformaciones a saber:

- La conversión solar térmica.
- La conversión solar fotovoltaica.

En este contexto, en el presente capítulo se expondrán aplicaciones de la energía solar, tanto térmica como fotovoltaica, en el Nordeste Argentino.

No es el objetivo ahondar en los detalles de los procesos físicos involucrados y exponer los desarrollos matemáticos que describen los mismos ya que, para los interesados, esto puede ser encontrado por ejemplo en Duffie y Beckman (2007) [3], entre la abundante bibliografía existente.

## **UTILIZACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA SOLAR EN EL NEA**

La Argentina posee un elevado porcentaje de electrificación (95 %). No obstante ello, una proporción importante (30 %) carece de servicio eléctrico. Frente a la necesidad de brindar igualdad de oportunidades a la población en general, el Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales (PERMER) [4], financiado por el Banco Mundial y por el Fondo Internacional para el Medio Ambiente, inició en el año 1996 la ejecución de proyectos que apuntan a asegurar el abastecimiento de electricidad a 1,8 millones de personas que viven en 314 mil hogares, y 6000 servicios públicos de todo tipo (escuelas, salas de emergencia médica, destacamentos policiales, etc.) fuera del alcance de los centros de distribución de energía.

Ello permitiría mejorar la calidad de vida de los pobladores rurales y disminuir su emigración a las zonas urbanas a través del manejo sustentable de los recursos energéticos ambientales sanos.

Las tablas a continuación presentan la inversión por provincia para la implementación de las instalaciones PERMER en el NEA (fuente: PERMER).

Sumado a este proyecto de cobertura nacional, en la zona NEA se han llevado a cabo otros proyectos de aplicación de energías renovables con fondos tanto públicos como privados. En la mayoría de estos emprendimientos, la Universidad Nacional del Nordeste participó activamente tanto durante la implementación como en el mantenimiento y seguimiento posterior.

Las tablas que se presentan a continuación muestran las características generales de las diferentes aplicaciones implementadas en la región y de las que se tiene constancia según la tecnología empleada.

Misiones:

Categoría	Cantidad de instalaciones/ beneficiarios	Financiamiento			Inversión total (USD)
		PERMER	Ministerio de Educación de la Nación	Provincia	
Escuelas	24	80 %	20 %		223.473
Otros servicios públicos	42	80 %		20 %	353.298
<b>Total inversión</b>					<b>576.771</b>

Chaco:

Categoría	Cantidad de instalaciones/ beneficiarios	Financiamiento			Inversión total (USD)
		PERMER	Ministerio de Educación de la Nación	Provincia	
Viviendas	3680	6.669.996		167.920	6.837.916
Escuelas	208	1.168.882	398.148		1.567.030
<b>Total inversión</b>					<b>8.404.946</b>

Corrientes:

Categoría	Cantidad de instalaciones/ beneficiarios	Financiamiento			Inversión total (USD)
		PERMER	Ministerio de Educación de la Nación	Provincia	
Viviendas	1300	100 %			2.429.368
Escuelas	85	80 %	20 %		2.320.078
Escuelas (térmico)	85	80 %	15 %		403.021
<b>Total inversión</b>					<b>5.152.467</b>

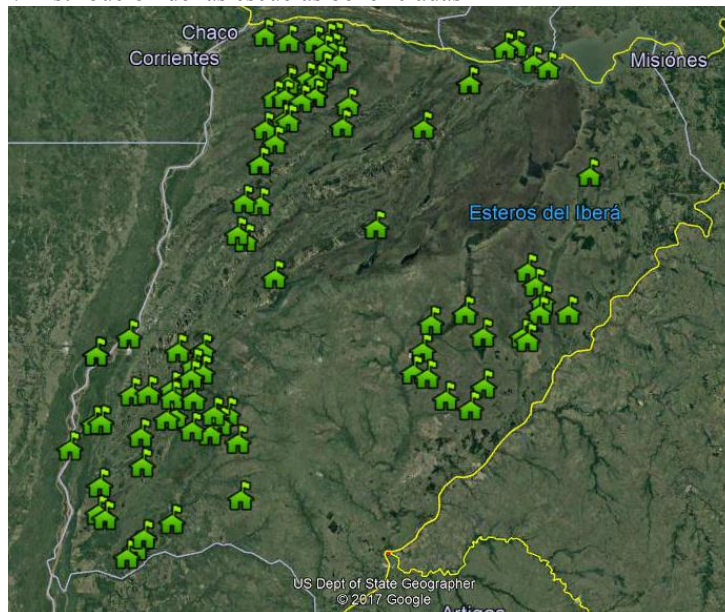
**Fuente:** PERMER y Secretaría de Energía de Corrientes.

## APLICACIONES LOCALES DE CALEFONES SOLARES

### USO PRÁCTICO

Corrientes: Proyecto PERMER (Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales). 86 escuelas rurales aisladas de la provincia de Corrientes, 122 calefones solares de placa plana de fabricación nacional por la firma INNOVAR SRL además de sistemas fotovoltaicos autónomos. En la figura n.º 1 se presenta un mapa de la provincia con la ubicación de los establecimientos beneficiados y la figura n.º 2 muestra una foto de una instalación térmica típica. Durante las obras de instalación la supervisión estuvo a cargo de miembros del GER - Grupo en Energías Renovables de la Universidad Nacional del Nordeste. Asimismo, desde la puesta en funcionamiento, el mantenimiento de las 85 escuelas está a cargo del mismo grupo en conjunto con el Ministerio de Educación de la provincia de Corrientes.

**Figura n.º 1.** Distribución de las escuelas beneficiadas



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 2.** Fotografía de una instalación típica de los calefones instalados



**Fuente:** Arturo J. Busso.

Chaco: La empresa VETAK [5], con su planta en la ciudad de Resistencia, Chaco, ha instalado sistemas térmicos de fabricación propia desde el año 2007, algunas de cuyas instalaciones se muestran en la figura n.º 3.

Misiones: Desde 2010 la provincia evalúa el desempeño de 40 colectores solares térmicos de agua caliente que entregó en casas de un barrio construido por el **Instituto Provincial de Desarrollo Habitacional** (IPRODHA) con financiación estatal (INTI, 2011).

Los termotanques instalados durante el año 2011 son de tubos de vacío de fabricación china con un tanque de acumulación de 135 litros (ver figura n.º 4). El sistema se pensó para satisfacer las necesidades de una pareja con uno o dos hijos, que es el promedio de los habitantes de las viviendas sociales en la provincia. Según datos recolectados durante la época estival, se concluyó que, debido a los consumos residenciales usuales, resultarían más apropiados tanques de 160 litros de capacidad. Además, se ha podido estimar que, con los calefones instalados, el ahorro global de energía para calentar agua —sea gas o electricidad— es del 80 %.

## INVESTIGACIÓN

En este campo se han llevado a cabo varios proyectos que se detallan en la tabla n.º 2 y cuyas fotografías se muestran en la figura n.º 5 por número de orden.



**Figura n.º 3.** Diferentes instalaciones de calefones solares de la empresa VETAK



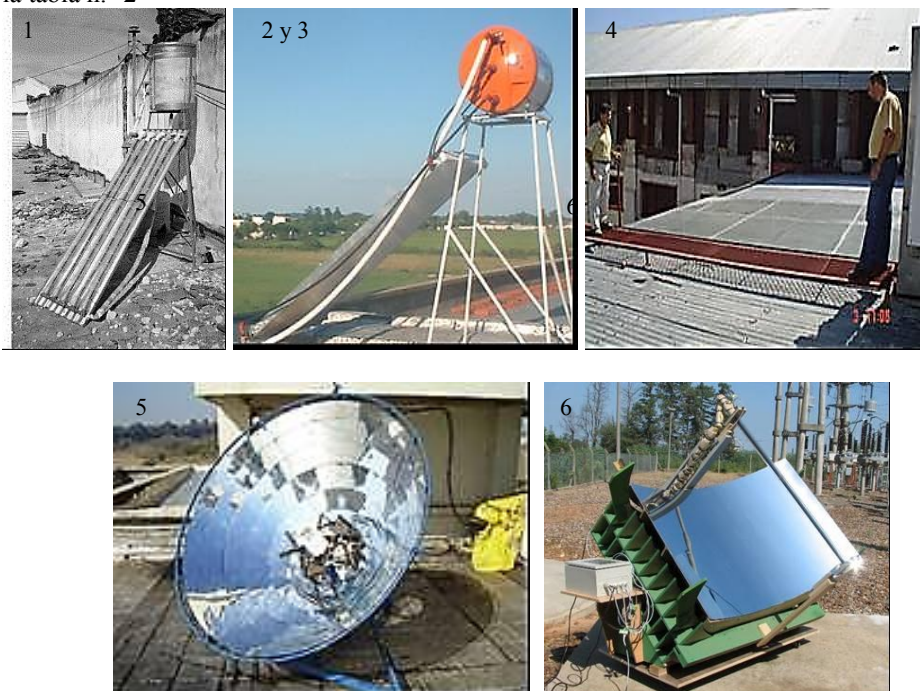
**Fuente:** VETAK

**Figura n.º 4.** Calefones de tubo de vacío instalados en 40 viviendas sociales en Posadas, Misiones



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 5.** Fotografías de los distintos colectores empleados en los proyectos descritos en la tabla n.º 2



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Tabla n.º 2.** Listado de proyectos con uso de colectores y breve descripción técnica de cada uno de ellos

n.º	Título del proyecto	Organismo ejecutor	Referencias	Tecnología/Usos/Temperatura de trabajo
1	Desarrollo rural sustentable mediante energización con energías renovables	GIDER-Fac. de Ingeniería UNNE	[6],[7],[8],[9]	Colector plano, Calentamiento de agua, Circulación por termosifón, T= 50°C
2	Ahorro de energía eléctrica por precalentamiento solar en dispensadoras de agua caliente para mate	GITEA-UTNFRR	[10]	Colector plano, Calentamiento de agua, Circulación por termosifón, T= 60°C
3	Prototipo de sistema híbrido solar-eléctrico para calentamiento de agua para mate	GER-FaCENA UNNE	[11]	Colector plano, Calentamiento de agua, Circulación por termosifón, T= 60°C
4	Caracterización de un colector solar de placa plana diseñado para la regeneración de sílica gel de una planta piloto de climatización solar-geotérmica	GITEA-UTNFRR	[12], [13]	Colector plano, Área 18m <sup>2</sup> , Calentamiento de aire, Circulación forzada, T= 80-90 °C
5	Uso de la energía solar como fuente térmica para el funcionamiento de un refrigerador por ciclo de absorción amoníaco-agua	GER-FaCENA UNNE	[14], [15], [16]	Colector concentrador, Cilíndrico Parabólico, Calentamiento de aceite térmico, Circulación forzada, T = 320 °C
6	Ensayos de un concentrador solar cilindro parabólico con fluido caloportador	GER-FaCENA UNNE	[17], [18] Dri et al. (2009) Dri et al. (2010)	Colector concentrador lineal, Calentamiento de aceite térmico, Circulación forzada, T = 250 °C
7	Cocinar y secar alimentos con energía solar	Fac. Ing. - UNaM		Colector plano, Calentamiento de agua, Circulación por termosifón, T = 60 °C

**Fuente:** Elaboración propia.

## APLICACIONES DE SECADO SOLAR

Los secaderos existentes en la zona NEA son producto de proyectos llevados a cabo por las Universidades de la región, tanto de manera autónoma como en cooperación con empresas privadas. La tabla n.º 3 presenta una breve descripción de estos emprendimientos y las respectivas referencias donde se puede encontrar información detallada sobre los resultados de cada proyecto y la figura n.º 6 muestra las fotografías de los distintos secaderos descriptos.

**Tabla n.º 3.** Descripción de emprendimientos y las respectivas referencias

Nº	Título del proyecto	Organismo Ejecutor	Referencias	Tecnología/Usos/Temperatura de trabajo/Empresa
1	Secadero solar de madera por convección natural.	GIDER - Fac. de Ingeniería - UNNE	[6], [8], [19], [20], [21]	Colector tipo túnel de 60 m de longitud Convección natural Secado de madera T = 60 °C KRAMER S.A. – Resistencia, Chaco
2	Secado solar de productos alimenticios del monte chaqueño	GITEA - UTN FRR	[22], [23]	Secadero tipo gabinete Colector plano Convección natural T = 40-60 °C
3	Utilización de la energía solar para deshidratar productos hortícolas	GER - FaCENA - UNNE	[24], [25], [26], [27], [28], [29]	Secadero tipo gabinete Colector plano Convección natural T = 40-60 °C
4	Secadero solar por convección de aire caliente para deshidratación de almidón de mandioca destinado a pequeños productores rurales de la provincia de corrientes	GER - FaCENA - UNNE	[30], [31]	Secadero con cámara de 4 m <sup>3</sup> Arreglo en serie de 5 colectores planos de 2 m <sup>2</sup> c/u Secado de almidón de mandioca Circulación forzada T = 40-60 °C con apoyo eléctrico y termostato Emprendimiento particular familiar
5	Cocinar y Secar Alimentos con Energía Solar	Fac. de Ingeniería - UNaM		Secadero tipo gabinete Colector plano Convección natural T = 40-60 °C
6	Secadero solar de madera	Consejo de Energías Renovables		Secadero con cámara de 48 m <sup>3</sup> Colector plano de 30 m <sup>2</sup> Circulación forzada T = 50-60 °C Míxto Solar-Biomasa Cámara de Madereros de San Pedro
7	Secadero solar para frutas y verduras	Facultad de Arte y Diseño (FAyD) de la Universidad Nacional de Misiones (UNaM)		Secadero tipo gabinete Colector plano Convección natural T = 40-60 °C Míxto Solar-Biomasa Municipalidad de Campo Viera de Misiones, INTA y grupo de productores “Los Colonos”

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 6.** Fotografías de los diferentes secaderos implementados



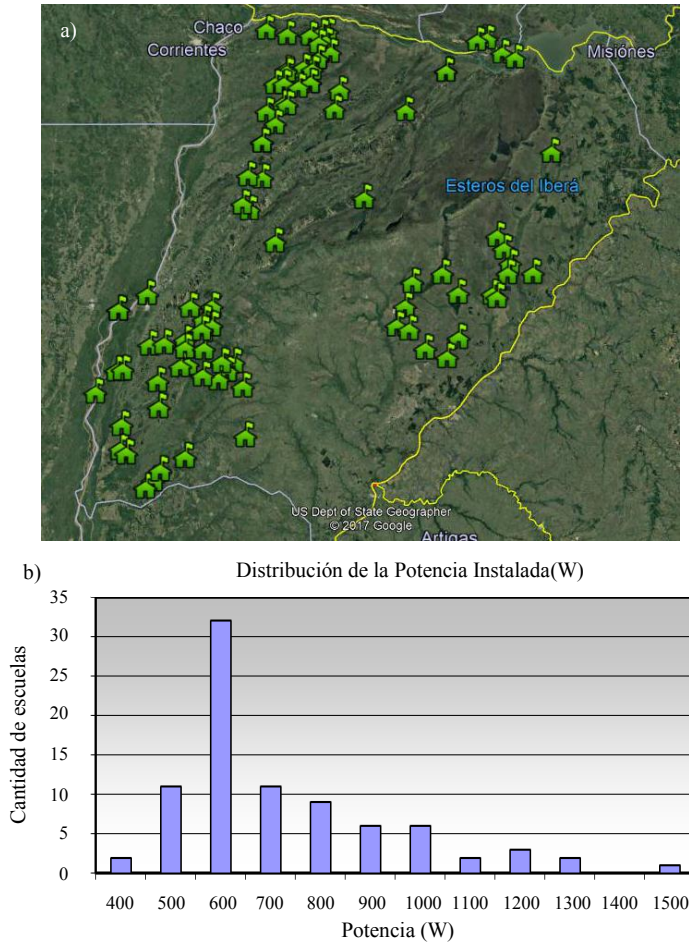
**Fuente:** Arturo J. Busso.

## APLICACIONES EN GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA

### SISTEMAS AUTÓNOMOS

Corrientes: Proyecto PERMER (Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales). 85 escuelas rurales aisladas de la provincia de Corrientes con potencias entre 400 Wp y 1500 Wp; beneficia a una matrícula de 2288 alumnos. La figura n.º 7(a) muestra la localización de las escuelas en el territorio provincial y la figura n.º 7(b) la distribución de las potencias instaladas. El mantenimiento está a cargo del GER - FaCENA UNNE.

**Figura n.º 7.** a) Distribución geográfica de las escuelas beneficiadas. b) Distribución de potencia instalada



**Fuente:** Elaboración propia.

En la tabla n.º 4 se describen las características técnicas básicas de los sistemas instalados y en las figuras n.º 8 y 9 ilustran fotografías de un banco de generación típico y la casilla de baterías respectivamente.



**Tabla n.º 4.** Características técnicas de los sistemas FV autónomos instalados

Características de los sistemas	
Tensión de generación	24 V CC
Tensión de alimentación	220 V AC
Prestaciones	Iluminación Ventiladores de techo Equipo audio visual Bombeo de agua
Autonomía	4 días
Generación	
Módulos	Photon 50 Wp
Arreglo banco generación	2xN (2 en serie y N series en paralelo)
Acumulación	
Tensión de banco	24 V CC
Baterías	12 V – 220 Ah
Arreglo banco de acumulación	2xN (2 en serie y N series en paralelo)
Regulador	
Conergy	12/24 V CC – 20-40 A
Inversor	
Studer	24 V CC/220 V AC senoidal pura/Potencia: 2000-2500-3000 W

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 8.** Vista de un banco de generación típico



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 9.** Vista de la casilla de baterías



**Fuente:** Arturo J. Busso.

Chaco:

Desde el 2001 el PERMER ha efectuado el Estudio de Mercado y tarifario en la Zona I de la provincia (Dtos. de Gral. Güemes, Almirante Brown y Maipú) y se concretó la instalación de 3680 sistemas fotovoltaicos autónomos para usuarios residenciales dispersos y 208 escuelas. La provincia acordó con la Cooperativa de Provisión de Servicios Públicos Norte Chaqueño Limitada, la operación y mantenimiento de los sistemas instalados bajo el PERMER.

## **SISTEMAS CONECTADOS A RED**

A continuación se exponen algunas iniciativas desarrolladas de investigación aplicada, experimentación y vinculación y transferencia tecnológica en materia de sistemas conectados a red, en particular en el área de influencia de la UNNE:

- Primer sistema fotovoltaico conectado a red en una universidad nacional implementado por el Grupo en Energías Renovables (GER) en el Departamento de Física de la Universidad Nacional del Nordeste en el año 2010. Objetivo: estudiar la interacción de la generación eléctrica solar con la red de energía de baja tensión. Los resultados fueron publicados y difundidos en diferentes ámbitos tanto nacional como internacional [32], [33].
- Convocatoria “Fondo de Innovación Tecnológica Sectorial de Energía (FITS-2010) - Energía Solar” del MINCyT denominado “Interconexión de



sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica en ambientes urbanos”. Consorcio IRESUD. Objetivo general: introducir en el país tecnologías asociadas con la interconexión a la red eléctrica, en áreas urbanas y periurbanas, de sistemas solares fotovoltaicos (FV) distribuidos. El proyecto contempló cuestiones económicas, legales y regulatorias, además de las específicamente técnicas. En particular, se propondrá realizar un conjunto de instalaciones piloto en el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). En este contexto, entre el 2011 al 2013 el GER coordinó las actividades tendientes a la instalación en el NEA de sistemas demostrativos tanto en universidades nacionales (UNaM, UNNE) como en organismos públicos (Secretaría de Energía de Corrientes y Subsecretaría de Energía de Entre Ríos). La figura n.º 10 muestra las fotografías de las instalaciones en los diferentes centros que participaron del proyecto.

- GER – instalación de un sistema híbrido red-autónomo para iluminación de espacios comunes (cocheras y palieres de acceso y pisos) en un edificio de departamentos en la ciudad de Corrientes. En las fotos de las figuras n.º 11(a) y (b) se parecían el montaje del sistema generador y la sala de máquinas.

**Figura n.º 10.** Fotografía de los sistemas instalados en los centros participantes del proyecto



Pérgola en Facultad de Ingeniería - UNNE



Pérgola en Laboratorio del GER FaCENA – UNNE



Pérgola en Universidad Nacional de Catamarca



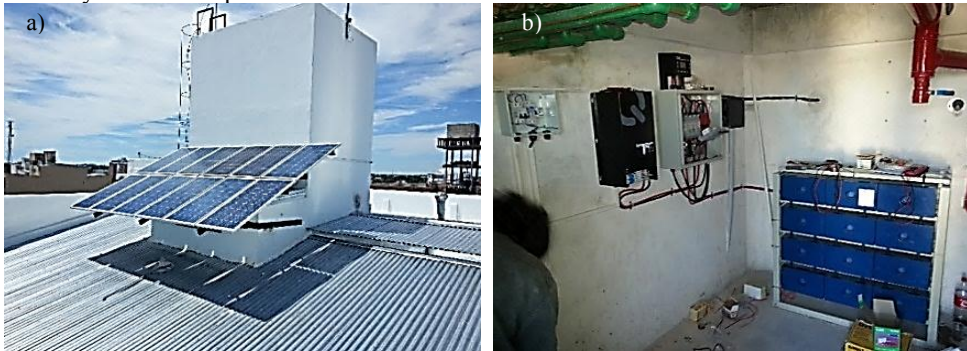
Pérgola en Universidad Nacional de Santiago del Estero



Pérgola en Secretaría de Energía Corrientes

**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 11.** a) Sistema de generación. b) Sala de máquinas con el inversor, banco de baterías y tableros de protección



**Fuente:** Arturo J. Busso.

## APLICACIONES DE BOMBEO SOLAR

En lo referente a bombeo solar, se realizaron varias experiencias cuyas características se describen en la tabla n.º 5.

**Tabla n.º 5.** Proyectos ejecutados en el área de bombeo solar

Proyecto	Característica
Corrientes: Escuela de Jardinería y Paisajismo. Financiado por la Secretaría de Energía de Corrientes dentro del Plan de Desarrollo de Energías Renovables (figura n.º 12)	Bomba: sumergible de 1 HP Módulos fotovoltaicos: 5 x 150 Wp Inversor: dual 220V/solar con MPPT 700 W/1 HP monofásico
Corrientes: Proyecto de la Secretaría de Políticas Universitarias (SPU). Unidad ejecutora: GER – Grupo en Energías Renovables – FaCENA UNNE (figura n.º 13)	Primer sistema móvil de bombeo que incluye: el tablero eléctrico de mando y protección, el sistema desalinizador de agua por ósmosis inversa, válvulas, batería de respaldo y el soporte desplegable con los módulos fotovoltaicos para generación de energía.
Formosa: financiado por el programa “Proyectos Federales de Innovación Productiva” del Mi-nisterio Nacional de Ciencia y Tecnología (MINCyT) (figura n.º 14)	Bomba sumergible con caudal de: 2 m <sup>3</sup> /hr. Módulos fotovoltaicos: 3 x 80 Wp Controlador con seguidor de punto de máxima potencia.

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 12.** Corrientes - a) Montaje del banco de generación. b) Sala de máquinas mostrando tablero de conmutación e inversor



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 13.** Formosa - a) Montaje del banco de generación. b) Controlador con MPPT



**Fuente:** Arturo J. Busso.

## APLICACIONES EN GENERACIÓN DISTRIBUIDA

A continuación se presentan experiencias en materia de generación distribuida

- Dirección de Desarrollo de Energías Renovables de la provincia de Corrientes: se están ejecutando dos proyectos piloto de Generación Distribuida cuyos detalles se presentan en la tabla n.º 6 y en la figura n.º 15 se puede observar el diseño conceptual para la integración de los sistemas en las viviendas. En este mismo esquema de proyectos piloto, se plantea la incorporación de calefones solares a las viviendas.
- Diseño e instalación de sistema FV híbrido en cabaña de madera: El sistema fue diseñado e instalado en dos cabañas de madera de quebracho colorado, cada una, cuenta con un sistema fotovoltaico híbrido donde combina las



capacidades, ventajas y flexibilidad de un sistema FV y la red convencional de energía eléctrica. Este sistema posee una potencia de generación solar de 1,2 kWp, y se encuentra ubicado en el Parque de la Democracia, en la ciudad de Resistencia. El diseño fue elaborado sobre un abordaje en el que se propone un espacio de esparcimiento en el parque más importante de la ciudad, que actúa como lugar de encuentro y acercamiento con la tecnología fotovoltaica.

**Figura n.º 14.** Fotografías del sistema de bombeo portátil y del equipo de filtrado incorporado



**Fuente:** Arturo J. Busso.

En el diseño se incorporan criterios de sustentabilidad ambiental como ser la reutilización de troncos acopiados en el terreno y la preservación de la “permeabilidad del suelo”, así como la concreción de un nodo experimental que permita monitorear los resultados de este proyecto demostrativo. La cubierta solar tiene un importante “efecto

demostrativo” tendiente a la difusión de la energía fotovoltaica (limpia, renovable y sustentable) mediante la incorporación del concepto de coexistencia de los sistemas tradicionales de generación y distribución de energía eléctrica en un espacio útil para el esparcimiento y actividades a cielo abierto. La iniciativa re-presenta un cambio conceptual, transformándose en un elemento icónico dentro de la provincia, convirtiéndose en el primer sistema de características híbridas en un ambiente urbano en el Norte Argentino.

De esta manera, se plantea una experiencia aplicada que contribuirá al conocimiento tecnológico necesario para impulsar un cambio de escala en el uso de la energía solar, mediante un trabajo interdisciplinario de distintas áreas de la UNNE (Facultades de Arquitectura, Ingeniería y Ciencias Exactas) en conjunto con la UTN FRR (figura n.º 16).

**Tabla n.º 6.** Proyectos en ejecución relacionados con Generación Distribuida

Proyecto	Característica
Corrientes: 5 sistemas FV conectado a red en viviendas sociales construidas por el Instituto Provincial de la Vivienda de Corrientes (In.Vi.Co)	Potencia instalada: 2 kW Inversor: 2.2 kW para conexión a red
Corrientes: 1 sistema FV conectado a red para iluminación de la Plaza del Hipódromo y reconversión de luminarias a LED para reducir demanda y llegar a balance cero.	Potencia instalada: 5 kW Inversor: 5.5 kW para conexión a red Demanda luego de reconversión: 3 kW

**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 15:** Diseño conceptual para la integración de sistemas FV conectados a red y de calefones solares



**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura n.º 16:** Foto de frente y posterior de la cabaña de quebracho con sistema FV híbrido



**Fuente:** Elaboración propia.

## **DESARROLLOS TECNOLÓGICOS TRANSFERIDOS**

### **Mobiliario solar para ambientes urbanos y naturales**

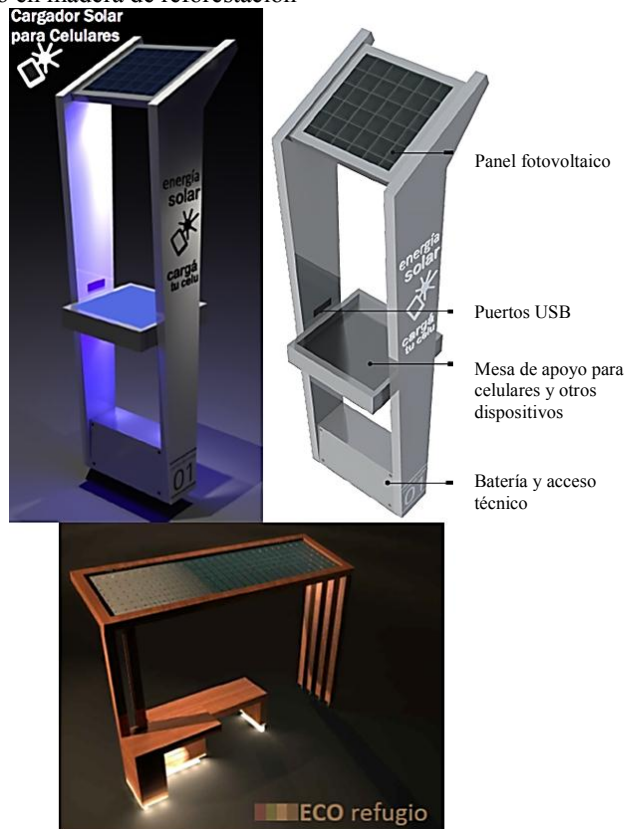
Si bien existe consenso (académico, profesional, ambiental, gubernamental) sobre la necesidad de incorporar energías renovables en la matriz energética de la Argentina, no son suficientes los casos en los que se ha logrado vincular estas tecnologías con la vida cotidiana. La difusión de las energías renovables resulta necesaria para desactivar desconfianzas, miedos y rechazos y lograr su apropiación por la comunidad. Un medio para alcanzar este objetivo es a través de la construcción e instalación de equipamientos o mobiliarios de uso público que permitan la visualización y el contacto directo (casi espontáneo) entre el ciudadano y estas tecnologías.

### **CARGADOR SOLAR**

El cargador solar integra en un solo producto distintas prestaciones como ser la iluminación y la recarga de energía para baterías de distintos dispositivos móviles, a la vez que puede servir de soporte para el marketing institucional y/o comercial, a la vez que actúa como medio de concientización social sobre la necesidad de virar hacia el uso de las energías renovables. En la figura n.º 17 se presenta imágenes del prototipo

del cargador; el mismo cuenta con cuatro puertos USB, repisa para el apoyo de los celulares o dispositivos móviles e iluminación LED de encendido automático.

**Figura n.º 17.** a) Diseño del CS desarrollado en el cual se presentan sus aspectos estéticos y técnicos, b) CS hecho en madera de reforestación



**Fuente:** Elaboración propia.

A la fecha se han instalado tres equipos en las provincias de Chaco y Corrientes que se pueden apreciar en las figuras n.º 18, 19 y 20.

- Peatonal Raúl Alfonsín y Avenida Alberdi - Resistencia.
- Parque de la Democracia y la Juventud, Resistencia, Chaco.
- Reserva Ecológica Ibera - colonia Carlos Pellegrini, Corrientes.



**Figura n.º 18.** Cargador Solar instalado en la ciudad de Resistencia



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 19.** Cargador Solar instalado en el Parque de la Democracia y la Juventud de la ciudad de Resistencia, de Chaco



**Fuente:** Arturo J. Busso.

**Figura n.º 20.** Cargador Solar instalado en la reserva natural Iberá

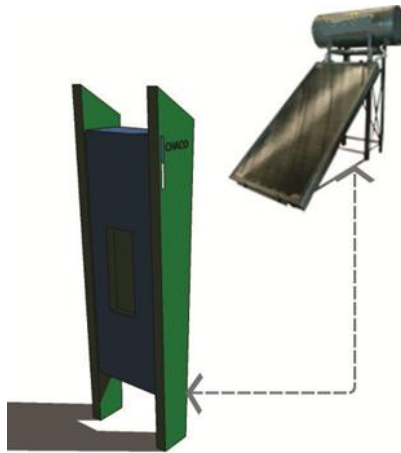


**Fuente:** Arturo J. Busso.

### **Dispenser solar de agua caliente para mate**

Está conformado por dos dispositivos, el calefón solar que precalienta el agua y un dispenser que eleva la temperatura hasta valores adecuados para tomar mate. La utilización de energía solar para precalentar el agua que se utilizará para el mate produce un ahorro de energía eléctrica del orden de 66 %. En la figura n.º 21 se presenta el diseño esquemático del dispenser solar y del calefón solar.

**Figura n.º 21.** Diseño esquemático del dispenser y calefón solar



**Fuente:** Elaboración propia.

### **DESARROLLO Y CALIBRACIÓN DE DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS PARA DETERMINAR EL RECURSO SOLAR**

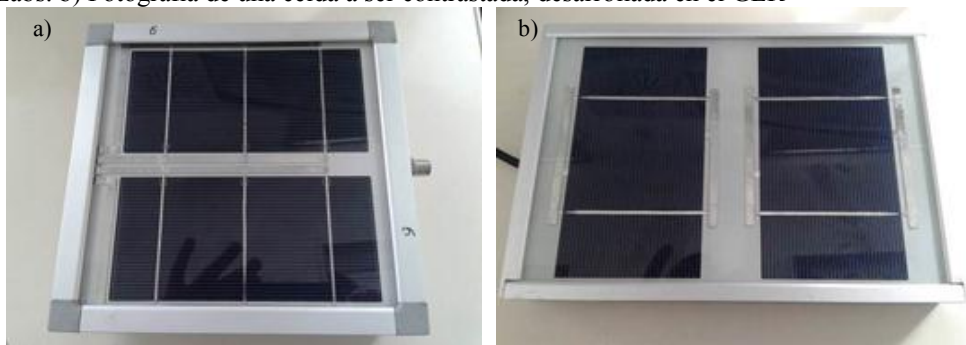
La evaluación correcta de la capacidad de generación de dispositivos fotovoltaicos requiere determinar con precisión el recurso solar. Teniendo en cuenta lo antes expuesto, se desarrolló y calibró un medidor de radiación solar cuyo elemento sensor está constituido por celdas fotovoltaicas en un encapsulado convencional de dispositivo FV. El comportamiento del sistema fue estudiado, y los valores obtenidos fueron comparados con los valores medidos con una celda patrón calibrada en el ESTI PVLAB. El análisis estadístico de las mediciones ha llevado a desarrollar una metodología para determinar los parámetros del modelo de análisis a fin de medir el

valor de la irradiancia. Una comparación entre los valores medidos resultó en valores de correlación mayores que 0,999 desarrollados entre la célula y el patrón celular, lo que confirma la linealidad y correspondencia del instrumento desarrollado con el patrón.

### Celdas FV de medición

A fin de dar cumplimiento a los objetivos en este trabajo se han desarrollado, en el GER-UNNE, celdas fotovoltaicas encapsuladas que permiten evaluar el recurso solar para generación de energía eléctrica. Con la finalidad de verificar su aplicabilidad se ha realizado la contrastación/calibración del sensor de radiación solar desarrollado frente a un sensor de radiación solar (celda patrón) fabricado y calibrado por el laboratorio PVEVOLUTION (2012). Esta celda patrón (Cpve) está conformada por dos células FV, las cuales trabajan de manera eléctricamente independiente; una de ellas se encuentra destinada a medir la irradiancia, y la otra la temperatura de célula FV (figura n.º 22(a)). La celda patrón posee las mismas celdas de los módulos fotovoltaicos de la empresa Solar World SW240 y fue calibrada según la norma IEC 60904. Las celdas construidas y a calibrar (CGER) (figura n.º 22(b)), poseen una disposición similar a la CPVE y constan de dos celdas encapsuladas en un marco común.

**Figura n.º 22.** a) Fotografía de la celda patrón construida y calibrada por ESTI PV Evolution Labs. b) Fotografía de una celda a ser contrastada, desarrollada en el GER

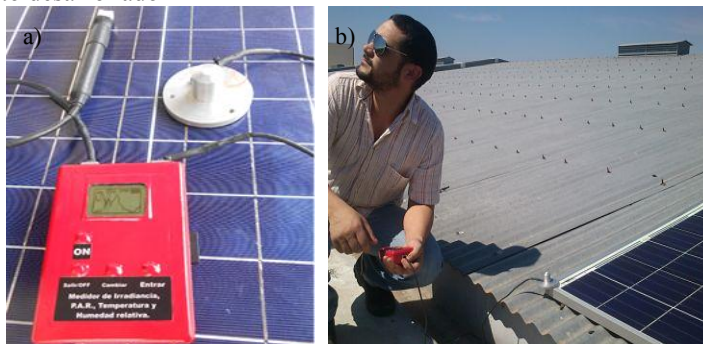


**Fuente:** Arturo J. Busso.

## DESARROLLO DE UN MEDIDOR PORTÁTIL DE IRRADIANCIA, PAR, TEMPERATURA Y HUMEDAD

Como parte de los proyectos y experiencias desarrolladas, se realizó el diseño, implementación y contrastación de un medidor portátil de irradiancia, PAR, temperatura y humedad, así como de todos los componentes que forman parte del sistema. El instrumento ha sido desarrollado en el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Universidad Nacional del Nordeste. El mismo contiene sensores digitales que le permiten medir la temperatura ambiente, humedad relativa y sensores analógicos para determinar el valor de la irradiancia y PAR. Es portable, posee una autonomía de cinco días, una pantalla para mostrar las variables medidas y es capaz de registrar datos en una tarjeta SD cumpliendo con la función de datalogger. Conjuntamente se ha desarrollado un software para la lectura y representación en un display de las magnitudes medidas en función del tiempo. En esta etapa de la investigación se cuenta con un prototipo funcional contrastado en etapa de pruebas experimentales finales.

**Figura n.º 23.** a) Medidor de irradiancia, de Humedad y de Temperatura conectado al instrumento desarrollado b) foto tomada durante la aplicación práctica del instrumento multipropósito desarrollado



**Fuente:** Arturo J. Busso.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Erenovable (2011). *Recursos energéticos*. <http://erenovable.com>.
- [2] Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007). *Atlas de Radiación Solar de la República Argentina*. Universidad Nacional de Luján.

- [3] Duffie, J. y Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Third edition. Jon Wiley & Sons, INC.
- [4] PERMER (1995). <https://www.se.gob.ar/permer/>.
- [5] VETAK (2007). <http://www.vetak.com.ar/index1.html>.
- [6] Busso, A.; Aeberhard, A., Figueredo, G.; Martina, P. y Cocca, V. (1997). “Optimización de un secadero solar por convección natural: Análisis del colector solar de aire”. *AVERMA*. Vol. 1, p. 5.
- [7] Busso, A. J.; Aeberhard, A. F. y Figueredo, G. (1998). “Un colector solar plano construido con elementos plásticos de descarte: viabilidad técnica y construcción”. *AVERMA*, Vol. 2, p. 54.
- [8] Busso, A. J. y Aeberhard, A. F. (1999). “Calefón solar de bajo costo con colector plástico plano construido en parte con elementos de descarte: primeros resultados experimentales”. *AVERMA*, Vol. 3, p. 49.
- [9] Busso, A. J. y Aeberhard, A. F. (1999). “Calefón solar de bajo costo con colector plástico plano construido en parte con elementos de descarte: perspectiva económica”. *AVERMA*, Vol. 3, p.53.
- [10] Busso, A.; Aeberhard, A.; Figueredo, G.; Martina, P. y Cocca, V. (1999). *Colector solar de aire de tipo túnel: modelo simplificado y resultados experimentales*. Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo 21. Cuba. 1999.
- [11] Toranzos, V. J.; Aquino, C. de Jesus; Brázzola, C. R. y Busso, A. J. (1999). “Prototipo de sistema híbrido solar-eléctrico para calentamiento de agua para mate”. *AVERMA*, Vol. 3, p. 17.
- [12] Busso, A.; Spotorno, R.; Pochettino, J. y Benitez, F. (2006). “Caracterización de un colector solar de placa plana diseñado para la regeneración de sílica gel de una planta piloto de climatización solar-geotérmica”. *AVERMA*. Vol. 10. p. 47.
- [13] Busso, A.; Esquivel, O.; Sogari, N. y Franco, J. (2007). “Uso de la energía solar como fuente térmica para el funcionamiento de un refrigerador por ciclo de absorción amoniaco-agua”. *AVERMA*, Vol. 11, p.67.
- [14] Busso, A.; Spotorno, R.; Pochettino, J.; Figueredo, G. y Benitez, F. (2007) “Regeneración solar de sílica gel”. *AVERMA*, Vol. 11, p. 115.

- [15] Busso, A.; Esquivel, O.; Sogari, N. y Franco, J. (2008). “Ciclo de absorción amoníaco-agua con energía solar como fuente térmica: primeros resultados del acople con aceite térmico”. *AVERMA*, Vol. 11, p. 7.
- [16] Busso, A.; Franco, J.; Sogari, N. y Cáceres, M. (2011). “Attempt of integration of a small commercial ammonia-water absorption refrigerator with a solar concentrator: Experience and results”. *International Journal of Refrigeration*. 34 (2011) 176. 0e1775.
- [17] Dri, F.; Busso, A. y Gea, M. (2009). “Ensayos de un concentrador solar cilindro parabólico con fluido caloportador”. *AVERMA*, Vol.13, p. 156.
- [18] Dri, F.; Busso, A. y Gea, M. (2010). *Simulación mediante TRNSYS de un concentrador solar cilindro parabólico con fluido caloportador*. Vol. 14, p. 47.
- [19] Busso, A.; Sogari, N. y Leyes, M. (2003). *Secado solar de productos hortícolas en el nordeste Argentino*. XXVII semana nacional de energía solar, Chihuahua, Chih, Mexico.
- [20] Sogari, N. y Saravia, L. (2003). “Modelización de un secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural”. *AVERMA*. Vol.7, p. 7.
- [21] Sogari, N.; Saravia, L. y Saravia, D. (2004). “Simulación de un secadero solar de maderas con circulación de aire por convección natural utilizando el programa SIMUSOL”. *AVERMA*. Vol. 8, p. 13.
- [22] Zurlo, H.; Vergara, L.; Benitez, F.; Sequeira, A.; De Pedro, J. y Stahringer, A. (1999). *Secado solar de productos alimenticios del monte chaqueño*. Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo 21. Cuba. 1999.
- [23] Zurlo, H.; Vergara, L.; Spotorno, R.; Benitez, F.; De Pedro, J.; Cerviño, V. y Monzon, S. (2000). *Secado solar: una tecnología apropiada para el norte argentino*. Conference Proceedings ISES MILLENNIUM SOLAR FORUM 2000.
- [24] Sogari, N. (1999). “Energía solar: experiencia en una escuela aerotécnica”. *AVERMA*. Vol. 3, p. 15.
- [25] Sogari, N. y Busso, A. (1999). “Secadero solar: balance energético”. *AVERMA*. Vol. 3, p. 20.
- [26] Sogari, N. y Busso, A. (1999). “Productos hortícolas deshidratados utilizando un secadero solar”. *AVERMA*. Vol. 3, p. 25.

- [27] Busso, A.; Sogari, N.; Lancelle, H.; Arrieta, F.; Tokeff, J. P. y Leyes, M. (2001). "Optimización de un secadero solar de tipo gabinete: evaluación y Modelización del proceso de secado y tipificación del producto seco". *AVERMA*. Vol. 5, p. 31.
- [28] Busso, A. (2003). *Modelo simplificado y validación experimental para colector calentador de aire tipo túnel basado en el formalismo de colector plano*. XXVII semana nacional de energía solar, Chihuahua, Chih, Mexico.
- [29] Sogari, N.; Busso, A. y Castillo, A. (1999). *Utilización de la energía solar para deshidratar productos hortícolas*. Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo 21. Cuba.
- [30] Sogari, N.; Busso, A. y Castillo, A. (1999). *Utilización de la energía solar para deshidratar productos hortícolas*. Conferencia Científica Internacional Medio Ambiente Siglo 21. Cuba.
- [31] Sogari, N.; Gómez, C.; Busso, A. y Condorí, M. (2008). "Secadero solar por convección de aire caliente para deshidratación de Almidón de mandioca destinado a pequeños productores rurales de la Provincia de corrientes en fase de construcción". *AVERMA*. Vol. 12, p. 71.
- [32] Caceres, M.; Pinto, E.; Busso, A.; Cadena, C. y Vera L. (2010) "Modelo matemático para simular la interacción entre un sistema de generación fotovoltaica y la red de baja tensión". *AVERMA*, Vol. 14, p. 25.
- [33] Caceres, M.; Busso, A.; Cadena, C. y Vera L. (2011). "Determinación de la eficiencia de conversión del inversor empleado en un sistema de generación fotovoltaica conectado a red instalado en el nordeste argentino". *AVERMA*, Vol. 15, p. 40.

Los investigadores autores del presente capítulo desarrollan sus actividades como integrantes del GER - Grupo en Energías Renovables de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), en Corrientes, Argentina.

### **Arturo Juan Busso**

Se graduó como Licenciado en Ciencias Físicas de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), en Corrientes, Argentina en 1985. Finalizó su MSc. in Physics en el TECHNION (Israel Institute of Technology) en el año 1990 y recibió el título de Doctor en Ciencias Area Energías Renovables de la Universidad Nacional de Salta en el año 2011. Actualmente es profesor de Termodinámica en el Departamento de Física de la FaCENA, UNNE, Corrientes, Argentina. Realizó pasantías de investigación en el ZAE Bayern de la UTM, Munich, Alemania. Posee más de 80 trabajos científicos en autoría y coautoría publicados en revistas internacionales y conferencias. Ha participado en más de 30 proyectos de investigación, siendo director en 15 de ellos con financiamiento de organismos tales como MINCyT (Argentina), ANPCyT, Secretaria General de Ciencia y Técnica (SECyT) de la UNNE, CIN-CONICET, entre otros. Ha participado en la formación de becarios de pre-grado y de pos-grado y dirigido Tesistas de Maestría. Sus principales intereses incluyen el aprovechamiento térmico y eléctrico de la energía solar y almacenamiento de energía térmica en el subsuelo. Participó en el desarrollo de la patente titulada “Carga híbrida para caracterización de arreglos fotovoltaicos”.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#!/resultados?q=arturo%20juan%20busso&tipo=Persona&start=0&rows=15>.

### **Luis Horacio Vera**

Se graduó de Ingeniero Mecánico en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), en Resistencia, Argentina en 2000. Finalizó su Maestría en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad Federal de Rio Grande do Sul



en el año 2004 y recibió el título de Doctor en Ingeniería Mecánica en la misma universidad en 2009. Posee también título de Especialista En Gerencia Y Vinculación Tecnológica otorgado por Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) en el año 2015. Actualmente es profesor de Termodinámica en el Departamento de Física de la FaCENA, UNNE, Corrientes, Argentina. Ha participado en más de 20 proyectos de investigación, siendo director en 8 de ellos con financiamiento de organismos como CAPES (Brasil), MINCyT (Argentina) ANPCyT, Secretaria General de Ciencia y Técnica (SECyT) de la UNNE, Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación. Ha participado en la formación de becarios de pre-grado y de pos-grado y dirigido Tesis de Doctorado. Posee más de 50 trabajos científicos en autoría y coautoría publicados en revistas internacionales y conferencias. Participó en el desarrollo de la patente titulada “Carga híbrida para caracterización de arreglos fotovoltaicos”.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#/resultados?q=luis%20horacio%20vera&tipo=Persona&start=0&rows=15>.

## **Manuel Cáceres**

se graduó como Ingeniero Electricista Orientación Electrónica otorgado por la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) en el año 2009 y recibió el título de Doctor en Ciencias Área Energías Renovables otorgado por la Universidad Nacional de Salta (UNSa) en el año 2014. Actualmente desempeña es profesor Ordinario en la cátedra “Señales y Sistemas” de la carrera de ingeniería Electrónica que se dicta en la FaCENA-UNNE. Participa en un proyecto bilateral entre Argentina y Brasil aprobado por los organismos CAPES (Brasil) y MINCyT (Argentina), en diversos proyectos de investigación aprobados por la ANPCyT, Secretaria General de Ciencia y Técnica (SECyT) de la UNNE, Secretaría de Políticas Universitarias del Ministerio de Educación de la Nación. Ha participado en la formación de becarios de pre-grado y de pos-grado. Realizó actividades de transferencia entre las que se destaca el desarrollo de un medidor de estrés térmico y de un sistema centralizado de monitoreo de humedad relativa y temperaturas con visualización en PC. Es autor y coautor de 10 publicaciones

nacionales e internacionales con referato y 37 presentaciones en jornadas y congresos nacionales. Participó en el desarrollo de la patente titulada “Carga híbrida para caracterización de arreglos fotovoltaicos”.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#!/resultados?q=manuel%20caceres&tipo=Persona&start=0&rows=15>.

## **Andres Firman**

se graduó como Ingeniero Electricista Orientación Electrónica otorgado por la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) en el año en 2006 y recibió el título de Doctor en Ciencias Área Energías Renovables otorgado por la Universidad Nacional de Salta (UNSa) en el año 2014. Actualmente desempeña es profesor Ordinario en la cátedra “Electricidad, Magnetismo, Optica y Sonodo” que se dicta en el Departamento de Física de la FaCENA - UNNE. . Es autor y coautor de 19 publicaciones con referato, tanto en ámbitos nacionales como internacionales. Trabaja activamente como investigador en proyectos acreditados, tareas de transferencia y extensión, formación de recursos humanos y realizando pasantías de perfeccionamiento vinculadas a la energía solar fotovoltaica en instituciones de prestigio; Grupo de Energía Solar (Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina), LABSOL (UFRGS, Brasil) y Grupo I+DEA (Universidad de Jaén, España). Participó en el desarrollo de una patente Nacional. En el ámbito privado se ha desenvuelto en distintas instituciones relacionadas a la salud. Participó en el desarrollo de la patente titulada “Carga híbrida para caracterización de arreglos fotovoltaicos”.

<http://www.sicytar.mincyt.gob.ar/buscacvar/#!/resultados?q=andres%20danilo%20firman&tipo=Persona&start=0&rows=15> .

PARTE IV  
POLÍTICAS ENERGÉTICAS



# PLANIFICACIÓN ENERGÉTICA Y CONDICIONES DE BORDE: PROPUESTAS PARA EL CASO ARGENTINO

Carina Guzowski<sup>1</sup>, Mariana Zilio<sup>1</sup>, Marina Recalde<sup>1</sup>,  
Ana Lía Guerrero<sup>1</sup>, Florencia Zabaloy<sup>1</sup>

## RESUMEN

El interés de esta investigación radica en analizar el rol de las políticas públicas y de la planificación energética en el alcance de los objetivos del desarrollo sustentable, entendido como una evolución coordinada y conjunta en el tiempo de cuatro dimensiones: *social, política, económica y ambiental*. Se pretende analizar con especial atención la relevancia del proceso de planificación energética en el desarrollo económico para el caso argentino. En este sentido se examina la importancia de la elección de distintos instrumentos de política y de las condiciones de borde en la consecución del objetivo de la planificación energética. El estudio, se concentra en el caso argentino y se realiza bajo una visión sistémica, que incluye como punto fundamental de análisis la dimensión histórico temporal, complementando el análisis

---

<sup>1</sup> Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur, Argentina. Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (IIESS) (CONICET-UNS).

con herramientas de distintos enfoques, tales como la economía ecológica y la economía ambiental, y la proveniente de la ciencia geográfica en la búsqueda de una comprensión lo más abierta (amplia) posible de la problemática bajo estudio.

**Palabras claves:** Planificación energética - Mercados energéticos - Energía.

## INTRODUCCIÓN

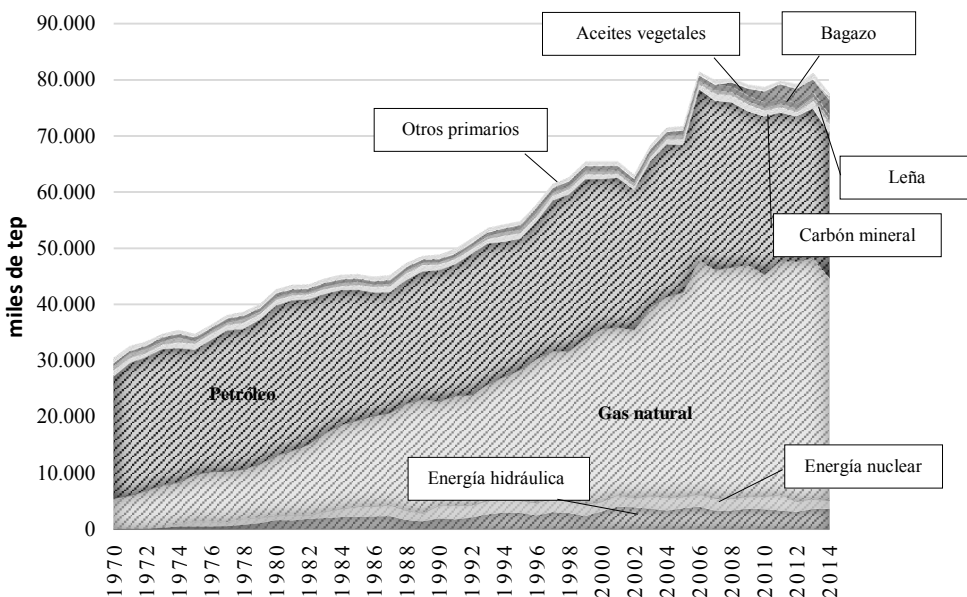
La energía cumple un rol clave y determinante en el proceso de desarrollo de un país, tanto por su importancia como insumo productivo en el proceso de crecimiento, como por su relevancia como bien de consumo en el desarrollo social. Desde este enfoque se considera a la energía como un bien que puede contribuir en combinación con otros bienes y servicios a la satisfacción de las necesidades del hombre que vive en sociedad. En este sentido, satisface necesidades sociales y, por tanto, la falta de abastecimiento genera efectos directos sobre el bienestar de todos los agentes económicos, pero en mayor medida sobre los de menores ingresos. La importancia de la energía en el desarrollo social se relaciona con el grado de cobertura de los llamados servicios energéticos (calefacción, cocción, iluminación, refrigeración), la calidad de los recursos utilizados para lograr dicha cobertura y el impacto del costo de la energía en los ingresos familiares con consecuencias sobre el desarrollo humano. Los mismos tienen un gran impacto sobre la salud, la educación, el cambio climático y la seguridad alimentaria e hídrica.

La energía se entiende entonces como un bien social que crea o genera bienestar y que debe contribuir a una conciencia solidaria respecto al uso de las fuentes energéticas y el impacto que genera su consumo sobre el medio circundante.

En este sentido, este punto de vista se considera entonces que la planificación de los recursos energéticos es un tema crucial en sistemas como el argentino en que la provisión de estos recursos se dejó por muchos años en manos del mercado. En este sentido puede decirse que las políticas energéticas fueron mutando significativamente en las últimas cinco décadas, en el marco de los cambios acontecidos respecto a la concepción del modelo de Estado imperante. Sin embargo, cuando se estudia la evolución energética desde el punto de vista histórico, puede observarse que en todos los periodos

se impulsó la inserción del gas en los usos residenciales, industriales y de generación eléctrica, principalmente por ser una fuentes energética segura y de menores impactos ambientales respecto a las proveniente de los combustibles fósiles tal como se muestra en la figura n.º 1.

**Figura n.º 1.** Evolución de la Matriz de Energía primaria en Argentina- 1970-2014



**Fuente:** Ministerio de Energía y Minería de Argentina.

Sin embargo, esta política no estuvo acompañada en los últimos veinte años, por el diseño de medidas eficaces en lo relativo a la expansión de las reservas de gas, que fueran suficientes para sostener una demanda creciente.

A partir del año 2002, se fue virando hacia una nueva forma de concebir la política energética y las modalidades de coordinación que guían las decisiones del sector. Ello implicó ir hacia una mayor intervención del Estado en la planificación y gestión de los recursos energéticos, aunque no resolvió los problemas estructurales del sector. La resolución de los mismos se encuentra íntimamente relacionada a las características específicas que presentan las cadenas productivas en la Argentina, fuertemente vinculadas entre sí (cadena productiva eléctrica imbricada con la del gas y la de hidrocarburos), y a problemas institucionales sistémicos de difícil resolución en el corto

plazo, ya que implica la discusión de nuevos marcos regulatorios e institucionales acordes a las nuevas características del sector. Asimismo, algunas condiciones de entorno o de borde se han mantenido a lo largo de los períodos analizados dificultando el éxito de las políticas energéticas. Dichas condiciones pueden mencionarse como: la debilidad y fragmentación institucional, el quiebre en las condiciones contractuales, la falta de acceso al crédito, falta de estabilidad en los marcos regulatorios.

## **PERSPECTIVA**

La hipótesis de este trabajo es que el sistema energético argentino presenta serios problemas relacionados con el abastecimiento, principalmente focalizado en dos cuestiones claves: primero, en la insuficiencia de gas de procedencia nacional para hacer frente a una demanda del sector de generación eléctrica e industria en constante aumento, y segundo, el retraso de las tarifas que no reflejan el verdadero costo de la energía en la producción de energía eléctrica.

Aunque mucho se ha remarcado acerca de la necesidad de diversificar la matriz energética nacional, esta posibilidad es moderada en su impacto global, y podría limitarse al uso de los biocombustibles y un leve cambio en la matriz de generación eléctrica en los próximos años, si se concreta que el 8 % del consumo eléctrico provenga de las fuentes renovables en el 2016 como lo propone la Ley n.º 26190 (Régimen de Fomento Nacional para el uso de las fuentes renovables de Energía destinada a la producción de energía eléctrica). En este contexto, a pesar de lo anteriormente mencionado, la dependencia del gas natural será creciente tanto en los consumos intermedios como en los finales.

La hipótesis central de este trabajo descansa sobre el argumento de que la oferta de las distintas fuentes energéticas (renovables y no renovables) no puede considerarse conformada por productos homogéneos perfectamente sustituibles; y la imposibilidad de aprovisionamiento a escala nacional puede ser suplida sin consecuencias por recursos importados. En efecto, la prevalencia de esta idea ha conducido al incremento desmesurado del déficit de la balanza energética en los últimos años, y su consecuente efecto sobre el saldo de la balanza de pagos.



Por lo anteriormente expuesto, en este proyecto se aborda la hipótesis de que es necesario que el Estado tenga un rol activo en el diseño y ejecución de la planificación de los recursos energéticos. Es importante diseñar una política energética dentro de una política nacional más abarcativa de desarrollo de largo plazo que sea transversal a todos los sectores y que se mantenga invulnerable a los cambios políticos, y se encuentre favorecida por las condiciones de borde adecuadas.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

La mencionada política energética debe enmarcarse en condiciones específicas, denominadas de entorno, dado que hasta el momento, la viabilidad de algunas medidas de política energética se ha visto condicionada por el contexto en el que se han implementado. Dado este marco, el objetivo ha sido identificar, para el caso argentino, aquellas condiciones de borde o de entorno que hacen que determinadas políticas lleguen a resultados positivos o negativos, y poder encontrar qué es lo que hace que un sistema energético sea sostenible en el tiempo; qué condiciones deberían darse para alcanzar el autoabastecimiento en el futuro; qué marcos institucionales habría que promover para que las políticas sectoriales funcionen coordinadamente, pensando al sector energético desde un enfoque sistémico, según el cual la falta de aprovisionamiento de un recurso en una cadena productiva genera efectos directos sobre otras cadenas productivas. Estas condiciones de borde están directamente definidas por el contexto institucional, las políticas regulatorias y el marco legal que promueven la sustentabilidad de un sistema energético en el tiempo: las condiciones tecnológicas, los recursos y las prácticas, que están sujetas a cambios en la acción del gobierno, sin dejar de tener en cuenta el contexto internacional.

Cuando se estudian tales condiciones de entorno, se está examinando entonces un conjunto de escenarios necesarios y posibles para que las políticas implementadas en cada cadena productiva funcionen con éxito.

## **PRINCIPALES CONTRIBUCIONES AL TEMA POR PARTE DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN**

El grupo de investigación ha trabajado en identificar y analizar aquellas condiciones de borde o condiciones de entorno (contexto habilitante) que se refieren a las denominadas condiciones del marco institucional, regulatorio y políticas de alcance más amplio, que influyen, determinan o facilitan la viabilidad de las políticas sectoriales o subsectoriales aplicadas en el sector energético argentino.

Esto se debe a que al momento de la elaboración y puesta en marcha de cualquier política energética existe una multiplicidad de factores que se combinan para dar el resultado final: las condiciones de contexto nacional e internacional (condiciones de entorno), las barreras con las que se enfrentará la política, los actores claves, y los instrumentos (directos e indirectos) a utilizar [1]. Por estos motivos, cualquier análisis de política energética debe contar, en primera instancia, con una comprensión de las condiciones de entorno y los factores históricos que los han determinado.

Por lo tanto hay que tener en cuenta que al momento de desarrollar una determinada política energética existen un conjunto de condicionantes que se combinan para determinar sus resultados finales. Entre ellos, se enumeran las condiciones de contexto nacional e internacional (condiciones de entorno), las barreras con las que se enfrentará la política, los actores claves y los instrumentos (directos e indirectos) a utilizar. ([1]; [2]). Las mencionadas condiciones de entorno —también denominadas condiciones habilitantes— derivan del entorno institucional, regulatorio que determinan o permiten la viabilidad concreta de determinadas políticas sectoriales o subsectoriales. Se trata en general del contexto nacional e internacional en el cual se implementan las políticas, condiciones que no pueden ser modificadas por quien diseña la política sectorial. En gran medida estas condiciones de entorno (en particular las condiciones del contexto nacional) dependen en forma cuasi directa del desarrollo institucional del país [2]. Se suele tener la percepción de que las conductas y decisiones de los actores son independientes entre sí. Por el contrario, cada uno de ellos se encuentra influenciado por las decisiones de los demás a la vez que define condiciones de borde que afectan a los restantes actores intervinientes. Esta fuerte interacción obliga a analizar al sistema energético con una visión sistémica y no parcializada, considerando las fuertes

interrelaciones que existen entre las cadenas energéticas más representativas-petróleo-gas-electricidad [3] y entre las cadenas pro-ductivas de las fuentes renovables y no renovables de energía.

En este grupo se ha trabajado en el concepto de que al momento de desarrollar el proceso de planificación energética el diseñador debería reconocer estas condiciones de entorno o de borde, tanto aquéllas derivadas del mercado nacional como internacional, de manera de adoptar diferentes instrumentos para el logro de acciones específicas, que se complementen, a los efectos de diseñar un sendero de expansión del sistema y desarrollar sistemas de aprovisionamiento alternativos en el largo plazo.

Si bien, con frecuencia, no son tenidas en cuenta las condiciones de entornos, son vitales para el desarrollo de la política energética. Su importancia radica en que son las que aportan el marco para el desarrollo de estrategias energéticas. Así mismo, la existencia de estas condiciones favorables facilita la remoción de las barreras a la implementación de diferentes políticas, al otorgar un contexto propicio para el desarrollo de estrategias, este es por ejemplo el caso de las energías renovables.

Para el logro de lo anteriormente mencionado se trabajó en:

La comprensión desde un análisis histórico de la actual situación del sector energético argentino en algunas de sus principales cadenas y algunos de los factores que han llevado a dicha situación. El fin último ha sido proveer un resumen de las complejidades del sistema energético actual, desde una visión sistémica, para a partir de ella, poder discutir el resto de los aspectos específicos que se desarrollaran en este proyecto.

Analizar para el caso argentino la evolución de la política energética en los últimos cien años, poniendo especial énfasis en examinar lo ocurrido en la última década con la política de promoción de las energías renovables, enfocado desde una perspectiva histórica, multidimensional y amplia del sector energético, considerando que el mismo genera fuertes impactos sobre el medio ambiente natural, e importantes derrames sobre el aparato social. En este punto se ha puesto principal énfasis en detectar qué condiciones del entorno socio institucional y económico argentino se constituyen en barreras a la promoción de las energías renovables.

El rol que el sector energético argentino tiene en la actualidad en relación a la meta general de reducción de emisiones de GEI impulsada por los organismos interna-

cionales expertos en la materia. Lo que aquí se presenta no es un listado taxativo de los instrumentos disponibles o implementados en la Argentina en materia de política ambiental en relación al sector energético, sino un pequeño aporte a la discusión sobre algunos tópicos relevantes en un contexto de creciente preocupación por los efectos del cambio climático a nivel global.

## **METODOLOGÍA**

La energía tiene una serie de características que hacen conveniente enfocar su estudio desde varias dimensiones que se interrelacionan: la dimensión física, la dimensión tecnológica, la dimensión económica, la dimensión política, la dimensión legal y la dimensión ambiental [1]. Por estos motivos, la utilización de un método de estudio sistémico multidimensional como herramienta de análisis de los fenómenos energéticos y su asociación a los mercados, permite mostrar las articulaciones mutuas entre los distintos actores y sus estrategias. Se parte de una concepción metodológica flexible y rigurosa, que comprende los procesos de reestructuración de la cadena productiva energética desde una concepción holística. Esta estrategia teórico-metodológica, que incluye la interrelación entre distintos niveles de análisis relacionados, y enfocado desde diferentes dimensiones (física, económica, ambiental, social, cultural y política) permite una reflexión teórica favoreciendo la interacción multidisciplinaria y las relaciones intersectoriales en la propia cadena productiva [4].

Siguiendo esta perspectiva de análisis integral, este proyecto propone la integración de los análisis económicos tradicionales con aquellos provenientes del enfoque de la economía ambiental, la economía ecológica y el propuesto por la ciencia geográfica. El objetivo es complementar la visión tradicional con enfoques metodológicos alternativos para lograr un análisis lo más sistémico y abarcativo posible, teniendo en cuenta la complejidad del objeto de estudio de esta investigación.

La adaptación del enfoque sistémico al estudio de los problemas energéticos permite analizar el rol que desempeñan los actores implicados, sus interacciones y redes, y la influencia que tienen las instituciones. Estas últimas entendidas como normas formales e informales, rutinas, costumbres, reglas de comportamiento.

Por último, el análisis de las alternativas de adaptación y mitigación del cambio climático relacionado con el sector energético se llevará adelante con base en las herramientas provistas por la economía ambiental, en línea con la literatura específica que aborda el cambio climático desde un enfoque de efectos externos.

Asimismo la ciencia geográfica aporta al proyecto una metodología específica y propia, que consiste en poner énfasis en las interacciones sociedad/territorio, en las diferentes escalas: local, nacional, regional y global, representando una alternativa complementaria para la interpretación de la problemática, con el propósito de elaborar propuestas de solución a efectos de minimizar los conflictos actuales. Es en este marco donde se destacan los aportes del método geopolítico como modelo de análisis alternativo en estudios económicos y la consideración del territorio como anclaje territorial y no solo como enclave productivo, pues en él existen, entre otros, recursos y actores como protagonistas principales.

Sobre la base de estos abordajes metodológicos provenientes básicamente de la ciencia económica y de la ciencia geográfica, se ha pretendido evaluar y concluir acerca de la pertinencia de las políticas sectoriales aplicadas al sector, así como de las futuras posibilidades y efectividad de su aplicación.

## **FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS**

En el presente proyecto de investigación participan tres docentes investigadores del Departamento de Economía de la UNS, un docente del Departamento de Geografía de la UNS y dos alumnos de la Licenciatura en Economía de la UNS. Seguidamente se referirá a los aspectos centrales referidos a la formación de cada uno de los integrantes del grupo de investigación, y los objetivos perseguidos a través de su incorporación al equipo de trabajo.

La Dra. Carina Guzowski es Licenciada y Doctora en Economía de la Universidad Nacional del Sur (UNS). Actualmente se desempeña como docente del Departamento de Economía de la UNS e Investigadora del Instituto de Investigaciones Sociales y Económicas del Sur —IIESS— (UNS/CONICET). Los estudios realizados por la Dra.

Guzowski se encuentran enmarcados en el área de Economía de la Energía, estando sus últimas publicaciones y trabajos de campo de referencia en relación a la problemática de los mercados de generación eléctrica en la Argentina y en algunos países de América del Sur, y a las políticas de desarrollo de los recursos renovables en la Argentina.

La Dra. Marina Recalde trabaja actualmente en temas relativos a la Política Energética y la Planificación Energética. Ha centrado sus estudios en demostrar que la sola adopción de políticas de liberalización de los mercados en las industrias energéticas, y la desverticalización de la industria no alcanzan para el logro de la autosuficiencia energética y la seguridad de abastecimiento. Por tanto su aporte al grupo provendrá del estudio de las decisiones públicas y privadas para incrementar la oferta de energía. Asimismo, el aporte de la Dra. Recalde proviene del análisis de las políticas que es necesario adoptar en la Argentina para lograr una mayor inserción de las fuentes renovables en la matriz energética.

La Dra. Mariana Zilio, trabaja en el área de Recursos Naturales, Medio Ambiente y Cambio Climático. Debido a que el sector energético es el principal responsable de los gases de efecto invernadero vertido al medio ambiente, se considera que su aporte provendrá del estudio de la incidencia y las potencialidades de la Argentina y América Latina en los acuerdos internacionales referidos al Cambio Climático, y cómo las políticas relacionadas a la promoción de la eficiencia energética afectarán la posición de la región en los acuerdos de mitigación. El aporte de la Dra. Zilio se focalizará específicamente en analizar qué políticas es necesario implementar en la Argentina para disminuir el impacto del sector energético sobre el calentamiento global, y cuáles serían los efectos sobre el medio ambiente de seguir sustituyendo gas por fueloil y gasoil en la generación eléctrica. En este sentido, la Dra. Zilio se enfocará en analizar qué medidas sería necesario instrumentar para morigerar el impacto ambiental proveniente de la utilización de combustibles más contaminantes, y cómo esas medidas pueden incluirse en la planificación de los recursos energéticos en la Argentina.

La Dra. Analia Guerrero, ha realizado su Tesis Doctoral en la temática del rol estratégico del gas como variable crítica del sistema energético nacional y regional. En esta etapa profundiza su trabajo de investigación, analizando desde la visión de la ciencia geográfica, el carácter estratégico de la energía desde la perspectiva que brinda la geopolítica. Procura analizar y comprender los conflictos que surgen en el uso de los

recursos energéticos, principalmente petróleo y gas, en función de factores geográficos asociados a la disponibilidad de esos recursos, como base del desarrollo de nuestra civilización basada en el consumo de energía a costos accesibles, a través de las relaciones de poder que se establecen entre los poseedores del recurso y los consumidores.

La Lic. en Economía Florencia Zabaloy es Becaria de Iniciación a la Investigación de CONICET y su plan de investigación aborda la temática de las políticas de eficiencia energética en el sector residencial argentino: barreras y obstáculos para su implementación bajo la dirección de la Dra. Marina Recalde y la Dra. Carina Guzowski.

## PRODUCCIÓN DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN

- [1] Recalde, M. y Guzowski, C (2016). “Política energética y desarrollo socio-económico: Una aplicación al caso argentino”. En: Guzowski, C. (Comp.) *Políticas de promoción de las energías renovables: Experiencias en América del Sur*, Bahía Blanca: Ediuns.
- [2] Del Valle Guerrero, A. L. (2016). “Aproximación a la geopolítica de las energías renovables”. En: Guzowski, C. (Comp.) *Políticas de promoción de las Energías Renovables: Experiencias en América del Sur*. Bahía Blanca: Ediuns.
- [3] Zabaloy, M. F. (2016). “Energías renovables, acceso energético y capital social: Un proceso de enseñanza-aprendizaje”. En: Guzowski, C. (Comp.) *Políticas de promoción de las Energías Renovables: Experiencias en América del Sur*. Bahía Blanca: Ediuns.
- [4] Recalde, M. Y. (2015). “The different paths for renewable energies in Latin American Countries: the relevance of the enabling frameworks and the design of instruments”. *WIREs Energy Environ.* 2015. doi: 10.1002/wene.190.
- [5] Recalde, M. Y.; Bouille, D. y Girardin, L. O (2015). “Limitaciones para el desarrollo de energías renovables en Argentina: el rol de las condiciones de marco desde una perspectiva histórica”. *Revista Problemas del Desarrollo*, 183 (46), octubre-diciembre 2015, 89-115.
- [6] Recalde, M.; Guzowski, C. y Zilio, M. (2014). “Are modern economies following an energy (de) materialization path?” *Energy for Sustainable Development*, Editor Gautam S. Dutt, ELSEVIER Indexada en: *Science Citation*

*Index; Science Citation Index Expanded™; Current Contents/ Engineering, Computing & Technology®*, SCOPUS.

- [7] Zilio, M (2014) “¿El final de la Curva de Kuznets de Carbono?: Un análisis semiparamétrico para América Latina y el Caribe”, con M. A. Caraballo Pou. El Trimestre Económico, Fondo de Cultura Económica 81 (1) 321, pp. 241-270.
- [8] Guerrero, A. L. del V. (2014). “El Gas Natural Licuado y su impacto en la circulación de la energía. Análisis Multiescalar”. *Revista Transporte y Territorio/11-* [5-32] Editorial de la Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires. n.º 11, 2º semestre.  
<http://revistascientificas.filo.uba.ar/index.php/rtt/article/view/653/632>.
- [9] Guerrero, A. L. del V. (2014). *Transiciones energéticas en el siglo XXI. De la geopolítica del shale a la geopolítica de las energías renovables*. 1, 2 y 3 de octubre 2014. 1º Congreso Argentino de Energías Sustentables. Universidad Tecnológica Nacional, Universidad Nacional del Sur y Colegio de Ingenieros de la Provincia de Buenos Aires. Bahía Blanca, 8 páginas.
- [10] Zilio, M (2014). Third Deliverable “Stakeholder Visions and Perspectives on the Future from the Argentina Case Study”. En: colaboración con M. Rojas, S. London, M. L. Bustos, Huamantino Cisneros, A., F. Scordo, F. Ferrelli, G. M. E. Perillo, M. C. Piccolo, V. Vitale, P. Bordino, L. Berninsone, J. C. Pascale. Financiado por el 7º Programa Marco de la Comisión Europea.  
Disponible en: [http://comet-la.eu/images/comet\\_la/deliverables/Deli\\_4.3.pdf](http://comet-la.eu/images/comet_la/deliverables/Deli_4.3.pdf).
- [11] Zilio, M (2013). Second Deliverable “Stakeholder vision on problems and drivers related to environmental challenges in Argentina Case Study”. En: colaboración con S. London, M. Rojas, M. L. Bustos, A. Huamantino Cisneros, M. M. Ibañez, F. Scordo, G. M. E. Perillo, , M. C. Piccolo, J. C. Pascale, G. Fidalgo, P. Bordino, L. Berninsone, M. C. Vaquero, C. Rodríguez y M. Recalde. Financiado por el 7º Programa Marco de la Comisión Europea.  
Disponible en: [http://comet-la.eu/images/comet\\_la/deliverables/COMET-LA%20D4.2.pdf](http://comet-la.eu/images/comet_la/deliverables/COMET-LA%20D4.2.pdf).
- [12] Guzowski, C.; Recalde, Z. y Zilio, M. (2013). *Las Fuentes Renovables de Energía En Argentina: su Aplicación a los mercados rurales dispersos*, VIII Jornadas Interdisciplinarias de Estudios Agrarios y Agroindustriales, Buenos



- Aires, 29, 30 y 31 de octubre del 2013, Facultad de Ciencias Económicas, Universidad de Buenos Aires, publicado en CD.
- [13] Guzowski, C.; Recalde, M., Zilio, M. y Guerrero, A. (2013) *Análisis de las Políticas públicas aplicadas al sistema energético ambiental argentino desde un enfoque multidimensional*, 5to Simposio Internacional de Investigación, Interdisciplinariedad, Mutidisciplinariedad y/o Transdisciplinariedad: En la búsqueda de respuestas desde las experiencias de investigación , 20 al 22 de agosto del 2013, San Salvador de Jujuy, Universidad Católica de Santiago del Estero, Departamento Académico, Res 312/2012. (En coautoría con Guerrero, A; Recalde, M y Zilio, M)
- [14] Guzowski, C. y Recalde, M. (2013). *Nuevas Regulaciones en el mercado de generación eléctrica en Argentina: Su impacto sobre las fuentes renovables de energía*, Hyfussen 2013, 5° Congreso Nacional, 4° Congreso Iberoamericano Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía, Córdoba, Argentina, 10-14 de junio del 2013.  
[http://www2.cab.cnea.gov.ar/ieds/hyfusen\\_2013/libro\\_nu\\_sist10\\_1.html](http://www2.cab.cnea.gov.ar/ieds/hyfusen_2013/libro_nu_sist10_1.html).
- [15] Guzowski, C.; Recalde, M. y Zilio, M. (2013). *¿Es posible el desarrollo y la desmaterialización energética?* Argentina. Salta. Revista. Artículo Completo. Jornada. ASAUE 2013-VI Jornadas de la Asociación Argentino Uruguaya de Economía Ecológica. Universidad Nacional de Salta/ASAUEE (Asociación Argentina Uruguaya de Economía Ecológica)/Instituto de Recursos Naturales y Ecodesarrollo (IRNED)/Instituto de Energías No Convencionales (INENCO).
- [16] Zilio, M. (2012). “Curva de Kuznets Ambiental: la validez de sus fundamentos en países en desarrollo”. *Cuadernos de Economía*. 35. pp. 43-54.
- [17] Zilio, M. (2012) “El rol de la política energética en las emisiones por generación eléctrica de América Latina”. *Revista de Ciencias Económicas*, Universidad de Costa Rica. Volumen 30, enero-junio 2012, n.º 1, pp. 109-132.
- [18] Zilio, M. (2012). First Deliverable “Stakeholder vision on social- ecological-system situation in Argentina case study”. En colaboración con S. London, M. Recalde, M. Rojas, G. Perillo, M. L. Bustos, M. C. Piccolo, C. Rodríguez, G. Fidalgo, J. C. Pascale, L. Berninsone, A. Huamantincó Cisneros y P. Bordino – Community-based Management of Environmental Challenges in Latin America (COMET-LA).

- Disponible en: <http://www.cometla.net/sites/default/files/DELIVERABLE%20ARGENTIN>.
- [19] Guerrero, A. L. del V. (2012) *Relaciones internacionales, relaciones de poder. Nueva geopolítica de la energía en la región sudamericana*. Saarbrücken, Alemania: Editorial Académica Española.
- [20] Guerrero, A. L. del V. (2012) “Advances in Natural Gas Technology”. *Chapter 3 “Geopolitics of gas in South America”* by A. L. del V. Guerrero. Book edited by: Dr. Hamid Al-Megren, King Abdulaziz City for Science & Technology, Saudi Arabia, Editorial In Tech, E-book.  
<http://www.intechopen.com/articles/show/title/geopolitics-of-gas-in-south-america>.
- [21] Recalde, M.; Zilio, M. y Guzowski, C. (2012). *How we can support future economic growth? Is there a global energy dematerialization?* Conferencia ISEE, International Society of Ecological Economics, Río de Janeiro.  
[http://www.isee2012.org/oral\\_presentation\\_and\\_poster\\_sessions\\_all\\_versao\\_programa\\_1306.pdf](http://www.isee2012.org/oral_presentation_and_poster_sessions_all_versao_programa_1306.pdf).
- [22] Recalde, M.; Flexor, G. y Martins Kato, K. (2012). “Mercado de Biodiesel y las políticas públicas: Los casos de Argentina y Brasil en forma comparada”. *Revista de la CEPAL* 108, pp. 71-89.
- [23] Recalde, M. y Ramos-Martin, J (2012). “Going beyond energy intensity to understand the energy metabolism of nations: the case of Argentina”. *Energy* 37 (1) pp. 122-132.
- [24] Recalde, M. (2012). “Importancia del autoabastecimiento energético: Impactos directos e indirectos sobre el crecimiento”. *Revista Ciencias Económicas* 30 (1), enero-junio 2012 pp. 87-107.
- [25] Recalde, M. (2012). “Un análisis de la renta de los recursos energéticos en Argentina, Problemas del Desarrollo”. *Revista Latinoamericana de Economía* Volumen. 43, n.º 170, julio-septiembre 2012 pp. 9-37.
- [26] Recalde, M. (2012). “Una visión integrada del desarrollo del biodiesel en Argentina”. *Estudios Sociedade e Agricultura* 20 (1) pp. 188-216.
- [27] Guerrero, A. L. del V. (2012). “Advances in Natural Gas Technology”. *Chapter 3 “Geopolitics of gas in South America”* by Ana Lía del Valle Guerrero, pp. 57

- a 78. Book edited by: Dr. Hamid Al-Megren, King Abdulaziz City for Science & Technology, Saudi Arabia, Editorial In Tech, April 2012. Printed in, Rejika, Croacia. 542 págs.
- [28] Zilio, M. (2011) “GDP and environment pressure: the role of energy in Latin America and the Caribbean”, con M. Recalde. *Energy Policy* 39 (2011) pp. 7941-7949.
- [29] Zilio, M. (2011). *La Curva de Kuznets Ambiental: evidencia empírica para América Latina y el Caribe*. Editorial Académica Española.
- [30] Zilio, M. (2011). “¿Existe una relación entre generación eléctrica, carbono y producto? La no verificación de la Curva de Kuznets y el rol de la política energética en la lucha contra el cambio climático”. *Anales de la Asociación Argentina de Economía Política*, XLVI Reunión Anual, Mar del Plata, noviembre de 2011.
- [31] Guerrero, A. L. del V. (2011). *Vulnerabilidad energética de los países de América Latina. Estudio de caso: El enfoque de la geopolítica crítica como herramienta de análisis de los nuevos escenarios de la energía centrados en la integración gasífera*. III Congreso Latinoamericano de Economía de la Energía; ELAEE 2011, 18 y 19 de abril, Buenos Aires, Argentina, 20 páginas.
- [32] Recalde, M. (2011). “Energy policy and energy market performance: The Argentinean case”. *Energy Policy* 39 (6) pp. 3860-3868.
- [33] Recalde, M. (2011). “Determinantes de la inversión en exploración de hidrocarburos: Un análisis del caso argentino”. *Cuadernos de Economía - Spanish Journal of Economics and Finance* 34 (94), enero-abril, pp. 40-52.
- [34] Recalde, M. y Guzowski, C. (2011). *Mecanismos de promoción de la eficiencia energética en Argentina*. Proceedings del Cuarto Congreso Nacional y Tercer Congreso Iberoamericano de Hidrógeno y Fuentes Sustentables de Energía: HYFUSEN. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable. CNEA, Mar del Plata, Argentina.
- [35] Recalde, M. (2011). *Sistemas energéticos, mercado y Estado: El rol de los recursos naturales energéticos y la política energética en el caso argentino*. Madrid: Editorial Académica Española.

- [36] Recalde, M. [s/f] *Implicancias de la inseguridad de abastecimiento energético: impactos directos e indirectos. El caso argentino*. 3 ELAEE - Encuentro Latinoamericano de Economía de La Energía, Buenos Aires, Argentina.
- [37] Guzowski, C. y Recalde, M. (2011). “Efectos distributivos de la estructura tarifaria eléctrica en Argentina”, *Anales del V Congreso de Estudiantes de Postgrado en Economía*, Departamento de Economía, UNS, Bahía Blanca, 26 y 27 de mayo.
- [38] Recalde, M. y Guzowski, C. (2011). “Boundaries in promoting energy efficiency: Lessons from the Argentinean case”, *International Journal of Hydrogen Energy*, ELSEVIER.
- [39] Zilio, M. y Recalde, M. (2011). “GDP and environment pressure: the role of energy in Latin America and The Caribbean”. *Energy Policy* 39 (12) pp. 7941-7949.
- [40] Guzowski, C. y Recalde, M. (2010). “Latin American Electricity Markets and Renewable Energy Sources: the Argentinean and Chilean cases”, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol 35, Issue 11, pp. 5813-5817, June. ELSEVIER.
- [41] Guzowski, C. y Recalde, M. (2010). “Latin American Electricity Markets and Renewable Energy Sources: the Argentinean and Chilean cases”, *International Journal of Hydrogen Energy*, vol 35, Issue 11, pp. 5813-5817, June.
- [42] Guzowski, C. (2010). *Crisis Energética en América Latina: Diagnóstico y Políticas*, II Congreso Latinoamericano y Caribeño de Ciencias Sociales, FLACSO, 26, 27, 28 de mayo, México.
- [43] Guzowski, C. (2010). *El Estudio de los Problemas Energéticos: Perspectivas Teóricas y Metodológicas para su implementación*, VI Jornadas de Sociología de la UNLP, La Plata 9 y 10 de diciembre.
- [44] Fernandez, C. y Guzowski, C. (2010). *Barreras Regulatorias para impulsar las fuentes renovables de energía: El Caso Argentino*, 2º Jornadas Nacionales de Investigación en Organización y Desarrollo Económico, 30 de junio y 1 y 2 de julio, San Juan.
- [45] Recalde, M. (2010) “Market coordination and energy planning: Analysis of Argentinean case in the frame of energy chains”. *EnergyPolicy (Manuscript number JEPO-D-10-00706)*

- [46] Recalde, M. (2010) “Wind power in Argentina: Current state of affairs, policy instruments and economic feasibility”. *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (11) pp. 5908-5913. Elsevier Journals.
- [47] Guzowski, C. y Recalde, M. (2010). “Latin American Electricity Markets and Renewable Energy Sources: the Argentinean and Chilean cases”. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35 (11) pp. 5813-5817. Elsevier Journals.
- [48] Recalde, M. y Ramos-Martin, J. (2010) “On why Argentina is increasing its energy intensity: a multi-scale integrated analysis of its energy metabolism”. 7th Biennial International Workshop - Advances in Energy Studies Can we break the addiction to fossil energy? Barcelona, Spain.
- [49] Zilio, M. (2010) “Curva de Kuznets de Carbono en América Latina y el Caribe: un análisis de cointegración”. *Anales de la Asociación Argentina de Economía Política*, XLV Reunión Anual, Ciudad de Buenos Aires, noviembre.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] OLADE/CEPAL/GTZ (2003). *Energía y Desarrollo Sustentable en América Latina y el Caribe: Guía para la formulación de políticas energéticas*
- [2] Recalde, M. Y. (2015). “The different paths for renewable energies in Latin American Countries: the relevance of the enabling frameworks and the design of instruments”. *WIREs Energy Environ.* 2015. doi: 10.1002/wene.190.
- [3] Hasson, G. y Pistonesi, H. (1988). *Análisis y Modelización del Abastecimiento Energético*. IDEE/FB, San Carlos de Bariloche.
- [4] Radonich, M. (2007). *Reestructuraciones sociales en cadenas agroalimentarias*, Buenos Aires: La Colmena.

## **Carina Guzowski**

Es Licenciada y Doctora en Economía de la Universidad Nacional del Sur (UNS). Actualmente se desempeña como docente del Departamento de Economía de la UNS e Investigadora del Instituto de Investigaciones Sociales y Económicas del Sur (IIESS). Los estudios realizados por la Dra. Carina Guzowski se encuentran enmarcados en el área de Economía de la energía, estando sus últimas publicaciones y trabajos de campo de referencia en relación a los mercados de generación eléctrica en la Argentina y en el Mercosur, y a las políticas de desarrollo de los recursos renovables en la Argentina.

## **Marina Recalde**

Es Doctora en Economía (2010) de la Universidad Nacional del Sur (UNS), Argentina. Es Investigadora Adjunta del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y del Programa de Medio Ambiente y Desarrollo de la Fundación Bariloche (Argentina). Trabaja en el campo de Energía y Cambio Climático. Se ha desempeñado como ayudante de docencia en la asignatura de Economía de la Energía de la UNS, y recientemente como docente de postgrado del Diploma Superior en Derecho y Economía del Cambio Climático de FLACSO Argentina. Actualmente, la Dra. Recalde es parte del grupo argentino de COMET-LA.

## **Mariana Zilio**

Es Doctora en Economía de la Universidad Nacional del Sur, Argentina e Investigador Asistente (CONICET). Consultor en Economía de los Recursos Naturales en el marco del Proyecto “Fortalecimiento de la gobernanza para la protección de la biodiversidad mediante la Formulación e implementación de la Estrategia Nacional sobre Especies Exóticas Invasoras (ENEI)” - (GCP/ARG/023/GFF).

### **Maria Florencia Zabaloy**

Se graduó como Profesora de Economía en el año 2015 y como Licenciada en Economía en el año 2016 en la Universidad Nacional del Sur. Actualmente posee una beca doctoral del CONICET para investigar las políticas de eficiencia energética en Argentina, con lugar de trabajo en el Departamento de Economía.

### **Ana Lía Guerrero**

Es Doctora en Geografía por la Universidad Nacional del Sur (UNS); Magister en Políticas y Estrategias (UNS); Licenciada y Profesora en Geografía (UBA). Docente-Investigador del Departamento de Geografía y Turismo (UNS). Profesora Geografía de América y Oceanía. Docente de Posgrado en Geografía y Organización Política (MPyE-UNS). Líneas de investigación: Geopolítica de la Energía y análisis de la relación entre energía, política y territorio.





# **MATRIZ ENERGÉTICA Y SISTEMA ELÉCTRICO: ESTRATEGIA E INTEGRACIÓN**

Patricia L. Arnera<sup>1</sup>, M. Beatriz Barbieri<sup>1</sup>, Mario Beroqui<sup>1</sup>, Santiago Barbero<sup>1</sup>

## **RESUMEN**

La disponibilidad energética constituye un requisito indispensable para el crecimiento y el desarrollo de los países. Los cambios ocurridos en los últimos años y los desequilibrios en el sistema energético global, obligan a repensar los criterios con que se sustenta el diseño del sector energético de la región, con el objeto de que su evolución contribuya al desarrollo de ventajas competitivas para las actividades productivas y evite restricciones al crecimiento. En los próximos años se vislumbran importantes cambios en el sector, en vistas a las nuevas características del consumo y la generación. Frente a la sensibilización del público sobre el medio ambiente y las restricciones a la posibilidad de utilización de hidrocarburos como fuentes primarias de energía, se están planteando nuevos desafíos y factores de cambio, desde modificaciones en el tipo y características del consumo, como de la disponibilidad de fuentes y tipo de generación. Se prevé que los cambios en el consumo, harán que los usuarios desempeñen un rol protagónico, planteando lo que se considera como “gestión de la demanda”. De este

---

<sup>1</sup> IITREE-FI-UNLP.

modo, el sistema eléctrico se transforma en el elemento integrador entre la oferta y la demanda.

**Palabras clave:** Energía eléctrica, Generación no convencional, Matriz Energética

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo de toda sociedad se observa en función de su posibilidad para acceder a los beneficios que brinda la tecnología principalmente en la solución de problemas habitacionales, de salud y alimentación. Este acceso a la tecnología se encuentra directamente vinculado al creciente uso de recursos energéticos, con una fuerte tendencia a incrementar la utilización de los recursos primarios para la generación de energía eléctrica. El consumo de recursos energéticos a nivel mundial en el período 1973 a 2014, pasó de 6101 Mtoe a 13.699 Mtoe. Para el mismo período los recursos energéticos utilizados en la generación de energía eléctrica, variaron de 6131 TWh a 23.816 TWh [1]. A nivel mundial para el año 2014, si bien el consumo de recursos energéticos tuvo un aumento que significó 2,24 veces lo consumido en el año 1973, el incremento para la generación de energía eléctrica fue de 3,88, lo cual evidencia la mayor dependencia de la sociedad a la utilización de energía eléctrica en el consumo final. No obstante este crecimiento, la generación de energía eléctrica solo representa entre el 17 a 19 % de la matriz energética total de un país, siendo el transporte el sector que mayores requerimientos energéticos evidencia.

Debido a su facilidad de uso, y bajo impacto sobre el medio ambiente, en el punto de uso final, el consumo eléctrico está creciendo en forma constante. Este crecimiento se produce a nivel mundial con características que dependen de situaciones específicas de cada región y del desarrollo de la sociedad a la cual se vincula, por lo cual se observa un crecimiento con diferentes ritmos [2], [3]. En países con altos estándares de confort, se observa la utilización de la electricidad en nuevas aplicaciones, o bien el reemplazo de otras formas de energía por electricidad, resultando así un consumo cada vez mayor. Se vislumbran en los hogares mayores consumos, ya sean por el uso de nuevos aparatos, como por la inserción del transporte vehicular eléctrico, y la tendencia creciente a la incorporación de otros servicios basados en las tecnologías de la

información. De este modo, progresivamente resultarán más exigentes los requerimientos del suministro eléctrico, exigiendo mayores estándares en calidad, confiabilidad y economía.

## **PERSPECTIVA**

Los sistemas eléctricos enfrentan nuevos desafíos para su desarrollo y operación, en vistas a las nuevas características que posee el consumo, así como la generación, entre las que se destacan aquellas originadas por restricciones a la utilización de hidrocarburos, ya sea por falta de disponibilidad de este recurso, como por restricciones vinculadas a criterios ambientales, de sustentabilidad, eficiencia y calidad.

La integración segura de las energías renovables es uno de los grandes desafíos para la operación del sistema eléctrico. Esta integración supone grandes retos y una elevada complejidad en el sistema en el territorio nacional debido, entre otras particularidades, a un marcado retraso en el desarrollo de la infraestructura de la red de transporte eléctrico, así como una limitada capacidad en las interconexiones con los países limítrofes.

A su vez la transformación en los tipos y características que tendrá el consumo de energía eléctrica, lleva a que los consumidores adopten un rol protagónico en el sector energético.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

El objetivo fundamental del trabajo es el análisis del desempeño de los sistemas de generación, transmisión y distribución que constituyen los sistemas eléctricos de potencia considerando la operación, ampliación y la integración de nuevas tecnologías que se incorporen. Se evalúan y establecen propuestas y estrategias que permitan el correcto desempeño técnico y ambiental, contemplando los exigentes requerimientos de calidad y eficiencia que se imponen.

En dicho proceso, resulta fundamental transferir los conocimientos generados al ambiente electrotécnico nacional mediante la vinculación con empresas del sector, realización de cursos de postgrado, publicaciones, presentaciones en simposios, informes técnicos, formación de recursos humanos tanto de pre, como de postgrado, ya sea con capacitaciones a empresas según sus requerimientos, como la formación de postgrado en Maestrías y Doctorados.

Otro objetivo es contribuir a la formación de criterios para la normalización de técnicas de ensayo, calidad de equipamiento y servicio eléctrico, confiabilidad y eficiencia, continuando con la participación en organismos nacionales e internacionales, ya sea universitarios, instituciones profesionales y normativas, agrupaciones privadas como estatales e incluso empresariales.

## **ANTECEDENTES NORMATIVOS**

En diciembre de 2007 se sancionó la Ley Nacional n.º 26190, correspondiente al “Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinadas a la Producción de Energía Eléctrica”. La ley, en el artículo 1º indica:

Declárase de interés nacional la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía renovables con destino a la prestación del servicio público como así también la investigación para el desarrollo tecnológico y fabricación de equipos con esa finalidad.

El objetivo que se establece es 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 de la ley. Esto se cumpliría el 31 de diciembre de 2016.

En el marco de lo dispuesto en dicha ley, el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, en su carácter de accionista mayoritario, instruyó a ENARSA a instrumentar un proceso licitatorio, por el cual se convocó a la presentación de ofertas de disponibilidad de generación de energía eléctrica proveniente de

distintas fuentes de origen renovable. En cumplimiento de ello se realizó en su oportunidad el llamado a la Licitación Pública Nacional e Internacional ENARSA n.º EE 01/2009 de generación de energía eléctrica que utiliza recursos renovables (“Licitación GENREN”). Se realizó la licitación, convocando a la presentación de hasta un total de 1000 MW de generación, basada en fuentes renovables. Las ofertas realizadas totalizaron 1465 MW, siendo adjudicados final-mente un total de 895 MW.

En la tabla n.º I se indica el detalle de cada tipo de fuente y las potencias correspondientes que se consideraron en las diversas etapas de esta licitación.

**Tabla n.º 1.** Resumen de la Licitación GENREN- 2009

	Convocatoria	Oferta	Adjudicación
Eólica	500	1200	754
Biocombustible	150	155	110,4
Residuos Urbanos	120		
Biomasa	100	51	
Hidroeléctricas (< 30 MW)	60	12,5	10,6
Geotermia	30		
Solar	20	22,5	20
Biogás	20	24	
<b>TOTAL</b>	<b>1000</b>	<b>1465</b>	<b>895</b>

**Fuente:** La hora de las Energías Renovables en la matriz eléctrica argentina - Informe Ejecutivo 2015 - CADER - Cámara Argentina de Energías Renovables.

Si bien la licitación aparentó ser exitosa, las obras no se realizaron debido a problemas asociados a su financiamiento.

Ante la falta del cumplimiento de los objetivos de la Ley n.º 26190, en septiembre de 2015 se sanciona la Ley n.º 27191, la cual modifica a la anterior. Las principales consideraciones que introduce la nueva ley son alcanzar el ocho por ciento (8 %) del consumo de energía eléctrica nacional al 31 de diciembre de 2017 en lugar del 31 de diciembre de 2016; definir como Fuentes Renovables de Energía a aquellas fuentes no fósiles idóneas para ser aprovechadas de forma sustentable en el corto, mediano y largo plazo, tales como: energía eólica, solar térmica, solar fotovoltaica, geotérmica, mareomotriz, undimotriz, de las corrientes marinas, hidráulica, biomasa, gases de vertedero, gases de plantas de depuración, biogás y biocombustibles, con excepción de los usos previstos en la Ley n.º 26093 y considerar como hidráulica renovables las centrales de hasta 50 MW, en lugar de 30 MW. A su vez, la ley incorpora nuevas

consideraciones, tales como: alcanzar el veinte por ciento (20 %) del consumo de energía eléctrica nacional con energías renovables, al 31 de diciembre de 2025; instituye un régimen de inversiones para la construcción de nuevas obras destinadas a la producción de energía eléctrica con fuentes renovables; establece la creación del FODER “Fondo para el Desarrollo de Energías Renovables”; quienes sean beneficiarios de este régimen gozarán de beneficios fiscales (devolución anticipada del impuesto al valor agregado, amortización acelerada respecto del impuesto a las ganancias, exención de impuestos y de los derechos de importación para bienes de capitales y equipos) para las inversiones realizadas antes de la fecha prevista en la ley. Otro aspecto de la ley es la obligación a los Grandes Usuarios (consumo igual o superior a 300 kW) a comprar energía limpia a fuentes renovables, pudiendo darse también la ejecución de proyectos propios, por un 8 % de su consumo eléctrico al 31 de diciembre de 2017, 12 % al 31 de diciembre de 2019; 16 % al 31 de diciembre de 2021; 18 % al 31 de diciembre de 2025, llegando al 20 % al 31 de diciembre de 2025. Un punto también de importancia es que el aporte de reserva de potencia para respaldar la potencia generada con este tipo de fuentes, será soportada por todo el sistema.

Mediante la Resolución MEyM n.º 136/2016 del 25 de julio del 2016, el Ministerio de Energía y Minería instruyó a CAMMESA a realizar la Convocatoria Abierta Nacional e Internacional “Programa RenovAr Ronda 1” para la calificación y eventual adjudicación de ofertas para la celebración de contratos de abastecimiento de energía eléctrica conforme lo prescripto por las Leyes n.º 26190 y 27191 y el Decreto n.º 531/2016.

En la tabla n.º 2 se vuelcan los detalles de las ofertas y proyectos adjudicados en Renovar Ronda-1 -2016 [4].

**Tabla n.º 2.** Resumen de la Licitación RenovAr- Ronda 1 - 2016

	<b>Cantidad de Ofertas</b>	<b>Potencia Ofertada [MW]</b>	<b>Cantidad de Proyectos Adjudicados</b>	<b>Potencia Proyectos Adjudicados [MW]</b>	<b>Precios promedios [u\$/MWh]</b>
Eólica	49	3468,7	12	708	59
Solar	58	2813,1	4	400	60
Biomasa	5	44,5	2	15	110
Biogas	6	8,6	6	9	154
Hidráulica (< 50 MW)	5	11,4	5	11	105
<b>Total</b>	<b>123</b>	<b>6346,3</b>	<b>29</b>	<b>1143</b>	<b>63</b>

**Fuente:** Resolución n.º 2016-213- Energías Renovables Adjudicación y Redistribución, 7 de octubre de 2016. Ministerio de Energía y Minería]- citada como Ref. [4].

De los proyectos que no fueron adjudicados, se realizó una nueva convocatoria correspondiente a Renovar Ronda 1,5, cuyos resultados se describen en la tabla n.º 3 [5].

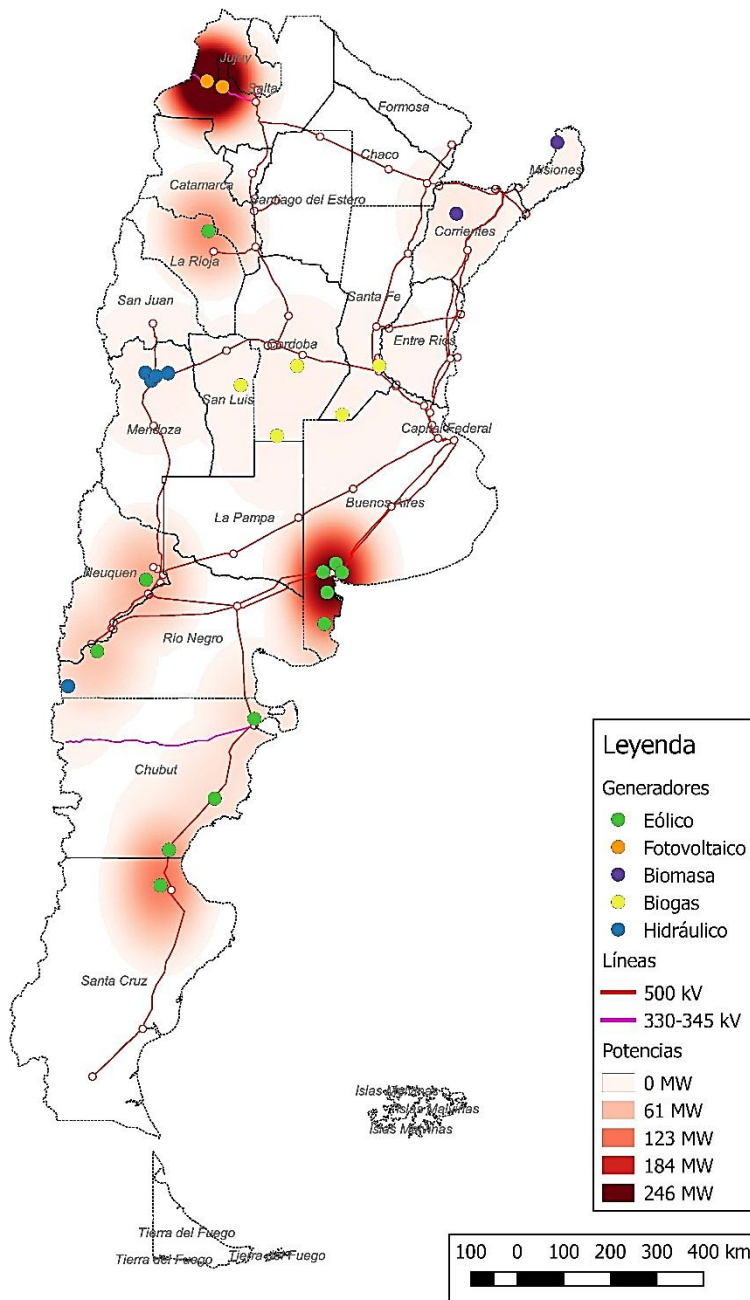
**Tabla n.º 3.** Resumen de la Licitación RenovAr- Ronda 1,5 - 2016

	<b>Cantidad de Ofertas</b>	<b>Potencia Ofertada [MW]</b>	<b>Cantidad de Proyectos Adjudicados</b>	<b>Potencia Proyectos Adjudicados [MW]</b>	<b>Precios promedios [u\$/MWh]</b>
Eólica	19	1561,3	10	765,4	53,34
Solar	28	925,1	20	516,2	54,94
<b>TOTAL</b>	<b>47</b>	<b>2486,4</b>	<b>30</b>	<b>1281,6</b>	<b>53,98</b>

**Fuente:** Resolución n.º 2016-281- Resolución de Adjudicación de Ofertas del Programa RenovAr Ronda 1.5- 25 de noviembre de 2016. Ministerio de Energía y Minería]. Citada como Ref. [5].

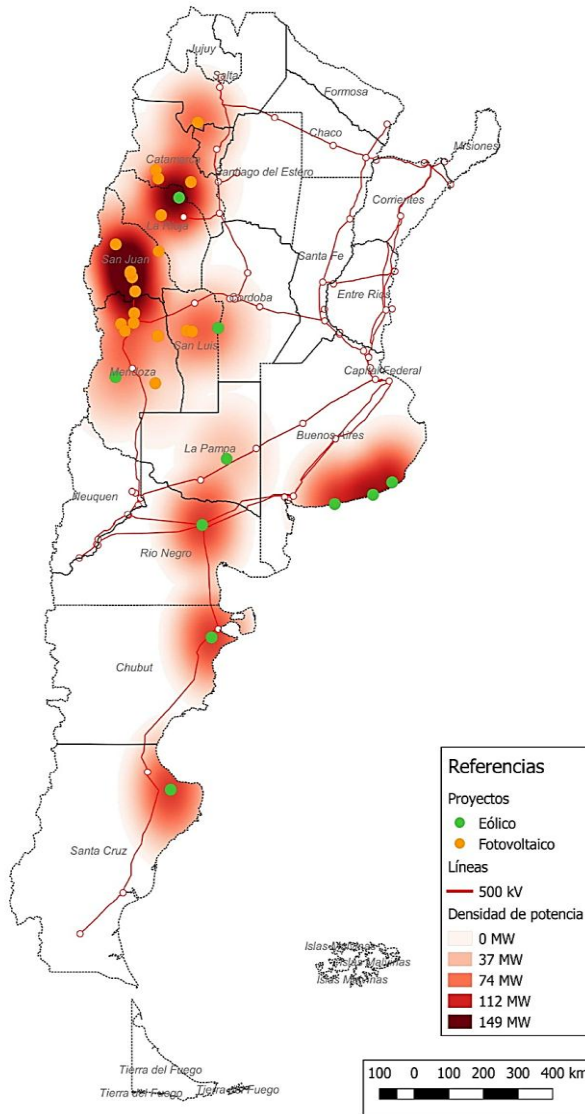
En la figura n.º 1 se encuentra la ubicación geográfica de los proyectos que han sido adjudicados en ambas licitaciones.

**Figura n.º 1.** Ubicación de los proyectos adjudicados en licitaciones RenovAr Ronda 1 y Ronda 1,5  
a) Proyectos Adjudicados Renovar Ronda 1





b) Proyectos Adjudicados Renovar Ronda 1,5



Tecnología	Cantidad de proyectos	Potencia adjudicada MW	Precio promedio U\$/MWh	Energía anual GWh/Año
Eólica	10	765,4	53,34	3037
Solar	20	516,2	54,94	1274
<b>Total</b>	<b>30</b>	<b>1281,5</b>	<b>53,98</b>	<b>4311</b>

Fuente: CAMESSA.

El Ministerio de Energía y Minería ha señalado que en el año 2018 habrá instalados un total de 3 GW correspondientes a generación renovable, cubriendo un total del 9 % de la demanda de energía nacional proyectada para dicho año. En este monto se contemplan los 700 MW instalados a diciembre de 2016, conformados por Solar 8 MW, Eólico 187 MW, Biogas 17 MW e Hidráulico (< 50 MW) 488 MW. A su vez prevé que en el año 2025 habrá instalados un total de 10 GW en generación renovable.

## SITUACIÓN DEL SISTEMA ARGENTINO DE INTERCONEXIÓN SADI

Con el objeto de visualizar el impacto de la energía eléctrica en la matriz energética de la Argentina, se indica en la tabla n.º 4, el resultado del Balance Energético Nacional 2014, la relación que se observa para cada tipo de usuario final, los recursos utilizados (en MTep), en el consumo de electricidad, combustibles fósiles (líquidos, gas natural y gas licuado de petróleo) y otros recursos primarios.

**Tabla n.º 4.** Consumo para usuarios finales, expresados en MTep

Sector/Consumo	Total	Electricidad	Comb. fósiles	Otros
Industrial	15,3	4,74	9,18	1,38
Residencial	15,9	3,82	11,77	0,32
Comercial y Público	4,8	2,54	2,11	0,14
Transporte	16,9	0	16,9	0
Agropecuario	4,3	0,09	4,09	0,13
<b>Total</b>	<b>57,2</b>	<b>11,19</b>	<b>44,04</b>	<b>1,97</b>

**Fuente:** Balance Energético Nacional 2014- Ministerio de Energía y Minería de la Nación.

Por otra parte, la potencia instalada para generación eléctrica en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI), a diciembre de 2016, totaliza 33.901 MW, de los cuales 540 MW se encuentran en proceso de habilitación comercial. La oferta de generación se conforma, según su tecnología, del siguiente modo: 20.764 MW Térmicos (4451 MW Turbinas de Vapor, 5251 MW Turbinas a Gas, 9227 MW Ciclos Combinados y 1834 MW Diesel), 10.682 MW Hidráulicos, 1755 MW Nuclear y 700 MW en Renovable, cuya conformación ya se ha indicado [6].

Respecto a la demanda, el máximo en diciembre de 2016 fue de 23.266 MW, mientras que el máximo histórico se registró en febrero del mismo año con 25.380 MW. En

energía, la demanda durante el mismo mes fue de 11.751 GWh. La composición acumulada de la misma a lo largo del año fue 43 % residenciales, 29 % comercial y 28 % Industrial y Comercial grande ( $\geq 300$  kWh). La distribución geográfica es: 39 % en Gran Buenos Aires, 12 % en Litoral; 11 % en provincia de Buenos Aires; 9 % en Centro; 8 % en Noroeste; 7 % en Noreste, 6 % en Cuyo; 4 % en Comahue y 4 % en Patagonia.

La actual distribución de las fuentes de generación de energía eléctrica y los futuros proyectos de energías renovables a incorporar en la red, se encuentran muy distantes del principal centro de demanda representado por Ciudad de Buenos Aires, provincia de Buenos Aires y sur del Litoral.

Debido a la variabilidad de las fuentes renovables, se presentan además nuevos desafíos para el operador del sistema, cuyo objetivo es mantener la calidad del producto eléctrico y velar por la seguridad operacional del mismo.

En este sentido, resulta necesario realizar estudios que analicen el funcionamiento del sistema eléctrico ante la incorporación de estas nuevas tecnologías. Para ello, resulta primordial utilizar modelos que representen adecuadamente el comportamiento de la generación renovable (ya sean generadores eólicos, módulos fotovoltaicos, etc) en distintas condiciones de servicio y su respuesta ante posibles perturbaciones.

A esta nueva situación del sector de suministro de energía eléctrica se suma el hecho de que los contratos de concesión de los servicios están siendo adecuados a los costos a través de procedimientos que eviten grandes aumentos en las tarifas a los usuarios del servicio eléctrico, circunstancia que requiere optimizar soluciones.

Respecto a esta problemática, las autoridades del sector eléctrico son conscientes del riesgo que se asume en la prestación del servicio eléctrico —cantidad y calidad de la energía— con condiciones previas de no inversión, lo que obliga a intensificar el control de la calidad del servicio.

Los aspectos señalados precedentemente refuerzan la estrategia de considerar también el fortalecimiento de la red eléctrica en la región, es decir incrementar las interconexiones internacionales con los países vecinos. Las interconexiones son el respaldo instantáneo más significativo a la seguridad del suministro, y a su vez aumentan la eficiencia de los sistemas interconectados, incrementando la integración

de energías renovables. A medida que aumenta la capacidad de interconexión, se maximiza el volumen de producción renovable que un sistema es capaz de integrar en condiciones de seguridad, dado que la energía renovable que no tiene cabida en el propio sistema se puede enviar a otros sistemas vecinos, en lugar de ser desaprovechada. Al mismo tiempo, ante la falta de producción renovable o problemas en la red, un alto grado de capacidad de intercambio permite recibir energía de otros países.

Respecto del rol del usuario quizás la no adecuada comprensión del funcionamiento del sistema eléctrico ha dificultado su participación en el sistema y lo ha mantenido en un segundo plano, como un consumidor pasivo. En la actualidad, la búsqueda de un consumo más eficiente y respetuoso del medio ambiente hace necesario que la relación entre energía y sociedad evolucione hacia un papel más activo por parte de los consumidores y para ello el consumidor debe contar con un mayor conocimiento de la electricidad y de cuáles son las buenas prácticas para un consumo eficiente.

## **PRINCIPALES CONTRIBUCIONES AL TEMA POR PARTE DEL GRUPO DE INVESTIGACIÓN**

La operación de los sistemas de transmisión cerca de sus límites, característica de nuestros sistemas de potencia, así como en la integración de nuevas tecnologías a la red, exige el uso de modelos más precisos del equipamiento relevante, en estudios de operación y/o planificación de la expansión.

Una parte importante de los modelos del SADI, utilizados en la base de datos de CAMMESA han sido desarrollados por el IITREE, para lo cual se han implementado metodologías de ensayos específicos para obtener los modelos y parámetros validados por mediciones en campo, de generadores sincrónicos y sus sistemas de control, ya sea regulación de velocidad, de tensión y sistemas estabilizantes que los caracterizan.

Las obras de interconexión en 500 kV que se han incorporado al SADI (NOA-NEA, Comahue-Cuyo y línea patagónica), han modificado su configuración de fundamentalmente radial a otra mallada. Dicho cambio estructural del SADI modifica su comportamiento dinámico ya que se alteran los modos dominantes de oscilaciones

electromecánicas, o sea los modos de oscilación entre máquinas sincrónicas con más bajos amortiguamientos.

A efectos de obtener un conocimiento acabado de dichos modos de oscilación electromecánicos, se ha desarrollado una innovadora herramienta informática para analizar, de manera rápida y confiable, los modos de oscilación que pueden esperarse en el SADI, ante distintos escenarios simulados en el programa PSS/E (Power System Simulator). Dicha herramienta informática se denomina Sistema Informático de Análisis Modal (SIAM) y es única en su tipo ya que utiliza como datos de entrada los resultados del flujo de carga realizados en el programa PSS/E y la base de datos nacional que también se encuentra cargada en el programa PSS/E (administrada por CAMMESA). El programa SIAM, en su versión original permite predecir los modos de oscilación de las distintas unidades generadoras del Sistema Eléctrico Argentino, clasificar al modo de oscilación (interárea, local, intraplanta, etc.) y obtener su frecuencia y su amortiguamiento.

En la continuidad de esta línea de investigación y desarrollo, está previsto ampliar las capacidades del SIAM a los efectos de determinar, la Observabilidad de los modos de oscilación (es decir determinar en qué variables del sistema de alta tensión son más observables los modos de oscilación) y la Controlabilidad de los modos de oscilación (es decir, identificar las variables del sistema sobre los que se debe actuar para amortiguar dichos modos de oscilación). Los resultados obtenidos con estas nuevas capacidades del SIAM serán de fundamental importancia para definir la necesidad, la ubicación y la potencia de los compensadores de energía reactiva a instalar, a fin de amortiguar convenientemente las oscilaciones de baja frecuencia que podrían presentarse en el SADI.

La operación en tiempo real del SADI —tendiente a su conservación en estado de equilibrio— requiere mejoras en las cadencias de tiempos de exploración y actualización de datos, debiendo actualizarse el Sistema Operativo de Tiempo Real (SOTR). Por lo tanto para acompañar el desarrollo actual de la tecnología a nivel mundial, se requiere emplear una base de tiempos de milésimas de segundo, lo que se logra con la utilización de Sincrofasores. Esta tecnología involucra el sensado simultáneo de las variables de interés en diversos nodos del Sistema, el envío en alta velocidad al Centro de Control Único, el procesamiento y la presentación a los

operadores en forma de diagramas fasoriales, tal como si estuvieran operando una red local. Se ha colaborado con CAMMESA en la experimentación en laboratorio de equipos terminales para mediciones fasoriales (Phasor Measurement Units - PMU) utilizados para la medición en campo.

El IITREE participa en un proyecto FONARSEC, junto con otros grupos de investigación para el desarrollo de los PMU, a su vez participará con otras universidades nacionales para implementar un sistema de monitoreo experimental en el SADI, al estilo de los que actualmente se desarrollan en Brasil, consistente en estaciones terminales (PMU) emplazadas en nodos del Sistema, el transporte de la información por canales de alta velocidad hacia el nodo concentrador, el tratamiento informático y la presentación a los operadores en forma de diagramas fasoriales, tal como si estuvieran operando una red local. Este proyecto piloto permitirá el desarrollo de aplicaciones, tales como el análisis de contingencias ocurridas simultáneamente en diversos puntos del Sistema, utilizando una base de tiempo universal (sincronismo con una señal proveniente de un GPS). Este significativo hecho de disponer de una base de tiempos única, permite determinar, ante la ocurrencia de fallas o eventos en el SADI, los tiempos de actuación de las protecciones, la correcta coordinación y escalonamiento de las mismas y una eficaz técnica o acción correctiva.

La oferta de unidades generadoras basadas en energías alternativas, ha generado serias inquietudes en el ambiente de las compañías eléctricas y de las empresas encargadas de la operación y seguridad del sistema eléctrico nacional (CAMMESA). Entre estas inquietudes se encuentran las consecuencias sobre la seguridad y operación del sistema que implican la conexión de estos dispositivos, el nivel de perturbaciones que los mismos originan y el comportamiento dinámico del sistema frente a una masiva utilización de este tipo de generación.

En esta línea de trabajo, y con la finalidad de contribuir al conocimiento sobre el nivel de perturbaciones producidas por las unidades generadoras basadas en energías alternativas (eólica, solar, etc), se han realizado mediciones remotas de las perturbaciones a partir del sensado del campo eléctrico, empleando un sensor diseñado y construido por el IITREE. Esta innovadora técnica propuesta por el IITREE, ha sido expuesta, validada y reconocida en importantes foros y congresos internacionales.

Por otra parte, la evolución del control en las empresas concesionarias de la distribución de la energía eléctrica debe ser contemplada a su vez por el impacto social que reviste dicha actividad, teniendo en cuenta los aspectos de calidad requeridos (confiabilidad, producto técnico, servicio, seguridad, etc.) y su vinculación final a las tarifas eléctricas y a las obras de expansión para mejorar la calidad y seguridad.

Las tendencias internacionales para mejorar el servicio eléctrico público en la actualidad, hacen foco sobre la automatización de la red de Media y Baja Tensión y la conexión a los clientes. Esta aplicación del telecontrol se denomina "Smart Grid" y su introducción requiere de ingentes esfuerzos en la experimentación y el desarrollo, tareas muy típicas de integración universidad-empresas prestadoras-autoridades eléctricas.

En las líneas de trabajo señaladas se contemplará a su vez desarrollar acciones en los aspectos de comunicación con el público, para concientizar a la población considerando dos aspectos. Por un lado, respecto a las necesidades del sector en cuanto a la incorporación de nuevas instalaciones de infraestructura o mejoras en la red existente, y por otra parte en la necesidad de modificar hábitos de consumo, considerando el ahorro energético.

## **PRODUCCIÓN DEL GRUPO**

Si bien las actividades de transferencia enunciadas anteriormente, se formalizan con informes técnicos que son confidenciales y reservados para quienes requieren dicha actividad, los avances logrados en las líneas de trabajo suelen presentarse en congresos y publicaciones del sector, siempre que esto sea factible.

Las publicaciones realizadas en los últimos años han sido:

- 1) J. Agüero, P. Issouribehere, D. Esteban, F. Issouribehere, G. Barbera, H. Gastón Mayer (2015) “Grandes parques eólicos y su vinculación con el sistema de potencia en términos de compatibilidad electromagnética”. XVI ERIAC. Trabajo: C4- 11. Puerto Iguazú, Argentina, 17 al 21 de mayo de 2015.

- 2) J. Agüero, G. Barbera, F. Issouribehere, H. G. Mayer, J. Diaz, N. Castro. “Determinación del impacto de la inclusión de paneles fotovoltaicos sobre la calidad del servicio eléctrico”. XVI ERIAC. Trabajo: C4-10. Puerto Iguazú, Argentina, 17 al 21 de mayo de 2015.
- 3) P. Issouribehere, J. Barbero, G. Barbera, F. Issouribehere, H. Mayer, P. Capechi “Desbalance en la tensión. Medición en el área metropolitana y verificación de equipos de registro”. Congreso y Exposición Internacional de Distribución Eléctrica, CIDEL 2014. Buenos Aires, Argentina, 22 al 24 de septiembre de 2014.
- 4) J. Agüero, P.E. Issouribehere, D.A. Esteban, F. Issouribehere, G.A. Barbera, H.G. Mayer. “Impact of large wind farms on power quality. First experiences gained in the argentinian power system”. Biennial CIGRE Session 2014, Trabajo: C4-102. Paris, Francia, 24 al 29 de agosto de 2014.
- 5) G. Barbera, M. Dalla Costa, F. Issouribehere, H. Mayer “Los nuevos sistemas de iluminación y su vinculación con las redes de suministro eléctrico”. XV ERIAC. Trabajo: C4.70. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 6) P. Issouribehere, J. Barbero, G. Barbera, F. Issouribehere, H. Mayer “Desbalances en sistemas de distribución. Evaluación experimental de los métodos existentes para su determinación”. Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia - 2013. Trabajo: FI-IE2. La Plata, Argentina, 21 al 23 de mayo de 2013.
- 7) G. Barbera, F. Issouribehere, M. Aly. “Proyecto e implementación de sistema para mitigación de huecos de tensión en planta industrial”. III Congreso de las Américas de Distribución Eléctrica. Córdoba, Argentina, 3 al 5 de octubre de 2016.
- 8) V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera “Filtro activo adaptado a diferentes configuraciones operativas de una planta industrial”. Reunión Bienal de IEEE en Argentina, ARGENCON 2014, 6. Artículo en CD: AGC77. San Carlos de Bariloche, Argentina, 11 al 13 de junio de 2014.
- 9) V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera. “Compensation with hybrid active power filter in an industrial plant”. *IEEE Latin America Transactions*. Trabajo: Vol. 11, n.º 1. , 2013



- 10) V. F. Corasaniti, M. B. Barbieri, P. L. Arnera. “Análisis de la ubicación y diseño conveniente de un filtro activo en una planta industrial ante diferentes escenarios de operación”. XV ERIAC. Artículo en CD: B4.46. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 11) S. Barbero, B. Barbieri, M. Beroqui, C. Biteznik. “Metodología para los estudios de reacceleración y re arranque de motores de inducción correspondiente a una planta industrial”. Expositor: Biteznik, Carlos E. Segundas Jornadas de Investigación y Transferencia - 2013. Trabajo: FI-IE3. La Plata, Argentina, 21 al 23 de mayo de 2013.
- 12) R. Bianchi-Lastra, B. Barbieri, J. Agüero, M. Lagleyze “Conversion of PSSE data file to ATP format for a study of voltage sags in an aluminum factory”. International Conference on Power System Transients IPST 2013. Vancouver, Canada, 07/2013.
- 13) P. Issouribehere, D. Esteban, F. Issouribehere, G. Barbera, H. Mayer. “Perturbation measurements on HV overhead lines using electric field sensors”. 2013 IEEE *Power & Energy Society General Meeting.*, 1 a 5. Vancouver, EEUU, 07/2013.
- 14) J. L. Agüero, R. D. Molina, J. C. Barbero, F. Issouribehere. (2016) “Poorly damped electromechanical oscillation in the 345 kV inter-connection between Argentina and Chile. Identification based on a sliding PRONY analysis”. Biennial CIGRE - Conseil International des Grands Reseaux Electriques. Paris, Francia, 21 al 26 de agosto de 2016. Artículo en CD: C2-205.
- 15) S. Barbero, M. Beroqui, M. B. Barbieri, P. Arnera (2015).”Wind power integration on interconnected or isolated upstream facilities”. 14th International Workshop on Large-Scale Integration of Wind Power into Power Systems as well as on Transmission Networks for Offshore Wind Plants (WIW 15). 5. Trabajo: 175. Cód. Artículo en CD: 175. Bruselas, Bélgica, 20 al 22 de octubre de 2015.
- 16) M. B. Barbieri, R. Bianchi Lastra, M. Beroqui, V. F. Corasaniti, S. Barbero, P. Arnera “Comportamiento dinámico de motogeneradores funcionando en paralelo con la red o en isla”. XVI ERIAC. Trabajo: C2-13. Puerto Iguazú, Argentina, 17 al 21 de mayo de 2015.

- 17) J. L. Agüero y M. C. Beroqui. “Sistemas de excitación. Excitatriz rotante versus estática. Comparación parámetros de desempeño”. XVI ERIAC, Trabajo: C2-14. Puerto Iguazú, Argentina, 17 al 21 de mayo de 2015.
- 18) C. Biteznik, J. Agüero, M. Beroqui.”Herramienta flexible para análisis de estabilidad de pequeña señal”. Terceras Jornadas de Investigación y Transferencia (ITE 15). Trabajo: IE3. La Plata, Argentina, 20 al 22 de abril de 2015.
- 19) C. E. Biteznik, J. L. Agüero, M. C. Beroqui. “Flexible tool for small signal stability analysis”. 2014 IEEE Power & Energy Society General Meeting. 5. Trabajo: 947. Washington, DC Metro Area, EEUU, 27 al 31 de julio de 2014.
- 20) R. Bianchi Lastra, J. L. Agüero, M. B. Barbieri. “Generación de un modelo digital en el ATP a partir de un archivo de datos del PSSE para estudios de barridos de frecuencia”. XV ERIAC. Trabajo: C4.71. Bianchi.1. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 21) C. Biteznik, J. Agüero, M. Beroqui, R. Canalis, S. Barbero “Sistema informático para análisis modal. Cálculo de la matriz a usando modelos de generadores, AVR y PSS”. XV ERIAC. Artículo en CD: C2.60. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 22) P. E. Issouribehere, J. C. Barbero, F. Issouribehere. Expositor: F. Issouribehere. “Desarrollo de una herramienta computacional para la detección de modos de oscilación en sistemas de potencia basada en el análisis de PRONY”. XV ERIAC. C4.71. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 23) M. Beroqui, M. B. Barbieri, P. Arnera, V. Sinagra, G. Amico. “Acceso a GBA a largo plazo. Alternativas de abastecimiento 2033”. XV ERIAC. Trabajo: C1.54. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 24) V. F. Corasaniti, J. L. Agüero, R. Bianchi Lastra. “Modelo para estudios de estabilidad de calderas de recuperación de calor (HRSG) y turbina de vapor”. XV ERIAC. C4.71. Corasaniti. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 25) J. L. Agüero, C. Tubello (NASA), F. Issouribehere.”Central Nuclear Embalse. Modelos validados por ensayo de: regulador automático de ten-

- sion, limitadores de sobre y sub excitación y estabilizador de potencia”. XV ERIAC. A1.03. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 26) S. Barbero, J. L. Agüero, C. E. Biteznik “Modelado de generadores eólicos para estudios de estabilidad de pequeña señal”. XV ERIAC. C2.60. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 27) M. Beroqui, R. Canalis “Análisis de la generación conjunta una central hidráulica y un parque eólico”. XV ERIAC. C2.58. Foz de Iguazú, Brasil, 19 al 23 de mayo 2013.
- 28) L. Agüero, C. Tubello (NASA), F. Issouribehere. “Central Nuclear Embalse. Modelos validados por ensayo de: regulador automático de tensión, limitadores de sobre y sub excitación y estabilizador de potencia”. *Revista Ingeniería Eléctrica*, 8. Trabajo: 280. Buenos Aires, Argentina, septiembre 2013.
- 29) C. Biteznik, J. Agüero, M. Beroqui. “Power system linear modeling. Application for small signal stability analysis”. 13th Spanish Portuguese Conference on Electrical Engineering (13CHLIE). ISSN: 2172-1246, 6. Cód. Artículo en CD: 194. Valencia, España, 3 al 5 de julio 2013

## **FORMACIÓN DE RECURSOS HUMANOS**

Las actividades enunciadas permiten consolidar el grupo de trabajo existente en el Instituto, produciendo avances significativos en el conocimiento de las temáticas involucradas. Por otra parte, redundará en un mejoramiento de la calidad de enseñanza de grado en la Facultad de Ingeniería de la UNLP, ya que los integrantes del grupo son docentes de esta Facultad, en las Carreras de Ingeniería Electricista, Ingeniería Electrónica e Ingeniería Electromecánica.

Además se transferirán estos conocimientos adquiridos en cursos de postgrado, seminarios, etc. con aporte de investigadores de otros centros nacionales y extranjeros, destinados a profesionales de empresas, investigadores, alumnos, etc., según el tipo de curso a desarrollar. La mayoría de estos cursos pertenecen a las carreras de Magister y Doctorado de la Facultad de Ingeniería de la UNLP. Estas carreras de postgrado se encuentran acreditadas con la máxima categoría (A) por la CONEAU.

Es permanente la participación de estudiantes en calidad de becarios y graduados en calidad de pasantes, todos ellos con becas financiadas con fondos propios correspondientes a los trabajos de transferencia realizados. Asimismo se dirigen tesis de Maestría y Doctorado, interactuando con docentes de otras carreras y Universidades.

## **FINANCIAMIENTO DISPONIBLE**

La principal fuente de financiamiento del IITREE es, y ha sido históricamente, el producido por la vinculación y transferencia de conocimientos al ambiente electrotécnico, bajo la forma jurídica vigente en la UNLP para este tipo de actividad.

Por otra parte, los proyectos aprobados en el marco del Programa de Incentivos a Docentes-Investigadores de la SPU, cuentan con subsidios de apoyos otorgados por el Consejo Superior de la UNLP, para sus ejecuciones.

Se posee financiamiento de la ANPCyT (MinCyT), a través del programa FONARSEC para la ejecución del Proyecto UREE 004-13 “Sistema de medición fasorial orientado al desarrollo de redes inteligentes”. 01/07/15 - 30/06/18. Se trata de un CAPP (Consortio Administrativo Público Privado) conformado por INTI, UNLP, CSC-CONICET, Computec S.R.L.

Continúan los convenios con el Ente Nacional Regulador de la Electricidad para la realización de auditorías de la calidad de servicio en el área Metropolitana, estudios, asesoramientos y asistencia técnica.

El IITREE participa junto con el Departamento de Potencia del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdeLaR), en el proyecto “Evaluación del impacto en la Calidad de Servicio de generación eólica de gran escala” presentado ante la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) de Uruguay. En el marco de dicho proyecto se han dictado cursos de postgrado y dirigido Tesis de Maestría.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Key world energy statistics. International Energy Agency 2016. © OECD/IEA, 2016.
- [2] World Energy Perspectives Renewable Integration - Variable renewable integration in electricity systems: how to get it right - World Energy Council 2016.
- [3] Energy Matters. How COP21 can shift the energy sector onto a low-carbon path that supports economic growth and energy access. International Energy Agency 2015.
- [4] Resolución n.º 2016-213- Energías Renovables Adjudicación Y Redistribución, 7 de octubre de 2016.
- [5] Resolución n.º 2016-281- Resolución de Adjudicación de Ofertas del Programa RenovAr Ronda 1.5- 25 de noviembre de 2016.
- [6] Informe anual CAMESA - 2015.

Los CV resumidos de los docentes investigadores del Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (IITREE-FI-UNLP) se encuentran en: <http://www.iitree-unlp.org.ar/integrantes>

## **Patricia Liliana Arnera**

Ingeniero Electricista (UNLP-1981). Director del IITREE-FI-UNLP por concurso desde 2000. Profesor Titular Ordinario con dedicación exclusiva en el Área Sistemas de Suministro de Energía Eléctrica, dictando materias para las carreras de Ing. Electricista e Ing. Electromecánica de FI-UNLP. Categoría II en el Programa de Incentivos a Docentes Investigadores. Miembro de comisiones asesoras y Consejero Académico/Directivo de la Facultad de Ingeniería en varios períodos. Ha sido ProSecretaria de Políticas en Ciencia y Técnica (2004-2007) y ProSecretaria de Vinculación y Transferencia de la UNLP (2011-2014). Presidente de la Comisión de Investigaciones de la Universidad Nacional de La Plata (2014-2018). Directora de becarios y tesistas de postgrado. Director de Carrera de Ing. Electricista desde septiembre 2014. Miembro Titular de la Academia de la Ingeniería de la Provincia de Buenos Aires, desde 2004 y de la Academia Nacional de Ingeniería desde 2009. Representante de la Universidad Nacional de La Plata en el CAE-AUGM. Miembro Regular por Argentina en el Comité de Estudios Internacional de CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) SC C3 - “System Environmental Performance” y Presidente del mismo Comité Nacional, desde 2010. Senior Member de IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Presidente del Capítulo Argentino de Power Engineering Society (PES) años 2001 y 2002. Las principales áreas de trabajo, comprenden el análisis del funcionamiento en régimen transitorio de los sistemas de potencia, coordinación de la aislación, estudios dinámicos, de confiabilidad de suministro, planeamiento eléctrico y económico de redes de potencia, evaluación de impacto ambiental de instalaciones eléctricas, eficiencia en sistemas eléctricos.

## **María Beatriz Barbieri**

Ingeniero en Telecomunicaciones (UNLP-1984). Sub Director de IITREE-FI-UNLP desde 2016. Responsable del sector Estudios Eléctricos del IITREE. Profesor Titular Ordinario Dedicación Exclusiva en el Área Tecnológicas Básicas, dictando materias para las carreras de Ing. Electricista e Ing. Electrónica de FI-UNLP. Categoría II en el Programa de Incentivos a Docentes Investigadores. Miembro de comisiones asesoras. Directora de becarios y tesistas de postgrado. Director de Carrera Alterno de Ing. Electricista desde septiembre 2014. Senior Member de IEEE. Presidente del Capítulo Argentino de Power Engineering Society (PES-IEEE). Especialista en Sistemas Eléctricos de Potencia, con amplio conocimiento en el funcionamiento de los mismos, en sus condiciones de operación normal y transitoria y el planeamiento técnico económico de los mismos. Estudios dinámicos, de confiabilidad de su-ministro, de coordinación de la aislación; evaluación de impacto ambiental de instalaciones eléctricas, eficiencia en sistemas eléctricos. Ha realizado estudios sobre los principales sistemas eléctricos de la Argentina, contribuyendo a establecer metodologías originales para nuestro país. Especialista en confiabilidad de sistemas eléctricos en plantas industriales.

## **Mario César Beroqui**

Ingeniero en Telecomunicaciones (UNLP-1976). Especialista en control de procesos y en funcionamiento y operación de sistemas eléctricos. Se desempeñó en la Comisión de Investigaciones Científicas de la Prov. de Buenos Aires como becario y como Profesional de Apoyo hasta el año 2007. Las áreas de los principales trabajos realizados son: Control de procesos; Modelado y simulación de sistemas eléctricos; Regulación de velocidad de turbinas; Regulación de tensión; Estudios de estabilidad dinámica y transitoria en sistemas eléctricos; Estudios de planificación técnico-económicos de redes de alta tensión; Análisis de operación del sistema eléctrico nacional; Ensayo y modelado de lazos de excitación de tensión y de velocidad de unidades generadoras.; Metodologías para la determinación de reservas de generación necesarias en el SADI.

Determinación de las variaciones rápidas y lentas de la carga.; La actividad desarrollada se documenta en aproximadamente 400 trabajos, entre presentaciones a congresos o simposios e informes técnicos oficiales a empresas del sector eléctrico. Ha recibido y dictado numerosos cursos en las áreas mencionadas, complementando su formación con breves estadias en el CESI y en CRA de ENEL ambos en Italia. Actualmente es Profesor Adjunto de Sistemas de Potencia.

### **Santiago Barbero**

Ingeniero Electricista, (UNLP-2010). Magister en Ciencias de Energías Renovables - Mención Eólica (UTN-2013), tema de tesis “Modelos simplificados de generadores eólicos para estudios de pequeña señal”. Director de Tesis Dra. ESTANQUEIRO, Ana (Universidad de Lisboa - FCUL) y Co-Director Ing. AGÜERO, Jorge (FI UNLP). Durante el año 2008 se desempeñó como becario del IITREE. Desde el 2007 es miembro estudiantil del Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos (IEEE). Durante el año 2015 fue secretario de IEEE PES Argentina. Desde 2010 forma parte del IITREE desempeñándose como profesional en el área de Estudios Eléctricos. Los temas en los que desarrolla su actividad es el análisis del funcionamiento de redes eléctricas en el ambiente industrial y sistemas de potencia, ajuste y coordinación de protecciones, realizando estudios de flujos de potencia y cortocircuitos; armónicas; estudios de estabilidad dinámica y transitoria, estudios de acceso a la capacidad de transporte. Ha presentado publicaciones en congresos nacionales e internacionales. Es Jefe de Trabajos Prácticos de las Cátedras “Campos y Ondas” y “Teoría de la Transmisión de la Energía Eléctrica”.



# **SISTEMAS DE INNOVACIÓN EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA: UN ANÁLISIS DE POLÍTICAS EN LA ARGENTINA**

Carolina Pasciaroni<sup>1</sup>, Carina Guzowski<sup>1</sup>, Florencia Zabaloy<sup>1</sup>

## **RESUMEN**

La necesidad de transitar desde una matriz fósil hacia una matriz renovable sumado al uso eficiente de los recursos energéticos, requiere la articulación de políticas energéticas y políticas de CTI (Ciencia, Tecnología e Innovación) que promuevan la difusión y generación de tecnologías en FNRE y eficiencia energética. En este trabajo se expondrán que grado de articulación han presentado en los últimos años tales políticas.

**Palabras clave:** Tecnologías energéticas - Innovación - Políticas públicas

---

<sup>1</sup> Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur, Argentina; Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur (IIESS) (CONICET-UNS).

## **INTRODUCCIÓN**

El surgimiento de la “sociedad del conocimiento” ha implicado que la ciencia, la tecnología y la innovación (CTI) constituyan factores determinantes en el desarrollo económico, social y cultural del país.

Esta misma sociedad necesitará cada vez más, utilizar eficientemente sus recursos para satisfacer una demanda de servicios energéticos creciente que se enfrenta con una disponibilidad limitada de los recursos energéticos fósiles, que se caracterizan por su alta volatilidad en precios y por sus efectos negativos sobre el calentamiento global. Es por esto, que las políticas en CTI aplicadas a las energías renovables y a la eficiencia energética son un instrumento estratégico y privilegiado para transitar un sendero de desarrollo sustentable que puede mejorar la gestión de las políticas energéticas en la Argentina.

A partir del enfoque teórico provisto los sistemas de innovación en tecnologías energéticas, este trabajo se propone identificar qué grado de articulación y/o convergencia han presentado las políticas energéticas y las políticas de CTI en la promoción de la generación y difusión de tecnologías en FNRE (nuevas fuentes de energías renovables) y eficiencia energética. De este modo, se identificarán qué instrumentos de políticas aplicadas en los últimos años en la Argentina han contribuido a impulsar sistemas de innovación en estos temas. El trabajo se basa en la revisión de literatura especializada y la consulta de bases de datos de libre acceso y consta de cinco apartados. En el primer apartado se plantea el marco teórico del trabajo. En el segundo se revisan históricamente las políticas energéticas en la Argentina. En el tercer apartado se analizan las políticas de ciencia y tecnología aplicadas al sector energético. En el cuarto apartado se examina si ha existido articulación entre las políticas de ciencia y técnica y las políticas energéticas. En el último apartado se elaboran las conclusiones del trabajo.

## MARCO TEÓRICO: SISTEMA DE INNOVACIÓN EN TECNOLOGÍAS ENERGÉTICAS

El concepto de sistemas de innovación parte de la concepción de la innovación como un proceso social e interactivo, que se desarrolla en un entorno social, específico y sistémico. En este sentido, la perspectiva neoschumpeteriana y sistémica de la innovación (Lundvall, Nelson, Freeman, entre sus principales exponentes) reconoce la complejidad involucrada en el proceso de creación de nuevo conocimiento. Bajo este enfoque teórico, la innovación, entendida como nuevo conocimiento que surge de conocimientos ya existentes combinados de nuevos modos, no es un evento discreto sino que es el resultado de un proceso de aprendizaje interactivo. La interacción entre distintos agentes —firmas, usuarios, proveedores, laboratorios y centros I+D— permite el intercambio de conocimiento necesario para la gestación de innovaciones en la compleja y dinámica economía moderna.

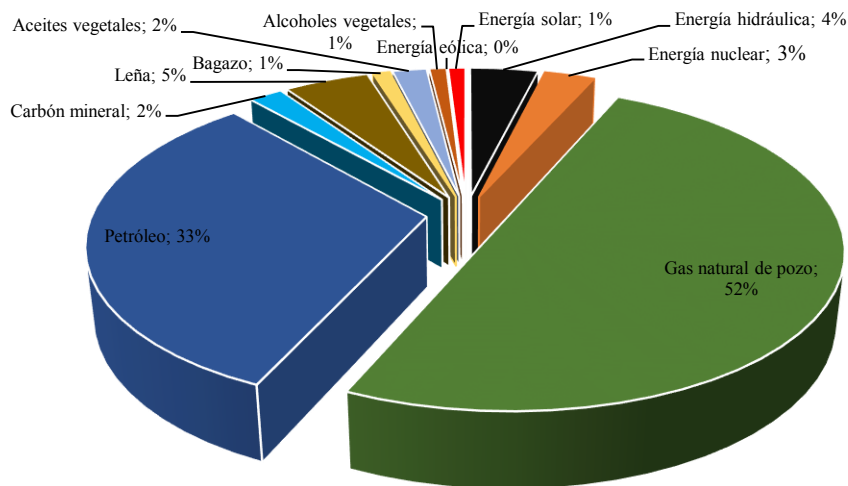
Entre las múltiples acepciones del concepto de sistema de innovación se encuentra la noción de “Sistemas de Innovación Tecnológica” (TIS, sus siglas en inglés) (ver [1]) y su derivación en “Sistemas de Innovación en Tecnologías Energéticas” [2]. Los sistemas tecnológicos se centran en el desarrollo, difusión y el uso de una tecnología en particular (en términos de conocimiento, producto o ambos) [1]. La adaptación del enfoque sistémico al estudio de las tecnologías energéticas permite analizar el rol que desempeñan los actores implicados, sus interacciones y redes, y la influencia que tienen las instituciones. Estas últimas, entendidas tanto como normas formales e informales, rutinas, costumbres, reglas de comportamiento, como políticas públicas, constituyen un factor clave para incentivar el surgimiento de procesos de innovación sistémicos.

El bloqueo tecnológico o *block in*, entendido como la inflexibilidad o la rigidez de un sistema socio-técnico para experimentar cambios tecnológicos profundos, constituye un aspecto clave en la penetración de nuevas tecnologías energéticas [3]. En este sentido, la “dependencia de la trayectoria” en el sector energético se pone de manifiesto en la fuerte dependencia de hidrocarburos en la matriz energética argentina, y se explica por el conocimiento acumulado en un grupo de tecnologías, las infraestructuras adaptadas a las mismas, el marco institucional adoptado, el surgimiento de cadenas productivas y de tecnologías complementarias, la aceptación social y los rendimientos crecientes de información, entre otros factores [3], [4].

## LAS POLÍTICAS ENERGÉTICAS EN LA ARGENTINA: EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y PERSPECTIVA ACTUAL

La Argentina presenta una conformación energética con una significativa participación de los hidrocarburos en su oferta interna de energía. En este sentido, y tal como lo indica la figura n.º 1, en la que se observa la escasa participación de las energías renovable en la oferta de energía primaria, se observa una matriz energética apoyada, principalmente, sobre los combustibles fósiles donde el gas y el petróleo explican el 84 % de la matriz. La participación de todas las fuentes primarias en la oferta interna se ha mantenido relativamente estable en el país, al menos desde el año 2006. La penetración del gas natural en el país es tal que, en paralelo a su participación en la matriz energética primaria, también es la principal fuente en el consumo final de los diferentes sectores de consumo (residencial, comercial y público, transporte, agropecuario e industrial), con una participación del 39 %, seguido por los combustibles líquidos (36 %) y la electricidad (19 %). (Recalde, 2016a).

**Figura n.º 1.** Matriz de energía primaria de la Argentina correspondiente al año 2015



**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de datos del Ministerio de Energía y Minería de la República Argentina.

Las políticas de promoción de las FNRE, para las cuales la Argentina cuenta con un gran potencial, se iniciaron a finales de la década de los noventa, aunque cobraron más relevancia en la primera década del 2000. En este caso, y siguiendo la tendencia mundial de los países en desarrollo mencionada anteriormente, la motivación principal de la promoción no surgió asociada a la cuestión ambiental, sino de la búsqueda de aumentar la oferta eléctrica en circunstancias de problemas de abastecimiento energético fuertes, de bajas inversiones, de falta de disponibilidad de gas natural y derivados del petróleo y de una demanda creciente de electricidad. Si bien es cierto que la Argentina fue uno de los primeros países latinoamericanos en aplicar políticas de promoción de las FNRE a nivel nacional, los resultados de tales programas han sido decepcionantes: en el 2014 solo el 0,5 % de la electricidad inyectada a la red fue de origen eólico o solar, a la cual debe sumarse casi un 1 % de electricidad producida por pequeños aprovechamientos hidroeléctricos (PAH) y una muy pequeña parte proveniente de biomasa o residuos [3].

En términos más específicos y a modo de conclusión puede decirse que en la Argentina las políticas de promoción de las fuentes renovables de energía se encuentran muy vinculadas a las políticas de eficiencia energética, en el sentido que las dos aportan a desincentivar el consumo de fuentes provenientes de los fósiles y a mejorar la perspectiva ambiental del sistema. Ambas políticas presentan un gran potencial en la Argentina. Sin embargo, las relativas a la promoción de las FNRE han tenido problemas de diseños y contextos no propicios, que hicieron que los instrumentos puestos en funcionamiento para promocionarlas no lograran superar las barreras y las condiciones de entorno, y por tanto, no lograron ser los suficientemente favorables como para traducirse en la conversión de nuevas inversiones en energías renovables. En lo relativo a la eficiencia energética, puede decirse que también existieron medidas de promoción de un uso más eficiente y racional de la energía, sin embargo en lo que respecta al sector residencial las mismas han tenido pocos resultados debido a que no se ha podido resolver el problema de los precios de la energía.

Por lo anteriormente expuesto, la Argentina presenta un gran desafío en lo relacionado a políticas efectivas que aumenten la penetración de las energías renovables en el parque de generación y que estimulen un consumo más eficiente de energía.

Desde este trabajo se cree que la implementación de políticas que integren en su concepción, la idea de sistemas de innovación en tecnologías energéticas, permitiría sumar una perspectiva nueva al problema, ya que se accedería a analizar el éxito o el fracaso de determinadas políticas en función de los actores implicados, sus interacciones, las relaciones que conforman el Estado, los actores privados, el mercado y la influencia de las instituciones sobre los roles de cada uno.

Luego de haber realizado un breve repaso respecto a las actuales características del sistema energético argentino, se realizará en el próximo apartado una revisión sintética respecto a las políticas de ciencia y tecnología aplicadas al sector energético en la Argentina.

## **EVOLUCIÓN DE LAS POLÍTICAS EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN LA ARGENTINA Y SU APLICACIÓN AL SECTOR ENERGÉTICO**

Con base en la numerosa literatura sobre la evolución de la política ciencia y tecnología e innovación (CTI) en la Argentina [5], [6], [7] en este apartado se identificarán en qué etapas de la política CTI nacional resultan de interés los temas vinculados a la energía reconociendo hacia qué tipo de fuentes de energía se dirigen tales políticas; cuáles son los objetivos perseguidos y los instrumentos previstos para su consecución.

La política CTI centra su atención en aspectos energéticos en dos períodos: a mediados de los años 50 con la creación de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) y, desde el año 2003, con la identificación, en los planes de CTI, de núcleos socio-productivos prioritarios para el desarrollo económico [8]. Entre tales núcleos se encuentran las FNRE, el uso racional de la energía y los avances tecnológicos en gas y petróleo.

**La energía atómica.** La Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se funda en 1950 con el objetivo promover la I+D en energía nuclear para su posterior aplicación en el sector agropecuario, industria, salud y energía. Su fundación se inscribe en un período de la política CTI donde prima el modelo lineal de innovación, y en consecuencia, el fomento de la oferta de conocimiento. Sin embargo, un aspecto que

distingue a la CNEA radica, no solo en su excelencia académica, sino en su papel como inductora de formación de empresas de alta tecnología, localizadas en San Carlos de Bariloche, entre las que se encuentra la firma INVAP SE. En materia de generación de electricidad, la constitución de las dos primeras centrales nucleares del país redundaron en la consecución de actividades I+D y de ingeniería con el objetivo de dotar a las centrales del equipamiento necesario en un contexto de restricción de la oferta externa de los mismos. Por otra parte, en el año 2011, el Departamento de Energía Solar de la CNEA, fundado en 1979 y dedicado al desarrollo de celdas solares y paneles para uso espacial, incursiona en el desarrollo de tecnología para la instalación de sistemas fotovoltaicos (de baja tensión) a la red eléctrica pública de la Argentina (proyecto Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos, financiado con la línea FONARSEC).

**FNRE, uso racional de la energía y tecnología de petróleo y gas.** Tal como se mencionó anteriormente, los planes estratégicos de CTI elaborados en los últimos años, identifican núcleos socio-productivos estratégicos asociados a la energía, los cuales se pueden dividir en FNRE (energía solar, biomasa-biocombustibles), tecnología de petróleo y gas y uso racional de la energía

El FONARSEC (Fondo Argentino Sectorial), a través de sus líneas Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial (FITS) y Fondos de Innovación Tecnológica Regionales (FITR) constituye el principal instrumento de financiamiento de proyectos destinados a promover el desarrollo de nuevas tecnologías en relación a los núcleos socio-productivos estratégicos. Estas líneas de financiamiento se dirigen a revertir la débil vinculación entre el complejo público de CyT y el sector productivo, exigiendo como requisito la conformación de un consorcio público-privado en calidad de beneficiarios de los fondos<sup>2</sup>. El análisis de las líneas de financiamiento FITS y FITR que integran el FONARSEC permiten: i) reconocer la relevancia dada al sector energético en comparación al resto de los sectores estratégicos (ambiente y desarrollo sustentable, energía, industria, salud, agroindustria, excluyendo de este último sector el

---

<sup>2</sup> A los instrumentos mencionados, se suman subsidios destinados a promover, en el ámbito del Complejo CyT, la formación de RR.HH y proyectos I+D orientados a los sectores mencionados.

núcleo biorrefinerías) y ii) identificar la importancia dada desde el ámbito de la política CyT a las distintas tecnologías energéticas.

En relación al primer aspecto mencionado, entre los distintos sectores estratégicos, aquellos asociados al sector energético representan el 29 % del total de los montos adjudicados en concepto de proyectos por el FONARSEC, llegando a representar el 59 % en el año 2011 (tabla n.º 1). Más aún, según datos de 2015, los proyectos vinculados a energía muestran la mayor participación sobre el total de subsidios en comparación con los proyectos vinculados al resto de los sectores estratégicos.

El FONARSEC, dentro de su línea Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial (FITS) en el sector energía, lanzó en 2010 una primera convocatoria para el financiamiento de proyectos en energía, específicamente energía solar; en 2012 una segunda convocatoria orientada a biomasa y biocombustibles; y al año siguiente una orientada al uso eficiente de la energía. Dentro de su línea Fondos de Innovación Tecnológica Sectorial (FITS) en el sector agroindustria, en 2013, lanzó una convocatoria para financiar proyectos en biorrefinerías. Por último, en 2015 en el marco de los Fondo de Innovación Tecnológica Regional (FITR) realizó una nueva convocatoria sobre energía referida a bioenergía y energía eólica, generación distribuida de electricidad y redes inteligentes y tecnologías de apoyo para la industria del petróleo y el gas.

**Tabla n.º 1.** FONARSEC. Número proyectos y monto de subsidios destinados a energía. Años 2011-2015

FONARSEC	Total proyectos	Proyectos en energía	Monto adjudicado para el total de proyectos (\$ARG) <sup>(1)</sup>	Monto adjudicado para proyectos energía (\$ARG)	% monto destinados a energía
2011	55	5	\$ 256.633.023	\$ 35.073.697	13,67
2012	16	7	\$ 134.899.463	\$ 79.728.509	59,10
2013	53	5	\$ 154.886.738	\$ 75.317.356	48,63
2014	81	12	\$ 761.951.697	\$ 202.285.655	26,55
2015	55	14	\$ 632.431.044	\$ 174.223.837	27,55
<b>Total</b>	<b>319</b>	<b>43</b>	<b>\$ 2.366.809.206</b>	<b>\$ 566.629.054</b>	<b>29,20</b>

1-Incluye las líneas de financiamiento FIS, FITS y FITR.

**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de información disponible en la ANPCYT.



**Tabla n.º 2.** FONARSEC. Monto de subsidios según sector estratégico. Año 2015

Sector Estratégico	Monto adjudicado para proyectos (\$ARG) <sup>(2)</sup>	Participación en el total
Agroindustria	\$ 92.908.010,48	14,80%
Desarrollo y tecnología social	\$ 52.174.892,00	8,31%
Energía <sup>(1)</sup>	\$ 213.643.716,69	34,02%
Industria	\$ 63.185.021,00	10,06%
Medio ambiente y desarrollo sustentable	\$ 107.267.350,00	17,08%
Salud	\$ 67.343.395,00	10,72%
Medio ambiente y cambio climático	\$ 31.393.500,00	5,00%
<b>Total</b>	<b>\$ 627.915.885,17</b>	<b>100,00%</b>

1-Incluye sector energía, URE y agroindustria-biorrefinerías.

2-Incluye las líneas de financiamiento FITS y FITR.

**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de información disponible en la ANPCYT.

Un segundo aspecto que se desprende del análisis de los proyectos financiados por FONARSEC se refiere a la relevancia que adquieren biomasa-biocombustibles y uso racional de la energía si se compara con el número de proyectos y fondos destinados a energía solar, eólica y tecnología de petróleo y gas. La distribución de proyectos y montos subsidios (tabla n.º 3) es un indicativo de las prioridades otorgadas a los distintos aspectos energéticos.

**Tabla n.º 3.** FONARSEC. Proyectos energía según tecnología. Años 2011-2015

FONARSEC	Proyectos	% sobre el total proyectos energía	Monto adjudicado (\$ARG) <sup>(1)</sup>	% sobre monto total adjudicado a energía
Energía solar	5	11,63	\$ 35.073.697	6,19
Energía eólica	6	13,95	\$ 88.566.556	15,63
Biomasa-Biocombustibles	19	44,19	\$ 245.644.376	43,35
Uso racional de la energía	10	23,26	\$ 157.203.832	27,74
Tecnología de petróleo y gas	3	6,98	\$ 40.140.593	7,08
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>100,00</b>	<b>\$ 566.629.054</b>	<b>100,00</b>

1-Incluye las líneas de financiamiento FITS y FITR

**Fuente:** Elaboración propia sobre la base de información disponible en ANPCYT.

A modo de ejemplo entre los proyectos financiados en relación a:

- Biomasa-biocombustible, se encuentran proyectos orientados a la producción de energía eléctrica a partir de biomasa forestal; biomasa “cáscara de mani”; biogás; proyectos relativos al sorgo como biomasa para la producción de bioetanol; obtención de biodiesel a a partir de barros cloacales;

- Uso racional de la energía, “Implementación de Redes Eléctricas Inteligentes en Salta”; “Sistema de Medición fasorial orientado al desarrollo de redes inteligentes”; “Conversión y Transformación de Energía Inteligente y herramientas de Gestión para modernas Redes de Distribución”;
- Energía solar, “Sistema Argentino de Evaluación de Energía Solar”; “Red Ren24- Red Renovable con Almacenaje 24h/día”; “Energía Solar en la Vivienda Social”, “Interconexión de Sistemas Fotovoltaicos a la Red Eléctrica en Ambientes Urbanos”

## **ARTICULACIÓN SISTÉMICA ENTRE LAS POLÍTICAS SECTORIALES ENERGÉTICAS Y LAS POLÍTICAS CTI**

Es posible identificar tres periodos en los cuales tales políticas convergen en relación a sus objetivos. El primer periodo, en los años 60 y 70, con la creación de las primeras centrales nucleares de energía eléctrica en el marco de una política energética con una clara tendencia a la diversificación de una matriz concentrada en recursos importados. La CNEA, creada una década atrás con el propósito de desarrollar I+D en energía nuclear, ofreció el conocimiento acumulado para la creación de las mismas. En un segundo periodo de convergencia, en la década de los 90, ambas políticas se dirigieron a la promoción de la eficiencia y competitividad del sector productivo, en un escenario de liberalización y apertura de los mercados [7].

Un tercer período, los últimos diez años, la convergencia se puso de manifiesto en la orientación de ambas políticas hacia la diversificación y sustentabilidad de la matriz energética doméstica. Tal como se indicó en secciones anteriores, desde el sector energético se diseñaron programas de fomento de energías renovable y la eficiencia y uso racional de la energía, que no alcanzaron los resultados esperados. La necesidad de una mayor articulación con la política CyT se pone de manifiesto en La Ley n.º 26190 del Régimen de Fomento Nacional para el Uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica, sancionada en el año 2006. Tal normativa refiere a la necesidad de coordinar con las universidades e institutos de investigación el desarrollo de tecnologías aplicables al aprovechamiento de las fuentes de energía renovables.

Desde la política CTI, la línea de financiamiento FONARSEC constituye el principal instrumento dirigido al surgimiento de entornos innovadores en tecnologías relativas a las FNRE, con especial atención a la interacción entre universidades, centros CYT y empresas. Entre las tecnologías energéticas se privilegió biomasa-biocombustible y uso racional de la energía frente a energía solar, eólica y tecnologías de petróleo y gas. Esto último se encuentra en línea con la política de fomento de los biocombustibles a partir de la Ley n.º 26093 de Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentable de los Biocombustibles.

Aún no existe información disponible sobre el grado de éxito alcanzado por la línea de financiamiento FONARSEC. En parte, se trata de convocatorias recientes, la primera convocatoria data del año 2010; por otra parte, se trata de proyectos I+D cuyos resultados no son inmediatos. Sin embargo, la línea FONARSEC continua con el carácter *demand-pull* de los instrumentos de financiación a la I+D y la innovación tecnológica disponibles a partir de los años 90, de forma tal que, el aprovechamiento de este financiamiento se encuentra sujeto a la iniciativa de investigadores y empresarios de vincularse e incursionar en proyectos de FNRE y eficiencia energética.

Más allá de los puntos de convergencia encontrados entre las políticas específicas orientadas al sector energético y la política CTI, no se identifican períodos de formulación e implementación articulada de ambas políticas. No solo existe desarticulación y fragmentación en las normativas formuladas por diferentes dependencias del Estado, sino que en materia de CTI predominó históricamente una orientación de tipo *laissez faire* [7], [9] mostrando signos de reversión en las últimas décadas. En este sentido, la exposición conjunta de la evolución de las políticas sectoriales energéticas y las políticas de CTI no permite reconocer un grado de articulación favorable al surgimiento de sistemas de innovación que promuevan la generación y difusión de FNRE y eficiencia energética.

## **SÍNTESIS Y REFLEXIONES FINALES**

El presente trabajo persiguió como objetivo identificar qué grado de articulación y/o convergencia presentan las políticas energéticas y las políticas de CyT en la promoción

de sistemas de innovación en tecnologías de FNRE y eficiencia energética. La histórica ausencia de articulación entre ambas políticas y el grado de correspondencia o convergencia que se identifica en la última década en torno a las FNRE y eficiencia energética, constituyen la principal evidencia encontrada.

Más allá de las políticas implementadas tanto en la esfera del sector energético como en la esfera de CTI, la participación de las energías renovables en la matriz de generación eléctrica en la Argentina continua siendo menor al 1 %. Es preciso indicar que, las políticas orientadas a las FNRE y eficiencia energética se formularon en un contexto energético de fuerte deterioro de las tarifas, alejadas de los verdaderos costos de producción, observándose sobreequipamiento y la sobreexplotación de los recursos energéticos. Estos factores contribuyen a la persistencia de un bloqueo tecnológico en torno a una matriz fósil, limitando, en consecuencia, las posibilidades de transición hacia una matriz renovable. La salida de este bloqueo requiere la articulación de políticas entre las instituciones de CTI y el sector energético, que estimulen el desarrollo de sistemas de innovación en nuevas tecnologías energéticas.

## **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Jacobsson, S. y Bergek, A. (2004). “Transforming the energy sector: the evolution of technological systems in renewable energy technology”. *Industrial and Corporate Change* 13 (5), pp. 815-849.
- [2] Wilson, C. y Grubler, A. (2013). “The energy technology innovation system. Energy technology innovation: learning from historical successes and failures”. Cambridge University Press.
- [3] Bersalli, G. (2016). *El bloqueo tecnológico en el sector eléctrico argentino: barreras a la difusión de las nuevas energías renovables. Los desafíos de la política energética argentina*. [s/l]: [s/e], pp. 55-82.
- [4] Arthur, W. B. (1989). “Competing technologies, increasing returns, and lock-in by historical events”. *The economic journal*, 99(394), 116-131
- [5] Albornoz, M. (2004). “Política científica y tecnológica en Argentina”. En: *Temas de Iberoamérica. Globalización, ciencia y tecnología Vol. II* (pp. 81-92). OEI. Disponible en: [www.oei.es/salactsi/albornoz.pdf](http://www.oei.es/salactsi/albornoz.pdf).

- [6] Chudnovsky, D.; López, A. y Pupato, G. (2004). *Research, development and innovation activities in Argentina: Changing roles of the public and private sectors and policy issues*. Buenos Aires: Centro de Investigaciones para la Transformación (CENIT).
- [7] Yoguel, G., Lugones, M. y Sztulwark, S. (2007). “La política científica y tecnológica argentina en las últimas décadas: algunas consideraciones desde la perspectiva del desarrollo de procesos de aprendizaje”. *Manual de Políticas Públicas*. Santiago de Chile: CEPAL.
- [8] Argentina, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva (MINCYT, 2013). *Argentina innovadora 2020. Plan nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación. Lineamientos Estratégicos 2012-2015*. Buenos Aires: Autor.
- [9] Chudnovsky, D. y López, A. (1996). “Política tecnológica en la Argentina: ¿Hay algo más que Laissez Faire?” *Revista Redes*, Vol. 3, N° 6, 33-75.

### **Carina Guzowski**

Es Licenciada y Doctora en Economía de la Universidad Nacional del Sur (UNS). Actualmente se desempeña como docente del Departamento de Economía de la UNS e Investigadora del Instituto de Investigaciones Sociales y Económicas del Sur (IIESS). Los estudios realizados por la Dra. Carina Guzowski se encuentran enmarcados en el área de Economía de la energía, estando sus últimas publicaciones y trabajos de campo de referencia en relación a los mercados de generación eléctrica en la Argentina y en el Mercosur, y a las políticas de desarrollo de los recursos renovables en la Argentina.

### **Carolina Pasciaroni**

Es Licenciada y Doctora en Economía de la Universidad Nacional del Sur. Auxiliar docente del Departamento de Economía de la Universidad Nacional del Sur. Becaria posdoctoral de CONICET. Temas de estudio: innovación tecnológica, sistemas de innovación, vínculos universidad-empresa.

### **Maria Florencia Zabaloy**

Se graduó como profesora de economía en el año 2015 y como licenciada en economía en el año 2016 en la Universidad Nacional del Sur. Actualmente posee una beca doctoral del CONICET para investigar las políticas de eficiencia energética en la Argentina, con lugar de trabajo en el Departamento de Economía.

Este trabajo constituye una importante contribución al avance del conocimiento en temas energéticos en América del Sur. Contiene valiosos aportes de investigación teórica y aplicada, así como experiencias de vinculación y transferencia tecnológica. Aborda una variedad de cuestiones técnicas y económicas con énfasis en las energías renovables. Avanza en temas de política energética y política de ciencia y tecnología, como así también en la consideración de impactos del cambio climático en la producción y el uso de la energía. Cabe destacar el detallado tratamiento de algunos trabajos respecto de la cuestión energética desde una visión sistémica y la relevancia asignada a los condicionantes internacionales, los cambios de políticas y las reformas institucionales que han afectado y afectan la dinámica sectorial.



**UNIVERSIDAD  
NACIONAL DEL SUR**



**UNIVERSIDAD MAYOR  
DE SAN ANDRÉS (UMSA)**



**Asociación de Universidades  
GRUPO MONTEVIDEO**

