

enerLAC

Revista de
Energía de
Latinoamérica
y el Caribe

Monitoreo y Control de un Sistema de Generación Distribuida mediante ETAP-RT y Matlab Simulink

Pobreza Energética en Uruguay

Tecnologías digitales aplicadas a la formación en operación y mantenimiento de parques eólicos

Producción de bioenergía a partir de Arundo donax L., un cultivo perenne de alto potencial energético en Argentina

Disponibilidad de rastrojos y su potencial energético en Uruguay

Medición del efecto de las partículas de polvo en la generación de potencia en módulos solares fotovoltaicos

Comunidades energéticas: modelos para el empoderamiento de los usuarios en Colombia



COMITÉ EDITORIAL

Andrés Rebolledo Smitmans
Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.

Pablo Garcés
Organización Latinoamericana de Energía (OLADE). Ecuador.

Marcelo Vega
Asociación de Universidades Grupo Montevideo (AUGM). Uruguay.

COMITÉ AD-HONOREM

Andrés Romero C.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Leonardo Beltrán.
Institute of the Americas. México.

Manlio Coviello.
Pontificia Universidad Católica de Chile.

Mauricio Medinaceli.
Investigador independiente. Bolivia.

Ubiratan Francisco Castellano.
Investigador independiente. Brasil.

COORDINADORES DE LA EDICIÓN

DIRECTOR GENERAL
Andrés Rebolledo Smitmans

DIRECTORES EJECUTIVOS
Pablo Garcés
Marcelo Vega

COORDINADORA DE PRODUCCIÓN
Ana María Arroyo
Consultora independiente

REVISORES

Claudia Alejandra Pilar
Universidad Nacional del Nordeste. Argentina.

Leonidas Sayas Poma
Osinergmin. Perú.

Iván López
Universidad de la República. Uruguay.

Alejandro Gutiérrez Arce
Universidad de la República. Uruguay.

Angel Eugenio Infante Haynes
Universidad de Holguín. Cuba.

Manuel Enrique Chacón Morales
EPR SIEPAC. Costa Rica.

Luciana Vanesa Clementi
CONICET. Argentina.

Myriam Ethel Ludueña
Universidad Nacional de Santiago del Estero. Argentina.

Martín Enrique Durán García
Universidad Simón Bolívar. Venezuela.

Jorge Alfredo Cárcamo
Secretaría de Energía. Honduras.

José Antonio La Cal Herrera
Universidad de Jaén. España.

Cristián Andrés Martínez
*Universidad Nacional Arturo Jauretche.
Argentina.*

Jesús López Villada
Universidad Internacional SEK. Ecuador.

Marx José Gómez Liendo
*Peralta Community College District.
Oakland, Estados Unidos.*

Byron Chilinguina Mazón
OLADE. Ecuador.

© Copyright Organización Latinoamericana de Energía
(OLADE) 2021. Todos los derechos reservados.

ISSN: 2602-8042 (Impresa)
ISSN: 2631-2522 (Electrónica)

Dirección: Av. Mariscal Antonio José de Sucre N58-63 y
Fernández Salvador.
Quito - Ecuador

Página web Revista ENERLAC: <http://enerlac.olade.org>

Página web OLADE: www.olade.org

Mail ENERLAC: enerlac@olade.org

Teléfonos: (+593 2) 2598-122 / 2598-280 / 2597-995

Fotografía de la portada y de la contraportada Alex Eckermann
en Unsplash.

Fotografía de página de aniversario Martin Adams en Unsplash.

Diseño de la portada y contraportada Ana María Arroyo.

NOTA DE RESPONSABILIDAD DE CONTENIDO

Las ideas expresadas en este documento son responsabilidad
de los autores y no comprometen a las organizaciones
mencionadas.





Resulta un enorme honor para mí poder dirigirme a los lectores de esta primera edición del año 2023 de ENERLAC. No sólo porque la continuidad institucional de la revista académica producida desde OLADE señala un itinerario de profundización de conocimiento científico indispensable para el progreso del sector energético en América Latina y el Caribe, sino también porque esta publicación tiene lugar en ocasión del aniversario 50 de nuestra Organización

Vivimos en un contexto global incierto, donde los mercados energéticos mundiales no han podido dar las respuestas de antaño. La energía se ha tornado un ámbito que suma al carácter eminentemente geopolítico de la discusión global, con una capacidad, inusitada por décadas, de condicionar todo el proceso económico y social de los países.

En este escenario, OLADE resulta fundamental para los países de América Latina y el Caribe y si no existiera debiéramos dar pasos para su creación. Así, debemos valorar la visión y la actividad de nuestros antecesores.

Los países de nuestra región necesitan establecer los mecanismos políticos y de mercado para conseguir una mayor integración regional energética que permita acceder a energía más barata y menos contaminante, para así poder

lograr un mayor desarrollo económico y social en armonía con el medioambiente. OLADE está comprometida con este esfuerzo de cooperación con sus países miembros y esta nueva administración redoblará esfuerzos para conseguir los resultados necesarios.

En este marco, la vinculación con las instituciones académicas de la región será fundamental para que los países miembros de OLADE puedan capitalizar todas las oportunidades que la transición energética presenta. El establecimiento de esfuerzos coordinados en ciencia y tecnología para la energía en América Latina y el Caribe es un objetivo de OLADE, y ENERLAC seguirá siendo una herramienta privilegiada en ese itinerario.

Producir conocimiento para la toma de decisiones en la región es uno de los cometidos originales de OLADE y entendemos que es una tarea fundamental para los próximos años de esta gestión. La diversidad y calidad de los trabajos recogidos en esta edición de ENERLAC son una demostración de esta voluntad.

Andrés Rebolledo Smitmans

*Secretario Ejecutivo
OLADE*



ÍNDICE

INDEX



p. 8 **MONITOREO Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA MEDIANTE ETAP-RT Y MATLAB SIMULINK**

MONITORING AND CONTROL OF A DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM USING ETAP-RT AND MATLAB SIMULINK

Alex Arias, Wilian Patricio Guamán, Gonzalo López, Gabriel Pesantes, Lauro Gómez



p. 22 **POBREZA ENERGÉTICA EN URUGUAY.CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE MULTIDIMENSIONAL ENTRE 2005 Y 2017**

ENERGY POVERTY IN URUGUAY.CONSTRUCTION OF A MULTIDIMENSIONAL INDEX BETWEEN 2005 AND 2017

Gastón Fernández



p. 44 **TECNOLOGÍAS DIGITALES APLICADAS A LA FORMACIÓN EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PARQUES EÓLICOS**

DIGITAL TECHNOLOGIES APPLIED TO TRAINING IN OPERATION AND MAINTENANCE OF WIND FARMS

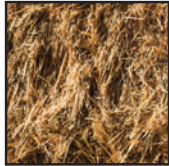
Priscila Silveira Ebert, Alberto Ceña



p. 56 **PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE ARUNDO DONAX L., UN CULTIVO PERENNE DE ALTO POTENCIAL ENERGÉTICO EN ARGENTINA**

PRODUCTION OF BIOMETHANE FROM ARUNDO DONAX L., A PERENNIAL CROP WITH HIGH ENERGY POTENTIAL IN ARGENTINA

Verónica Córdoba, Romina Cardoso, Alejandra Manzur, Estela Santalla, Laura Lazaro



p. 74 **DISPONIBILIDAD DE RASTROJOS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN URUGUAY**

URUGUAYAN STRAW AVAILABILITY AND ITS ENERGY POTENTIAL

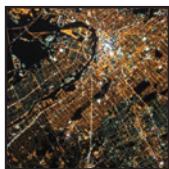
Gabriel Peña, Pedro Curto-Risso



p. 96 **MEDICIÓN DEL EFECTO DE LAS PARTÍCULAS DE POLVO EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA EN MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

MEASUREMENT OF THE EFFECT OF DUST PARTICLES ON POWER GENERATION IN SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES

Adelmo Miranda, Hector Villatoro, Franklin Martínez



p. 110 **COMUNIDADES ENERGÉTICAS: MODELOS PARA EL EMPODERAMIENTO DE LOS USUARIOS EN COLOMBIA**

ENERGY COMMUNITIES: MODELS FOR USER EMPOWERMENT IN COLOMBIA

Juan Molina Castro, Luisa F. Buitagro, Sandra Téllez, Sandra Giraldo, Jaime Zapata

MONITOREO Y CONTROL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA MEDIANTE ETAP-RT Y MATLAB SIMULINK

MONITORING AND CONTROL OF A DISTRIBUTED GENERATION SYSTEM USING ETAP-RT AND MATLAB SIMULINK

Alex Arias ¹, Wilian Patricio Guamán ², Gonzalo López ³, Gabriel Pesantes ⁴, Lauro Gómez ⁵

Recibido: 14/11/2022 y Aceptado: 2/5/2023

ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (8 - 21)

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Minh Bách Trương en Unsplash.

1 Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador
alex.arias8817@utc.edu.ec

2 Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador
wilian.guaman8956@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9905-8231>

3 Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador
gonzalo.lopez8466@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0007-2880-1204>

4 Universidad Técnica de Cotopaxi. Ecuador
gabriel.pesantes3889@utc.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-4037-3859>

2 SILVATECH S.A
lauro.gomez@silvatech.com.ec

RESUMEN

La introducción de sistemas de generación distribuida (GD) en las redes eléctricas se ha incrementado notablemente en los últimos años. Por ello, los sistemas de monitoreo y control de la red eléctrica se han vuelto indispensables en la operación del sistema, para garantizar las condiciones de calidad y confiabilidad del suministro eléctrico. En el presente trabajo se implementa una interfaz de monitoreo y control del sistema GD Smart Grid F-CIYA en tiempo real utilizando ETAP-RT y MATLAB Simulink. El sistema utiliza los módulos Lucas Nülle que constituyen una red de 10 kVA. ETAP-RT interactúa con el sistema físico, permitiendo realizar maniobras de control sobre los elementos de la red y visualizar los cambios en los parámetros eléctricos ante diferentes maniobras. Como resultado de este trabajo, se establece una metodología para implementar el sistema de monitoreo y control en sistemas de GD.

Palabras clave: Generación distribuida, control, monitoreo, tiempo real, ETAP-RT, Matlab Simulink.

ABSTRACT

The introduction of distributed generation (DG) systems in power grids has increased significantly in recent years. Therefore, monitoring and control systems of the power grid have become indispensable in the system operation, to ensure the quality and reliability of the power supply. In the present work, a real-time monitoring and control interface of the GD Smart Grid F-CIYA system is implemented using ETAP-RT and MATLAB Simulink. The system uses Lucas Nülle modules that constitute a 10 kVA grid. ETAP-RT interacts with the physical system, allowing to perform control maneuvers on the grid elements and to visualize the changes in the electrical parameters in case of different maneuvers. As a result of this work, a methodology is established to implement the monitoring and control system in DG systems.

Keywords: Distributed Generation, control, monitoring, real-time, ETAP-RT, Matlab Simulink.

INTRODUCCIÓN


La Generación Distribuida (GD) consiste en producir energía eléctrica a través de micro centrales de generación con Energías Renovables No Convencionales (ERNC), aprovechando el potencial de un determinado lugar geográfico como la irradiación solar, velocidad del viento, condiciones hidrológicas, entre otras (Razavi et al. 2019). Sin embargo, la aleatoriedad de estos recursos podrían ocasionar problemas en el sistema como: fallas en las protecciones, desbalance de potencia y tensiones durante el abastecimiento de cargas, imperfecciones en la calidad de la señal suministrada tales como *flickers*, *sags*, e incrementos en el THD (*Total Harmonic Distorsion*) del voltaje, por encima de los niveles admisibles (Arias, Rivas, and León 2017).

Para conocer las condiciones del sistema eléctrico ante el ingreso de GD, en (Singh et al. 2015) se plantea como una solución implementar medidores inteligentes que permitan supervisar y controlar los parámetros eléctricos de la red. Esto se consigue a través de la adquisición de datos en tiempo real y la aplicación de técnicas de estimación de estado, que en conjunto ayudan a la operación eficiente de las redes eléctricas. Las tecnologías asociadas a la gestión energética han evolucionado recientemente, combinando los sistemas convencionales SCADA con herramientas que permiten almacenar esos datos y utilizarlos para otras aplicaciones, como estimadores de estado y análisis predictivo (Pérez-López and Scada 2015).

Varios trabajos han implementado sistemas de monitoreo y control para evaluar el rendimiento de las redes de energía eléctrica. Por ejemplo, en (Vaschetti, Gomez, and Amatti 2012) y (Manrique, Gómez, and Mejia n.d.), se plantean modelos de simulación mediante el software ETAP para observar el comportamiento de la red cuando se incluye GD. Para ello, se utilizan protocolos de comunicación que enlazan los medios físicos con

el sistema SCADA mediante la interfaz hombre-máquina (HMI), obteniendo como resultado un modelo de protección automático para sistemas de GD, que activan los reconectores a través de baterías recargables para reanudar el suministro eléctrico cuando se producen fallas en los seccionadores.

Para evaluar la confiabilidad de los sistemas eléctricos, (Alarcon 2021) realiza el monitoreo y el control de la red con inclusión de GD utilizando el software ETAP *Real time* lo que permite analizar la eficiencia a través de la creación de una base de datos en tiempo real ante la presencia de diferentes contingencias que se podrían producir a futuro con la finalidad de optimizar los sistemas, obteniendo como resultado que, ante la presencia de fallas la GD aporta la energía necesaria para abastecer la demanda. Además, se realiza la coordinación de la protección del alimentador cuando se incluye motor de 250 HP, obteniendo un nivel de corriente en el arranque de 580 A, a través del estudio de flujo de carga y cortocircuito lo que permitió dimensionar el calibre del conductor.



La Generación Distribuida (GD) consiste en producir energía eléctrica a través de micro centrales de generación con Energías Renovables No Convencionales aprovechando el potencial de un determinado lugar geográfico.

El resto de este documento está estructurado como sigue: en la segunda sección se revisa el estado del arte relacionado con simulación en tiempo real, monitoreo y control en SEP y protocolos de comunicación asociados. A continuación, en la metodología se muestra la configuración del sistema de GD *Smart Grid* F-CIYA y se describen los pasos para la configuración de los elementos físicos (medidores e interruptores de potencia) en el software ETAP-RT. Posteriormente, se detalla la configuración del diagrama de bloques en MATLAB Simulink para visualizar y controlar el sistema de manera remota. Finalmente, en la cuarta sección, se analizan los resultados obtenidos en el monitoreo y control del sistema de GD comparando los valores medidos del software ETAP-RT y Simulink para analizar la capacidad de la red y su factibilidad para la adaptación de nuevas cargas.

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan algunos conceptos para realizar el monitoreo y control de un sistema de generación distribuida, además se muestran los protocolos de comunicación existentes para vincular los dispositivos de campo con el software ETAP-RT.

Simulación en tiempo real y gemelo digital

Un simulador en tiempo real debe ser capaz de realizar cálculos de forma continua y en un tiempo de procesamiento mínimo, con el fin de sincronizar el tiempo de simulación con un reloj de referencia [6]. Este procesamiento de datos, tiene la característica de representar la dinámica en un sistema de potencia y emular con precisión los tiempos de respuesta de la parte física, los datos deberán ser presentados en un tiempo aproximadamente igual que tardaría el sistema real (Singh et al. 2015), a esto se le denomina gemelo digital.

Un gemelo digital es una construcción virtual de un objeto o proceso que simula el comportamiento de un sistema real que se actualiza

con datos reales del sistema físico a lo largo de un tiempo determinado y se puede aplicar a la evaluación del estado del equipo de energía, diagnóstico de fallas, inspección de imágenes inteligentes, análisis del sistema de energía, predicción de carga y análisis del comportamiento del usuario. Además, puede manejar los eventos dominantes, como el cálculo del flujo de potencia, el diagnóstico de cortocircuito trifásico, la estrategia de control del equipo y programación de operaciones optimizada (Pan 2020).

• Monitoreo y control en los sistemas de distribución

Conocidos como SCADA, permiten la identificación de medidas asociadas entre generación y demanda, así como una amplia gama de aplicaciones de control remoto, gestión de equipos y activos asociados al sistema eléctrico. Estos sistemas han evolucionado desde los primeros en telemetría hasta los actuales sistemas basados en protocolos de telecomunicaciones (Singh et al. 2015). Los sistemas de monitoreo y control eléctrico son primordiales dentro de las redes inteligentes porque permiten conocer y analizar el estado del sistema en tiempo real. A continuación, se describen los elementos que intervienen en este proceso.

• Arquitectura de redes inteligentes

Una red eléctrica inteligente se caracteriza por: la participación de los consumidores, establecer un mercado de la electricidad con nuevos servicios y productos, tener energía con una alta calidad, capaz de una economía basada en la comunicación, la computación y la operación digital de la red que permite la operación eficiente sistemas con optimización de los activos existentes y de los nuevos incorporados. Además, la autorrecuperación mediante la anticipación y la respuesta ante los disturbios ocurridos en la red que ofrece resistencia a los ataques, ya sean naturales o provocados (Ramos Guardarrama, Hernández Areu, and Silverio Freire 2019).

• **Sistema de Adquisición, Supervisión y Control de Datos (SCADA)**

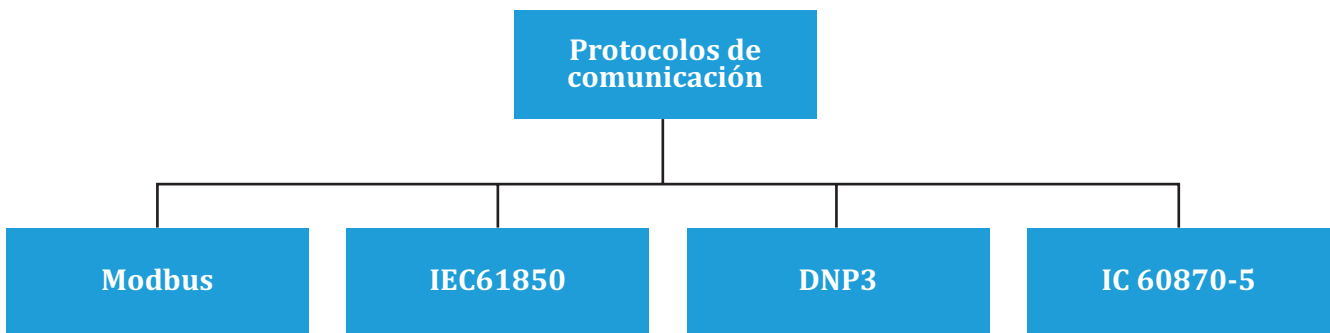
La obtención de las mediciones se las realiza bajo nivel de proceso mediante unidades de terminales remotas y son transferidas al *host* central SCADA en un determinado tiempo. Los componentes de un sistema SCADA son: las Unidades Terminales Remotas (RTU) que se encargan de la conexión directa entre los medidores; las Unidades Terminal Master (MTU) que se comunican con las terminales remotas y

los Sistemas de Comunicación que son el medio de transferencia de datos entre el MTU y RTU.

• **Protocolos de comunicación**

La eficiencia de las microredes dependen de los protocolos de comunicación que se utilizan, esto permite que sea posible el intercambio de datos entre un conjunto de dispositivos. En la Figura 1, se muestran los protocolos de comunicación comúnmente utilizados en GD.

Figura 1. Protocolos de comunicación utilizados en SEP



Fuente: Isaac, Arias, and Bidó 2021.

De acuerdo a lo anterior, es posible adquirir datos mediante el uso de sistemas digitales las medidas enviadas por los dispositivos de medida, protección y control colocados a lo largo de los circuitos (Isaac et al. 2021).

Ecuaciones de balance de potencia

Un flujo de potencia es la determinación de los voltajes en los nodos, las corrientes y las pérdidas de potencia real y reactiva en las líneas, y la generación que se requiere para satisfacer la demanda de un sistema de potencia operando en condiciones normales.

Un flujo de potencia es la determinación de los voltajes y corrientes en los nodos, además, de las pérdidas existentes de potencia activa y reactiva en los ramales (Bel 2012). La potencia de generación debe ser igual la potencia necesaria para satisfacer la demanda cuando el sistema se encuentra operando en condiciones normales y las pérdidas del mismo, como se muestra en las Ecuaciones (1) y (2).

$$P_G = P_D + P_P \tag{1}$$

$$Q_G = Q_D + Q_P \tag{2}$$

METODOLOGÍA

En este trabajo se toma como caso de estudio un sistema de GD formado por la interconexión de los módulos LN, denominado GD-LN, el sistema está compuesto por centrales de generación no convencionales como solar fotovoltaica, eólico e hidráulica reversible, una línea de transmisión de 150 km y tres consumidores. Para realizar el control y monitoreo en ETAP-RT se diseña un diagrama unifilar del sistema y se realiza la configuración de los medidores e interruptores

con el módulo SCADA *Integrator*. Mientras que, en MATLAB Simulink se crean diagramas de bloques que simulan los elementos físicos. A continuación, se describen los criterios utilizados para realizar el monitoreo y control del sistema.

Simulación del sistema de GD-LN

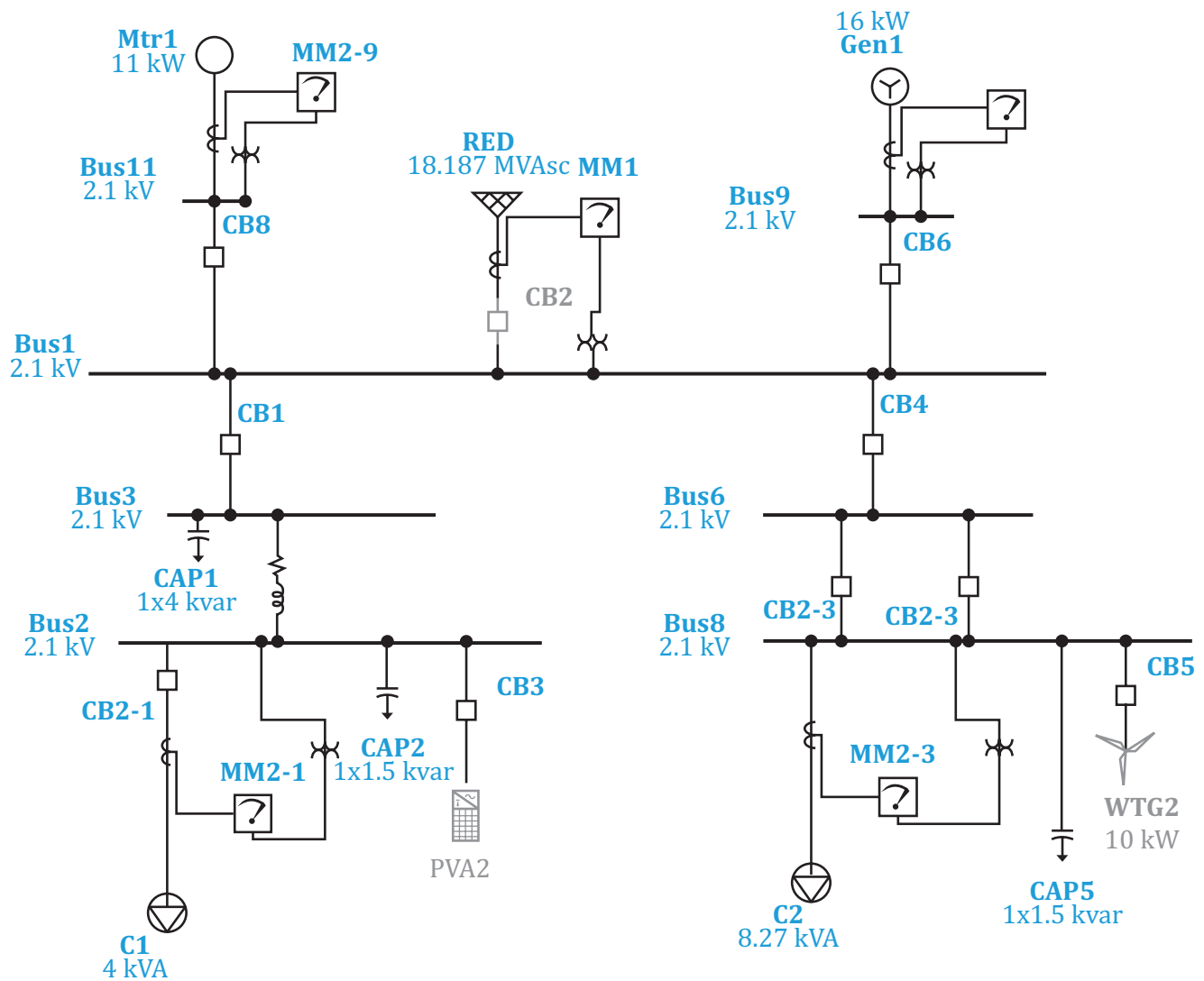
Para realizar el gemelo digital del sistema de GD-LN se deben considerar las características de los elementos del sistema como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Características del sistema de GD

Generación	P (kW)	Q (kVar)
Solar fotovoltaica	5,00	0,00
Eólica	5,00	0,00
Hidráulica reversible	16,00	40,00
Cargas		
Consumidor I	4,00	0,00
Consumidor II	8,00	2,12
Motor	11,00	-3,20
Línea de transmisión		Unidad
Resistencia	0,02	Ω/km
Inductancia	0,26	Ω/km
Susceptancia	6,05	$\mu\text{S}/\text{km}$
Longitud	150,00	km

En la Figura 2, se realiza la simulación de la microrred en ETAP-RT. Además, se considera un sistema eólico y un sistema solar fotovoltaico con la finalidad de plantear posibles soluciones al sistema cuando se produzcan contingencias.

Figura 2. Simulación del sistema de GD en el Software ETAP-RT

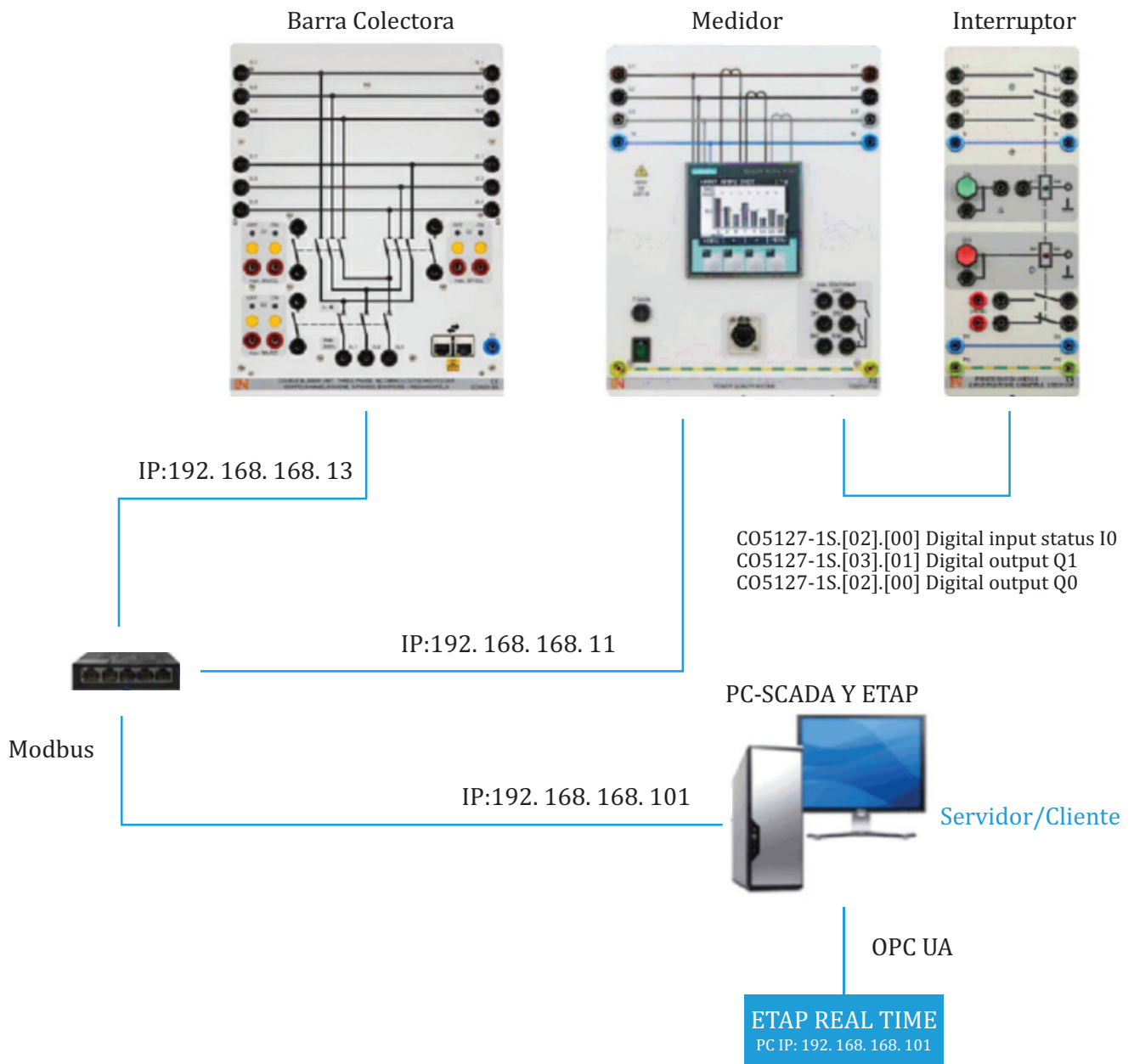


Arquitectura del sistema ETAP-RT

El sistema GD-LN está compuesto por elementos de supervisión (SENTRON PAC-4200) y de control (interruptores de potencia) los cuáles se comunican a los sistemas SCADA y ETAP R-T a través de la configuración de protocolos de comunicación, en el caso de la medición se utiliza Modbus TCP/IP a través de las direcciones IP de los medidores, mientras que, para realizar el control se utilizan las salidas digitales mediante OPC UA de ETAP-RT. En la Figura 3, se puede observar la arquitectura de control y monitoreo del sistema de GD/LN en ETAP-RT.

Utilizando el software ETAP Real time permite analizar la eficiencia a través de la creación de una base de datos en tiempo real ante la presencia de diferentes contingencias que se podrían producir a futuro con la finalidad de optimizar los sistemas.

Figura 3. Arquitectura del sistema GD-LN en ETAP-RT

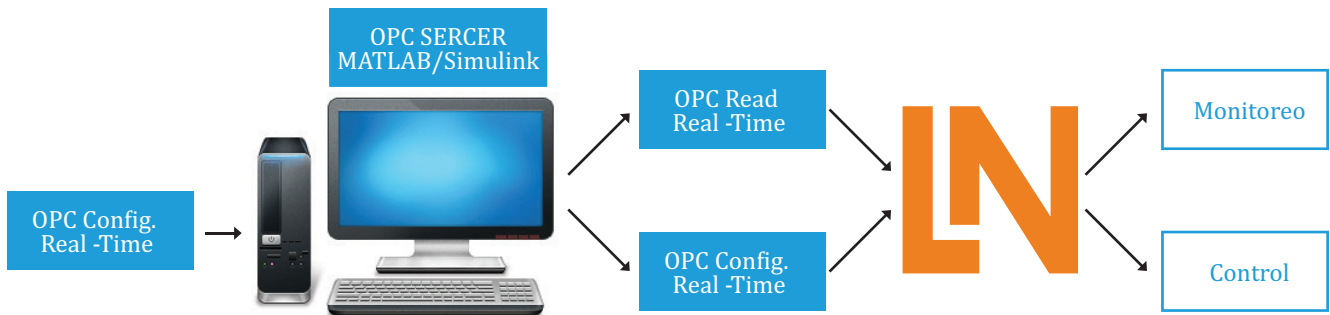


Arquitectura del sistema en Simulink

Para obtener el control y monitoreo del sistema de GD de manera remota, Matlab Simulink utiliza el OPC Toolbox que permite crear diagrama de bloques. Para ello, se utiliza el módulo OPC Config. Real-Time que se comunica con los dispositivos físicos, a través del sistema SCADA utilizando el

protocolo OPC Server. Mientras que, el bloque OPC Read, lee las señales como estados del sistema y OPC Write, escribe el valor de las señales leídas y las muestra en un Display. En la Figura 4, se indica la arquitectura del control y monitoreo en MATLAB Simulink.

Figura 4. Arquitectura del sistema GD-LN en MATLAB/Simulink



Configuración del software ETAP Real-Time

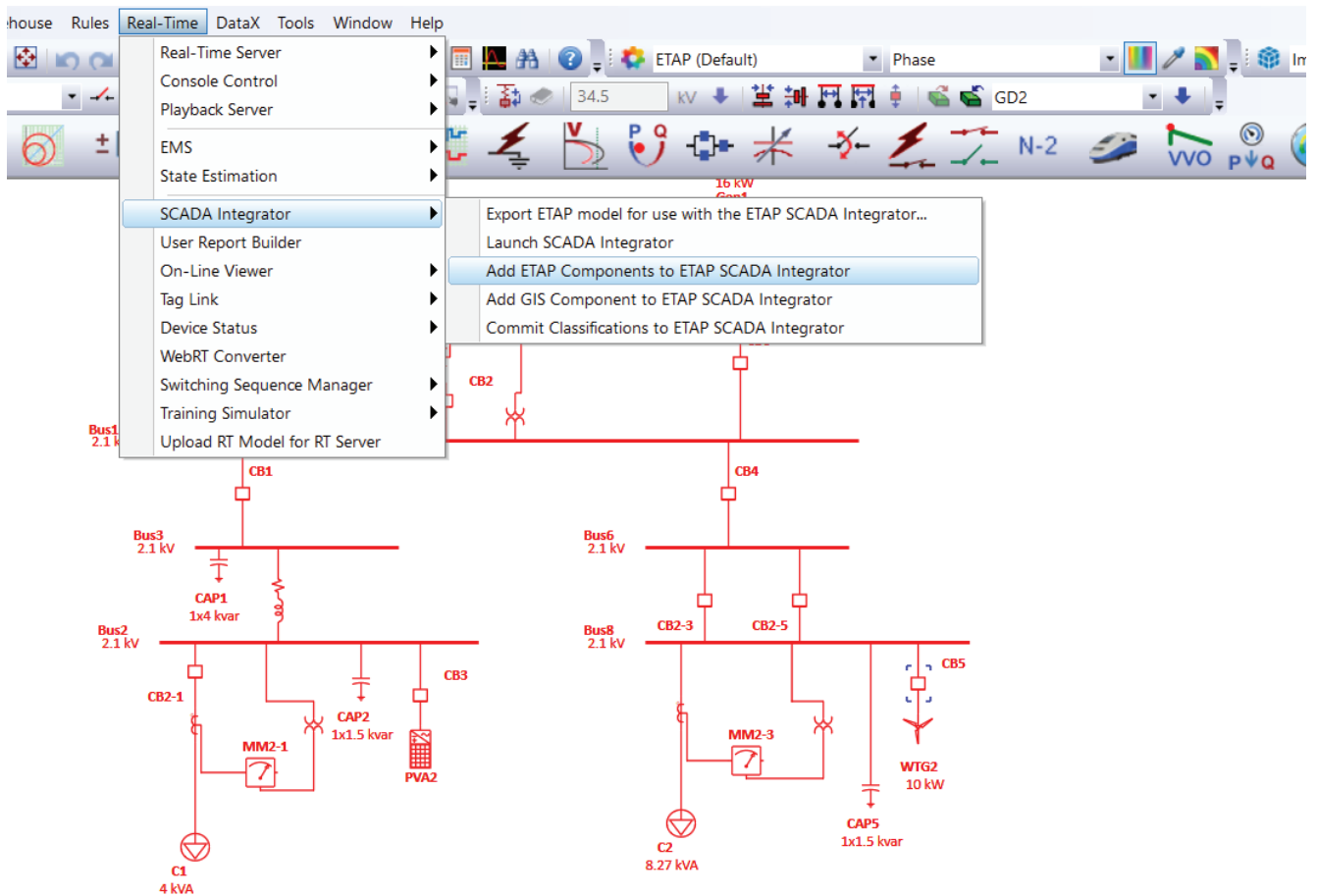
Para realizar el monitoreo y control en tiempo real de la microred formada por los módulos LN mediante ETAP-RT se configuró ETAPUserAccessManager, en donde, se detallan los roles entre el usuario y la PC. Luego, en ETConfig se añade el esquema unifilar del sistema en formato .OTI, donde se incluyen los módulos LN. Las configuraciones del sistema como, base de datos (SQL) y MongoDB. Después, en ETAP SCADA Integrator se configuran las direcciones IP de los dispositivos de campo que permiten visualizar y manipular los elementos del sistema de GD de manera remota.

Para que los dispositivos se comuniquen con el software de simulación el ETAP-RT se utiliza el ETAP SCADA Integrator, esta herramienta permite asociar el modelo matemático con los valores reales obtenidos de los medidores, incorporando todos los elementos del sistema del GD al software para poder controlar y monitorear los parámetros del sistema eléctrico. Para integrar los elementos a ETAP-RT se selecciona la opción SCADA Integrator en la pestaña Real Time lo que permite exportar el modelo del sistema hacia una carpeta donde se guarda el proyecto como se indica en la Figura 5.



Foto de Andrew Hall en Unsplash.

Figura 5. Incorporación del sistema de GD al SCADA Integrator



Monitoreo de GD-LN en tiempo real

A continuación, en la Figura 6, se crea el dispositivo de medición donde se añaden las características como: Tipo de elemento, marca, dirección IP y nombre del dispositivo, el nombre del elemento aparecerá como hasta dependiendo del número de medidores que se encuentren en el sistema, además, se seleccionan las variables que se desean monitorear mediante la dirección IP. Finalmente, en la pestaña Commit Version se selecciona la opción “Conectar” y “Aceptar”, para que el dispositivo de campo quede integrado en ETAP-RT.



Foto de Edvin Johansson en Unsplash.

Figura 6. Creación de los medidores para monitoreo en tiempo real del sistema de GD

Active	Name	Device Model	Alarm Group	Device	Settings Device	Comtrade Device	Comtrade Map	Display Alias	Client	CompDashbo
<input checked="" type="checkbox"/>	MM1	BP	No Alarm	BP			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM2	Hidro	No Alarm	Hidro			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM3	LT	No Alarm	LT			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM4	Consumidor 1	No Alarm	C1			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM5	Consumidor 2	No Alarm	C2			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM6	Motor	No Alarm	M1			Open		Local Modbus	

Control de GD-LN en tiempo real

Para el control del sistema, se utilizan las entradas y salidas digitales del medidor SENTRON PAC-4200 que se encuentran conectadas a los interruptores de potencia a través del protocolo OPC UA de ETAP-RT y del OPC SERVER de LN

los mismos que permiten conectar y desconectar los elementos del sistema. A continuación, en la Figura 7, se indican los dispositivos creados para el control del sistema.

Figura 7. Creación de los medidores para e contol en tiempo real del sistema de GD

Active	Name	Device Model	Alarm Group	Device	Settings Device	Comtrade Device	Comtrade Map	Display Alias	Client	CompDashboard
<input checked="" type="checkbox"/>	MM2	Hidro	No Alarm	Hidro1			Open		Local Modbus	
<input type="checkbox"/>	MM3						Open			
<input checked="" type="checkbox"/>	MM4	Motor	No Alarm	Motor1			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM5	C1	No Alarm	C1_1			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM6	C2	No Alarm	C2_1			Open		Local Modbus	
<input type="checkbox"/>	MM7						Open			
<input checked="" type="checkbox"/>	MM8	BP	No Alarm	BP1			Open		Local Modbus	
<input checked="" type="checkbox"/>	MM9	LT	No Alarm	LT1			Open		Local Modbus	

RESULTADOS

En la Tabla 2, se detalla el procedimiento para realizar el monitoreo y control en tiempo real del sistema de GD formado por los módulos de LN, a través de los elementos físicos, las direcciones IP y el software ETAP-RT.

Tabla 2. Procedimiento para realizar el monitoreo y control de GD

Inicio	
1. Identificar hardware de monitoreo y control	Interruptores y medidores (SentronPAC-4200)
2. Configurar las direcciones IP de cada elemento	(192.168.168.10), (192.168.168.11), (...), (192.168.168.n) (192.168.168.20), (192.168.168.21), (...), (192.168.168.n)
3. Conectar a la red los dispositivos a través de Ethernet	Comunicación microrred-software
4. Simular la microrred-software	Gemelo digital
5. Crear e integrar los elementos físicos al software ETAP-RT	Interruptores y medidores → SCADA <i>Integrator</i>
6. Seleccionar el protocolo de comunicación	Monitoreo → MODBUS Control → OPC UA
7. Accionar el <i>Toolbox Real-Time</i>	Gemelo digital → <i>On-line</i>
Fin	

En la Tabla 3, se muestran los datos de voltajes y potencias del sistema GD-LN que se monitorean en tiempo real, estos valores se obtienen mediante el software MATLAB Simulink y ETAP-RT. Aunque los resultados provienen de una misma fuente de medición, se evidencian variaciones relacionadas con el instante de tiempo en el que se registraron los valores medidos.

La ventaja de ETAP-RT es que se pueden usar los datos para realizar estudios eléctricos avanzados y crear un gemelo digital del sistema físico.

Tabla 3. Mediciones del sistema de GD-LN obtenidas en tiempo real

Monitoreo en tiempo real del sistema de GD-LN						
Punto de medición	Software					
	Simulink			ETAP-RT		
	V (kV)	P (kW)	Q (kVar)	V (kV)	P (kW)	Q (kVar)
Barra Slack	2,03	16,67	-4,67	2,04	16,62	-4,09
Línea de transmisión	2,01	3,87	-1,31	2,01	3,91	-1,29
Central hidráulica	2,02	8,04	-3,91	2,04	8,18	-3,64
Consumidor I	2,02	3,73	0,01	2,08	3,79	0,01
Consumidor II	3,03	7,64	2,00	2,03	7,88	2,07
Motor	2,02	12,81	-5,57	2,04	12,54	-4,56

Luego, en la Tabla 4, se presenta el balance de potencias del sistema de GD en donde son las potencias generadas y las potencias demandas. Por lo tanto, a través de la Ecuación 1 y de la Ecuación 2, se obtienen pérdidas de potencia activa de 0,60 kW y pérdidas de potencia reactiva

de 0,30 kVar respectivamente. Para realizar el balance de potencias del sistema de GD, se debe tener en cuenta la potencia reactiva propia de las barras colectoras (1,4 kVar). En el gemelo digital se considera esta potencia por medio de capacitores colocados en paralelo a las barras.

Tabla 4. Balance de potencias del sistema GD-LN

Elemento	Balance de potencias			
	P_g (kW)	Q_g (kVar)	P_d (kW)	Q_d (kVar)
Red	17,50	0,00	0,00	-10,40
Generador hidráulico	8,20	3,70	0,00	0,00
Consumidor I	0,00	0,00	-8,100	0,00
Consumidor II	0,00	0,00	-7,50	-1,30
Motor	0,00	2,10	-9,500	0,00
Barras	0,00	5,600	0,00	0,00
Total	25,70	11,40	-25,10	-11,70

CONCLUSIONES

Es posible realizar el monitoreo y control de la microrred en tiempo real utilizando el software MATLAB Simulink, que se comunica a través del *Toolbox* OPC y diagramas de bloques (OPC Config, OPC *Read*, OPC *Write*) que envían y reciben las señales del sistema.

ETAP-RT utiliza la interfaz SCADA *Integrator* para la comunicación mediante los protocolos MODBUS para el monitoreo de los parámetros eléctricos de la red y OPC UA para el control de los interruptores de potencia. La ventaja de ETAP-RT es que se pueden usar los datos para realizar estudios eléctricos avanzados y crear un gemelo digital del sistema físico.

En el balance de potencias se observa un valor de pérdidas mayor en la potencia activa del sistema de GD-LN, mismas que se producen por las características de las cargas y la resistencia que presenta la línea de transmisión. Mientras que, las pérdidas en la potencia reactiva son menores debido a la incorporación de los bancos de capacitores que representan la capacitancia propia de las barras colectoras del sistema. ■

REFERENCIAS

Alarcon, Denis. 2021. "Implementación de Un Sistema de Monitoreo y Control En Tiempo Real Para El Análisis Predictivo de Un Sistema Eléctrico de Potencia Con Generación Distribuida." UTEC.

Arias, Luis A., Edwin Rivas, and Luis M. León. 2017. "Propuesta de Modelo de Gestión Para Redes Eléctricas Con Generación Distribuida a Través de Unidades de Medición Fasorial." *Información Tecnológica* 28(2). doi: 10.4067/S0718-07642017000200003.

Bel, Carlos Álvarez. 2012. "Electrical Circuit Theory." P. 122 in *Electrical Circuit theory*.

Isaac, Ángel, Roa Arias, and Ezequías Bidó. 2021. "Protocolos y Topologías Utilizadas En Los Sistemas de Comunicación de Las Microrredes Eléctricas." 4(1):81-95.

Manrique, Franco, Luna Gómez, and Franco Mejia. n.d. "Sistema de Monitoreo de Una Microred Aislada Usando ETAP Real Time."

Pan, Huaming. 2020. "Digital Twin and Its Application in Power System." 21-26.

Pérez-lópez, Esteban, and E. Los Scada. 2015. "SCADA Systems in the Industrial Automation Los Sistemas SCADA En La Automatización Industrial." 28:3-14.

Ramos Guardarrama, Josnier, Orestes Hernández Areu, and Raimundo Carlos Silverio Freire. 2019. "Sistema de Supervisión Para El Monitoreo de Redes Eléctricas Inteligentes."

Razavi, Seyed-ehsan, Ehsan Rahimi, Mohammad Sadegh, and Ali Esmaeel. 2019. "Impact of Distributed Generation on Protection and Voltage Regulation of Distribution Systems : A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 105(May 2018):157-67. doi: 10.1016/j.rser.2019.01.050.

Singh, Shiv Kumar, Bibhu P. Padhy, Student Member, S. Chakrabarti, Senior Member, S. N. Singh, Senior Member, A. Kolwalkar, S. M. Kelapure, and Senior Member. 2015. "Development of Dynamic Test Cases in OPAL-RT Real-Time Power System Simulator." 0-6.

Vaschetti, Jorge C., Juan C. Gomez, and Juan C. Amatti. 2012. "Modelado y Simulación de Un Seccionador Tensión-Tiempo Para Protección Inteligente Con Inclusión de Generación Distribuida de Electricidad." *Información Tecnológica* 23(2):99-108. doi: 10.4067/S0718-07642012000200012.

POBREZA ENERGÉTICA EN URUGUAY. CONSTRUCCIÓN DE UN ÍNDICE MULTIDIMENSIONAL ENTRE 2005 Y 2017

*ENERGY POVERTY IN URUGUAY.
CONSTRUCTION OF A MULTIDIMENSIONAL INDEX BETWEEN 2005 AND 2017*

Gastón Fernández ¹

Recibido: 13/2/2023 y Aceptado: 24/5/2023
ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (22 - 42)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Cedrik Wesche de Unsplash.

1 UTE (Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones Eléctricas). Uruguay
gastonfernandez83@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-3867-7098>

RESUMEN

Esta investigación estudia la pobreza energética en Uruguay, entendiéndola como la situación de un hogar cuando no tiene acceso a servicios energéticos básicos y asequibles. Se propone un indicador multidimensional de pobreza energética (IPEM) en base a la metodología de Alkire y Foster (2011). El mismo incluye cinco dimensiones: cuatro referidas al acceso a servicios energéticos (calentamiento de agua sanitaria, calefacción de ambientes, servicios energéticos eléctricos y servicios energéticos para alimentación e higiene,) y una referida al gasto de los hogares en energéticos.

Se realizaron mediciones utilizando las Encuestas Nacionales de Gastos e Ingresos de Hogares relevadas por el Instituto Nacional de Estadística en 2005-06 y 2016-17. Los resultados indican una mejora significativa: pasando de una incidencia del 47% al 26,4%. La dimensión que presentó mayores niveles de privación fue la de gasto (16,8%), seguida de calefacción de ambientes (9,6%). Se encontró una asociación significativa entre deciles de ingreso e IPEM; y en menor medida, entre IPEM y calidad de la vivienda y región.

Por último, se hallaron debilidades en cómo se obtiene información referida a gastos en leña, gas licuado de petróleo y al acceso a servicios energéticos de calefacción y calentamiento de agua sanitaria, proponiéndose recomendaciones para superarlas.

Palabras clave: Pobreza Energética, Desigualdad, Indicadores Multidimensionales, Energía, Uruguay.

ABSTRACT

This research studies energy poverty in Uruguay, understanding it as the situation of a household when it does not have access to basic and affordable energy services. A multidimensional indicator of energy poverty (IPEM) is proposed based on the methodology of Alkire and Foster (2011). It includes five dimensions: four referring to access to energy services (sanitary water heating, space heating, electrical energy services and energy services for food and hygiene) and one referring to household energy expenditure.

It was carried out based on National Households Income and Expenditure Surveys micro-data carried out by Instituto Nacional de Estadística in 2005-06 and 2016-17. The main findings indicate a significant improvement: from an incidence of 47% to 26.4%. The highest deprivation levels corresponded to energy expenditure (16.8%), followed by access to heating (9.6%). A significant association was found between income deciles and IPEM, showing important gaps in deprivation levels between the lowest and the highest per capita income; and to a lesser extent, between IPEM and housing quality and region.

Finally, weaknesses were found in how information is obtained regarding expenses on firewood, liquefied petroleum gas and access to energy services for heating and sanitary water heating, proposing recommendations to overcome them.

Keywords: *Energy Poverty, Inequality, Multi-dimensional indicators, Energy, Uruguay, Expenditure.*

INTRODUCCIÓN

Cada vez más, el acceso a servicios energéticos en el hogar es un requisito inevitable para alcanzar ciertos niveles de desarrollo humano, ya que incide directamente en las posibilidades de educación, salud, o calidad de vida de la población. Esto quedó de manifiesto en 2015, cuando la ONU aprobó la “Agenda 2030 para el desarrollo sostenible” donde se establecieron los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, dentro de los cuales se encuentra el objetivo 7 “Energía asequible y no contaminante”, el cual trata sobre la necesidad de acceder a la energía para superar la pobreza y hacerlo mediante la disminución de emisiones de CO₂.

En esta línea, la política energética 2005-2030 de Uruguay elaborada por el Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM), aprobada en 2008 por el consejo de ministros y ratificada en 2010 por una comisión multipartidaria, incorpora el eje social como uno de los pilares centrales, definiendo como un objetivo general: “Promover el acceso adecuado a la energía para todos los sectores sociales de forma segura y a un costo accesible”. (MIEM, 2009, 8)

Ahora bien, el alcance de este objetivo requiere al menos poder dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿En qué medida la población uruguaya logra acceder a servicios energéticos básicos y a un costo asequible? Esta investigación se propone dar respuesta a esta pregunta, contribuyendo así a generar una base de conocimiento que favorezca al diseño e implementación de políticas públicas.

Para esto se construye un índice multidimensional de PE basado en la metodología de Alkire y Foster (2011), incorporando, tanto la efectiva satisfacción de necesidades energéticas por parte de los hogares, como la proporción de los ingresos requeridos por los mismos para el pago de servicios energéticos. De este modo se

entenderá **que un hogar se encuentra en situación de pobreza energética cuando no acceda a servicios energéticos básicos y asequibles en el hogar**. Las mediciones se realizaron en base a datos de las Encuestas de Gastos e Ingresos de los Hogares (ENGIH) relevadas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) en 2005-6 y 2016-17, las cuales son las fuentes de información con datos de ingresos y de los hogares más actuales en el país (INE, 2020). Estos resultados se analizan globalmente; y se profundiza cada una de sus dimensiones desagregando entre regiones y decil de ingresos.

TRAYECTORIA DEL CONCEPTO DE POBREZA ENERGÉTICA

No es hasta la década de 1980, que en Inglaterra se acuña por primera vez el término de “*Fuel Poverty*” (pobreza combustible). El concepto es introducido por Isherwood y Hancock en 1979, luego que la crisis del petróleo de 1973-74 generara un aumento del precio de la energía (Castaño, Solís, y Marrero 2020), y que se constatará un aumento de muertes en los meses de invierno respecto a los restantes meses del año, debido en parte a las dificultades de la población para hacer frente a los costos de combustible para calefacción (Day, Walker y Simcock, 2016). Sin embargo, no es hasta 1991, cuando Brenda Boardman, establece una definición en función de si los hogares superaban o no el umbral del 10% de sus ingresos destinados a gastos energéticos. Diez años después, el Reino Unido establece este criterio como indicador formal de *Fuel Poverty* y define una línea de política pública para actuar directamente sobre el tema. Luego, en 2012 se realiza una revisión de la metodología, modificándose este indicador por el indicador actual LIHC (*Low Income High Cost*) (PNUD, 2018; Day, Walker y Simcock, 2016).

Este ha sido, muy a grandes rasgos, el desarrollo del concepto en Reino Unido. Sin embargo, la

idea de una medición que dé cuenta del vínculo energía – pobreza, si bien surge en Inglaterra, trascendió rápidamente las fronteras al resto de Europa primero y a nivel internacional luego, asumiendo en general el concepto de Pobreza Energética (PE). En la actualidad, la investigación en esta temática es liderada por Europa, donde la mayoría de los países tienen mediciones oficiales y políticas concretas sobre PE, llegando incluso a establecer un Observatorio de PE paneuropeo, con el objetivo de estandarizar mediciones, compartir experiencias de política pública e investigaciones sobre el tema (Tirado Herrero, 2018; Thomson, Bouzarovski & Snell, 2017).

En América Latina y el Caribe (LAC), sin embargo, la PE aún no es un campo de estudio consolidado y su desarrollo, necesariamente presenta diferencias respecto a los estudios realizados en Europa, debido por lo menos a tres elementos. En primer lugar, Europa presenta un clima en promedio más frío, lo que implica que, para gran parte del continente la calefacción de ambientes sea un servicio de primera necesidad en invierno. En segundo lugar, LAC presenta niveles de desarrollo económico y social muy disímil al europeo, con mayores niveles de desigualdad y necesidades básicas insatisfechas. Por último, los sistemas de información disponibles son también muy distintos entre ambos continentes, lo que obliga necesariamente a repensar el concepto a la hora de aplicarlo a las distintas coyunturas nacionales. Pese a esto, en los últimos años LAC ha asistido a un importante desarrollo de la investigación en esta área, por ejemplo: Urquiza, et al. (2017) en Chile; Calvo, et al. (2019) en Chile; Castelao y Méndez (2019) en Argentina; García Ochoa (2014) en México; Dehays y Schuschny (2019) en LAC; Duran, (2018) en Argentina; Villalobos, Chavez y Urube (2019) en Chile; Contreras (2019) en Uruguay; Civitaresi et. al. (2021) en la provincia de Río Negro, Argentina, entre otros. También se pueden encontrar investigaciones en otros contextos, como Shinichiro, (2017) en Japón; Mirza y Szirmai (2010) en Pakistan; Nussbaumer,

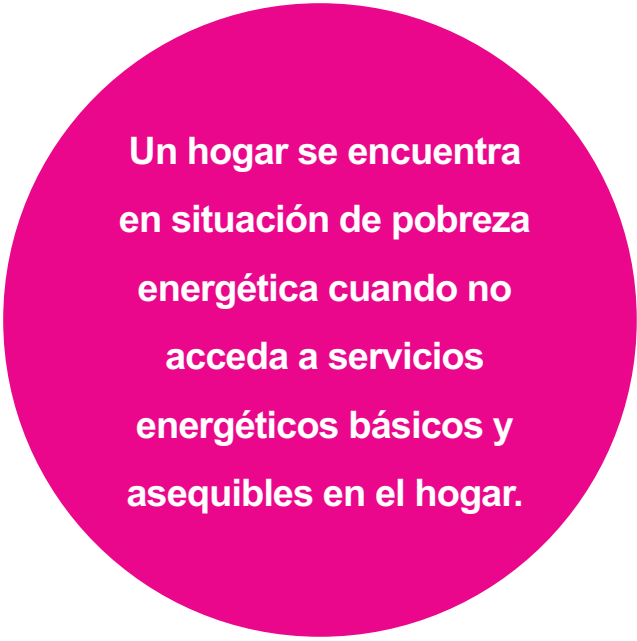
et al (2011) en varios países de África, entre varios otros.

La divergencia de condiciones estructurales y coyunturas entre países, así como también las distintas situaciones respecto a sistemas nacionales de información, han favorecido que, al abordar el tema, se hiciera desde perspectivas muy distintas. Teniendo estos elementos en cuenta, PNUD presenta una clasificación que establece cuatro formas de entender la PE: Básica -entendiéndola como la falta de acceso a electricidad y fuentes modernas y no contaminantes para la cocción-, restringidas -definidas como la incapacidad para pagar por servicios energéticos-, amplias -centradas en el acceso efectivo a servicios energéticos en el hogar- y complejas -las cuales incorporan las anteriores, más una noción de subjetividad y la dimensión espaciotemporal de la satisfacción-. PNUD (2018)

La literatura internacional presenta también varias tipologías de indicadores con los que se puede medir la PE, algunos de ellos son: Culver (2017), Gonzalez Equino (2015) y Rademaekers et al. (2016). En grandes líneas -y sin entrar en las particularidades de cada clasificación- la PE ha sido históricamente medida: o bien desde el acceso concreto a servicios energéticos en el hogar (relevando fuentes de energía y tenencia de bienes de confort), o mediante el análisis de los gastos en los que incurren los hogares para acceder a los energéticos¹, o mediante la autopercepción de las personas (relevando, por ejemplo, si perciben que pasan frío o calor).

1 Este tipo de indicadores tienen una amplitud muy grande a su interior, en tanto se pueden encontrar indicadores absolutos o relativos, que midan gasto excesivo o reducido, que incorporan mayor o menor fuentes de energía a incorporar en el gasto, basados en gastos empíricos o producto de modelaciones teóricas, como el caso del indicador LHIC inglés (Rademaekers et al., 2016; Tirado Herrero, 2018)

Como se ha expresado hasta el momento, la PE es un fenómeno de naturaleza multidimensional, por lo cual, si bien hasta aquí se han descrito tipos de indicadores que abordan el tema a través de alguna de sus dimensiones (acceso y tenencia de bienes económicos, asequibilidad del gasto, acceso a servicios energéticos) las investigaciones a nivel internacional sobre el tema, cada vez más asumen perspectivas multidimensionales, tanto mediante índices sintéticos, como mediante la combinación de indicadores que relevan distintas dimensiones.



Un hogar se encuentra en situación de pobreza energética cuando no acceda a servicios energéticos básicos y asequibles en el hogar.

Algunos ejemplos de estudios multidimensionales referidos a PE son: el Observatorio Europeo de PE (EPOV), el cual unifica y sistematiza mediciones en todos los países miembros, mediante una batería de indicadores primarios y secundarios; el índice tridimensional de PE en Chile (Calvo et. al., 2019), que utiliza distintos indicadores de acceso, calidad y gasto de los servicios energéticos a través del análisis de varias fuentes de datos secundarios; el Índice de PE multidimensional basado en la percepción

(PMEPI) (Villalobos, et. Al., 2019) que utiliza la metodología Alkire y Foster (2011) con indicadores de autopercepción; el estudio de Nussbaumer (2011) donde estudian la PE en varios países de África también utilizando el método de Alkire y Foster; Contreras (2019) quien elabora una medición multidimensional, mediante la construcción de un índice de vulnerabilidad energética (IVE) aplicado a Montevideo y su área metropolitana, entre muchos otros.

En Uruguay se pueden encontrar investigaciones que asuman una definición restringida de la PE, mediante indicadores de gasto, concretamente utilizando el umbral de 10% de los ingresos del hogar, por ejemplo: Messina (2015) y Amarante y Ferrando (2011). Sin embargo, el desarrollo de investigaciones en PE desde una perspectiva multidimensional es insipiente, identificando únicamente la investigación de Contreras, 2019, la cual es una investigación de vulnerabilidad energética² y la investigación (aún no publicada) llevada adelante por Red de Pobreza Energética de la Universidad de Chile en 2021).

METODOLOGÍA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL IPEM

Respecto a las fuentes de información y sus limitaciones

El trabajo empírico se realizará en base a la Encuesta de Gastos e Ingresos de los Hogares 2016-17 realizada por el INE. Se presentan comparaciones con la ENGIH 2006-07 a efectos de obtener una perspectiva del fenómeno en el tiempo. Ambas encuestas, pese a presentar

2 La vulnerabilidad energética, a diferencia del de PE es esencialmente un concepto probabilístico; en tanto se centra en las características y factores de los hogares que afectan la probabilidad (el mayor riesgo) de caer en PE, al margen de cómo definamos la misma. La noción de vulnerabilidad reconoce que un hogar puede abandonar la condición de PE (o caer en ella) ante un cambio en algunas de estas circunstancias. (Bouzarovski y Petrova, 2015; Bouzarovski, 2018; Thomson, Bouzarovski y Snell, 2017).

algunas diferencias entre sí, aportan información de los ingresos de los hogares; de sus gastos en energía discriminados por fuente (electricidad, gas licuado de petróleo -GLP-, leña, Fuel oil, etc); y de los bienes de confort de los que disponen los hogares. (INE, 2009; INE, 2020).

Las encuestas de gastos son muy útiles para los estudios de PE, ya que obtienen información de ingresos, gastos, fuentes de energía utilizadas y bienes económicos dentro de un mismo hogar. Sin embargo, al no ser diseñada para el estudio de aspectos energéticos, los registros de gastos en GLP y leña presentan un subregistro que dificulta seriamente el cálculo de gastos energéticos por hogar.

A modo de ejemplo, la pregunta concreta referida al consumo de leña es “*En el mes pasado, ¿cuánto pagó su hogar por leña?*”. Utilizar un período de referencia de gasto mensual con la leña genera una gran dificultad, ya que en general, este consumo suele estar caracterizado por grandes gastos, pocas veces en el año y con una alta estacionalidad en el invierno. Otros países como España han resuelto asignarle un período de referencia anual³, o sea que se consulta por los gastos en el último año hasta el día de realizada la encuesta; Chile, por ejemplo, ha optado por preguntar directamente el período de referencia al entrevistado⁴. En Uruguay, al contar con datos que referencian al último mes de consumo, se obtuvo un gran número de respuestas con gasto cero, en especial en los hogares encuestados en verano y primavera. Además, el hecho que los

3 Esto se puede observar en los cuestionarios y en los documentos metodológicos de la encuesta de gastos española disponibles en https://www.ine.es/dyngs/INEbase/es/operacion.htm?c=Estadistica_C&cid=1254736176806&menu=metodologia&idp=1254735976608

4 Puede consultarse el formulario de relevamiento de gastos del hogar de la Encuesta de Presupuestos Familiares en Chile disponible en [https://www.ine.cl/docs/default-source/encuesta-de-presupuestos-familiares/formularios/viii-epf---\(junio-2016---junio-2017\)/3-lgh-viii-epf.pdf?sfvrsn=3d8386a_2](https://www.ine.cl/docs/default-source/encuesta-de-presupuestos-familiares/formularios/viii-epf---(junio-2016---junio-2017)/3-lgh-viii-epf.pdf?sfvrsn=3d8386a_2)

gastos sean pocos en el año, pero con montos muy elevados, distorsiona las mediciones de PE al hacer que hogares de altos ingresos sean computados por los indicadores de gasto como pobres energéticos debido a presentar gastos en leña muy elevados, pese a que su utilización pueda corresponder a varios meses o incluso a un año completo. Con el GLP, sucede lo mismo, aunque en menor proporción.

Debido a esto, se elaboró un método de desestacionalización, mensualización e imputación de valores perdidos mediante medias condicionadas para datos agrupados según las variables “tamaño del hogar”, “región” y “cuartil de ingresos”. Al desestacionalizar y mensualizar los gastos en leña, los gastos se reducen ampliamente, por lo que su incidencia disminuye fuertemente en el gasto general. El efecto conjunto de la mensualización de la leña junto con la imputación de gastos de leña y GLP, genera una disminución porcentual del indicador del 5,8%, generando un aumento únicamente en los hogares del primer decil de ingresos.

La estructura y dimensiones del IPEM

La metodología utilizada en esta investigación para la construcción del IPEM es derivada de la metodología desarrollada por Alkire y Foster (2011). Esta metodología se denomina de corte dual, debido a la definición de dos umbrales de privación; uno por dimensión y uno general a todo el índice. De este modo, en primer lugar, se definen una serie de dimensiones (d) e indicadores (j) a relevar. Luego, para cada indicador se debe definir un umbral (z) que permita identificar si una persona sufre privación o no en cada dimensión; se pueden definir también ponderadores (w) de cada indicador dentro de cada dimensión. Luego se establece un segundo umbral (k), que refiere a la cantidad de privaciones necesarias para que un hogar experimente pobreza multidimensional. Si al observar un hogar (i), su suma ponderada de privaciones (es superior a este segundo umbral (k), entonces se está en situación de pobreza multidimensional. Estos elementos se presentan en la siguiente ecuación:

$$\left. \begin{array}{l} x_{ij} < z_j \rightarrow p_{ij} = 1 \\ x_{ij} > z_j \rightarrow p_{ij} = 0 \end{array} \right\} \Sigma_j^d p_{ij} w_j = C_i \rightarrow S_i C_i > k \quad \Rightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Se clasifica} \\ \text{como pobreza} \\ \text{multidimensional} \end{array}$$

Donde: x_{ij} = logro del hogar i en el indicador j ; z_j = umbral definido para el indicador j ; p_{ij} es el valor que asume cada indicador según se esté por debajo o por encima del umbral; w_j = ponderador del indicador j ; k = umbral de privaciones para ser considerado pobre multidimensional; C_i = suma ponderada de privaciones de cada persona

Esta metodología permite calcular tres indicadores principales. En primer lugar, la tasa de recuento (H) o incidencia de la pobreza, que es la proporción de hogares con pobreza multidimensional (q), dentro del total de hogares (n), tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$H = \frac{q}{n}$$

En segundo término, se calcula la intensidad de la pobreza (A), que representa el promedio ponderado de privaciones para el subconjunto de los hogares en situación de pobreza multidimensional. Para su cálculo se censuran las privaciones que experimentan los hogares no pobres. De este modo, se define un vector censurado de recuento de privaciones ponderadas $c(k)$ de forma tal que si $c_i < k$ entonces $c_i(k) = 0$. A partir de esto, se calcula A, tal como se expresa en la siguiente ecuación (Alkire y Foster, 2011; Alkire et. al. 2015):

$$A = \Sigma_i^q \frac{c_i(k)}{q}$$

El tercer y principal índice es la Tasa de Recuento Ajustada (M0) – resultado del producto de H y A. Intuitivamente M0 se puede entender como el cociente entre el total de privaciones de los hogares identificados como pobres multidimensionales y la cantidad máxima de privaciones posibles en los hogares que componen la muestra, tal como se expresa en la siguiente ecuación (Alkire y Foster, 2011; Alkire et. al. 2015):

$$M0 = H * A = \frac{1}{n} \sum_i^n c_i(k)$$

Para el IPEM se seleccionaron 4 dimensiones referidas al acceso a servicios energéticos dentro del hogar (servicios energéticos eléctricos, calentamiento de agua sanitaria, calefacción de ambientes y servicios energéticos para la alimentación). La quinta dimensión del IPEM refiere al gasto⁵. Debido a la complejidad de los indicadores de esta última dimensión, a continuación, se profundizará en la misma.

Dimensión de gasto: esta dimensión, en cierto sentido, es transversal a las restantes, en tanto el acceso a servicios energéticos no puede realizarse a cualquier costo. No sería deseable, por ejemplo, que, por solventar costos energéticos, un hogar no alcance a cubrir los gastos mínimos de alimentación, vestimenta, educación, u otros; o que aun cubriendo estos, la satisfacción de sus necesidades energéticas implique un esfuerzo muy elevado o incluso muy desigual a nivel de toda la población. Por otro lado, gastos muy reducidos pueden estar indicando la no satisfacción de necesidades o el acceso irregular a servicios de electricidad, lo que a su vez puede generar problemas tanto a nivel de la calidad del servicio, como de la seguridad de este.

5 Las 5 dimensiones fueron analizadas a la luz del coeficiente de correlación de Spearman, en tanto se trata en todos los casos de variables dicotómicas. Encontrándose una muy baja correlación entre las mismas, por lo que las privaciones en unas no se asocian a las privaciones en otras.

Se usarán dos indicadores; uno de gastos no asequibles; y otro que evidencia gastos reducidos, que puedan estar indicando la no satisfacción de necesidades.

Respecto al **primer indicador de gasto no asequible**, está compuesto por dos subindicadores: en primer lugar, el indicador del umbral del 10% en tanto es de sencilla comprensión, además de ser un indicador ampliamente utilizado a nivel internacional; y, en segundo término, un indicador de “ingresos insuficientes” el cual surge como una variante del indicador propuesto inicialmente por Moore (2012) primero y Clavo et. al. (2019) luego. El mismo identifica que un hogar es pobre energéticamente si luego de descontados sus gastos energéticos, el ingreso residual disponible no permite cubrir los costos de vida mínimos. En nuestro caso, se utilizará la Línea de Pobreza (LP) como umbral de costo de vida mínimo, aunque teniendo en cuenta que, en el método de construcción de la LP, se consideran los costos energéticos implícitos, se ajustará la misma restándole la media de la proporción de ingresos destinados a gastos energéticos de la población, la cual, según datos de la ENGIH 2016-17 corresponde al 4,85%, por lo que el valor de la LP ajustada es de 0,952LP.

De este modo, un hogar estará en situación de PE si: $I - GE < LPA$

Donde I = ingreso total del hogar⁶ CVL; GE = es el gasto energético y LPA = Línea de Pobreza Ajustada, que equivale a la LP menos la mediana de la proporción de ingresos destinados a gastos energéticos del total de la población.

Este indicador refleja información de hogares pobres y hogares que, pese a no ser pobres por

6 La metodología de la LP se desarrolla con ingresos con valor locativo. Debido a que el indicador compara ingresos con la LP, y la LP se calcula con ingresos cvl, todos los cálculos realizados en este documento se harán con valor locativo, según la metodología del Instituto Nacional de estadística de Uruguay (INE, 2006)

ingreso, debido a sus bajos ingresos en relación con sus gastos energéticos, caen por debajo de este umbral. De este modo, el componente de gasto no asequible del IPEM será una combinación de los dos indicadores hasta aquí descritos, identificando privación cuando se supere el umbral de 10% de ingresos destinado a gastos energéticos y/o cuando, luego de realizado los gastos energéticos, el hogar quede con ingresos por debajo de la LP ajustada.

Por otro lado, se utilizará también un **segundo indicador de gasto reducido** basado en el indicador de la Unión Europea “M/2”, el cual define pobres en energía a los hogares cuyo gasto energético absoluto está por debajo de la mitad de la mediana nacional. En nuestro caso, se asumirá un enfoque más conservador, definiendo un umbral de un tercio de mediana de gasto energético absoluto que los hogares de su grupo de referencia (definido en base a la cantidad de integrantes, la región y la cantidad de habitaciones de la vivienda).

Este indicador de gasto reducido se construye en función del comportamiento en el uso y gasto energético de toda la población (con PE o no) y es, por lo tanto, un indicador relativo, por lo que incorpora un enfoque de desigualdad, tanto en el gasto energético, como en la satisfacción de necesidades. La privación en este indicador

remite directamente a mantener cierto nivel de desigualdad con un grupo definido como de referencia, respecto al cual se estudia su acceso a servicios energéticos, utilizando su gasto energético como proxy. Si bien contar con artefactos para la satisfacción de servicios energéticos, como por ejemplo heladera, calefón, tv, etc, es un buen indicador; es claro que un hogar puede tener un artefacto y no utilizarlo por no ser capaz de afrontar sus costos de uso y, por lo tanto, no satisfacer sus necesidades. Por ello, el indicador de gasto reducido incorpora una perspectiva relativa que permite complementar el relevamiento de artefactos en el hogar, con un enfoque donde los gastos energéticos del hogar se consideran en función del gasto del resto de los hogares de similares características. De esta forma es posible identificar hogares que, pese a contar con los artefactos necesarios, tienen un nivel de gasto energético menor a un tercio de la mediana del gasto del resto de los hogares de su grupo de referencia.

En cuanto a los ponderadores (w), se utilizará una igual ponderación para cada indicador (0,125). Se tomará un valor de $k = 0,125$, correspondiente a tener un indicador con privación. Para todas las mediciones, los gastos contemplados refieren a electricidad, leña, GLP, gas por cañería, kerosene, carbón, fuel oil (únicamente en ENGIH 2005-6) y no incorpora gastos por transporte.



Foto de Joshua Lanzarini de Unsplash.

Cuadro 1: Estructura del IPEM (dimensiones, indicadores y ponderadores)

Dimensiones	Indicadores y Servicios energéticos	Método de cálculo y umbrales de respuesta	Ponderación
Dimensión de gasto	Gastos no asequibles	El indicador asume valor 1 si: $GE > 10\% I$ Y/O $I - GE < LPA$ Donde I = ingresos totales del hogar CVL; GE = es el gasto energético y LPA= Línea de Pobreza Ajustada, que equivale a la LP menos la mediana de la proporción de ingresos destinados a gastos energéticos de la población.	0,125
	Gasto Energético Bajo	$GE < 31GEGR$ GE = Gasto Energético Bajo $GEGR$ = Mediana del Gasto Energético de grupo de referencia	0,125
Servicios energéticos eléctricos	Iluminación	El hogar utiliza energía eléctrica para iluminar	0,125
	Entretenimiento y/o comunicación	El hogar cuenta con alguno de los siguientes artefactos: TV, radio, PC, laptop, tablet	0,125
Servicios energéticos para la alimentación	Cocción de alimentos	La fuente principal utilizada para la cocción de alimentos es electricidad, glp, o gas natural	0,125
	Conservación de alimentos	El hogar cuenta con refrigerador	0,125
Calentamiento de agua sanitaria	Calentamiento de agua sanitaria	El hogar cuenta con calefón, termofón o calentador instantáneo	0,125
Calefacción de ambientes	Calefacción de ambientes	El hogar utiliza alguna fuente de energía para calefaccionar ambientes	0,125

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

A continuación, se puede observar la evolución que ha tenido el fenómeno en ambas mediciones, con los datos de H, A y M0 discriminados por regiones. En todos los casos, los datos se calculan tomando al hogar como unidad de análisis y en cada cuadro se presenta el valor del estadístico de asociación utilizado, así como su nivel de significación⁷.

Cuadro2: Variación porcentual del IPEM entre 2005 y 2017 por regiones

Región	2005-6			2016-17			Variación porcentual		
	H*	A**	MO	H***	A****	MO	H	A	MO
Montevideo	38,5%	0,222	0,086	23,7%	0,173	0,041	-38,5%	-22,4%	-52,3%
Interior > 5.000 hab.	50,3%	0,234	0,117	25,5%	0,172	0,044	-49,3%	-26,3%	-62,6%
Interior < 5.000 hab.	62,9%	0,273	0,172	35,7%	0,176	0,063	-43,2%	-35,8%	-63,6%
Total	47,0%	0,237	0,111	26,4%	0,173	0,046	-43,9%	-27,0%	-59,0%

* *V de Cramer = 0,167 (p = 0,000)*

** *Gamma de Goodman - Kristal = 0,245 (p = 0,000)*

*** *V de Cramer = 0,095 (p = 0,000)*

**** *Gamma de Goodman - Kristal = 0,139 (p = 0,000)*

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 20016-17 y 2005-6

Como se observa en el cuadro 2, hubo una importante mejora entre ambas mediciones; la tasa de recuento ajustada (que nos brinda una imagen global de la PE) ha disminuido un 59%, en línea con la situación socioeconómica de Uruguay. A modo de ejemplo, entre 2006 y 2018 la pobreza monetaria en Uruguay disminuyó un 78%, mientras la pobreza multidimensional en personas de más de 18 años lo hizo un 31%, evidenciando una mejora generalizada en los niveles de privación de los uruguayos. (Machado y Vigorito, 2021)

En cuanto a las distintas regiones analizadas, se puede observar que, si bien el IPEM se redujo en todas ellas, el interior presenta una disminu-

ción porcentual aún mayor que la de Montevideo, tanto en M0 como en H y A. Los estadísticos para los datos 2016-17 arrojan una asociación muy débil entre las regiones con respecto a H y débil respecto a A. Pese a esto, se constata que a medida que nos alejamos de los entramados urbanos, aumenta la PE (a excepción de los hogares del interior con más de 5000 habitantes en la última medición), evidenciando las mayores dificultades de los hogares de localidades de menos de 5000 habitantes para acceder a servicios energéticos asequibles.

En el cuadro 3 presentan las contribuciones a M0 por dimensiones e indicadores.

7 En todos los casos, para asociación entre variables nominales se utilizará el estadístico V de Cramer; para asociación entre variables ordinales o dicotómica y ordinal, se utilizará el estadístico Gamma de Goodman-Kriska; para asociación entre variables continuas o dicotómica y continua se utilizarán coeficientes de correlación según corresponda. Se utilizará un nivel de significación del 0,01 y se asumirán valores de asociación según el siguiente criterio: muy débil<0,1<débil<0,3<moderada<0,6<fuerte<0,8< muy fuerte.

Cuadro3: Tasa de recuento ajustada (MO) desagregada según contribuciones de sus dimensiones e indicadores para hogares en 2016-17

Dimensión	SE eléctricos		SE para la alimentación		Calentamiento de agua sanitaria	Calefacción de ambientes	Dimensión del gasto	
	Iluminación eléctrica	Entretenimiento y/o comunicación	Conservación de alimentos	Cocción de alimentos	Calentamiento de agua sanitaria	Calefacción de ambientes	Gasto energético	Gasto no asequible
Contribución por indicador	0,000125	0	0,001875	0,001625	0,006875	0,012	0,01025	0,013
Contribución por dimensión	0,0001		0,004		0,007	0,012	0,023	

MO total = 0,046

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17.

El 50% del valor total de MO (0,046) es explicado por la dimensión de gasto, la cual a su vez presenta un valor cercano al doble de la segunda dimensión con mayor contribución (calefacción de ambientes).

Las dimensiones del IPEM, análisis de sus tasas de recuento (H)

A continuación, se presenta el cuadro 4 donde se descompone el IPEM en dos cuadrantes que

contienen los valores de la tasa de recuento simple (H) de cada dimensión; y los indicadores de gasto que utiliza el IPEM de forma desagregada. Acompañando al cuadro, se presenta el gráfico 1, donde en el eje horizontal se observan las dimensiones del IPEM y en el vertical la tasa de recuento (H) de cada una de ellas. También se presenta el gráfico 2 que ilustra la evolución de los indicadores gasto, con los períodos de tiempo en el eje de las ordenadas y las tasas de recuento de cada indicador en las abscisas.

Cuadro 4: Tasa de recuento simple (H) por dimensiones e indicadores de gasto. Variación entre 2005 y 2017.

Año	Dimensiones del IPEM				Indicadores de gasto		
	SE eléctricos	SE para la alimentación	Calentamiento de agua sanitaria	Calefacción de ambientes	Dimensión de gasto	Gasto energético bajo	Gasto no asequible
2005-6	4,2%	9,8%	14,9%	15,8%	36,3%	8,5%	34,1%
2016-17	0,1%	2,6%	5,5%	9,6%	16,8%	8,2%	10,4%
Variación porcentual	-97,6%	-73,5%	-63,1%	-39,2%	-53,7%	-3,5%	-69,5%

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2005-06 y 2016-NGIH 2005--6 y 2016-17 (Chi cuadrado, p=0,000)

Gráfico 1: Dimensiones del IPEM.

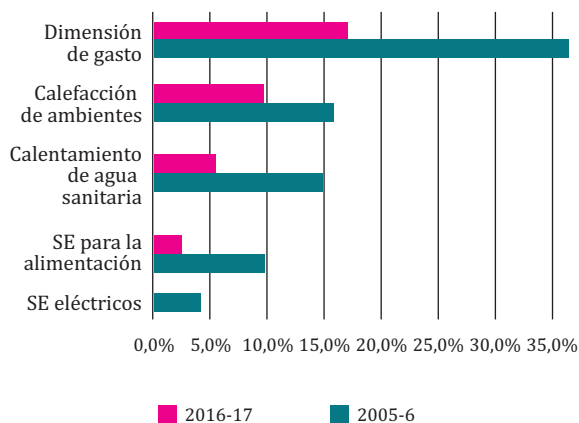
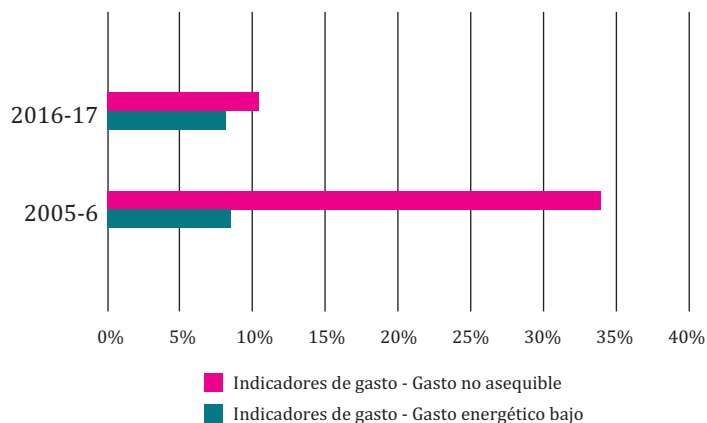


Gráfico 2: Indicadores de gasto.



Todas las dimensiones presentan una clara disminución en la tasa de recuento simple en ambas mediciones, siendo la de SE eléctricos la que más ha descendido, explicado en gran parte por el aumento de la cobertura del servicio de energía eléctrica en este período, en particular en áreas rurales⁸. Le siguen en disminución los SE para la alimentación, calentamiento de agua sanitaria, la dimensión de gasto y por último la calefacción de ambientes. Esta baja generalizada de las privaciones en todas las dimensiones podría estar vinculada, tanto con los aumentos del poder adquisitivo de la población en estos años, como por una posible baja de los precios de los artefactos tecnológicos para el hogar.⁹

Como se explicó en el apartado metodológico, el indicador de “gasto no asequible” computa una privación si un hogar cumple con alguna de las siguientes características: destina más del 10% de sus ingresos a gastos energéticos; o, una vez realizado sus gastos energéticos, sus ingresos quedan por debajo de la LP ajustada (ingresos insuficientes). En el cuadro 5 se presenta un detalle de estos indicadores.

8 Mientras en 2006 la tasa de electrificación era de: 99,3% la urbana, 86,6 la rural y 98,6 la total; en 2017 las mismas tasas eran de 99,8, 98,4 y 99,8 respectivamente, según datos extraídos de la serie estadística del MIEM disponible en <https://www.miem.gub.uy/energia/series-estadisticas-de-energia-electrica>

9 Respecto a los ingresos de los hogares; entre marzo 2006 y marzo 2017 (ambos puntos medios del trabajo de campo de cada ENGIH) el índice de salario real en Uruguay tuvo una variación porcentual acumulada de 46,4%, según datos extraídos de la serie histórica de índice salario real (base julio 2008=100) publicada por el INE. Disponible en <https://www.ine.gub.uy/jms-indice-medio-de-salarios>.

El acceso a servicios energéticos en el hogar es un requisito inevitable para alcanzar ciertos niveles de desarrollo humano; incide directamente en las posibilidades de educación, salud, o calidad de vida de la población.

Cuadro 5: Componentes del indicador “gasto no asequible” por deciles de ingreso per cápita

Deciles ingreso per cápita CVL	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total
Ingresos insuficientes*	51,8%	5,6%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	5,8%
Gasto > 10% Ingresos CVL**	26,3%	12,0%	9,1%	6,5%	5,1%	2,7%	2,6%	1,2%	1,5%	0,0%	6,7%

* Gamma de Goodman - Kristal = 0,989 (p = 0,000)

** Gamma de Goodman - Kristal = 0,639 (p = 0,000)

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17

Como se puede observar en los estadísticos de asociación del cuadro, ambos componentes del indicador tienen una asociación significativa y fuerte (muy fuerte en el caso de “ingresos insuficientes”) con el ingreso de los hogares. De este modo, los hogares con ingresos insuficientes para el pago de sus gastos energéticos se concentran en la parte inferior de la distribución, alcanzando el 51,8% del primer decil y no presentando ningún caso luego del decil 3. Por otro lado, el indicador del 10%, si bien también decrece a medida que se aumenta de decil, tiene presencia en toda la distribución, salvo en el decil 10. Este comportamiento tan disímil valida la opción de utilizarlos de forma combinada en el indicador de gasto no asequible. De hecho, de haberse utilizado únicamente el indicador del 10%, 39.168 hogares (3,2% del total) no hubiesen sido considerados, ya que, si bien quedan por debajo de la LP ajustada luego de realizar sus gastos energéticos, no superan el umbral del 10%.

Por otro lado, si se observa nuevamente el cuadro 5, se aprecia como el indicador de gasto energético bajo (GEB) apenas si tiene una disminución porcentual del 3,5% entre mediciones, alcanzando al 8,2% de los hogares en 2016-17 (cuadro 9). Este indicador identifica hogares que, tengan o no privación en otras dimensiones, tienen un gasto energético muy bajo en relación con el universo de hogares de similares características. Esto podría

estar indicando una posible restricción en la satisfacción de algunas necesidades en términos relativos, así como también la incidencia de conexiones irregulares (y por lo tanto inseguras) al servicio de energía eléctrica, que no generen gastos para estos hogares.

Por último, se presenta el cuadro 7, el cual nos permite visualizar los niveles de privación según las regiones de la ENGIH 2016-17.

La Pobreza Energética requiere un abordaje necesariamente multidimensional. Uruguay, ha mejorado pero aún presenta una situación deficitaria importante en cuanto al efectivo acceso a servicios energéticos básicos y a un precio asequible para su población.

Cuadro 6: Dimensiones del IPEM por regiones (H)

Regiones ENGIH 2016-17	Dimensiones del IPEM					Indicadores de gasto	
	SE eléctricos	SE para la alimentación	Calentamiento de agua sanitaria	Calefacción de ambientes	Dimensión de gasto	Gasto energético bajo	Gasto no asequible
Montevideo	0,0%	1,0%	4,0%	9,2%	15,7%	7,4%	8,9%
Interior más de 5000 hab.	0,1%	2,5%	5,4%	10,4%	15,6%	3,9%	9,1%
Interior menos de 5000 hab.	0,5%	6,9%	9,4%	8,6%	22,9%	6,5%	17,6%
País	0,1%	2,6%	5,5%	9,6%	16,8%	8,2%	10,4%
V de Cramer	0,042	0,129	0,082	0,024	0,072	0,046	0,104

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17

(p = 0,000)

Lo primero a destacar es que, si bien existe una asociación significativa entre las dimensiones del IPEM y la región, la misma es débil o muy débil según el caso. Sin embargo, del cuadro se observa claramente cómo 4 de las 5 dimensiones del IPEM presentan mayores niveles de privación en los contextos rurales y localidades de menos de 5.000 habitantes, evidenciando un contexto territorial con mayor dificultad en el acceso a servicios energéticos.

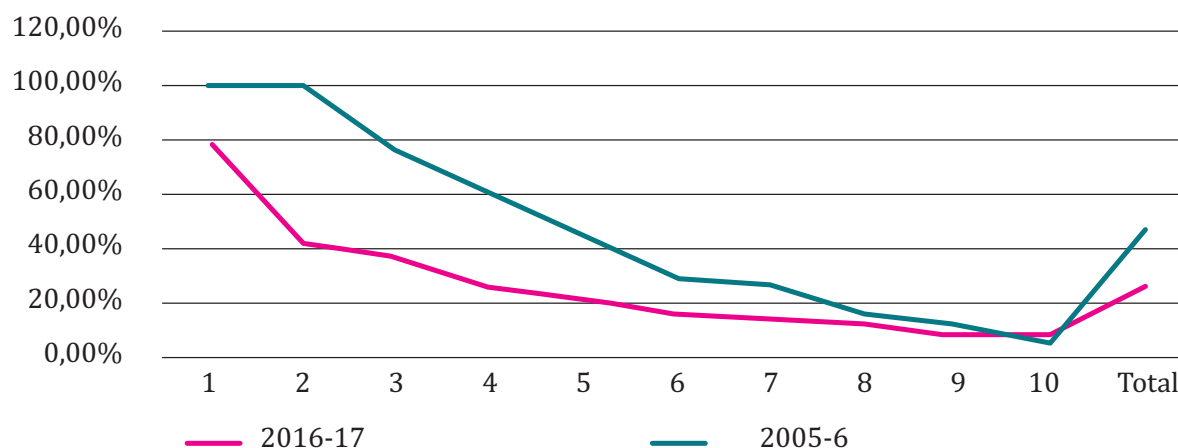
La excepción a esto es la dimensión “calefacción de ambientes”, la cual tiene su menor nivel de privación en las localidades de menos de 5.000

habitantes. Esta particularidad se debe a la mayor disponibilidad de leña en estas zonas. A modo de ejemplo, mientras en Montevideo tan solo el 13,9% de los hogares calefacciona su hogar con leña, en las localidades con menos de 5000 habitantes del interior, lo hacen el 71%.

Enfoque desde una perspectiva de la desigualdad de ingresos

A continuación, se desarrolla un análisis desde una perspectiva de desigualdad. Como se observa en el gráfico 4, el IPEM disminuye a medida que aumenta el decil de ingresos.

Gráfico 3: Tasa de recuento (H) del IPEM por deciles de ingreso per cápita CVL en 2005-06 y 2016-17



Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17

Sin duda, los altos niveles de PE en los primeros deciles son el elemento más destacable. En 2005-6 los dos primeros deciles estaban casi en su totalidad en situación de PE. Pese a la importante disminución en 2016-17, los deciles 1 y 2 continúan con niveles de PE en el entorno del 80 y 40% respectivamente, lo cual alerta respecto a importantes privaciones en la calidad de vida de la población y respecto a la existencia de brechas importantes en la satisfacción de necesidades energéticas¹⁰.

Otro elemento importante es la existencia de hogares en situación de PE en todos los deciles. Este aspecto es un indicio de cómo independientemente del nivel socioeconómico de los hogares, existen aspectos culturales y/o preferencias adaptativas en la población que pueden estar incidiendo en no hacer uso efectivo de determinados servicios energéticos, aún en caso de que no operen restricciones presupuestarias. Esto último, se puede observar más detalladamente en el cuadro 9, donde se desagrega el IPEM en dimensiones e indicadores de gasto por deciles.

Cuadro 7: Dimensiones del IPEM e indicadores de gasto por decil de ingresos per cápita CVL

Deciles de ingreso per cápita	SE eléctricos	SE para la alimentación	Calentamiento de agua sanitaria	Calefacción de ambientes	Dimensión de gasto	Gasto energético bajo	Gasto no asequible
1	0,5%	7,5%	21,6%	21,6%	67,3%	24,0%	59,8%
2	0,2%	2,9%	7,5%	13,7%	27,7%	13,2%	15,7%
3	0,2%	3,4%	8,2%	12,9%	21,7%	12,7%	9,1%
4	0,0%	2,5%	5,3%	9,4%	16,2%	9,7%	6,5%
5	0,2%	3,4%	3,5%	7,0%	12,9%	7,8%	5,1%
6	0,0%	1,8%	2,4%	7,9%	7,8%	5,0%	2,7%
7	0,0%	1,8%	1,8%	4,8%	7,7%	5,1%	2,6%
8	0,2%	1,0%	1,2%	7,1%	5,5%	4,2%	1,2%
9	0,0%	1,0%	1,0%	5,3%	1,5%	0,0%	1,5%
10	0,0%	0,8%	2,2%	6,1%	0,0%	0,0%	0,0%
Total	0,1%	2,6%	5,5%	9,6%	16,8%	8,2%	10,4%
V de Cramer	0,044	0,117	0,260	0,167	0,501	0,249	0,558

Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17

(P=0,000)

10 Se calculó el estadístico de asociación Gamma de Goldman-Kriskal evidenciando una asociación moderada entre los deciles de ingreso y la PE. Los valores fueron de 0,571 en el caso de H y 0,562 en el caso de A.

Tal como se observa, el estadístico V de Cramer presenta niveles de asociación bajos para las cuatro dimensiones de acceso a servicios energéticos y moderada para la dimensión de gastos. En términos generales, cada dimensión presenta menores niveles de privación a medida que avanzamos en los deciles de ingreso. Sin embargo, la dimensión “calentamiento de agua sanitaria” y “calefacción de ambientes” marcan una excepción, en tanto en ambas se da un aumento de la privación en el decil 10, respecto al decil 8 y 9¹¹. Como se expresó anteriormente, esto podría estar vinculado al modo como se recoge la información¹².

La literatura internacional, suele vincular la PE, con el estado general de las viviendas, en el entendido que es un aspecto fundamental en la preservación de la temperatura interna de los hogares (Contreras, 2019; Okushima, 2017; Gouveira, 2019). Al respecto, se constató que los hogares con PE tienen viviendas de menor calidad que el resto de los hogares, tanto si observamos sus materiales constructivos, como sus problemas estructurales y de conservación. En el gráfico 3, se presenta la suma de problemas de construcción y conservación de la vivienda según deciles de ingreso, observándose como la mayor precariedad de la vivienda en hogares con PE se observa en todos los deciles.

11 Esto se puede constatar en ambas mediciones y en las tres regiones analizadas en cada una.

12 Para el calentamiento de agua sanitaria, la ENGIH releva la tenencia de: “Calefón o Termofón” y “Calentador Instantáneo”; podría ser que algunos hogares de mayores ingresos tengan acceso a fuentes para calefaccionar el agua para el baño distintas, como, por ejemplo, calderas centralizadas, las cuales no estén siendo relevadas. Con la dimensión calefacción de ambientes también puede pasar algo similar, por ejemplo, con sistemas de calefacción centralizados asociados a los gastos comunes

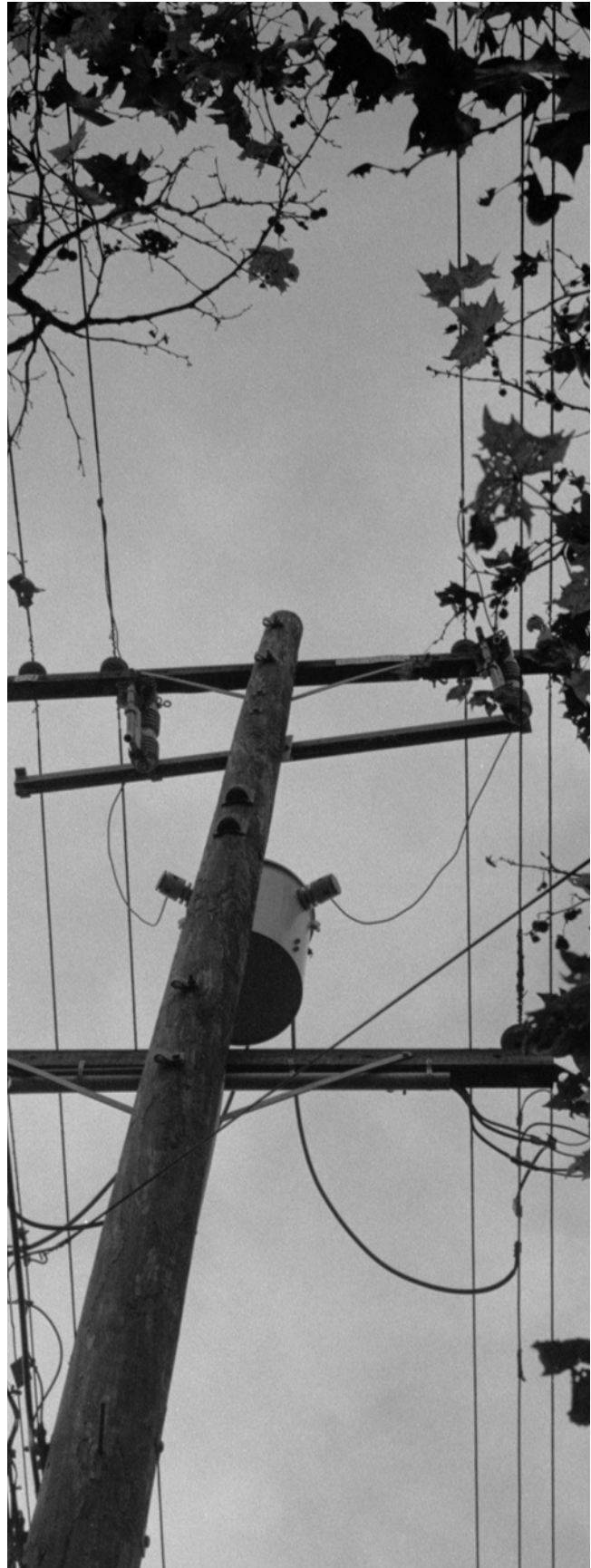
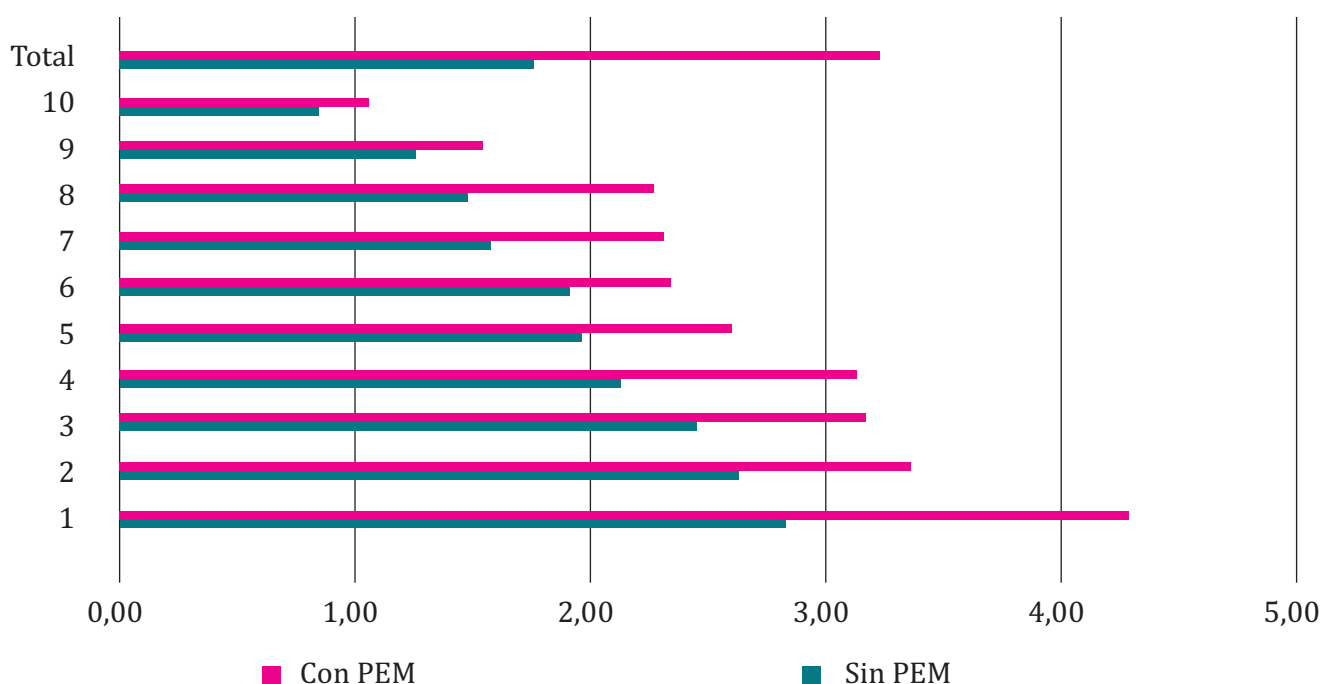


Foto de Ronan Furuta de Unsplash.

Gráfico 4: Cantidad de problemas constructivos y de mantenimiento en la vivienda promedio según PEM o no, por deciles de ingreso per cápita CVL.



Fuente: Elaboración propia. Datos ENGIH 2016-17

REFLEXIONES FINALES

Si bien la ENGIH es una fuente de información muy valiosa para realizar mediciones de PE, presenta una limitación muy importante a la hora de trabajar con los registros de gastos, particularmente en la leña, pero también en el GLP. Se entiende que el modo de preguntar en los formularios genera esta dificultad, en tanto el período de referencia que se establece es “el mes previo a la encuesta”, lo que genera respuestas muy sesgadas por las estacionalidades de los consumos. De este modo, sería recomendable cambiar los períodos de referencia para estos gastos de “mensuales” a “anuales” o a “períodos definidos por el entrevistado”, como lo han hecho España y Chile respectivamente.

De igual modo, el aumento de la privación en “calefacción de ambientes” y “calentamiento de agua sanitaria” en el decil 10 de ingresos respecto a los dos deciles anteriores, puede indicar también fallas en la recolección de la información.

Por otro lado, las estadísticas nacionales aún no relevan información subjetiva que permita realizar un análisis basado en la autopercepción de los propios hogares respecto a su satisfacción con sus servicios energéticos: qué tanto frío o calor pasan los hogares; si restringen o no sus gastos por temas presupuestarios; por qué no acceden a tal o cual servicio energético; pueden ser todas preguntas que permitan acercarse al fenómeno de la PE desde una perspectiva subjetiva, jerarquizando así la voz de los individuos y enriqueciendo el análisis respecto a la PE. La ENGIH 2016-17 ya incluye un módulo de preguntas respecto a pobreza subjetiva, sin embargo, el mismo no incorpora información respecto a servicios energéticos, lo cual sería de amplio valor para profundizar estudios de PE.

Respecto a los resultados, la amplia mejora entre ambas mediciones, tanto en M0, donde se aprecia una disminución porcentual entre mediciones de 59%, como en cada uno de sus indicadores, es el elemento que surge más

claro. Esto implica una mejora importante en el acceso a servicios energéticos asequibles, y, por lo tanto, una mejora importante también en las condiciones de vida, que sin duda permite ampliar las libertades y favorecer el desarrollo humano de la población.

Dada la alta sensibilidad del IPEM a los indicadores de gasto (los cuales explican alrededor del 50% de M0), se entiende que gran parte de esta mejora en el indicador puede estar vinculada al aumento en los ingresos de la población en este período. Pese a esto, Uruguay mantiene niveles de PE de 0,046, lo que implica un 26,4% de los hogares no acceden a servicios energéticos de forma asequible. Al observar el desempeño del IPEM por deciles, se constata una asociación moderada entre ambos, lo que significa un acceso desigual a servicios energéticos básicos por parte de los hogares uruguayos. También se constató una mayor concentración de viviendas de baja calidad constructiva y con mayores problemas estructurales y de conservación en hogares con PE que en el resto de la población.

A modo de síntesis, se concluye que la PE es un fenómeno que requiere un abordaje necesariamente multidimensional; y que Uruguay, pese a haber mejorado ampliamente en el correr del siglo XXI, aún presenta una situación deficitaria importante en cuanto al efectivo acceso a servicios energéticos básicos y a un precio asequible para su población (en particular en los primeros deciles de la distribución).

Por último, es importante marcar que durante 2020 y 2021 gran parte de los países del planeta han asistido a restricciones en la movilidad y distintas modalidades de aislamientos y cuarentenas domiciliarias a causa de la pandemia por COVID-19. Esta coyuntura jerarquiza la importancia de que los hogares cuenten con acceso a servicios energéticos básicos y asequibles, en tanto el tiempo de permanencia en el hogar de los individuos aumenta, y gran parte de las actividades de éstos pasó a realizarse por distintas modalidades virtuales desde el hogar.

Esta coyuntura obliga a rediscutir el concepto de “básico” de los conceptos energéticos; el IPEM no incluye en sus indicadores la tenencia de pc, ni el acceso a internet en el hogar, sin embargo, se entiende que son elementos para analizar profundamente, en tanto en la coyuntura actual son elementos clave para el desarrollo de las personas. ■

REFERENCIAS

Alkire, S., y Foster, J. (2011). Counting and multidimensional poverty measurement. *Journal of Public Economics*, 95(7-8), 476-487.

Alkire, S., Roche, J. M., Ballon, P., Foster, J., Santos, M. E., y Seth, S. (2015). *Multidimensional Poverty Measurement and Analysis*. Oxford University Press.

Amarante V., Ferrando M. (2011) Consumo de servicios de energía y agua en la población (Serie Documentos de Trabajo / FCEA-IE; DT05/11). UR.FCEA-IE.

Bouzarovski S. (2018) *Energy Poverty (Dis) Assembling Europe's Infrastructural Divide* Manchester, UK

Bouzarovski S. & Petrova S. (2015) Una perspectiva global sobre la privación de energía doméstica: superando pobreza energética-pobreza energética binaria *Energy Research & Social Science* Volume 10, Páginas 31-40

- Calvo R., Amigo C., Billi, M., Cortés, A., Mendoza, P., Tapia, R., Urquieta, M. y Urquiza, A. (2019) Acceso equitativo a energía de calidad en Chile: hacia un indicador territorializado y tridimensional de pobreza energética Documento de Trabajo N 5 Red de Pobreza Energética Chile (RedPE).
- Castaño, R., Solís, J., & Marrero, M. (2020). Midiendo la pobreza energética. Una revisión de indicadores. *Hábitat Sustentable*, 10. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.01>
- Castelao M. y Méndez F. (2019) La pobreza energética desde una perspectiva de género en hogares urbanos de Argentina en SABERES. Vol. 11 NÚM. 2 Páginas 133-151.
- Civitaresi, H., Mariana Dondo M., Sarmiento, J., Attaguile, M., Capuano A., Savarese, M. (2021) Medición de Pobreza y Vulnerabilidad energética de los hogares. El caso de la provincia de Río Negro, Argentina. *ENERLAC Revista de Energía de Latinoamérica y el Caribe*. Volumen V. Número 1. P. 106-126 <https://enerlac.olade.org/index.php/ENERLAC/article/view/159/227>
- Contreras S. (2019) Vulnerabilidad energética en Montevideo y área metropolitana: conceptualización, medición y distribución (Tesis de Maestría) Universidad de la República. Uruguay
- Culver C. (2017) *Energy Poverty: What You Measure Matters* Lauren. Stanford University, CA.
- Dehays R. y Schuschny A. (2019) Pobreza energética en América Latina y el Caribe Una propuesta de indicadores que midan el acceso a la energía con enfoque de desigualdad social y de género Documento de Trabajo de OLADE – DTO 2019/008
- Day R., Walker G., Simcock N. (2016) Conceptualising energy use and energy poverty using a capabilities framework. *Energy Policy* 93 p. 255–264
- Duran, R. (2018) *Apuntes sobre pobreza energética: estimaciones para Argentina: año 2003-2018* Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO-CONICET/UNSa), Rosario, Argentina.
- García Ochoa, R. (2014) *Pobreza Energética en América Latina*. CEPAL, Colección Documentos de Proyectos, Santiago de Chile.
- Gouveia J., Palma P., Simoes S. (2019) Energy poverty vulnerability index: A multidimensional tool to identify hotspots for local action. *En Energy Reports* 5 (2019) 187–201
- González Eguino M. (2014) *La pobreza energética y sus implicaciones*. BC3 Working paper series.
- Instituto Nacional de Estadística de Uruguay (INE) (2006) *Línea de indigencia y pobreza 2006 Uruguay*. Metodología y resultados disponible en www.ine.gub.uy
- Instituto Nacional de Estadística de Uruguay (INE) (2009) *Encuesta Nacional de Gastos e Ingresos de los Hogares 2005-2006* <https://www.ine.gub.uy/documents/10181/36026/Encuesta+Nacional+de+Gastos+e+Ingresos+de+los+Hogares+2005+-+2006/83d8c75c-a0f7-49d3-b5c1-1cb9548ddf1a>
- Instituto Nacional de Estadística de Uruguay (INE) (2020) *Principales resultados de la Encuesta de Gastos e Ingresos de los Hogares 2016-17*. Montevideo, Uruguay https://www.ine.gub.uy/c/document_library/get_file?uuid=3b50400d-c42f-44e7-83a6-339f30798068&groupId=10181
- Machado, A y Vigorito, A. (2021.). *Pobreza, vulnerabilidad y desigualdades horizontales en*
- Mesina, P. (2015) *Aspectos distributivos del consumo de energéticos en los hogares uruguayos (2005-2013)* Documento para las 6tas. Jornadas Uruguayas de Historia Económica. Universidad de la República, Uruguay

- Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) (1 de agosto de 2021) Balance Energético Nacional. <https://ben.miem.gub.uy/balance.php>
- Ministerio de Industria, Energía y Minería (MIEM) (2009) Política energética 2005 – 2030. Disponible en (01 de abril 2020) <http://www.eficienciaenergetica.gub.uy/documents/20182/22528/Pol%C3%ADtica+Energ%C3%A9tica+2005-2030/841defd5-0b57-43fc-be56-94342af619a0>
- Mirza, B.y Szirmai, A. (2010). Hacia una nueva medición de la pobreza energética: un análisis intercomunitario de las zonas rurales de Pakistán . UNU-MÉRITO. <http://collections.unu.edu/view/UNU:275>
- Moore R. (2012) Definitions of fuel poverty: Implications for policy. *Energy Policy* Vol. 49 p. 19-26 <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.057>
- Nussbaumer, P., Bazilian M., Modi V., and Yumkella K. (2011) Measuring Energy Poverty: Focusing on What Matters working paper n°. 42, OPHI.
- PNUD (2018) Pobreza Energética. Análisis de experiencias internacionales y aprendizajes para Chile. Santiago de Chile, Chile
- Rademaekers, K., Yearwood J., Ferreira A., Pye, S., Hamilton I., Agnolucci, P., Grover D., Karásek, J. y Anisimova, N. (2016) Selecting Indicators to Measure Energy Poverty Framework Contract ENER/A4/516-2014. Rotterdam
- Shinichiro, O. (2017) Gauging energy poverty: A multidimensional approach *Energy*, Elsevier Volume 137. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.137>
- Thomson H., Bouzarovski S. & Snell C. (2017) Rethinking the measurement of energy poverty in Europe: A critical analysis of indicators and data. *En Indoor and Built Environment* Vol. 26(7) páginas 879–901.
- Tirado Herrero, S., Jiménez, L., López, J., Hirigoyen H. (2018) Pobreza Energética en España. Hacia un sistema de indicadores y una estrategia de actuación estatal. Asociación de Ciencias Ambientales. Madrid
- Urquiza, A., Amigo, C., Billi, M., Leal T. (2017) Pobreza Energética en Chile ¿Un problema invisible? Análisis de datos secundarios disponibles de alcance nacional. Documento de trabajo Red de Pobreza Energética, Universidad de Chile.
- Villalobos C., Chávez C., Uribe A. (2019) Energy poverty measures and the identification of the energy poor: A comparison between the utilitarian and multidimensional approaches in Chile. Instituto iberoamericano de Investigaciones Económicas. <https://ideas.repec.org/p/got/iaidps/243.html>



Ministerio
de Industria,
Energía y Minería



VIII SEMANA DE LA
ENERGÍA
NOVIEMBRE 2023

URUGUAY
6 - 10 NOV
2023

Save
theDATE



TECNOLOGÍAS DIGITALES APLICADAS A LA FORMACIÓN EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE PARQUES EÓLICOS

*DIGITAL TECHNOLOGIES APPLIED TO TRAINING IN OPERATION
AND MAINTENANCE OF WIND FARMS*

Priscila Silveira Ebert, Alberto Ceña ¹

Recibido: 13/2/2023 y Aceptado: 24/5/2023
ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (44 - 55)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Betzy Arosemena de Unsplash.

1 CEO BEPTE Consultores.

España

acena@bepete.com



RESUMEN

La industria de la energía eólica se considera hoy madura y competitiva en costes con otras fuentes de energía, lo que ha propiciado el rápido crecimiento de la capacidad instalada en todo el mundo en la última década. Este rápido crecimiento ha creado un gran mercado laboral y, en consecuencia, han surgido grandes oportunidades para que las instituciones educativas impartan formación relacionada con la energía eólica. El principal objetivo de la investigación en este campo está relacionado con la mejora del rendimiento y la prolongación de la vida útil de las turbinas eólicas mediante la inversión en estrategias de funcionamiento y mantenimiento. En este sentido, este artículo pretende presentar algunas herramientas de formación desarrolladas por el proyecto Windext. Estas herramientas están enfocadas a apoyar a centros de enseñanza y empresas del sector en la formación de personas en operación y mantenimiento de parques eólicos.

Palabras clave: Energía eólica, formación, herramientas digitales, Windext, Operación y mantenimiento.

ABSTRACT

The wind energy industry is considered mature and cost competitive with other sources of energy, which has enabled a large growth in installed power worldwide in the last decade. This rapid growth has created a large job market and accordingly, great opportunities have arisen for educational institutions to provide training related to wind energy. The main focus of research in this area is related to improving the performance and extending the life of wind turbines by investing in operation and maintenance strategies. In this sense, this paper aims to present some of the training tools developed by the Windex project. These tools are focused on supporting education centers and companies of the sector in the training of people in operation and maintenance of wind farms.

Keywords: *Wind Energy, training, digital tools, Windex, Operation and maintenance.*

INTRODUCCIÓN

En la última década el número de parques eólicos instalados en el mundo ha crecido significativamente, sólo en el último año se han incorporado un total de 93,6 GW de energía eólica en todo el mundo, de los cuales 86,93 GW proceden de instalaciones onshore y 6.068 GW de instalaciones offshore. con lo que la capacidad total instalada alcanza los 837 GW (GWEC, 2021). Uno de los factores que ha motivado este gran crecimiento han sido los avances tecnológicos, con rotores más grandes instalados

a mayor altura y mejores tecnologías de generación que han aumentado la producción y reducido los costes.

No obstante, aun con este incremento, los parques eólicos son muy vulnerables a interrupciones en su producción. Estas pausas pueden ser causadas por problemas impredecibles, tales como restricciones ambientales o limitaciones en el despacho de energía, o por fallas en los equipos que conforman el parque eólico (Silva, Ferrari y Wingerden, 2023).

Aunque la energía eólica se ha convertido en una fuente de electricidad madura y competitiva en costes, las pérdidas de producción siguen siendo un problema en el sector. Esto no solo se debe a la pérdida de ingresos, sino también a las causas subyacentes que originan los fallos o a posibles daños en caso de paradas de emergencia. Para aumentar el rendimiento de los parques eólicos y, en consecuencia, su rentabilidad, se invierte cada vez más en estrategias optimizadas de explotación y mantenimiento (Xia y Zou, 2023).

Además de los retos ya conocidos, como, por ejemplo, la economía circular de los componentes, el avance de la tecnología trae consigo nuevos desafíos y con ellos la necesidad de un gran número de ingenieros, científicos e investigadores locales. La creación de empleo durante la transición energética mundial es un tema relevante y al que hay que prestar atención porque el rápido crecimiento de este sector empuja a cada vez más personas a trabajar en él y esto requiere formación, habida cuenta además, el alargamiento de la vida útil de los activos eólicos.

La educación y la formación desempeñan un papel vital en el desarrollo de la industria eólica (Xie, Feng y Qiu, 2013), compleja en toda la cadena de producción desde la fabricación hasta la operación de los parques, ubicados en muchos casos en terrenos complejos y de climatología complicada. La educación tiene

varias funciones vitales, entre ellas: promover la concienciación pública, desarrollar la confianza de los consumidores, formar al personal de apoyo técnico, capacitar a los ingenieros y a los analistas políticos (Jennings, 2009). La formación puede proporcionar conocimientos estructurales para que las personas sepan gestionar el recurso eólico y los equipos en aspectos como el diseño, la fabricación, el transporte, la instalación, el funcionamiento y el mantenimiento (Yelda et al., 2012).

En este contexto, el presente artículo presenta algunas herramientas didácticas desarrolladas a partir del proyecto Windext, financiado por el programa Erasmus+ de la Comisión Europea, con el fin de formar a futuros profesionales en el ámbito de la explotación de los parques eólicos. El proyecto Windext comenzó en 2020 y su principal objetivo es desarrollar contenidos y definir técnicas de enseñanza para diferentes grupos destinatarios, relacionados con temas como, la prolongación de la vida útil, la reutilización de componentes y las estrategias de funcionamiento y mantenimiento de aerogeneradores.

EL MERCADO Y LAS FUTURAS OPORTUNIDADES DE LA ENERGÍA EÓLICA

El gran crecimiento de la energía eólica contribuye, por un lado, a la generación de energía renovable y apoya la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y, por otro, contribuye a algunas cuestiones sociales, como la creación de empleo local (Msigwa, Ighalo e Yap, 2022).

El estudio desarrollado por (Ram, Aghahosseini y Breyer , 2020) presenta algunos datos relativos al número de oportunidades de empleo generadas por la energía eólica. Los datos presentan los empleos generados desde 2010 y hacen una proyección hasta 2050. A continuación, se presentan algunos datos obtenidos en este estudio.

- **Europa:** Se espera que la energía eólica genere alrededor de 400.000 empleos en 2025, principalmente en tierra, y unos 50.000 adicionales en parques eólicos marinos, con una estimación adicional de 264.000 puestos de trabajo para 2050.

- **Eurasia:** Con un gran potencial para la energía eólica, se observa que la mayor parte de los puestos de trabajo de 2020 a 2030 están asociados al desarrollo de la energía eólica, creando unos 353.000 empleos en 2025.

- **Mena:** Se calcula que creará 260.000 empleos hasta 2030.

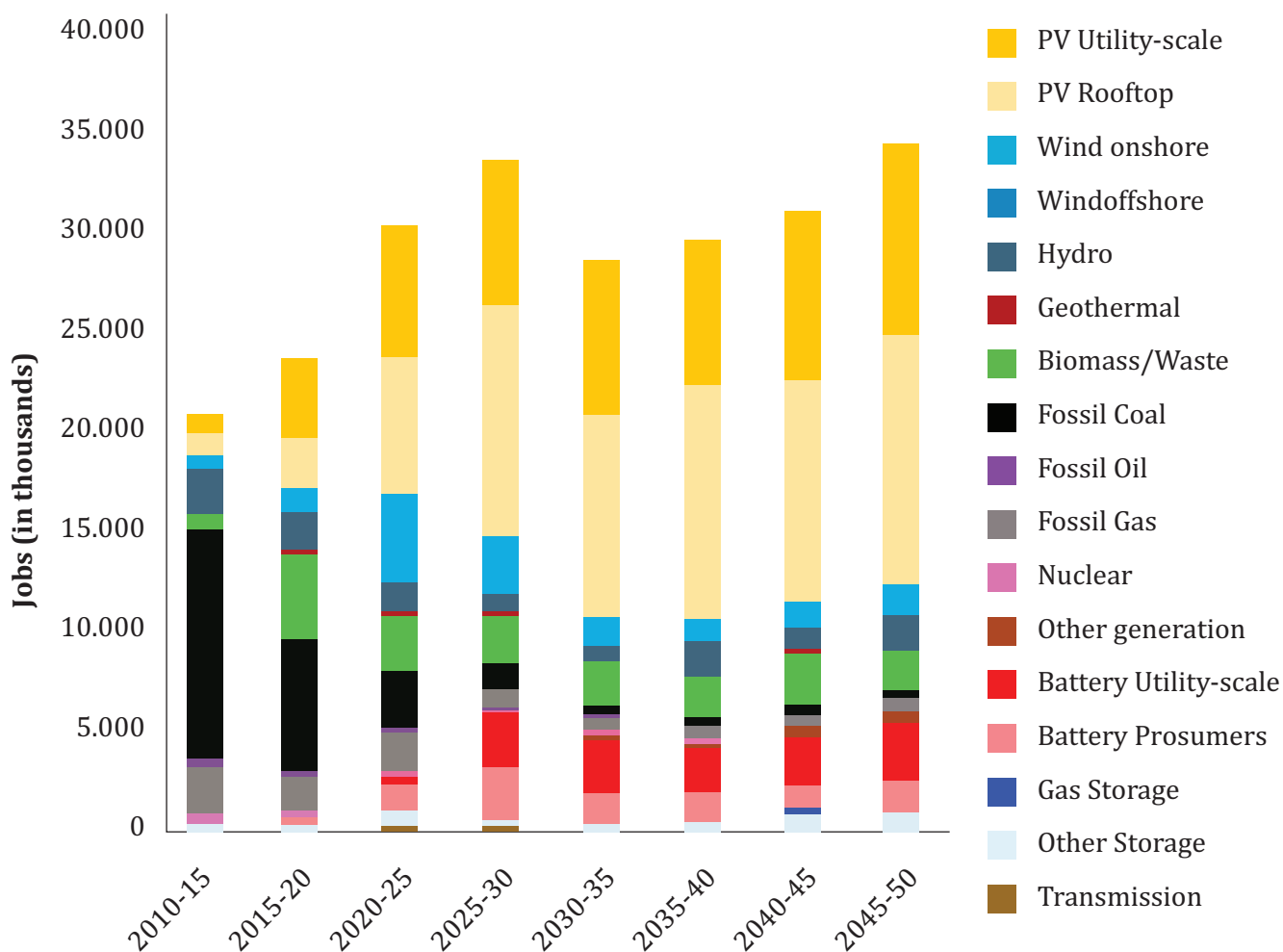
- **África subsahariana:** En ese continente se observa que la energía solar fotovoltaica será la principal creadora de empleo durante el periodo de transición, con un 65% del total de puestos de trabajo creados en 2050. En cuanto a la energía eólica, se crearán 283.000 empleos hasta 2025.

- **SAARC:** Sólo la energía eólica generará 504.000 oportunidades en 2030.

- **Sudamérica:** En 2050 se crearán unos 800.000 empleos en energía eólica.

Desde una perspectiva global, el sector de la energía experimentará un aumento de alrededor del 70% más de puestos de trabajo directos de aquí a 2030, y la creación total de empleo será 1,5 veces mayor en 2050 en comparación con 2015. Las fuentes de energía con más potencial según las proyecciones son la energía solar fotovoltaica, con una previsión de 22,2 millones de empleos para 2050, seguida por el almacenamiento en baterías con 4,5 millones de empleos para la misma fecha, y finalmente la energía eólica con 1,4 millones de empleos para 2050, como se ilustra en la Figura 1 (Ram, Aghahosseini y Breyer, 2020).

Figura 1. Creación de puestos de trabajo estimados por fuente de 2015 a 2050



Fuente: (Ram, Aghahosseini y Breyer, 2020)

Un reciente estudio realizado por el International Renewable Energy Agency (IRENA) presenta los 10 principales generadores de oportunidades en el sector eólico: China representa el 44% de los puestos de trabajo, seguida de Estados Unidos, Alemania, Reino Unido, India, Brasil, Dinamarca, España, México y Países Bajos (IRENA y OIT, 2021). Una de las razones por las que estos países registran las tasas de empleo más elevadas está relacionada con la cadena de suministro. Sólo China alberga el 45% de las 800 empresas fabricantes de componentes para aerogeneradores de todo el mundo.

Este gran número de puestos de trabajo pone de manifiesto la necesidad de atención especial al apartado de seguridad y salud para garantizar unas condiciones de trabajo confiables, en la parte de fabricación, pero sobre todo en la operación y mantenimiento, dadas las condiciones exigentes de trabajar con tensión, en altura y en condiciones ambientales exigentes.

Teniendo en cuenta los datos de empleo es posible observar que la necesidad de formar a los futuros profesionales del sector y en la práctica ya se observa una carencia de trabajadores para la

gestión de los activos eólicos, fundamentalmente en las tareas de mantenimiento especializado.

HERRAMIENTAS DIGITALES ALIADAS A LA ENSEÑANZA DE LA ENERGÍA EÓLICA

En los últimos tiempos, ha habido una creciente discusión acerca de un concepto innovador: la llamada “Industria 4.0”. La industria 4.0 es una tendencia global de automatización y digitalización que engloba el uso intensivo de tecnologías digitales como el internet de las cosas, la inteligencia artificial y la robótica para hacer la producción más eficiente, flexible y personalizada (Bhagwan y Evans, 2023). En lo que respecta a la educación en energía eólica, la Industria 4.0 tiene un importante papel que desempeñar con la incorporación de tecnologías avanzadas. La llegada de este nuevo concepto ha provocado cambios en diversos sectores de la sociedad y los centros de formación deben seguir el ritmo de estos avances y mantener actualizadas sus técnicas para garantizar una formación más precisa y eficaz (Borges et al., 2019). Sin embargo, en el sector eólico se ha constatado que el vínculo entre educación e industria presenta algunas carencias, dado que la industria evoluciona mucho más rápido (Fitch-Roy, 2013) pero también por el progresivo envejecimiento de las máquinas al extenderse su vida útil.

Otro gran problema es la calidad de la formación ofrecida, en muchos casos la formación teórica se aleja de los problemas que se plantean en la realidad. Para minimizar este problema, se ha hecho un mayor esfuerzo en el uso de estrategias de educación en línea y herramientas digitales que brinden la posibilidad a docentes y estudiantes de realizar ejercicios prácticos con la ayuda de simuladores. Esto permite una comprensión más profunda de la funcionalidad básica de los aerogeneradores, el análisis de cargas y los modos de control de las máquinas.

Otra herramienta destacada es la realidad virtual, que contribuye a la aproximación entre

el mundo real y el virtual, mediante entornos que se aproximan a la realidad ante las dificultades de acceder en muchos casos a la góndola del aerogenerador.

Proyecto WindEXT

El proyecto comenzó a desarrollarse en 2020 y tiene como grupos de interés instituciones de formación, fabricantes y proveedores independientes de servicios.

El objetivo general es desarrollar un curso de entrenamiento en el cual se utilicen diferentes tipos de recursos y técnicas de enseñanza. Estos recursos están vinculados a temas de gran importancia en el desempeño posterior de la actividad profesional, tanto en tierra como en el mar, a modo de ejemplo: el análisis de las causas raíz de los fallos, la medida de la disponibilidad y la pérdida de rentabilidad, el uso de SCADAs, los modelos de contrato y los indicadores de rendimiento, como los KPI, el uso final y el reciclaje de componentes, el diagnóstico de averías y las estrategias comerciales.

Con el uso de estas herramientas de libre acceso, estudiantes, empresas y trabajadores del área podrán hacer uso de los mismos para expandir sus conocimientos y desarrollar de una manera práctica nuevas habilidades que podrían ser de utilidad en un futuro.

Herramientas digitales desarrolladas por el proyecto WindEXT

Durante el proyecto se desarrollaron una serie de contenidos que están disponibles en una plataforma Moodle. A través de esta plataforma se puede acceder a las diferentes secciones, módulos y herramientas digitales que se presentan a continuación. Cada uno de ellos desarrollados para cumplir con ciertos objetivos de aprendizaje y al mismo tiempo en su conjunto forman un curso de formación completo.

Plataforma Moodle: En la plataforma se integran diversos contenidos y el acceso a las diferentes herramientas digitales creadas para reforzar el conocimiento y el aprendizaje de los usuarios. La plataforma se divide en cuatro secciones: introducción a las tecnologías de aerogeneradores, mantenimiento, repotenciación y extensión de la vida útil, y herramientas digitales.

Cascade Damage Explorer (CaDWEx): Es un software que permite el análisis de fallos en cascada de componentes. A modo de ejemplo, se han analizado y enumerado los posibles modos de fallo de una caja de cambios. Es posible analizar tanto los fallos individuales como los subsiguientes.

WindEXT Simulation (WExSiM): Este software consiste en 5 diferentes escenarios en los que se deben realizar operaciones tanto de mantenimiento como de seguridad. Para la realización de los mismos se hace uso de gafas de realidad virtual. A su vez, cada práctica contiene un manual de los pasos a seguir y se puede acceder a este durante la misma. Como se puede observar en la Figura 2. Las 5 posibles prácticas a realizar son:

- Mantenimiento y sustitución de una transmisión de guiñada
- Bloqueo del eje de alta velocidad y lubricación de las pastillas
- Evacuación del elevador de servicio
- Funcionamiento de la llave dinamo-métrica hidráulica
- Sustitución de fusibles del armario de alta tensión



Foto de Artur Zudin de Unsplash.

Figura 2. Captura de práctica de Elevador.



Fuente: windEXT

WindEXT Laboratory (WExLaB): Mediante el uso de programas desarrollados en Simulink (están compilados no es necesario disponer de licencias de este software) es posible aprender los fundamentos teóricos del diseño, la producción y los costes de los aerogeneradores. Esta aplicación está dividida en módulos que permiten analizar distintos factores como se muestra en la Figura 3.

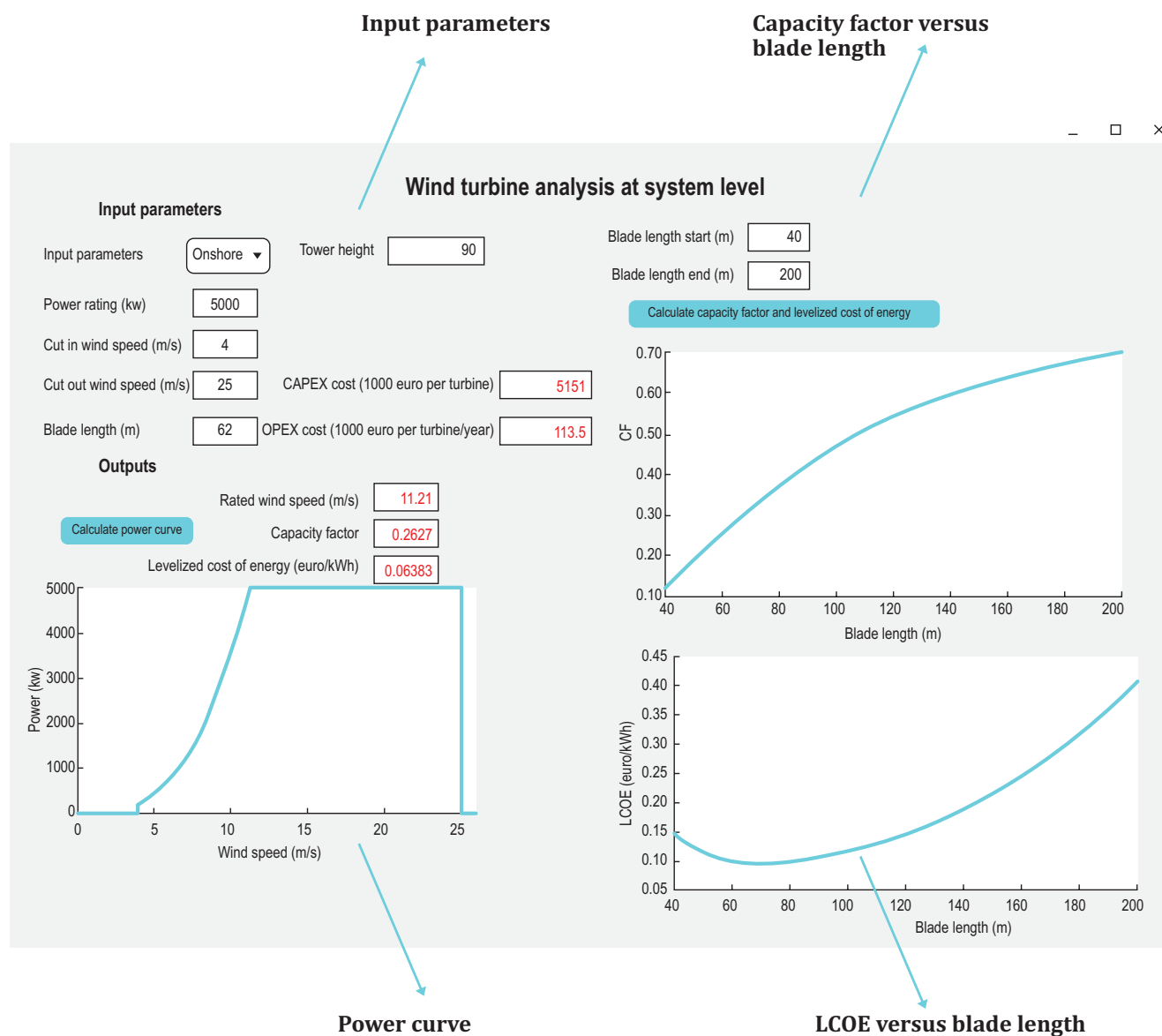
- **Análisis a nivel de sistema:** A partir de esta aplicación se puede calcular la curva de potencia, los costos CAPEX y OPEX, el LCOE y el factor de capacidad de la turbina.

- **Análisis modal:** Esta aplicación permite a los usuarios calcular las frecuencias naturales de la pala y la torre y realizar el diagrama de Campbell.

- **Análisis de carga:** Utilizando esta aplicación podemos calcular las cargas aerodinámicas en las palas de la turbina y las cargas operativas de las mismas.

- **Análisis operacional:** Con el uso de esta aplicación se analiza el rendimiento del aerogenerador, pudiendo calcular algunos parámetros de operación como lo son el ángulo de inclinación, el par, la potencia y la deflexión de la punta de la pala.

Figura 3. Ejemplo de aplicación de una de las herramientas de WExLaB

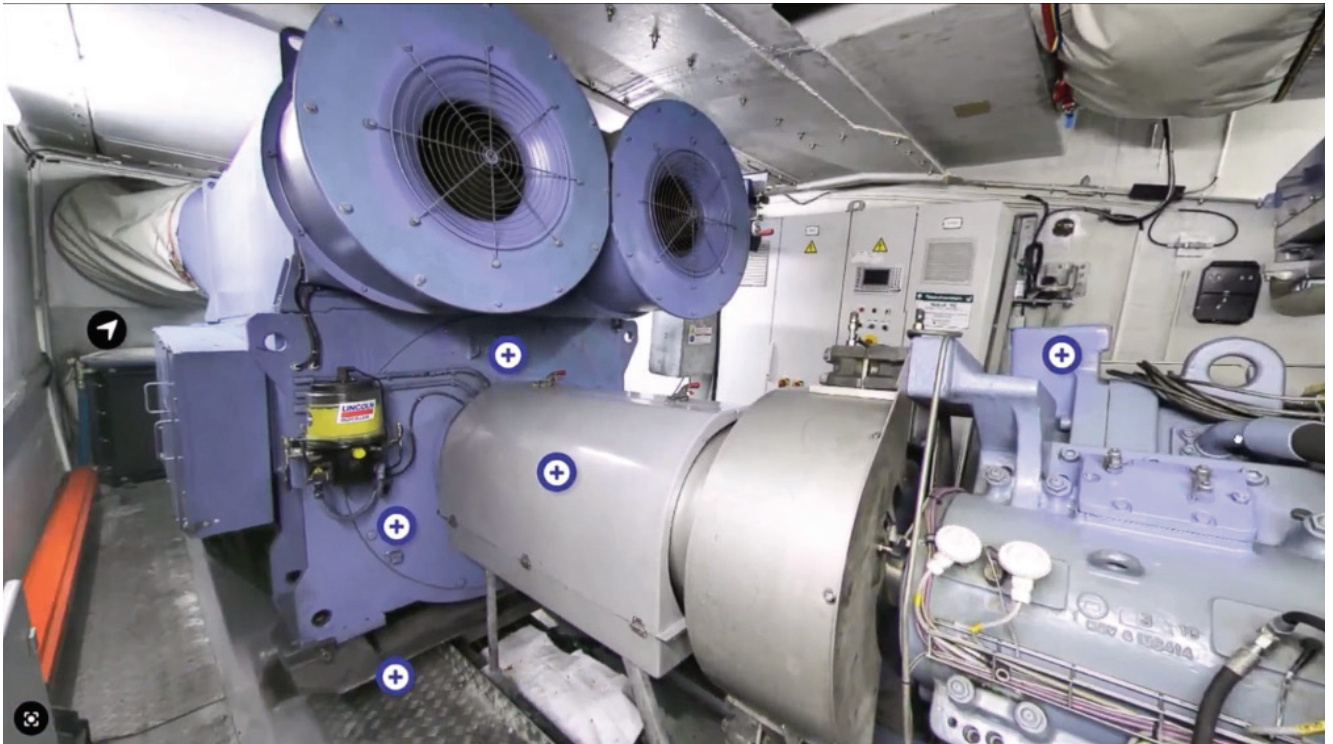


Fuente: windEXT

WindEXT Virtual Reality (WExVir): A diferencia de WindEXT Simulation, esta herramienta nos permite adentrarnos en un aerogenerador con imágenes reales de 360° utilizando H5P. Durante el recorrido por el aerogenerador se pueden observar conceptos y detalles sobre los distintos componentes del mismo como presentado en la Figura 4.

Invertir en la conexión entre industria y educación es el gran reto actual del sector de las energías renovables

Figura 4. Captura de WindEXT Virtual Reality (Nacelle)



Fuente: windEXT

Así como acceder a las diferentes tareas del mantenimiento, fundamentalmente preventivo, pero también correctivo y predictivo, como se muestra en la guía de herramientas de la figura 5.



Foto de Betzy Arosemena de Unsplash.

Figura 5. Guía de herramientas WexViR



Fuente: windEXT

A través de esta herramienta es posible asimilar mejor los contenidos teóricos utilizando recursos interactivos.

CONCLUSIONES

La capacidad mundial instalada de energía eólica crece a un ritmo acelerado cada año, y este crecimiento promueve una serie de beneficios, como la reducción de las emisiones de CO₂, la diversificación de la matriz energética y la creación de nuevos puestos de trabajo. Sin embargo, para que la generación de energía sea eficiente es necesario, entre otras cosas, contar

con profesionales capacitados para resolver los diferentes problemas relacionados con el tema. Invertir en la conexión entre industria y educación es el gran reto actual del sector de las energías renovables.

En este sentido, este trabajo presentó una iniciativa que busca contribuir a la solución de esta problemática, con el desarrollo de una plataforma de capacitación a través del proyecto WindEXT. La plataforma cuenta con varios tipos de contenidos, desde contenidos teóricos hasta softwares de realidad virtual y con ella es posible mejorar los conocimientos en el área de operación y mantenimiento de aerogeneradores. ■

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la financiación del proyecto a través del Programa Erasmus + de la Unión Europea así como a las demás instituciones implicadas en el desarrollo del proyecto Asociación Empresarial Eólica (AEE), 8.2 Consulting AG, Renewable Skills & Consultant GmbH, DP2i, INESC TEC - Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores, Tecnologia e Ciencia, TESICNOR, S.A, Delft University of Technology, Universidad de Castilla - La Mancha y Universidad de Chipre, SGS Tecnos SA.

REFERENCIAS

- Bhagwan, N. & Evans, M. (2023). A review of industry 4.0 technologies used in the production of energy in China, Germany, and South Africa, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 173, 113075, ISSN 1364-0321.
- Borges, P. R., Moreira, P. A., Lopes, T.L.S., Robert, L. F. O. y Pena, H. W. A. (2019). *Treinamentos utilizando a realidade aumentada e virtual: comparação da inovação e tradicionalismo na formação profissional*. Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana. En línea <https://www.eumed.net/rev/oel/2019/06/realidade-aumentada-virtual.html>
- Fitch-Roy, O., et al. (2013). *Workers wanted: The EU wind energy sector skills gap*. 10.13140/RG.2.2.22454.55360.
- GWEC (2021). *Global Wind Report 2020*. Ed. Global Wind Energy Council (GWEC).
- GWO and GWEC (2021), *Global Wind Workforce Outlook 2021-2025*, Brussels, Frederiksberg and London, June, <https://gwec.net/global-wind-workforce-outlook-2021-2025/>
- IRENA & ILO (2021), *Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2021*, International Renewable Energy Agency, International Labour Organization, Abu Dhabi, Geneva.
- Jennings P. (2009). New directions in renewable energy education. *Renewable Energy*. Volume 34 (2). 435-439.
- Msigwa, G., Ighalo, J. O., Yap, P.S. (2022). Considerations on environmental, economic, and energy impacts of wind energy generation: Projections towards sustainability initiatives, *Science of The Total Environment*, Volume 849, 157755, ISSN 0048-9697.
- Ram, M., Aghahosseini, A., Breyer, C. (2020). *Job creation during the global energy transition towards 100% renewable power system by 2050*. Technological Forecasting & Social Change. Volume 151, 157755, ISSN 0048-9697.
- Silva, J. G., Ferrari, R., Jan-Willem van Wingerden, J.W. (2023). Wind farm control for wake-loss compensation, thrust balancing and load-limiting of turbines, *Renewable Energy*, Volume 203, Pages 421-433, ISSN 0960-1481.
- windEXT. *Advanced maintenance, lifetime extension and repowering of wind farms supported by advanced digital*. Disponible en: <https://www.windext.com/>
- Xie, Y. Feng, Y., Qiu, Y. (2013). The present status and challenges of wind energy education and training in China. *Renewable Energy*. Volume 60, Pages 34-41, ISSN 0960-1481.
- Xia, J. Zou, G. (2023). Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: A review, *Ocean Engineering*, Volume 268, 113322, ISSN 0029-8018.
- Yelda K, Seçil V, Ali K, Mehmet Y. (2012). The levels of awareness about the renewable energy sources of university students in Turkey. *Renewable Energy*. Volume 44. 174e9.

PRODUCCIÓN DE BIOMETANO A PARTIR DE *ARUNDO DONAX L.*, UN CULTIVO PERENNE DE ALTO POTENCIAL ENERGÉTICO EN ARGENTINA

PRODUCTION OF BIOMETHANE FROM ARUNDO DONAX L., A PERENNIAL CROP WITH HIGH ENERGY POTENTIAL IN ARGENTINA

Verónica Córdoba ¹, Romina Cardoso ², Alejandra Manzur ³, Estela Santalla ⁴, Laura Lazaro ⁵

Recibido: 23/3/2023 y Aceptado: 24/5/2023

ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (56 - 72)

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Conscious Design de Unsplash.

1 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería
CONICET. Argentina vcordoba@fio.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0001-6601-7452>

2 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería.
Argentina rominapaolacardoso@gmail.com

3 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería
Argentina amanzur@fio.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-9660-1470>

4 LAByMA, INTELyMEC, Facultad de Ingeniería.
Argentina estela.santalla@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0001-6631-2267>

5 CIISAS, Facultad de Agronomía. Argentina
llazaro@faa.unicen.edu.ar
<https://orcid.org/0000-0002-6160-783X>

RESUMEN

Arundo donax L. es un cultivo perenne, que ha demostrado, un buen rendimiento de biomasa por hectárea y su potencialidad como biocombustible sólido. En este trabajo se evalúa la producción de biometano a partir de la digestión anaeróbica de la biomasa de *Arundo donax L.*, ensilado y sin ensilar, en condiciones mesofílicas en régimen batch y a escala laboratorio y utilizando una relación sustrato/inoculo de 3/1 en términos de sólidos volátiles, con la finalidad de cuantificar su potencial energético para sustituir al silaje de maíz en las plantas de biogás. Se realizó la caracterización físico-química de muestras frescas y ensiladas. La estructura de *Arundo donax* reveló 34.4 y 10.8% bs de α -celulosa y lignina, respectivamente y una relación C/N entre 15.2 y 18.2 (87% inferior a silaje de maíz). La producción de biometano resultó 276 NmL CH₄/g SV, 11% inferior al silaje de maíz, sin observar efectos significativos de los tratamientos de ensilado. Considerando el rendimiento por hectárea obtenido para *Arundo* en

Argentina, la productividad energética alcanzaría 5,850 Nm³ CH₄/ha, superior al de maíz (4,423 Nm³ CH₄/ha). Estos valores resultan promisorios para considerar a esta biomasa como cultivo con capacidad potencial para reemplazar al maíz en un escenario sostenible de transición energética, debido al bajo requerimiento de nutrientes y recursos, lo que permitiría liberar tierras agrícolas para la generación de productos de mayor valor agregado.

Palabras clave: Biomosas, Biogás, Digestión anaerobia, Ensilado, Recursos energéticos renovables.

ABSTRACT

Arundo donax L. is a perennial crop, which has demonstrated good biomass yield per hectare and its potential as a solid biofuel. In this work, the production of biomethane under anaerobic digestion of *Arundo donax L.*, both ensiled and fresh, was evaluated under mesophilic conditions in a batch regime and on a laboratory scale, in order to quantify its energy potential to replace corn silage in biogas plants. The physical-chemical characterization of fresh and ensiled samples was carried out. The structure of *Arundo donax* revealed 34.4 and 10.8% bs of α -cellulose and lignin, respectively, and a C/N ratio between 15.2 and 18.2 (87% lower than corn silage). Biomethane production was 276 NmL CH₄/g SV, 11% lower than corn silage, without observing significant effects of silage treatments. Considering the yield per hectare obtained for *Arundo* in Argentina, energy productivity would reach 5,850 Nm³ CH₄/ha, higher than that of corn (4,423 Nm³ CH₄/ha). These values are promising to consider this biomass as a crop with potential capacity to replace corn in a sustainable scenario of energy transition, due to the low requirement of nutrients and resources, which allows freeing agricultural land for the generation of products with higher added value.

Keywords: Biomass, Biogas, Anaerobic digestion, Silage, Renewable energy resources.

INTRODUCCIÓN

La producción de bioenergía a partir de biomasas es una realidad creciente en Argentina, que surge como resultado de la promulgación de la Ley 27.191 en el año 2015, la cual fomenta el uso de fuentes renovables de energía. El actual modelo energético basado en el consumo de combustibles fósiles, refleja un aumento creciente de la demanda de energía, cuyas emisiones agudizan los procesos de calentamiento global (Nogar et al., 2021).

La producción de biogás por digestión anaeróbica (DA) es una alternativa de generación de energía renovable que posibilita el aprovechamiento de residuos agroindustriales, residenciales y sustratos diversos para generar energía térmica y/o eléctrica (Liebetrau et al., 2020); esta tecnología contribuye, además, a resolver problemas críticos de la sociedad actual, como es la gestión de los residuos, la mitigación de los impactos negativos sobre los ecosistemas y la reducción de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEIs), cuya acumulación genera los efectos del cambio climático (Scott y Blanchard, 2021). En el marco de la promoción de electricidad a partir de energías renovables, se ha incrementado en Argentina la instalación de plantas de bioenergía a partir de biogás (FAO, 2019) para la producción de electricidad, principalmente asociadas a sistemas agropecuarios intensivos (feedlot, tambos, criaderos de cerdos o pollos) que gestionan parte de los desechos de la producción mediante digestión anaeróbica. Estas plantas requieren, para cumplir con la potencia contratada, alcanzar una producción eficiente de metano, lo que se logra aportando suministros adicionales, tales como silaje de maíz o sorgo (Veluchamy et al., 2019). Esta situación ha provocado que el precio de la energía generada a partir de biogás tenga una fuerte dependencia del precio de este *commodity*, lo cual resulta poco favorable, no sólo desde el punto de vista económico, sino

que desde el punto de vista ambiental, también compromete la sostenibilidad del sistema, ya que la cadena del maíz ofrece mayor potencial de desarrollo para la producción de alimentos y productos de alto valor agregado a través de su utilización en procesos biotecnológicos (Bisang y Trigo, 2017).

Arundo donax L. (AD) comúnmente conocida como Caña de Castilla, es una biomasa lignocelulósica perenne, de cosecha anual, que puede crecer en una amplia variedad de suelos y que además presenta un balance de energía positivo y excelente productividad por hectárea (Pompeiano et al., 2013). Características, tales como alta producción de biomasa, rusticidad y adaptación a ambientes de capacidad limitada (Falasca et al., 2011), resultan altamente favorables para evitar el uso de superficie agrícola de elevada calidad para la producción de bioenergía. Imporzano et al. (2018) plantearon el desafío de utilizar AD para reemplazar 47,000 ha de cultivo de maíz destinadas a la producción de energía en la región lombarda (Italia) y liberarlas para la producción de alimentos, demostrando, a partir del análisis de ciclo de vida, que el modelo basado en la utilización de AD reduce entre 17 y 33% las categorías de impacto vinculadas a la gestión de nutrientes como eutrofización, acidificación y generación de material particulado. Esto ha permitido que varios autores como Baldini et al., (2017) y Thomsen et al., (2014), profundicen en el estudio del uso de AD como cultivo energético en la región mediterránea. En Argentina, Rodríguez et al. (2021) han llevado a cabo los primeros estudios agronómicos en el sudeste de la región pampeana, y a nivel tecnológico, se ha analizado su potencial energético por vía seca para la producción de energía térmica (Córdoba, Manzur, et al., 2022a, 2022b). Sin embargo, la utilización de AD como sustrato para la producción de biogás requiere analizar el efecto que algunas variables, vinculadas al cultivo y su manejo, ejercen sobre la composición de la biomasa. En este sentido, Pirozzi et al., (2015) observaron que las condiciones de cultivo influyen sobre los

componentes estructurales de la biomasa. En condiciones de irrigación y altas temperaturas la biomasa de AD presentó un incremento del contenido de celulosa del 8.5% frente a condiciones de secano y bajas temperaturas ambientales. La celulosa es reconocida como un sustrato de alto potencial, y bajo digestión anaeróbica su potencial de producción de biometano se encuentra entre el 80 y 100% de su máximo teórico (Holliger et al., 2016; Kreuger et al., 2011; Triolo et al., 2012). Sin embargo, su biodisponibilidad puede ser reducida principalmente debido a la acumulación de lignina durante su ciclo de desarrollo, siendo éste el factor limitante más importante en la conversión anaeróbica de materiales lignocelulósicos (Monlau et al., 2013; Triolo et al., 2011). En este sentido, Ragolini et al., (2014) encontraron que el rendimiento de metano por hectárea de AD de primer corte excede en hasta un 35% el metano producido a partir de una sola cosecha en la madurez del cultivo, indicando que las modificaciones de la cristalinidad de la celulosa, las propiedades fisicoquímicas de la hemicelulosa, la polimerización de la lignina y la variación de la composición a lo largo del ciclo del cultivo son factores clave que influyen en la disponibilidad de carbohidratos estructurales y no estructurales para el proceso de digestión anaeróbica.

Otro de los puntos a resolver es la necesidad de las plantas generadoras de biogás de disponer de una alimentación constante de biomasa a lo largo del año, por lo que, en general, se recurre al proceso de ensilado para asegurar su conservación. Actualmente, es la práctica utilizada para cultivos como maíz, o sorgo, pero en el caso de AD, sus características, tales como alta proporción de carbohidratos estructurales y, ausencia de granos que aporten carbohidratos solubles y azúcares fermentables, dificultaría la capacidad de esta biomasa para alcanzar una óptima calidad del silaje (Barbanti, 2014). La utilización de inoculantes a base de bacterias ácido lácticas podría acelerar los procesos fermentativos y un rápido descenso del pH en el

siló, lo que mejoraría su conservación, tal como ocurre en silos de especies forrajeras (Gallardo, 2018). A fin de analizar este punto, Corno et al. (2016) avanzaron en el estudio de los procesos de ensilados y encontraron que la producción de metano por hectárea del ensilado de AD en silo bolsa por 100 días fue de 22,183 Nm³/ha, resultando más eficiente que el ensilado en trinchera (21,468 Nm³ CH₄/ha). Estos valores, además, fueron superiores a los de otros cultivos energéticos como maíz (6,931 Nm³ CH₄/ha), sorgo (5,975 Nm³ CH₄/ha) o centeno (2,738 Nm³ CH₄/ha). Estos antecedentes constituyen herramientas que permiten avanzar sobre la utilización de AD con fines energéticos en Argentina.

En el presente trabajo se evaluó el potencial de producción de biometano de AD cultivado en la región centro de la provincia de Buenos Aires, a partir de muestras frescas y ensiladas con y sin inoculantes en base a bacterias lácticas. Estos resultados fueron comparados con los de un silaje de maíz, utilizado actualmente en una planta de biogás en funcionamiento en la región. Además, se estudió y modeló la cinética del proceso para determinar los parámetros que permitirán mejorar el proceso de producción de biometano de AD.

**El actual modelo energético
 basado en el consumo de
 combustibles fósiles, refleja un
 aumento creciente de la demanda
 de energía, cuyas emisiones
 agudizan los procesos de
 calentamiento global**

METODOLOGÍA

Muestras

Las muestras de AD provienen de un cultivo ubicado en la Chacra Experimental de la Facultad de Agronomía de la UNCPBA en Azul, provincia de Buenos Aires (36° 49' 41,4'' S; 59° 53' 11,6'' O; 147 s.n.m.). Este cultivo fue implantado en octubre de 2019 según se describe en Rodríguez et al., (2021), y las muestras utilizadas se corresponden con el primer corte del tercer ciclo anual del cultivo, corte realizado el 15 de diciembre de 2021, a los 80 días del inicio de brotación. Se tomaron alícuotas de 5 cañas cortadas al ras del suelo, provenientes de cuatro bloques experimentales. Sobre estas muestras se determinó el peso fresco y luego se procedió a su picado. Con las muestras de AD fresco (AD) se confeccionaron microsilos con (ADCI) y sin (ADSI) la aplicación de un inoculante comercial (*Silotrap Plus*), que contiene bacterias lácticas (*Lactobacillus plantarum* y *L. buchneri*) y *Pedicoccus acidilactici*, en dosis de 2 g/t de forraje verde. Los microsilos de alrededor de 2 kg cada uno fueron compactados a una

densidad 817 kg/m³ dentro de bolsas plásticas de 240 µm de espesor y cerrados herméticamente para evitar el ingreso de oxígeno, simulando el silaje a campo. Los silos se abrieron para su caracterización y análisis al cabo de 83 días. En forma comparativa se analizó una muestra de silaje de maíz (SM) proveniente de una planta de producción de biogás, ensilado durante un mes en trinchera, sin aditivos ni agua, y compactado con tractor.

La evaluación de la calidad del material previo y post ensilado con y sin inoculantes se realizó mediante la determinación de proteína bruta (%PB) (macro Kjeldahl, factor 6,25 según AOAC, 1998), fibra detergente neutra (FDN), fibra detergente ácido (FDA) (analizador de fibra Ankom 200, Ankom Technology, Fairport, NY, EEUU) y carbohidratos no estructurales solubles en agua (CNES), adaptado del Método de Antrona según Yemm y Willis, (1954). Sobre el material fresco y ensilado además se determinaron cualitativamente las características organolépticas olor, color y textura que califican la calidad del material ensilado como excelente, buena, regular y mala según Cárdenas Medina et al., (2004).

Figura 1: Muestras estudiadas para la determinación del potencial de biometano. De izq a der. AD, ADCI, ADSI y SM.



Fuente: Elaboración propia

Caracterización físico-química de las muestras

La caracterización físico-química de las muestras de AD, ADCI, ADSI y SM se realizó en términos del contenido de humedad, sólidos totales (ST) y materia volátil (SV), según norma ASTM, (1999); pH y alcalinidad (AT) según el método 6045D del compilado SW-846 (USEPA, 1995) y nitrógeno amoniacal (NA) según APHA (1999). La composición polimérica fue establecida en términos de á-celulosa y hemicelulosa según norma TAPPI T 203 (*Technical Association of Pulp and Paper Industry* - TAPPI, 1999). El contenido de lignina se determinó según la norma ASTM 1106 (ASTM, 1999). La composición elemental de los sustratos en términos de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre se determinó utilizando un equipo CHN628, *Sulphur Add-On Module* y *TruSpec Micro Oxygen Add-On Module Elemental Determinators* (LECO).

Determinación del potencial de biometano

El potencial de biometano (PBM) de las tres muestras de AD (Fig. 1) y SM, se estableció según la metodología propuesta por Holliger et al., (2016). Se utilizaron bioreactores batch de 500 mL de capacidad por triplicado, con una relación Inóculo/Sustrato en unidades de SV de 3/1, concentración de inóculo en el reactor de 25 g SV/L y 20% de espacio libre en el reactor, en condiciones mesofílicas (35°C±1) y en medio neutro. Se utilizó una solución de nutrientes según Aquino et al., (2007) con la finalidad de alcanzar un volumen final de mezcla de reacción de 400 mL. El seguimiento del proceso se realizó midiendo el volumen de CH₄ producido, utilizando un sistema de absorción de CO₂ mediante el burbujeo de biogás en una solución de NaOH 6 N y conexión a un sistema de desplazamiento según (Córdoba et al., 2022b). En paralelo se condujeron ensayos de un blanco de inóculo y de un control positivo (CP), que utiliza celulosa microcristalina (CAS 9004-34-6) como sustrato, control que permite verificar la actividad y calidad del inóculo. El ensayo finalizó cuando la producción diaria de metano resultó

inferior al 1% de la producción acumulada durante tres días consecutivos. El protocolo establece como parámetros de aceptación y rechazo de la prueba las siguientes condiciones, una desviación estándar relativa inferior al 5% para el blanco y el CP, e inferior al 10% para cada sustrato, y un PBM para el CP entre 352 y 414 NmL CH₄/g SV celulosa. Como inóculo se utilizaron lodos de planta depuradora, los cuales fueron previamente desgasificados y adaptados al sustrato, aplicando la metodología propuesta por Steinmetz et al., (2016). El inóculo presentó un contenido en SV de 0.5766 ± 0.0072 g/g, pH 7.60, AT de 4026±137mg CaCO₃/L y NA 744±45 mg/L. Estos parámetros se encuentran en el rango de lo establecido por Holliger et al., (2016) para asegurar un inóculo de calidad.

Cinética del proceso de digestión anaeróbica

El análisis de la cinética de un proceso biológico permite establecer la biodegradabilidad del sustrato en estudio, a la vez que brinda información que puede ser utilizada para el escalado del proceso. En este trabajo se utilizó el modelo de Primer Orden, el cual estima una constante de velocidad de producción de metano o tasa de desintegración de primer orden, k (d⁻¹) y el rendimiento máximo teórico de metano (NmL CH₄/g SV), según (1). Este modelo se basa en considerar que la disponibilidad de sustrato es el factor limitante y supone que la hidrólisis gobierna el proceso general (Li et al., 2015).

$$L(t) = L_0 (1 - e^{-kt}) \quad (1)$$

Donde $L(t)$ es la producción acumulada de metano (NmL CH₄/g SV) al tiempo t (h).

Análisis estadístico

El análisis del efecto del proceso de ensilado sobre el PBM en las muestras estudiadas se realizó mediante la prueba de ANOVA al 95% de confiabilidad ($\alpha = 0.05$), utilizando el *software Statgraphics Centurion XVI* (v.18.1.12).

Los parámetros del modelo cinético para cada sustrato se estimaron utilizando la herramienta *Curve Fitting Tool* de MATLAB® software (MathWork, versión R2017b), que provee los estadísticos correspondientes al coeficiente de determinación R^2 y a la raíz del error cuadrático medio (RMSE).

RESULTADOS

Características de las biomásas

Las muestras utilizadas, que corresponden al primer corte del tercer ciclo de producción, presentaron un rendimiento medio en materia seca de 11.98 ± 0.59 t/ha. Es importante destacar que al final de la estación de crecimiento, en junio, se realizó un segundo corte del expe-

rimento que aportó 8.6 ± 1.10 t/ha adicionales, siendo la producción anual de biomasa de 20.31 ± 1.74 t/ha (datos no presentados).

La Tabla 1 detalla las características de calidad de las biomásas estudiadas. El contenido de humedad inicial de las muestras resultó 74.9% (b.h.) valor sensiblemente superior al mínimo recomendado para obtener silajes de óptimas condiciones de conservación (65%). El elevado contenido de humedad pudo haber sido responsable de la generación de lixiviados, además de haber favorecido fermentaciones de tipo butírica en lugar de láctica, lo que se verifica en las características organolépticas, de regular a mala, así como en el descenso en el contenido de los carbohidratos solubles y en el aumento en la proporción de FDA (Tabla 1), y en un pH no suficientemente ácido en las muestras (Tabla 2).

Tabla 1. Evaluación de la calidad de las muestras

Biomasa	% PB	% FDN	% FDA	% CNEs
AD	8.23 ± 2.29^a	74.10 ± 0.57^a	43.43 ± 1.29^a	2.19 ± 0.44^b
AD _{SI}	7.61 ± 1.96^a	69.57 ± 1.07^a	46.26 ± 2.93^b	0.81 ± 0.21^a
AD _{CI}	7.91 ± 1.20^a	70.67 ± 1.09^a	44.31 ± 1.23^b	0.96 ± 0.09^a
<i>p valor</i>	<i>0.670</i>	<i>0.090</i>	<i>0.028</i>	<i>0.006</i>

*Letras diferentes dentro de columnas indican diferencias significativas en el test de comparación de medias

De la Tabla 1 se puede observar un leve incremento del 2.0% y del 6.5% en el contenido de FDA y un descenso del 55.9% y 62.8% en los CNEs en el material ensilado con y sin inóculo respecto del fresco. En ninguna de las variables se observaron efectos atribuibles a la inoculación biológica. La concentración de proteína bruta de la biomasa resultó menor al valor estimado por Kering et al., (2012) para estadios iniciales del cultivo (10.3 %). Otros autores, como Mantineo et al., (2009) sólo reportan el contenido de proteínas al final de la estación de crecimiento,

que para el tercer año de cultivo resultó entre 1.5 y 1.6, dependiendo del nivel de fertilización nitrogenada utilizado, valores significativamente inferiores a los encontrados para AD de primer corte al tercer año de cultivo en nuestra región. Por lo expuesto, si bien el corte en estados tempranos presenta, según la bibliografía, ventajas como resultado de una menor proporción de lignina, se requeriría un secado previo del material para llegar a concentraciones de materia seca más adecuadas (alrededor del 40%), lo que mejoraría la conservación del material ensilado.

En este sentido el aporte de bacterias lácticas mediante el uso de un inoculante comercial no mostró diferencias significativas respecto del tratamiento sin inocular (Tabla 1). Kleinschmit & Kung L, (2006) sugieren que cada cultivo en particular requeriría inoculantes con bacterias adaptadas al mismo. El inoculante comercial utilizado contiene bacterias que contribuyen a lograr silos con bajo pH y alta estabilidad en cultivos de maíz y sorgo. Como no existen en el mercado argentino inoculantes recomendados para silos de AD y ésta es una de las primeras evaluaciones de esta técnica en el país, fue utilizado un inoculante para gramíneas de verano, lo más semejante a AD de las opciones disponibles en el mercado. La baja especificidad podría explicar en parte la falta de respuesta al mismo.

Las características físico-químicas de las muestras utilizadas para determinar el PBM se describen en la Tabla 2. Se observa una disminución significativa entre 35 y 36% en el contenido de ST de ADSI y ADCI, respecto a AD por efecto del proceso de ensilado, resultados relacionados con la generación de lixiviados como consecuencia del exceso de humedad de la biomasa

original. Tendencia similar fue observada por Corno et al., (2016) quienes reportaron reducciones del orden del 15-16% y por Baldini et al., (2017) de entre 0.2 y 5.6%, dependiendo de la fecha de corte de la biomasa.

Respecto al pH, si bien se detectó una leve oscilación por efecto del ensilado, no se observó la reducción reportada por Corno et al., (2016) como consecuencia de la acumulación de ácidos grasos volátiles. Respecto al contenido de nitrógeno amoniacal, se detectó en ambos ensilados que la concentración aumentó de 0.06 ± 0.00 mg/g a 0.56 ± 0.02 y 0.83 ± 0.01 mg/g para ADCI y ADSI respectivamente, lo que representa aumentos superiores al 800% respecto a la muestra fresca. Estos incrementos pueden ser efecto de la ruptura de las proteínas durante el proceso de ensilado, resultado de una fermentación restrictiva, tal como han reportado Baldini et al., (2017) para AD y Miscanthus; dando un indicio de que los silos obtenidos fueron de baja calidad.

Según Chew et al., (2021), las condiciones óptimas de pH, para una adecuada hidrólisis durante un proceso anaeróbico de tipo mesofílico, se dan en un rango de pH entre 5 y 7, con lo cual los valores medidos para las muestras estudiadas deberían favorecer una adecuada evolución del proceso. Sin embargo, según Gerardi (2003) una actividad enzimática aceptable que promueva la formación de bacterias metanogénicas no ocurre por debajo de pH 6.2, siendo el rango óptimo entre 6.8 y 7.2. Estas condiciones indicarían que las muestras de ADCI y SM deberían presentar una buena *performance* en la producción de biometano.

Se observó un aumento significativo de la AT de las muestras frescas por acción del ensilado, con incrementos de 57.3 y 65.8% para ADCI y ADSI respectivamente. Todos los valores de AT de AD fueron significativamente superiores a SM, lo que resulta en muestras con una mayor capacidad *buffer*, lo que asegurará un mayor control de pH del reactor.

Este escenario posiblemente permitiría liberar tierras agrícolas para la generación de productos de mayor valor agregado que aporten desarrollo e innovación a la bioeconomía nacional.

Tabla 2. Caracterización físico-química de las muestras de biomásas utilizadas en los ensayos de PBM.

Parámetro	AD	AD _{Cl}	AD _{SI}	SM	p-value
ST (% bh)	25.01 ± 0.49 ^b	15.99 ± 0.38 ^a	16.23 ± 0.51 ^a	42.98 ± 0.18 ^c	0.0000
SV (% bs)	88.42 ± 2.20 ^a	88.62 ± 0.14 ^a	87.73 ± 0.49 ^a	95.16 ± 0.36 ^b	0.0039
pH	5.74 ± 0.03 ^b	6.89 ± 0.02 ^c	5.31 ± 0.02 ^a	7.84 ± 0.04 ^d	0.0000
AT (mgCaCO ₃ /L)	654.22 ± 39.99 ^b	1028.77 ± 18.30 ^c	1084.71 ± 4.18 ^c	450.61 ± 10.46 ^a	0.0001
NA (mgNH ₃ ⁺ /g)	0.06 ± 0.00 ^a	0.56 ± 0.02 ^b	0.83 ± 0.01 ^b	0.63 ± 0.03 ^c	0.0000
α celulosa (% bs)	34.4 ± 2.3 ^b	33 ± 1.5 ^b	39.5 ± 3.5 ^b	20.5 ± 0.6 ^a	0.0154
Hemicelulosa (% bs)	19.0 ± 1.2 ^b	16.9 ± 0.1 ^{ab}	18.0 ± 0.5 ^b	14.1 ± 0.7 ^a	0.0374
Lignina (% bs)	10.8 ± 0.3 ^d	8.4 ± 0.8 ^b	8.8 ± 0.3 ^{bc}	5.7 ± 0.4 ^a	0.0101
% C	40.07 ± 0.80 ^b	36.2 ± 0.24 ^a	36.0 ± 1.29 ^a	43.47 ± 0.02 ^c	0.0063
% N	2.2 ± 0.03 ^c	2.38 ± 0.03 ^d	2.10 ± 0.02 ^b	1.38 ± 0.01 ^a	0.0000
% H	5.09 ± 0.01 ^b	4.77 ± 0.02 ^a	4.89 ± 0.12 ^{ab}	6.12 ± 0.09 ^c	0.0009
% S	0.13 ± 0.03 ^a	0.16 ± 0.02 ^a	0.11 ± 0.0 ^a	ND	0.3024
C/N	18.19 ± 0.06 ^b	15.23 ± 0.10 ^a	17.11 ± 0.42 ^b	31.53 ± 0.30 ^d	0.0000

*Valores seguidos por la misma letra en la misma línea no presentan diferencias significativas a p-value <0.05. bs: Base seca. ND: no detectado

Respecto a la composición estructural, AD presenta mayor porcentaje de cada uno de los polímeros que SM. Respecto a α-celulosa, los valores superaron entre 40.4 y 48.1% al contenido en SM; en hemicelulosa entre 16.5 y 25.8% y en lignina entre 31.9 y 47.1%. Estas características podrían indicar una mayor resistencia de AD a la degradación de las estructuras para la producción de metano ya que la lignina actúa como barrera al resto de los constituyentes, impidiendo su degradación (Thomsen et al., 2014). Confirmando la influencia que las condiciones del cultivo ejercen sobre la composición de AD, se han encontrado en la literatura (Pirozzi et al., 2015; Thomsen et al., 2014) porcentajes de celulosa entre 20,7% y 46,2%, de hemicelulosa entre 17.7 y 23.5% y de lignina entre 16.2 y 25.4% para muestras de AD bajo diferentes condiciones

de cultivo, fertilización, riego y secado. Las muestras estudiadas en este trabajo presentaron contenidos de celulosa y hemicelulosa dentro de los rangos encontrados en la literatura, aunque el porcentaje de lignina resultó significativamente inferior, lo que ofrece una ventaja adicional para la producción de biometano.

Respecto al efecto del ensilado sobre la composición estructural, se observó que el contenido de celulosa permaneció prácticamente inalterado por la fermentación (diferencias no significativas para α-celulosa), con leve reducción del contenido de hemicelulosa (11% y 5%) aunque no significativa. Este resultado está de acuerdo con Webster, (1992) quien confirma que la hemicelulosa se degrada más fácilmente que la celulosa durante el ensilado y con los resultados

reportados por Baldini et al., (2017), quienes reportan que la hemicelulosa en el maíz se redujo en aproximadamente un 10.1% después del ensilaje. Respecto al porcentaje de lignina, el proceso de ensilado disminuyó 22.3% y 18.6% el contenido en ADCI y ADSI respectivamente, ambos estadísticamente diferentes a la muestra fresca, aunque resultando superiores a SM.

Por su parte, la relación C/N también presenta diferencias significativas entre los valores obtenidos para AD y SM, lo que *a priori* indica menor cantidad de carbono disponible para la producción de biogás. La relación C/N mostró leves disminuciones por efecto del ensilado en AD, tal como observaron Baldini et al. (2017) quienes reportaron reducciones de 0.8 y 15.9% para primer y segundo corte respectivamente. Los valores de C/N obtenidos para AD en el presente trabajo resultaron significativamente inferiores a los reportados por Di Girolamo et al. (2013) de 56 y por Baldini et al., (2017) de 50 y 122 para AD de primer y segundo corte respectivamente.

Potencial de biometano

Luego de aproximadamente 40 días de fermentación anaeróbica, el PBM de AD resultó 275.8 NmL CH₄/g SV, valor mayor al reportado por Di Girolamo et al., (2013) que obtuvo 250 NmL CH₄/g SV cuando trabajó con muestras de AD de primer corte o los obtenidos por Thomsen et al., (2014) quien reportó 178 NmL CH₄/g SV para muestras de AD

frescas. Por su parte, Ragaglini et al., (2014) reportaron PBM para AD fresco de 319.5 NL/kg SV correspondiente al primer corte mientras que Corno et al., (2016) obtuvieron rendimientos de 374 a 380 Nm³CH₄/t SV para cañas de AD frescas.

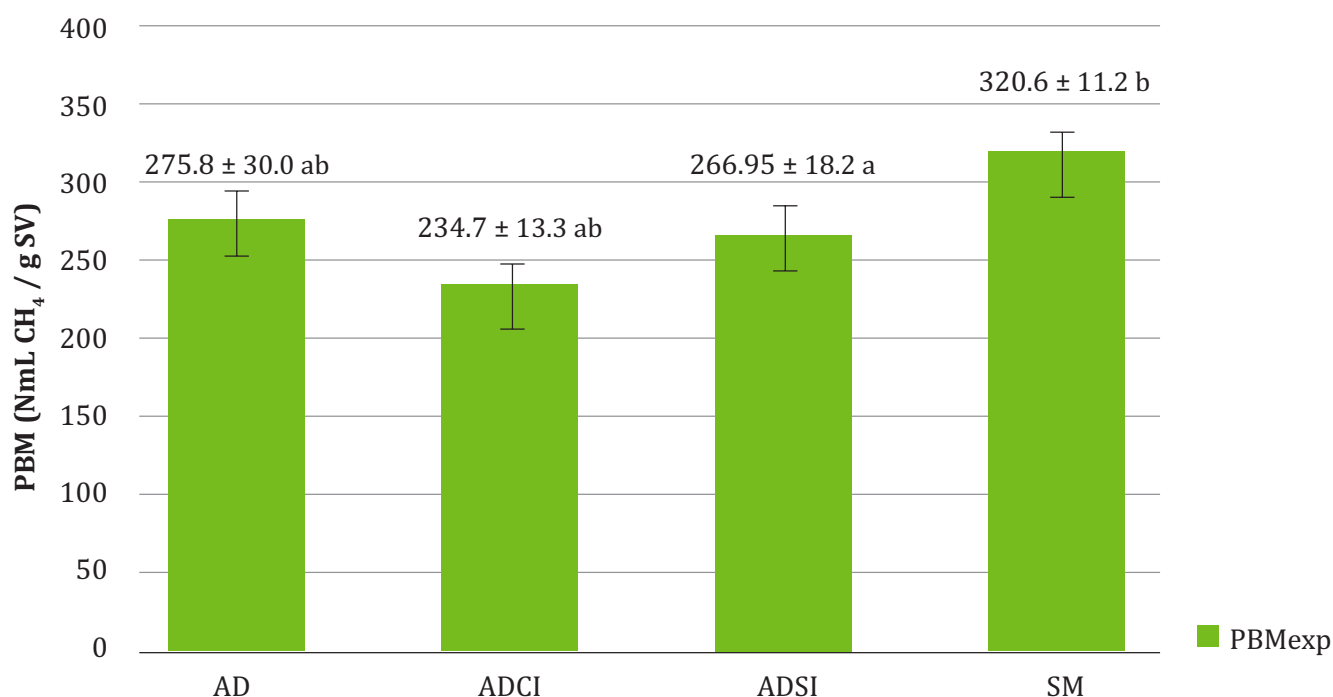
Respecto al efecto del ensilado, las diferencias entre los valores promedio (triplicados) del PBM para AD no resultaron significativamente diferentes ($p < 0.05$) observando la menor producción (234.7 NmL CH₄/g SV) en ADCI. El PBM resultó 14.9 y 3.2% inferior en ADCI y ADSI respectivamente en relación al valor obtenido para AD fresco, siendo a su vez este valor 14% menor a SM. Corno et al., (2016) también reportaron disminuciones en el PBM de 20.1 y 7.6% cuando evaluaron el efecto de ensilados de AD en trinchera y en silo bolsa respectivamente. Baldini et al., (2017) reportaron valores de PBM para muestras de AD ensiladas de 148.1 y 169.7 NmL CH₄/g SV, aproximadamente 42% inferior al PBM de AD fresco analizado en este trabajo.

Debido a la necesidad de las plantas de biogás de disponer de alimentación continua, y a que las plantaciones de AD solo pueden presentar dos cortes anuales, el proceso de ensilado resulta necesario para garantizar la disponibilidad de biomasa. Los resultados preliminares muestran que la estructura de AD ha sido resistente a la acción de las bacterias lácticas y, por lo tanto, no estaría afectando su PBM, por lo que AD podría ser utilizado directamente en el digestor, previo picado del material.



Foto de Nirnjan Photographs de Unsplash.

Figura 2. PBM predicho y experimental de las muestras estudiadas.



Valores del PBMexp con la misma letra no presentan diferencias significativas a p-value <0,05.

Los valores de PBM obtenidos son altamente promisorios, considerando que esta herbácea perenne alcanza su máxima productividad de materia seca aproximadamente luego de 4-5 años desde su implantación y se mantiene durante un ciclo de vida de aproximadamente 15 a 20 años (Webster et al., 2016). Además, basado en la revisión literaria llevada a cabo por Jámber & Török, (2019), este cultivo presenta bajos costos de mantenimientos una vez implantado. En particular, los mayores costos se dan durante el primer año y están relacionados con la implantación, de ahí en adelante estos se reducen a la fertilización, que debe realizarse cada 3 o 4 años. El costo de fertilización es significativamente menor que en el cultivo de maíz, debido a los bajos requerimientos de nitrógeno de la especie, 3 kg N/t MS (Christou et al., 2018) versus 11 kgN/t MS en maíz (Andrade, 2023). Jámber & Török, (2019) además, mencionan que al aplicar la metodología de costo del ciclo de

vida se obtuvo para AD en Europa un costo de la materia seca de 65 EUR/t mientras que para otros cultivos biomásicos perennes como Miscanthus o Panicum virgatum los costos se ubican entre 65 y 80 EUR/t.

Los resultados de productividad de AD obtenidos a partir de los primeros estudios agronómicos realizados en el centro de la provincia de Buenos Aires, mostraron un rendimiento de biomasa promedio 23.8 ± 3.5 t MS/ha, medido al tercer año desde su implantación en condiciones de secano, con una capacidad potencial (riego y fertilización) de hasta 38.6 ± 2.4 t MS/ha, lo que, en base al rendimiento promedio, daría una productividad de metano, una vez alcanzada la madurez del cultivo de $5,850$ Nm³/ha. Productividad superior a la obtenida por maíz de $4,423$ Nm³ CH₄/ha, considerando una producción de biomasa anual de 15.33 t/ha, obtenida para nuestra región a partir de un rendimiento

en grano de maíz según las estadísticas de la Dirección Nacional de Agricultura (Dirección Nacional de Agricultura, 2023) de 6.9 t/ha, y considerando un índice de cosecha (Rendimiento grano/Biomasa total) de 0.45 (Andrade, 2023) y un potencial experimental de 320 NmL CH₄/g SV. Los valores aquí obtenidos para AD se encuentran en el orden de los reportado por otros autores para diferentes zonas de Italia: Baldini et al., (2017) reportó rendimientos de metano de 5,522 m³ CH₄/ha para maíz, y de 2,647 m³ CH₄/ha para AD ensilado, Ragolini et al., (2014) por su parte informó una productividad de 9,580 Nm³ CH₄/ha para AD de primer corte, resultando superior a maíz (6,750 Nm³ CH₄/ha), obtenido a partir de un rendimiento de materia seca de 20 t/ha, mientras que Schievano et al., (2012) trabajando con AD de primer corte encontró rendimientos de metano entre 7,170 y 11,280 Nm³/ha.

Cinética de la digestión anaeróbica de AD

En la Tabla 3 se detallan los parámetros cinéticos obtenidos al modelar los datos experimentales según la Ec. (1), la cual que representa un mecanismo de degradación de primer orden controlado por la etapa de hidrólisis de la biomasa. Los resultados del rendimiento máximo teórico de metano, L₀, se corresponden con los valores experimentales obtenidos (Figura 2) con diferencias máximas de 33% entre SM y AD. No se observaron diferencias significativas en la velocidad de producción de metano para ninguna de las muestras estudiadas, lo que indica que las biomásas tienen un comportamiento similar durante el proceso mesofílico sin efecto del proceso de ensilado. SM mostró un valor de L₀ significativamente superior a AD pero en términos de velocidad de degradación (k) para producir metano no se observaron diferencias significativas entre las biomásas estudiadas.

Tabla 3: Parámetros cinéticos y estadísticos del ajuste del modelo cinético de primer orden aplicado para la producción de metano de AD y SM.

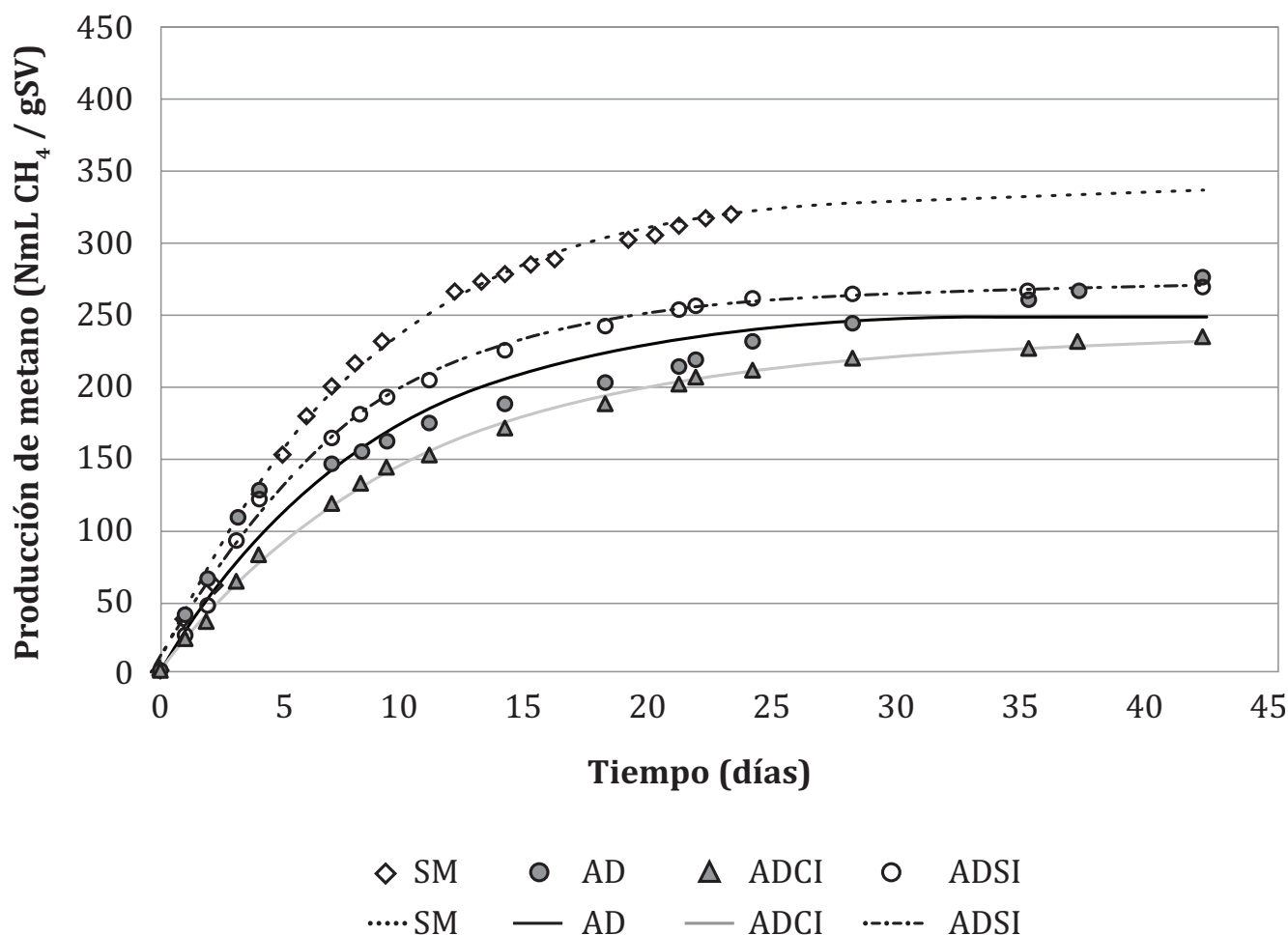
Biomasa	L ₀ (NmL CH ₄ /g SV)	kk (d ⁻¹)	R ²	RMSE
AD	253.00 ± 18.4 ^a	0.12192 ± 0.0269 ^a	0.9556	17.280
AD _{ci}	233.6 ± 4.1 ^a	0.0992 ± 0.0049 ^a	0.9983	3.248
AD _{si}	269.4 ± 5.3 ^a	0.1338 ± 0.0086 ^a	0.9967	5.378
SM	337.2 ± 10.1 ^b	0.1262 ± 0.0101 ^a	0.9964	6.232
<i>p-value</i>	0.01	0.4966		

Valores seguidos por la misma letra en la misma línea no presentan diferencias significativas a p-value <0.05.

El coeficiente de correlación observado para todas las muestras resultó superior al 95% lo que indica que el modelo propuesto resulta adecuado para representar el comportamiento de la producción de metano de AD, y permite obtener los parámetros cinéticos del proceso.

En la Figura 3 se observa la bondad del ajuste de los datos experimentales al modelo cinético de primer orden y también el efecto no significativo del ensilado sobre la productividad de metano de las muestras de AD.

Figura 3. Producción de metano experimental y ajustado según el modelo cinético de primer orden.



Los resultados aquí observados, tanto en función del potencial máximo como de la velocidad de producción de biometano, demuestran la capacidad de este cultivo perenne para generar biometano. Si bien se observaron deficiencias en la calidad del ensilado de AD como resultado de un elevado contenido de humedad y baja concentración de carbohidratos solubles, a futuro se estudiará el comportamiento de ensilados mixtos de AD-SM con la finalidad de evaluar su efecto sobre el PBM y la factibilidad de un futuro y paulatino reemplazo del SM en los digestores anaeróbicos. Para alcanzar esto será necesario, además, difundir la capacidad de AD como cultivo energético, introducir a productores de determinadas regiones en su

cultivo y acondicionamiento y sensibilizar a los sectores de producción de biogás en la posibilidad de incorporar esta biomasa con potencial de biometano comprobado. Este reemplazo evitaría comprometer el uso de la tierra para la producción de alimentos, ya que AD puede implantarse tanto en suelos arcillosos pesados como en arenas sueltas con regímenes pluviométricos anuales inferiores a 550 mm (Rodríguez et al., 2021), lo que permitiría su cultivo en diferentes áreas marginales de Argentina (Falasca et al., 2011), lo cual contrasta con la alta demanda de agua, fertilizantes químicos y pesticidas que requiere el cultivo maíz para alcanzar una elevada productividad de materia seca (Baldini et al., 2017).

En términos más generales, si bien son reconocidas las ventajas que los biocombustibles representan en la sustitución de combustibles fósiles por la disminución de GEIs, las políticas de promoción de su producción han dejado algunas cuestiones sin resolver, como por ejemplo su incidencia en el desarrollo rural y la necesidad de mayor investigación sobre el impacto en la sostenibilidad del modelo (Sili & Dürr, 2022). Además, numerosos estudios han evidenciado la influencia que el desarrollo de una política de promoción de biocombustibles en base a maíz, ha ejercido sobre el alza de precios del mercado de granos ya sea por la mayor demanda de semillas, como por la competencia de tierras arables entre diferentes cultivos (OECD-FAO, 2007). En Argentina, como en muchos otros países latinoamericanos, la producción de biocombustibles se concentra a base de soja, maíz y caña de azúcar, no explotando suficientemente otros cultivos, que presenten bajas inversiones y pueden tener efectos positivos e impactos N/ten el desarrollo local (Trigo et al., 2013). AD por su parte, como cultivo lignocelulósico perenne, es considerado una de las especies más promisorias para la producción de biomasa en Europa, lo que constituye un antecedente para evaluar el desarrollo de su cadena de valor en Argentina. Los resultados preliminares obtenidos en el presente trabajo se consideran potencialmente atractivos para avanzar en su implementación como cultivo energético.

CONCLUSIONES

El estudio de AD como una biomasa de segunda generación demostró su aptitud como cultivo energético para la producción de biometano con adecuado comportamiento durante el proceso de digestión anaeróbica a escala laboratorio, tanto de la biomasa fresca, como de la ensilada, a pesar de su alto contenido en componentes estructurales. Su productividad energética superior a $5,800 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{ha}$ refleja un futuro promisorio para su utilización como sustrato en la producción de biogás, basado en el elevado

rendimiento en materia seca obtenido en la zona centro de la provincia de Buenos Aires ($23.8 \pm 3.5 \text{ t/ha MS}$ en secano y $38.6 \pm 2.4 \text{ t/ha MS}$ en condiciones potenciales para el tercer ciclo de crecimiento), a pesar, de haber observado para esta biomasa un potencial experimental de metano menor al obtenido por el maíz. Los resultados preliminares del presente estudio proveen una alternativa para pensar una transición energética sostenible que incorpore nuevas fuentes de biomasa a la cadena de producción de biogás, que no compitan con la producción de alimentos. Dada la disponibilidad de capacidades e infraestructura vinculada al sector agrícola que tiene Argentina, el paso siguiente será realizar una valoración integral del desarrollo de la cadena de valor de AD bajo una perspectiva multicriterio que incluya además de los costos económicos, la identificación de los impactos sociales y ambientales que se puedan generar en diversos sectores. Este escenario posiblemente permitiría liberar tierras agrícolas para la generación de productos de mayor valor agregado que aporten desarrollo e innovación a la bioeconomía nacional. ■

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la SECAT (UNCPBA) Programa de Fortalecimiento a la Ciencia y la Tecnología en las Universidades Nacionales (IV) y a la Facultad de Ingeniería (UNCPBA) por la Beca BICT de la alumna Romina Cardoso. A los integrantes del PEIDYT Torres A., Caldentey F., Portela G., Ressia J., Grosso J. y Bongiorno C. por las tareas de campo y la confección de los microsilos y a Bioeléctrica General Alvear por el aporte de silajes de maíz.

REFERENCIAS

- Andrade, F. (2023). *Ecofisiología y manejo del cultivo de maíz* (F. Andrade, M. E. Otegui, A. Cirilo, & S. Uhart (eds.); 1a ed.). <https://sites.google.com/agro.uba.ar/libroecofisiologadelcultivodem/inicio>
- AOAC. (1998). *Official methods and recommended practices of the American Oil Chemists' Society*.
- APHA. (1999). *APHA: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20th ed. Washington, DC. (Issue 1). American Public Health Association.
- Aquino, S., Chernicharo, C., Foresti, E., Dos Santos, M. & Monteggia, L. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (ame) em lodos anaeróbios. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 12(2), 192–201.
- ASTM. (1999). *Annual Book of ASTM Standards*. In American Society for Testing and Materials Annual. ASTM bulletin West Conshohocken.
- Baldini, M., da Borso, F., Ferfuaia, C., Zuliani, F. & Danuso, F. (2017). Ensilage suitability and bio-methane yield of *Arundo donax* and *Miscanthus × giganteus*. *Industrial Crops and Products*, 95, 264–275. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2016.10.031>
- Bisang, R. & Trigo, E. (2017). *Bioeconomía argentina: modelos de negocios para una nueva matriz productiva*. Documento Elaborado En El Marco Del Convenio de Colaboración Entre El Ministerio de Agroindustria de La Nación y La Bolsa de Cereales de Buenos Aires., 55.
- Cárdenas Medina, J., Solorio Sánchez, F. & Sandoval Castro, C. (2004). Ensilaje de forrajes: alternativa para la alimentación de rumiantes en el trópico (Universida).
- Chew, K. R., Leong, H. Y., Khoo, K. S., Vo, D. V. N., Anjum, H., Chang, C. K. & Show, P. L. (2021). Effects of anaerobic digestion of food waste on biogas production and environmental impacts: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(4), 2921–2939. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01220-z>
- Christou, M., Alexopoulou, E., Cosentino, S. L., Copani, V., Nogues, S., Sanchez, E., Monti, A. & Walter Zegada-Lizarazu, Luigi Parí, A. S. (2018). Giant Reed: From Production to End Use. In E. Alexopoulou (Ed.), *Perennial Grasses for Bioenergy and Bioproducts: Production, Uses, Sustainability and Markets for Giant Reed, Miscanthus, Switchgrass, Reed Canary Grass and Bamboo* (Vol. 4, Issue 1, pp. 64–75).
- Córdoba, V., Ibarlucía, D. & Santalla, E. (2022). Desarrollo y validación de un mecanismo para remover CO₂ y cuantificar la producción de CH₄ en sistemas de digestión anaeróbica. *RedBioLAC*, 6(1), 40–45.
- Córdoba, V., Manzur, A. & Santalla, E. (2022a). Drying Kinetics and Mathematical Modelling of *Arundo donax* L. Canes, a Potential Renewable Fuel. *Research in Agricultural Engineering*, 68, 1–11. <https://doi.org/10.17221/73/2021-RAE>
- Córdoba, V., Manzur, A. & Santalla, E. (2022b). Thermal Behaviour and Emission Characteristics of *Arundo donax* L. as Potential Biofuel. *Bioenergy Research*, 1. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10556-5>
- Corno, L., Pilu, R., Cantaluppi, E. & Adani, F. (2016). Giant cane (*Arundo donax* L.) for biogas production: The effect of two ensilage methods on biomass characteristics and biogas potential. *Biomass and Bioenergy*, 93, 131–136. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.07.017>
- D'Imporzano, G., Pilu, R., Corno, L. & Adani, F. (2018). *Arundo donax* L. can substitute traditional energy crops for more efficient, environmentally-friendly production of biogas: A Life Cycle Assessment approach. *Bioresource Technology*, 267, 249–256. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.07.053>
- Di Girolamo, G., Grigatti, M., Barbanti, L. & Angelidaki, I. (2013). Effects of hydrothermal pre-treatments on Giant reed (*Arundo donax*) methane yield. *Bioresource Technology*, 147, 152–159. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.006>
- Dirección Nacional de Agricultura. (2023). *Estimaciones Agrícolas*. <https://Datosestimaciones.Magyp.Gob.Ar/Reportes.Php?Reporte=Estimaciones>.

- Falasca, S., Flores Marco, N. & Galvani, G. (2011). ¿Puede Usarse Una Especie Invasora Como Arundo Donax (Caña Común) Con Fines Energéticos En Argentina? *Inta, N° Doc BC-*, 6. https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta_-_arundo_donax_con_fines_energeticos_en_argentin.pdf
- FAO. (2019). Relevamiento nacional de biodigestores, Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico.
- Gerardi, M. H. (2003). *The microbiology of anaerobic digesters* (M. H. Gerardi (ed.); 1st ed.). John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffiere, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernandez, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Lacroix, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 1–9. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>
- Jámbor, A. & Török, Á. (2019). The economics of Arundo donax-A systematic literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 11(15). <https://doi.org/10.3390/su11154225>
- Kering, M., Butler, T., Biermacher, J. & Guretzky, J. A. (2012). Biomass yield and nutrient removal rates of perennial grasses under nitrogen fertilization. *BioEnergy Research*, 5(1), 61–70.
- Kleinschmit, D. & Kung L, J. (2006). A meta-analysis of the effects of *Lactobacillus buchneri* on the fermentation and aerobic stability of corn and grass and small-grain silages. *Journal of Dairy Science*, 89(10), 4005–4013. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(06\)72444-4](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(06)72444-4)
- Kreuger, E., Prade, T., Escobar, F., Svensson, S. E., Englund, J. E. & Björnsson, L. (2011). Anaerobic digestion of industrial hemp-Effect of harvest time on methane energy yield per hectare. *Biomass and Bioenergy*, 35(2), 893–900. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.11.005>
- Li, K., Liu, R. & Sun, C. (2015). Comparison of anaerobic digestion characteristics and kinetics of four livestock manures with different substrate concentrations. *Bioresource Technology*, 198, 133–140. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.151>
- Liebetrau, J., Baier, U., Wall, D. & Murphy, J. D. (2020). Integration of biogas systems into the energy system (J. . Murphy (ed.); Issue 8). IEA Bioenergy Task 37.
- Mantineo, M., D'Agosta, G. M., Copani, V., Patané, C., Cosentino, S. L., Mantineo, M., D'Agosta, G. M., Copani, V., Patané, C. & Cosentino, S. L. (2009). Biomass yield and energy balance of three perennial crops for energy use in the semi-arid Mediterranean environment. *Field Crops Research*, 114(2), 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.07.020>
- Monlau, F., Barakat, A., Trably, E., Dumas, C., Steyer, J. P. & Carrère, H. (2013). Lignocellulosic materials into biohydrogen and biomethane: Impact of structural features and pretreatment. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 43(3), 260–322. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.604258>
- Nogar, A. G., Rodríguez, L. D., Bongiorno, C.-V. & Santalla, E. M. (2021). Las potencialidades bioenergéticas del Arundo donax L. en Argentina. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, 30, 84–104. <https://doi.org/10.17141/letrasverdes.30.2021.4607>
- OECD-FAO. (2007). *AGRICULTURAL OUTLOOK 2007-2016* (pp. 1–88).
- Pirozzi, D., Fiorentino, N., Impagliazzo, A., Sannino, F., Yousuf, A., Zuccaro, G. & Fagnano, M. (2015). Lipid production from Arundo donax grown under different agronomical conditions. *Renewable Energy*, 77(September 2020), 456–462. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.12.046>
- Pompeiano, A., Guglielminetti, L., Bargiacchi, E. & Miele, S. (2013). Responses in chemical traits and biomass allocation of Arundo donax L. to deficit resources in the establishment year. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 73(December), 377–384. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392013000400008>
- Ragolini, G., Dragoni, F., Simone, M. & Bonari, E. (2014). Suitability of giant reed (Arundo donax L.) for anaerobic digestion: Effect of harvest time and frequency on the biomethane yield potential. *Bioresource Technology*, 152, 107–115. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.004>

- Rodríguez, D., Lázaro, L., Ressia, J., Laddaga, J., Grosso, J., Bongiorno, C. & Confalone, A. (2021). Producción de biomasa de Arundo donax L., un cultivo bioenergético para el centro de la provincia de Buenos Aires. *Revista Argentina de Agrometeorología-RADA*, XII, 15–20.
- Schievano, A., Corno, L., Adani, F. & Pilu, S. R. (2012). Più biogas a costi inferiori con arundo o doppia coltura. *Settore AGR/13 - Chimica Agraria*.
- Scott, A. & Blanchard, R. (2021). The role of anaerobic digestion in reducing dairy farm greenhouse gas emissions. *Sustainability (Switzerland)*, 13(5), 1–18. <https://doi.org/10.3390/su13052612>
- Sili, M. & Dürr, J. (2022). Bioeconomic Entrepreneurship and Key Factors of Development: Lessons from Argentina. *Sustainability*, 14(4), 2447. <https://doi.org/10.3390/su14042447>
- Steinmetz, R. L. R., Mezzari, M. P., da Silva, M. L. B., Kunz, A., do Amaral, A. C., Tápparo, D. C. & Soares, H. M. (2016). Enrichment and acclimation of an anaerobic mesophilic microorganism's inoculum for standardization of BMP assays. *Bioresource Technology*, 219, 21–28. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.031>
- Technical Association of Pulp and Paper Industry - TAPPI. (1999). T 203 cm-99. Alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. *TAPPI Test Methods*, 5–9.
- Thomsen, S. T., Spliid, H. & Østergård, H. (2014). Statistical prediction of biomethane potentials based on the composition of lignocellulosic biomass. *Bioresource Technology*, 154, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.12.029>
- Trigo, E. J., Henry, G., Sanders, J., Schurr, U., Ingelbrecht, I., Revel, C., Santana, C. & Rocha, P. (2013). Towards bioeconomy development in Latin America and the Caribbean. In *Towards a Latin America and Caribbean knowledge based bioeconomy in partnership with Europe* (pp. 15–41). Pontificia Universidad Javeriana. www.bioeconomy-alcue.org
- Triolo, J. M., Pedersen, L., Qu, H. & Sommer, S. G. (2012). Biochemicalmethanepotentialandanaerobicbiodegradability of non-herbaceous and herbaceous phytomass in biogas production. *Bioresource Technology*, 125, 226–232. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.08.079>
- Triolo, J. M., Sommer, S. G., Møller, H. B., Weisbjerg, M. R. & Jiang, X. Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion: Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102(20), 9395–9402. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2011.07.026>
- USEPA. (1995). Test Methods for Evaluating solid waste, SW-846, Method 9040C, Soil and waste pH (Issue November, pp. 1–5). <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/index.htm>
- Veluchamy, C., Gilroyed, B. H. & Kalamdhad, A. S. (2019). Process performance and biogas production optimizing of mesophilic plug flow anaerobic digestion of corn silage. *Fuel*, 253(May), 1097–1103. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.104>
- Webster, J. (1992). *The Biochemistry of Silage* (Second Edition). By P. McDonald, A. R. Henderson and S. J. E. Heron. Marlow, Bucks, UK: Chalcombe Publications, (1991), pp. 340, £49.50, ISBN 0-948617-225. *Experimental Agriculture*, 28(1), 125–125. <https://doi.org/10.1017/S0014479700023115>
- Webster, R. J., Driever, S. M., Kromdijk, J., McGrath, J., Leakey, A. D. B., Siebke, K., Demetriades-Shah, T., Bonnage, S., Peloe, T., Lawson, T. & Long, S. P. (2016). High C3 photosynthetic capacity and high intrinsic water use efficiency underlies the high productivity of the bioenergy grass Arundo donax. *Scientific Reports*, 6, 20694. <https://doi.org/10.1038/srep20694>
- Yemm, E. W. & Willis, A. (1954). The estimation of carbohydrates in plant extracts by anthrone. *Biochemical Journal*, 57(3), 508.



olade 50

AÑOS
1973 - 2023

ORGANIZACIÓN
LATINOAMERICANA
DE ENERGÍA

LATIN AMERICAN
ENERGY
ORGANIZATION

ORGANIZAÇÃO
LATINO-AMERICANA
DE ENERGIA

ORGANISATION
LATINO-AMERICAINE
D'ENERGIE

Nos une la **energía**

Energy joins us

www.olade.org

DISPONIBILIDAD DE RASTROJOS Y SU POTENCIAL ENERGÉTICO EN URUGUAY

URUGUAYAN STRAW AVAILABILITY AND ITS ENERGY POTENTIAL

Gabriel Peña ¹, Pedro Curto-Risso ²

Recibido: 24/3/2023 y Aceptado: 15/6/2023
ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (74 - 94)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Eric Prouzet en Unsplash.

1 Facultad de ingeniería - UdelaR
Uruguay
gabpena@fing.edu.uy
<https://orcid.org/0000-0003-0414-2658>

2 Facultad de ingeniería - UdelaR
Uruguay
pcurto@fing.edu.uy
<https://orcid.org/0000-0002-7331-8621>

RESUMEN

A nivel internacional, el peso relativo de las fuentes de energía renovables aún es muy inferior al de las fósiles. En este contexto, la biomasa, si bien presenta una gran tradición, continúa vigente y con perspectivas de crecimiento. En los últimos años, debido al incremento en la competencia entre el uso del suelo con fines energéticos y para la producción de alimentos, el aprovechamiento de biomasa residual ha surgido como una de las alternativas de mayor interés para lidiar con esta disyuntiva. Uruguay, país con gran tradición de uso de leña y una matriz energética con gran presencia de fuentes renovables, presenta grandes superficies de tierra destinadas a la producción de granos (soja, arroz, trigo, maíz, cebada cervecera y sorgo). Este trabajo tiene como objetivo determinar la disponibilidad de rastrojos cosechables, así como su potencial energético total y distribuido en el territorio. Se puede concluir que los rastrojos de cultivos uruguayos presentan un potencial muy elevado, destacándose, por ejemplo, que la cosecha parcial de los rastrojos de soja, arroz o trigo fue suficiente para satisfacer la demanda

de leña del Uruguay (industrial o residencial). En algunas zafas era posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de un solo cultivo.

Palabras clave: Biomasa residual, Rastrojos, Disponibilidad, Potencial energético, Capacidad de sustituir la biomasa tradicional.

ABSTRACT

On an international level, the relative weight of renewable energy sources is still much lower than that of fossil fuels. In this context, biomass, although it has a great tradition, today it is still used and with growth prospects. In recent years, due to increased competition between the use of land for energy purposes and for food production, the use of residual biomass has emerged as one of the most interesting alternatives to deal with this dilemma. Uruguay, a country with a long tradition of using firewood and an

energy matrix with a large presence of renewable sources, has large areas of land devoted to the production of grains (soybeans, rice, wheat, corn, malting barley and sorghum). This work aims to determine the availability of harvestable straws, as well as its energy potential and distribution in the territory. It can be concluded that crop straws have a very high potential, highlighting for instance, that the partial harvest of soybean, rice or wheat straws was sufficient to satisfy the demand for firewood in Uruguay in the years 2018 to 2022 (industrial or residential). In some harvests it was possible to satisfy the entire national demand with stubble from a single crop.

Keywords: *Waste biomass, Straws, Availability, Energy potential, Ability to replace traditional biomass*

INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades humanas, la producción y consumo de energía, son de las más intensivas en el consumo de recursos, así como de las principales fuentes de emisiones contaminantes, representado alrededor del 60% de todas las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero (Barbosa-Cortez, 2008; Naciones Unidas, 2019). Por tal motivo, una de las Metas del Objetivo de Desarrollo Sostenible número 7 (Energía Asequible y no Contaminante) para el 2030, es aumentar considerablemente la proporción de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas (Naciones Unidas, 2019). Si bien en las últimas décadas comenzó a incorporar el uso de nuevas fuentes de energía renovable, a nivel internacional el peso relativo de las fuentes renovables aún es muy inferior al

de las fósiles, donde estas últimas representaron el 78,9% del consumo de energía total (contemplando todos los usos) en el 2019 (Ritchie, 2020).

En Uruguay el uso de la biomasa y particularmente la leña, presenta una fuerte tradición. Los sectores de consumo de la biomasa son principalmente el residencial e industrial, en los cuales el peso relativo de la biomasa es altamente relevante sobre el total (DNE-MIEM, 2019).

La utilización de biomasa como combustible tiene asociado una serie de ventajas y desventajas respecto a otros combustibles o fuentes de energía. En primer lugar, la biomasa es una fuente de energía renovable (cuando es manejada bajo determinados criterios de sostenibilidad), la cual es formada continuamente a partir de la interacción de CO₂, aire, agua, suelo y luz solar con las plantas y animales. Cuando la biomasa es quemada, o utilizada luego de ser convertida en otro tipo de combustible, el carbono de la biomasa reacciona con el oxígeno del aire generando CO₂, que se libera a la atmósfera. Si se quema completamente, la cantidad de CO₂ generado es igual a la que adquirió la planta en su crecimiento. En otras palabras, el dióxido de carbono generado en la combustión de la biomasa no incrementa el CO₂ del planeta, por ello la biomasa podría considerarse neutra en emisiones de gases de efecto invernadero. Por otro lado, este ciclo de emisiones neutras no contempla las emisiones generadas por los consumos de energéticos en los procesos de siembra, cosecha y transporte de la biomasa (Basu, 2010; Saidur, 2011; Vassilev, 2010).

Comparado con otras fuentes de energía renovable, como la energía solar o eólica, la biomasa puede ser almacenada por largos períodos de tiempo. Por lo tanto, la generación de energía con biomasa es gestionable y fiable, a diferencia de otras fuentes de energía renovable, como la eólica o solar, cuya generación depende de que las condiciones meteorológicas sean favorables. A partir de la biomasa pueden ser generados

otros tipos de combustibles sólidos, líquidos y gaseosos o directamente energía térmica y/o eléctrica (Saidur, 2011).

Dependiendo de las condiciones locales, puede ser un recurso barato y de gran disponibilidad, por lo cual presenta un potencial en la diversificación del suministro de combustibles y favorece a la soberanía energética. Esto es relevante en países como Uruguay, los cuales no cuentan con reservas probadas de petróleo, carbón mineral ni gas natural. Adicionalmente, colabora con la revitalización rural mediante la creación de puestos de trabajo.

Por otro lado, como principales desventajas se puede destacar su baja densidad energética, lo cual aumenta los costos de transporte además de tener altos costos de cosecha y almacenamiento. Esto hace que la disponibilidad de la misma sea regional. En aplicaciones de quema directa, si esta no se realiza en buenas condiciones, puede contribuir fuertemente al calentamiento global y a la emisión de material particulado. Además, su combustión, u otras alternativas de conversión termoquímica, pueden generar emisiones de compuestos contaminantes, inclusive hay emisiones generadas por el lixiviado de la biomasa. Sumado a esto, los residuos de la combustión y otros procesos térmicos no presentan un uso claro. La explotación de cultivos energéticos puede generar daños al suelo y a la biodiversidad, o en ocasiones puede generar una competencia con la producción de alimentos.

En los últimos años, debido al incremento en la competencia entre el uso de la tierra con fines energéticos y para la producción de alimentos, el aprovechamiento de biomasa residual (y en particular los residuos agrícolas) ha surgido como una de las alternativas de mayor interés para lidiar con esta disyuntiva (Horvat, 2018).

Los residuos agrícolas y agroindustriales como rastrojos de cultivos, bagazo de caña, cáscaras de arroz y café, así como residuos de la industria forestal tales como aserrín, corteza, entre otros,

son generados en todo el planeta. A pesar de las grandes cantidades generadas de estas biomasa, su utilización como combustible es baja (Werther, 2000). La biomasa no tradicional suele tener un uso local debido a su baja densidad aparente bulk comparado con la biomasa tradicional, a fin de minimizar los costos de transporte (Horvat, 2018; Werther, 2000). Debido a esto, muchas aplicaciones se limitan a plantas de pequeño porte, con desempeños inferiores comparados con plantas de gran porte (Werther, 2000). Así mismo, la densificación de estas biomasa (pellets y briquetas) es necesaria para viabilizar el transporte de mayores distancias.


Sumado a las problemáticas que pueden generar los residuos agrícolas directamente relacionadas con su combustión, también son relevantes los impactos que se pueden generar en el ecosistema debido a su extracción. Desde el punto de vista agrícola, la disposición de los rastrojos en el campo cumple un rol de vital importancia para la conservación de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, evitando (o minimizando) la erosión generada por la lluvia y el viento, favoreciendo la reincorporación de nutrientes al suelo, permitiendo la captura de carbono, reduciendo la pérdida de materia orgánica y por lo tanto minimizando la pérdida de fertilidad del suelo (IPCC, 2006; Monteleone, 2015; Sastre, 2015; USDA - NRCS, 2006; Whittaker, 2014). Es así que, retirar los rastrojos puede generar un impacto negativo en el ambiente, afectando la fertilidad del suelo y por lo tanto la productividad de futuras cosechas. El impacto que se deriva por la ausencia de rastrojos en el campo depende de las condiciones locales (clima, tipo de suelo, topografía), así como del cultivo en sí y de la gestión agrícola aplicada (rotación de cultivos, fertilización, etc). Por lo tanto, el impacto ambiental generado depende de cada aplicación en particular (Bird, 2011).

A pesar de las desventajas que presentan los residuos agrícolas frente a las biomasa tradicionales, los mismos son utilizados como fuente de energía en varios países como Dina-

marca, Reino Unido, España, Suecia, China e India, donde se han instalado plantas de gran escala, siendo la ventaja principal de estas biomásas su reducido impacto en uso de la tierra. Dinamarca es el pionero en la utilización rastrojos en plantas de generación de gran porte desde 1989 (Batidzirai, 2016). Países como España, cuentan con asociaciones de todos los actores del sector de la bioenergía (Avebiom, 2021) que impulsan el uso de la biomasa en general y los rastrojos de cultivos en particular.

Las Directivas Europeas de Energías Renovables (RED) (EP, 2009) promueve el uso de biomásas residuales como forma de minimizar la competencia entre los cultivos energéticos y alimenticios, previniendo los cambios en el uso de la tierra (Monteleone, 2015). En algunos casos particulares, la gestión agrícola de rotación de cultivos requiere la extracción de los rastrojos del campo, siendo habitual (principalmente en las superficies con riego) el quemado del rastrojo a cielo abierto. Esto se debe a que la presencia del rastrojo dificulta la implantación del siguiente cultivo. Esta combustión no solo repercute en emisiones de CO₂ sino que también genera daños en la estructura del suelo y facilita su erosión, destruye microorganismos útiles y genera pérdida de nutrientes y por lo tanto la calidad del suelo (Batidzirai, 2016).

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), es probable que a largo plazo los residuos agrícolas contribuyan a la matriz energética mundial entre 15 y 70 EJ (ExaJoules), principalmente en países donde la producción agrícola es importante (Batidzirai, 2016). Según la Agencia Internacional de Energía (IEA) (Bird, 2011), la recolección de rastrojos para su posterior uso como energético solamente se justifica en caso donde se determinen beneficios ambientales, económicos y sociales respecto a la retención de los mismos en el campo, siendo fundamental el análisis caso a caso debido a la gran dependencia y variabilidad con las condiciones locales y particulares de cada aplicación.

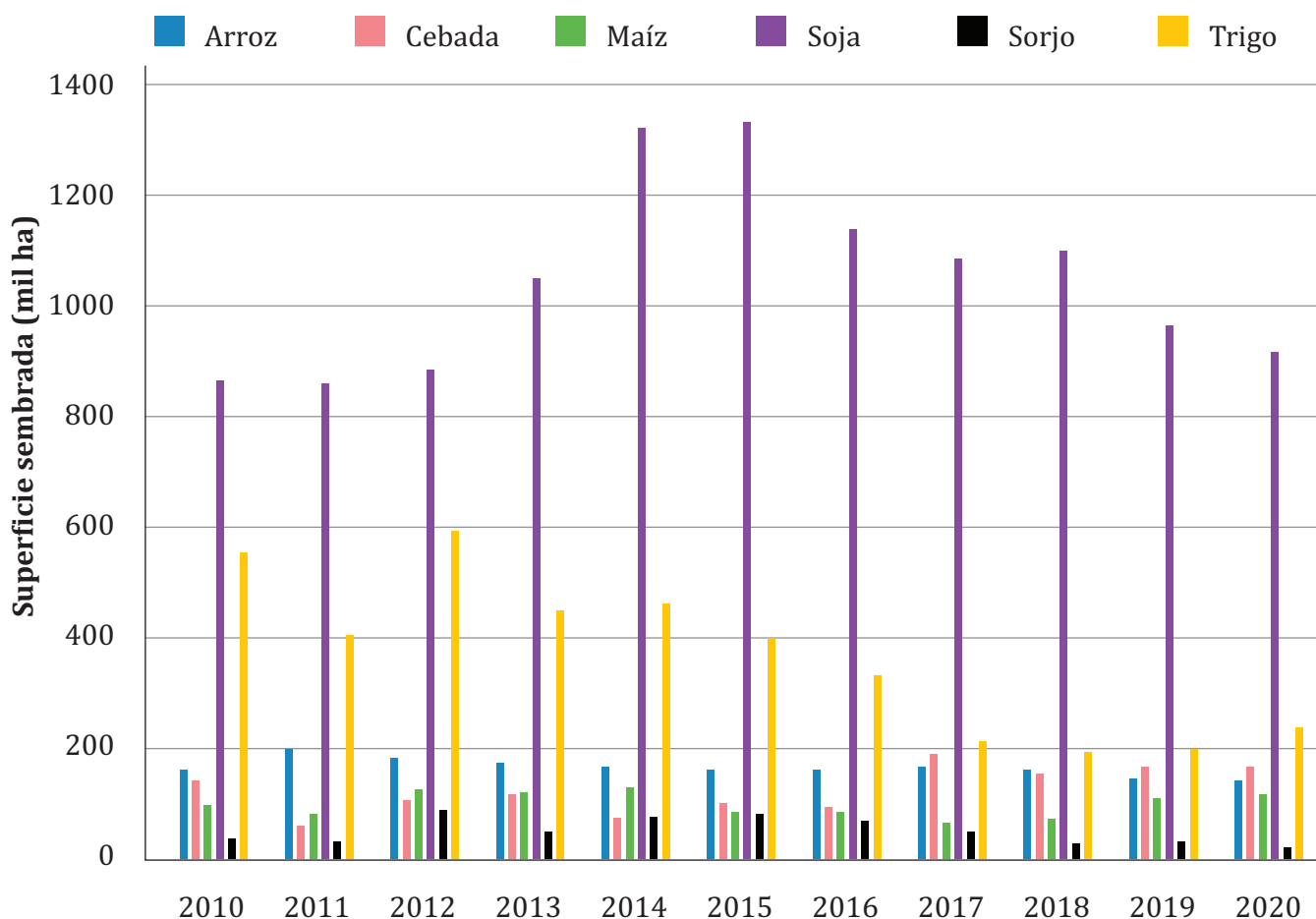


A nivel internacional, el peso relativo de las fuentes renovables aún es muy inferior al de las fósiles, donde estas últimas representaron el 78,9% del consumo de energía total (contemplando todos los usos) en el 2019.

Los principales cultivos del Uruguay, en términos de superficie cultivada y producción de grano, son la soja, arroz, trigo, maíz, cebada, cerveza y sorgo (DIEA-MGAP, 2020). Por lo tanto, son los cultivos que generan mayor cantidad de biomasa residual (en términos absolutos a nivel nacional), y cabe preguntarse qué potencial energético se dispone en ese residuo (o parte de él), esto motiva el interés de este estudio. Existe una gran diferencia entre las áreas sembradas de los diferentes cultivos. En la figura 1 se observa la evolución de la superficie sembrada de cada cultivo entre 2010 y 2020¹, donde se aprecia notoriamente que el cultivo de soja es el más extendido, superando las 1.3 millones de hectáreas en las zafas de 2013/14 y 2014/15 (DIEA-MGAP, 2020). El resto de cultivos en estudio presentan superficies cultivadas notablemente menores, que pueden ordenarse en forma decreciente (en los últimos años) como: trigo, cebada, arroz, maíz y por último sorgo. No obstante, el rendimiento (o producción por unidad de superficie) de cada cultivo es diferente. Por lo tanto, las producciones totales no mantienen las tendencias o diferencias observadas en la superficie cultivada. De este modo, respecto a la producción total de grano, se ordenan de forma decreciente como: soja, arroz, trigo, maíz, cebada y sorgo.

1 Los años indicados en el gráfico corresponden al segundo año del año agrícola, por ejemplo 2010 corresponde a la zafra 2009/2010.

Figura 1. Evolución anual de la superficie sembrada



Fuente: Elaboración propia con datos del MGAP (DIEA-MGAP, 2020).

El principal residuo de los cultivos de grano es la biomasa aérea (exceptuando el grano en sí), el cual se denomina rastrojo. Esta biomasa cumple un rol vital en la sustentabilidad de la producción agrícola, protegiendo al suelo de la erosión, así como conservando sus propiedades y devolviendo nutrientes (Batidzirai, 2016; USDA-NRCS, 2006). Por lo tanto su retiro afecta directamente la calidad del suelo y la producción de los futuros cultivos, factores determinantes al momento de estimar la cantidad de rastrojo cosechable con fines energéticos.

Estimar la fracción cosechable, o los requerimientos mínimos de biomasa que debe quedar en el campo, no es simple dado que depende

de las condiciones climáticas del lugar, tipo de suelo, topografía, las prácticas agrícolas, el cultivo en cuestión, entre otras, existiendo gran variedad de criterios en los estudios consultados (Batidzirai, 2016; Monteleone, 2015; USDA-NRCS, 2006).

Si bien la disponibilidad y potencial de estas biomásas en Uruguay es elevado (según se verá a continuación) casi no hay estudios al respecto. Carlos Faroppa (Faroppa, 2010) realizó una evaluación de disponibilidad de biomasa residual en Uruguay, donde cuantifica el potencial del uso de rastrojos de trigo y cebada (entre otras biomásas residuales, principalmente residuos forestales). De acuerdo con lo estimado por

López (2016), el potencial de generación de biogás a partir de los rastrojos de avena, cebada, girasol, maíz, soja, sorgo y trigo. Los mapas energéticos desarrollados por la DNE (DNE, 2017), si bien especifican el potencial energético a partir de algunas fuentes renovables (solar, eólica y microhidráulica), respecto a la biomasa sólo detallan la cobertura forestal y zonas con emprendimientos agropecuarios sin una estimación del potencial energético. También se pueden ver detalles del uso de biomasa no tradicionales del Uruguay en la memoria del proyecto ANII FSE 102079-14 (AUTOR, 2017) (“Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales”), siendo éste último el antecesor del presente estudio.

El objetivo de este trabajo es estimar el potencial energético disponible a partir del aprovechamiento de rastrojos de los principales cultivos del Uruguay, determinando su potencial a nivel nacional y por unidad de superficie cultivada, así como identificar las zonas geográficas de mayor concentración. Para ello, en primera instancia se debe cuantificar la cantidad de rastrojo generado y estimar la fracción cosechable a partir de restricciones técnicas y ambientales.

A partir de la estimación de disponibilidad de biomasa residual y la cuantificación de su potencial energético se puede concluir que los rastrojos de cultivos presentan un potencial muy elevado, promediando 1284 ktep por año.

El documento se organiza de la siguiente forma, en la siguiente sección se presenta la metodología utilizada para determinar la cantidad de rastrojos y su potencial energético; luego se muestran los resultados, sobre la cantidad de rastrojos, considerando las limitaciones de uso de suelo y de producción, el potencial energético y su distribución en el Uruguay y por último se presentan las conclusiones y se proponen temas a estudiar a futuro.

METODOLOGÍA

Estimación de rastrojos cosechables

Disponibilidad de rastrojos totales: El residuo en estudio consiste en rastrojo del cultivo. Al ser el grano la fracción de interés del cultivo, se tiene registro anual (global nacional) de la producción total de grano, superficie cultivada y rendimiento de cada cultivo a partir del Anuario Estadístico Agropecuario (DIEA-MGAP, 2018) y registro regional únicamente de la superficie sembrada a partir del último censo nacional (DIEA-MGAP, 2012), ambos elaborados por la Oficina de Estadísticas Agropecuarias del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (DIEA-MAGP). No se cuenta con un relevamiento de la biomasa residual que genera cada uno. Por lo tanto, para su estimación se debe utilizar el índice de cosecha (IC) de cada cultivo. Este se define como el cociente entre la masa de grano cosechado (m_{gr}) y la masa aérea total del cultivo (m_{AT}), ambos en base seca (Amanullah, 2016). Este índice permite cuantificar la producción por hectárea de biomasa residual (rendimiento de rastrojo total [$kg_{RTot} ha^{-1}$]) de cada cultivo en función del rendimiento de grano ($\eta_{Gr} [kg_{Gr} ha^{-1}]$). En las ecuaciones 1 y 2 se explica el cálculo del índice de cosecha y su empleo para calcular el rendimiento de rastrojo. Para cada cultivo, los factores que influyen en el IC son el contenido energético y proteico de las semillas, las temperaturas extremas (ya sea frías o calientes) durante el desarrollo reproductivo del cultivo, las condi-

ciones climáticas (ecosistema), la fecha de siembra, el grado de madurez en la cosecha (longitud del ciclo del cultivar), el cultivar, entre otras (Amanullah, 2016; Bongiovanni, 2001; Fan, 2017; Kemanian, 2007;).

$$IC = \frac{m_{Gr}}{m_{AT}} \quad (1)$$

$$\eta_{tot} = \frac{1 - IC}{IC} \quad \eta_{Gr} = \frac{Producción}{Superficie} \quad (2)$$

A efectos del cálculo del rendimiento de rastrojo total de cada cultivo, los índices de cosecha se calcularon con base en funciones y datos de la literatura consultada (Amanullah, 2016; Bongiovanni, 2001; Fan, 2017; Kemanian, 2007; Khaliq, 2018; Tang, 2017; Unkovich, 2010), así como valores estimados a nivel nacional. Es importante destacar que, si bien el IC es una relación entre masas secas, la información de producción y rendimiento de grano presentada en el Anuario Estadístico Agropecuario se encuentra en masa de grano con 13% de humedad (b.h.). Por lo tanto, antes de calcular los rendimientos de rastrojo se debe calcular el rendimiento de masa seca de grano.

Disponibilidad de rastrojo cosechable: A fin de estimar la cantidad de rastrojo cosechable (o fracción cosechable respecto al total generado), se debe contemplar el efecto que implica retirar el mismo del campo para garantizar la sustentabilidad de los sistemas agrícolas, manteniendo los niveles de producción y minimizando los impactos ambientales asociados a su retiro (Batidzirai, 2016; IPCC, 2006; Whittaker, 2014). El impacto de retirar parte de los rastrojos (inclusive cosechando fracciones bajas) depende de varios factores como el tipo de cultivo, el rendimiento del mismo, la rotación de cultivos (incluyendo pasturas) o cultivos continuos, las prácticas agrícolas (con o sin laboreo de la tierra), clima y las condiciones físicas del suelo como la topografía, entre otros (Batidzirai, 2016; IPCC, 2006; Whittaker, 2014).

De acuerdo a lo estudiado por Lal (2009), en situaciones de monocultivo de maíz, el 25% de los rastrojos podrían ser cosechados conservando el carbono orgánico del suelo.

Cabe destacar que la gestión agrícola de los cultivos de cebada, maíz, soja, sorgo y trigo en Uruguay se realizan minimizando el laboreo de la tierra y con rotación de cultivos (incorporando pasturas) bajo un Plan de Uso y Manejo del Suelo (MGAP, 2018), a fin de garantizar la conservación del mismo (Ley 15.239). Estos dos aspectos mejoran las cualidades de suelo respecto a técnicas de laboreo convencional y/o monocultivo por períodos prolongados, reduciendo la erosión, así como la pérdida de materia orgánica y agotamiento de nutrientes (Batidzirai, 2016).

Adicionalmente, en los sistemas con cosecha de rastrojos, para mantener los niveles de producción se deben compensar los nutrientes extraídos al retirar los rastrojos. Por lo tanto es necesario un aumento en el uso de fertilizantes (Batidzirai, 2016; Giuntoli, 2013; Monteleone, 2015; Sastre, 2015).

Según Batidzirai et al. (2016), en los sistemas de cultivos de maíz y trigo sin laboreo (en inglés *no-tillage practice*) donde permanecen 2000 kg ha⁻¹ de rastrojos en el campo, se logra controlar la erosión aceptablemente. Sin embargo, para algunos cultivos implicaría extraer porcentajes muy altos de rastrojo, lo cual puede generar problemas en el suelo.

Además, a partir de la consulta con expertos en el área, se estima que bajo las condiciones climáticas y de siembra en Uruguay, aconsejable no retirar más del 60% del rastrojo generado para evitar (o minimizar) los problemas de erosión así como para contemplar las limitaciones tecnológicas en la cosecha del material.

Por lo tanto, en este trabajo, al tratarse de cultivos sin laboreo, se determinó la cantidad de rastrojo cosechable de forma tal que se cumplan los dos requisitos simultáneamente:

1. En el campo deben quedar al menos 2000 $kg\ ha^{-1}$ de rastrojo.
2. La fracción máxima de rastrojos a cosechar es del 60% respecto al total generado.

De esta forma, los rendimientos se calculan según las ecuaciones 3 y 4, donde η_{RTot} corresponde al rendimiento de rastrojo total generado por hectárea y η_{RCos} al rendimiento de rastrojo cosechable [$kg\ ha^{-1}$].

$$Si\ 0,4\ \eta_{RTot} > 2000\ kg\ ha^{-1} \Rightarrow \eta_{RCos} = 0,6\eta_{RTot} \quad (3)$$

$$Si\ 0,4\ \eta_{RTot} \leq 2000\ kg\ ha^{-1} \Rightarrow \eta_{RCos} = \eta_{RTot} - 2000\ kg\ ha^{-1} \quad (4)$$

Evolución temporal y distribución geográfica

Se dispone de dos fuentes de información para la estimación de rastrojos (disponibles y cosechables). Por un lado, un histórico anual donde se compila la información total nacional, discriminada por tipo de cultivo pero no por zona territorial o región. Esta información se encuentra en los Anuarios Estadísticos Agropecuarios (MGAP, 2020), los cuales detallan el área sembrada (AS), producción total de grano y rendimiento para cada cultivo como promedio nacional. Por otro lado, se cuenta con información discriminada por regiones (o áreas de enumeración - AE) pero solamente de años específicos. Esta información se obtiene a partir del Censo Agropecuario, siendo el último del 2011 (DIEA-MGAP, 2012). La información publicada del Censo detalla el AS de cada cultivo en cada AE pero no su rendimiento. Por lo tanto, para estimar la disponibilidad de rastrojo cosechable en cada AE se utilizó un rendimiento promedio obtenido a partir del rendimiento nacional del 2011 para cada cultivo (datos del Anuario Estadístico de Uruguay).

De este modo, es posible determinar la evolución temporal (histórico) de la disponibilidad de rastrojos cosechables a nivel nacional (sin discriminación regional) y la distribución geográfica (por AE) solamente para el año 2011.

Determinación del Potencial Energético

Una vez estimada la cantidad de rastrojo cosechable por hectárea (η_{RCos}), se determina la densidad energética por unidad de superficie sembrada (DE) [$kJ\ ha^{-1}$], es decir, la energía disponible por unidad de superficie sembrada, como el producto del rendimiento de rastrojo cosechable por el Poder Calorífico Neto² (PCN) según se explica en la ecuación 5. Conociendo el AS total de cada cultivo, se calcula el potencial energético (PE) de cada cultivo como el producto entre DE y AS del mismo (ecuación 6). Nótese que con esta metodología se determina el potencial (o densidad) térmico máximo debido a que el cálculo no está afectado por el rendimiento de un eventual sistema.

$$DE = \eta_{RCos} PCN \quad (5)$$

$$PE = DE \cdot AS \quad (6)$$

El PCN se determinó a partir del poder calorífico superior (PCS), el contenido de hidrógeno (H) y la humedad de las biomásas (W) según la ecuación 7 (UNE-EN, 2011), donde h_{fg} corresponde a la entalpía de vaporización del agua a la temperatura de referencia.

$$PCN = PCS - (w + 9H) h_{fg} \quad (7)$$

2 Definido según la norma UNE-EN 14918.

Dado que no es conveniente realizar fardos con biomásas que contengan más de 15% de humedad (bh) (Hinge, 2009), para el caso de los rastrojos de arroz, maíz y sorgo, los cuales suelen tener humedad inicial mayor a este valor, se los consideró con 15% de humedad, estimando que primero se reduce su humedad de forma natural y luego son enfardados.

Dentro de cada AE existe una fracción del terreno cultivada y otra sin cultivar, más aún parte del terreno puede cultivarse con cultivos de invierno y verano en el mismo año. Con la finalidad de poder contemplar estos factores y conociendo la superficie cultivada (área sembrada - AS) de cada región (área de enumeración), se define la densidad energética específica (DE') para cada AE como el potencial energético de cada AE dividido la superficie de cada AE, según se

explica en la ecuación 8. De este modo, se puede estimar, para cualquier superficie arbitraria, el potencial energético de la misma considerando uno o varios cultivos, los cuales no tienen por qué estar cultivados en la misma tierra.

$$DE'_i = \frac{AS_i}{AE_i} DE \quad (8)$$

RESULTADOS

En la tabla 1 se presentan las propiedades de los rastrojos (humedad y poder calorífico neto) así como el índice de cosecha de cada cultivo utilizados para los cálculos de potencial y densidad energética presentados en esta sección.

Tabla 1. Propiedades de los rastrojos e índice de cosecha de cada cultivo

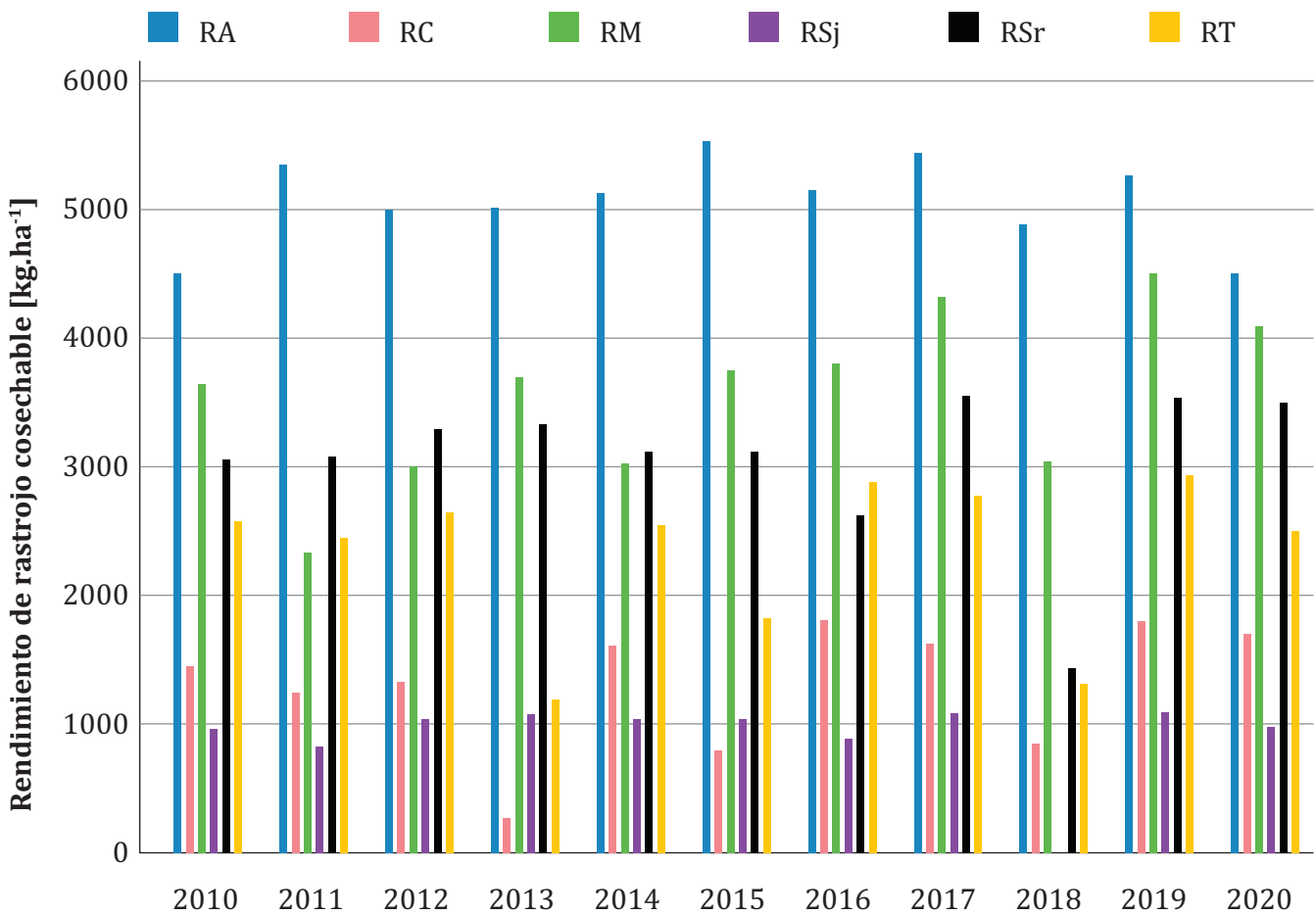
	RA	RC	RM	RSj	RSr	RT
W (%)	15,0	8,8	15,0	9,2	15,0	8,1
PCN (MJ/kg _{Seco})	13,51	16,68	16,66	16,23	16,28	16,27
IC (%)	45,0	45,0	44,1	39,4	40,0	38,5

Disponibilidad de rastrojos

A partir de los datos suministrados por el Anuario Estadístico Agropecuario (MGAP, 2020), se observó elevadas superficies cultivadas con granos, principalmente de soja. No obstante, debido a que los rendimientos de producción de cada cultivo son diferentes y por tanto la producción vegetal es diferente, la cantidad de rastrojos que genera cada cultivo por unidad de superficie también es muy diferente. En la

figura 2 se presenta la evolución entre 2010 y 2020 de la cantidad de rastrojo cosechable por hectárea de los seis cultivos: Rastrojo de Arroz (RA); Rastrojo de Cebada (RC); Rastrojo de Maíz (RM); Rastrojo de Soja (RSj); Rastrojo de Sorgo (RSr); Rastrojo de Trigo (RT), contemplando las dos restricciones antes mencionadas (dejar al menos de rastrojos en el campo y no retirar más del 60% del rastrojo generado).

Figura 2. Evolución anual del rendimiento de rastrojo cosechable.



A partir de estos resultados se observa que los rastrojos de soja (principal cultivo en extensión) son los de menor rendimiento ($kg_{RCos} ha^{-1}$), donde la limitante se encuentra en la cantidad de rastrojo que se debe dejar en el campo como cobertura del (estimada en $2000 kg ha^{-1}$). Para los cultivos de soja, difícilmente se puede cosechar más de $1000 kg ha^{-1}$ (oscila entre 840 y $1090 kg ha^{-1}$) de rastrojos (lo cual representa un tercio del rastrojo generado), más aún considerando que su relación C:N es baja y por ende su velocidad de descomposición es alta (Rodríguez, 2011). En particular para la zafra 2017/18, el rendimiento de grano fue tan bajo que no era posible cosechar rastrojos de soja bajo estos supuestos.

En orden creciente de rendimientos de rastrojos cosechables a la soja le sigue el cultivo de cebada, con rendimientos entre 270 y $1800 kg_{RCos} ha^{-1}$, lo cual representa una fracción cosechada entre el 12 y 47% del rastrojo generado.

Con rendimientos de rastrojo cosechable superiores a la cebada se encuentran el sorgo y trigo, los cuales oscilaron entre 1450 a 3550 y 1200 a $2650 kg_{RCos} ha^{-1}$ respectivamente. Para estos cultivos, la fracción cosechable superó el 40% y en muchas zafras alcanzó el límite de 60%. En la figura 3 se observan fotografías de las diferencias cualitativas de la disponibilidad de rastrojo en el campo luego de cosechado el grano para los cultivos de soja (izquierda), sorgo (centro) y trigo (derecha).

Figura 3. Fotografías de los rastrojos inmediatamente después de cosechar el grano.



Izquierda: Soja; Centro: Sorgo; Derecha: Trigo

Seguidamente se encuentran los rastrojos de maíz, quienes presentaron rendimientos de rastrojo cosechable entre 2300 y $4500 \text{ kg}_{RCos} \text{ ha}^{-1}$, limitados en todas las zafras por la restricción de cosechar como máximo el 60% de lo generado. Por último, el cultivo de arroz es el que genera mayor cantidad de rastrojos cosechables (entre 4500 y $5500 \text{ kg}_{RCos} \text{ ha}^{-1}$) también limitando su cosecha al 60% de lo generado.

Contemplando los rendimientos de rastrojos cosechables de cada uno, así como el área sembrada por zafra para cada cultivo, a nivel nacional los rastrojos de arroz, soja y trigo han sido los generados en mayor cantidad, según se aprecia en la figura 4. Los rastrojos de arroz muestran una producción con pocas oscilaciones, superando los 800 Gg por año en la mayoría de las zafras. Los rastrojos de trigo, hasta la zafra del 2011/2012 fueron los de mayor disponibilidad alcanzando 1,6 millones de toneladas. A partir de la zafra del 2012/13 los rastrojos de soja fueron los principales (con excepción del 2017/18), superando las 700 Gg y alcanzando 1400 Gg en las zafras 2013/14 y 2014/15. De este modo se compensa el bajo rendimiento de rastrojo cosechable del cultivo de soja con su gran extensión superficial, siendo por lo tanto una de las biomásas residuales con mayor disponibilidad.

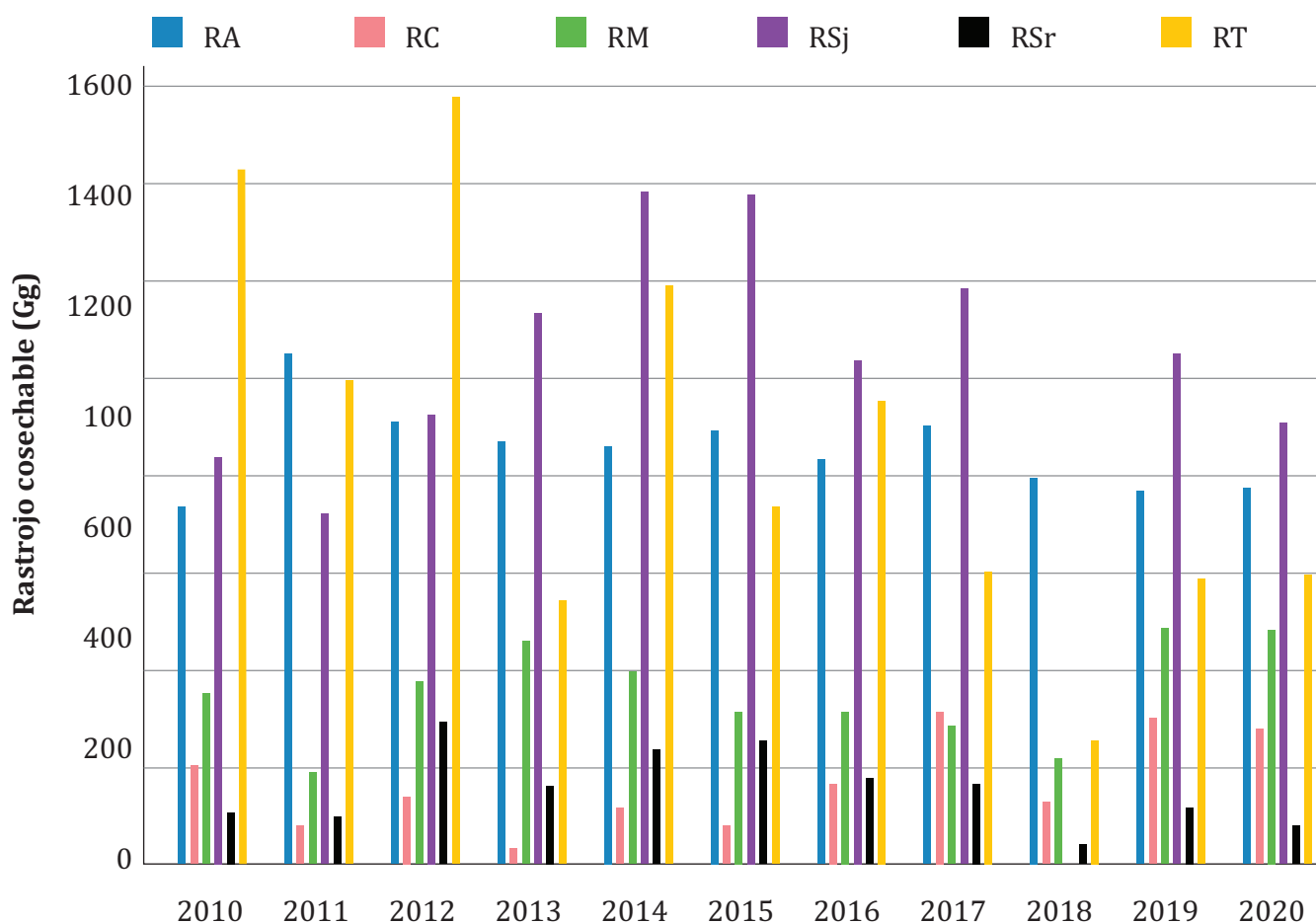
Los rastrojos de maíz son la cuarta biomasa en términos de masa disponible, los cuales han

alcanzado casi el medio millón de toneladas en los últimos años (con registro). Por debajo del maíz, en términos de rastrojo cosechable total, se posiciona la cebada desde la zafra de 2015/16, a partir de donde se alcanzó una disponibilidad entre 200 y 300 Gg por año. En último lugar se encuentran los rastrojos de sorgo, quienes muestran una tendencia a la baja en los últimos años con cantidades que no superan los 200 Gg por año.



Foto de Waldemar de Unsplash.

Figura 4. Evolución anual del rastrojo cosechable a nivel nacional



Potencial energético

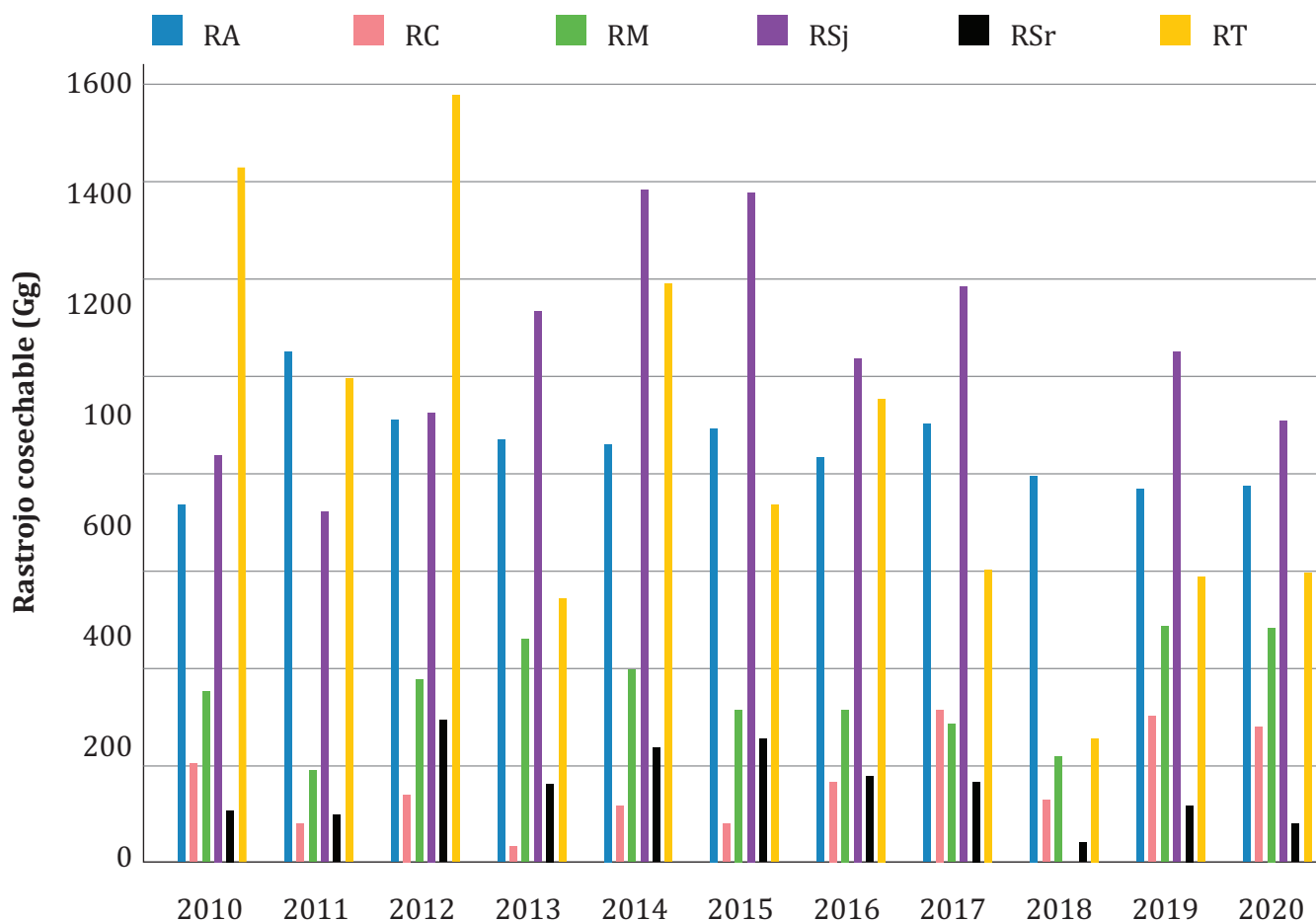
Hasta ahora se ha evaluado la disponibilidad en masa seca de cada biomasa residual. Debido a que los poderes caloríficos de las biomásas son relativamente similares, la densidad y potencial energético (térmico), determinados con las ecuaciones 5 y 6, presentan tendencias similares a las observadas para la disponibilidad en masa.

En la figura 5 se grafica la evolución temporal de la densidad energética, es decir, la capacidad de generación térmica a partir de la cosecha de una fracción de los rastrojos generados en una hectárea ($GJ ha^{-1}$). Se observa que los rastrojos de arroz fueron los de mayor densidad energética ($70 GJ ha^{-1}$ aproximadamente) y los de soja

los de menor densidad energética ($17 GJ ha^{-1}$ aproximadamente). Esto se debe a que son los cultivos con mayor y menor rendimiento de grano, o sea los de menor producción vegetal y por ende también menor rendimiento de rastrojo cosechable. En forma creciente respecto a la densidad energética se ordenan como soja, cebada, sorgo y trigo, maíz y por último arroz.

Considerando que el límite entre una industria “pequeña” y “mediana” en Uruguay es un consumo de 3000 toneladas de leña por año (con humedad próxima a 25% en b.h.) (Almeida, 2001), el equivalente en superficie necesaria para suplir la demanda energética de ese consumo de leña sería de 730 ha de arroz, 2350 ha de cebada, 870 ha de maíz, 3150 ha de soja, 1000 ha de sorgo o 1370 ha de trigo.

Figura 5. Evolución anual de densidad energética.



La densidad energética de cada rastrojo junto con la superficie cultivada, dan como resultado el potencial energético de generación térmica a nivel nacional para cada biomasa residual. Estos resultados, junto con los consumos de leña en el sector industrial, residencial y total (según el histórico de datos del Balance Nacional de Energía (BNE) (DNE-MIEM, 2019) se presentan en la figura 6.

Como principales resultados se destaca que los rastrojos de soja son los de mayor potencial energético a nivel nacional en los últimos años debido a que la soja fue el cultivo con más extensión territorial (representando aproximadamente el 28% del potencial total), seguido por los rastrojos de trigo y arroz (26 y 24% respectivamente).

El potencial energético de cada uno de estos rastrojos es suficiente (o al menos del orden) para satisfacer toda la demanda de leña del sector industrial o residencial del Uruguay, e inclusive para algunos años era posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de trigo o soja. Por lo tanto, si bien las cualidades como combustible de los rastrojos son inferiores a la de biomásas tradicionales (AUTOR, 2022), aprovechando estas biomásas residuales podría prescindirse de cultivos energéticos (con fines en la combustión directa³)⁴.

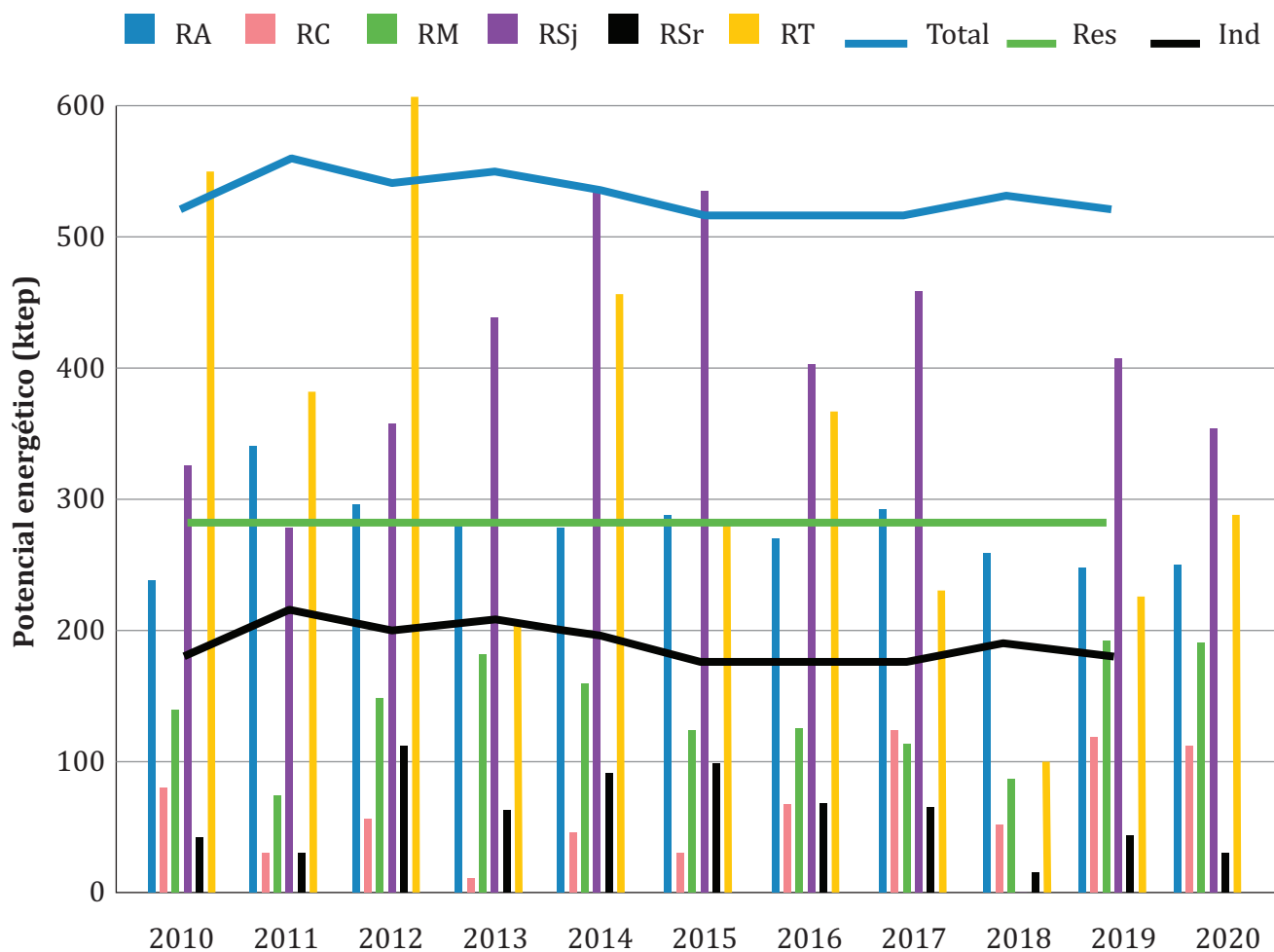
3 No se incluye cultivos energéticos con fines en la producción de biocombustibles como etanol, biodiesel, etc.

4 No obstante, una parte significativa de la leña del sector residencial y comercial es para cocción, la cual en principio no sería totalmente sustituible por rastrojos.

Los rastrojos de maíz son la cuarta biomasa residual estudiada en términos de potencial energético, la cual osciló entre 75 y 200 ktep⁵. Por debajo del maíz se posicionan los rastrojos

de cebada y sorgo, los cuales en ninguna zafra superaron las 120 ktep (10% del potencial total aproximadamente).

Figura 6. Evolución anual del potencial energético térmico disponible y consumos de leña total, industrial y residencial.



Este potencial energético principalmente se encuentra disponible en otoño/invierno debido a que varios de estos cultivos son de verano (arroz, maíz, soja y sorgo) por lo que su cosecha se realiza comenzando el otoño. De los últimos 8 años representados en la figura 6, dos tercios corresponden a rastrojos de cultivos de verano, mientras que el tercio restante a cultivos de invierno (27% trigo y 6% cebada).

En la tabla 2 se sintetiza el potencial energético disponible promedio, mínimo y máximo (ktep) de las últimas 11 zafas de cosecha para cada cultivo, así como su disponibilidad temporal (disponible en invierno y verano) y total nacional.

⁵ ktep: kilo tonelada equivalente de petróleo, 1 ktep = 41868 GJ

Tabla 2. Potencial energético disponible (ktep)

Biomasa	Promedio	Mínimo	Máximo
RA	277	238	341
RC	66,4	12,4	124
RM	140	75,2	193
RSj	410	0	356
RSr	60,8	16,1	113
RT	331	98,3	607
Disp. Invierno	887	361	1066
Disp. Verano	397	150	662
Total	1284	511	1577

Distribución geográfica

La distribución geográfica de la densidad energética por unidad de superficie total (no solo sembrada) determinada a partir de los datos del Censo Agropecuario de 2011 se presenta en las figuras 7 y 8.

A partir de estos resultados (figura 7c) se aprecia claramente que el mayor potencial energético (calculado como la sumatoria de todos los rastrojos cosechables) para el año 2011 se encontró en el litoral Oeste del país (Departamentos de Colonia, Soriano y Río Negro), superando en al-

gunas zonas los 35 $Gj\ ha^{-1}$. El mismo se dividió en partes similares entre rastrojos de cultivos de verano e invierno (figuras 7a y 7b), donde segregando por cultivo, el principal aporte lo realizó el trigo, seguido por la soja, sorgo y por último cebada y maíz (figura 8). Según se observó en la evolución temporal del potencial disponible (figura 6), el cultivo de trigo disminuyó a partir de la cosecha del 2013/2014 por lo que los mapas de disponibilidad total y estacional de los últimos años presentarían variaciones, inclinándose a mayor disponibilidad en el período frío debido a la cosecha de cultivos de verano.

Figura 7. Distribución geográfica de la densidad energética de rastrojos cosechables por estación para el 2011. (a) Disponible en otoño/invierno (b) Disponible en primavera/verano (c) Total anual.

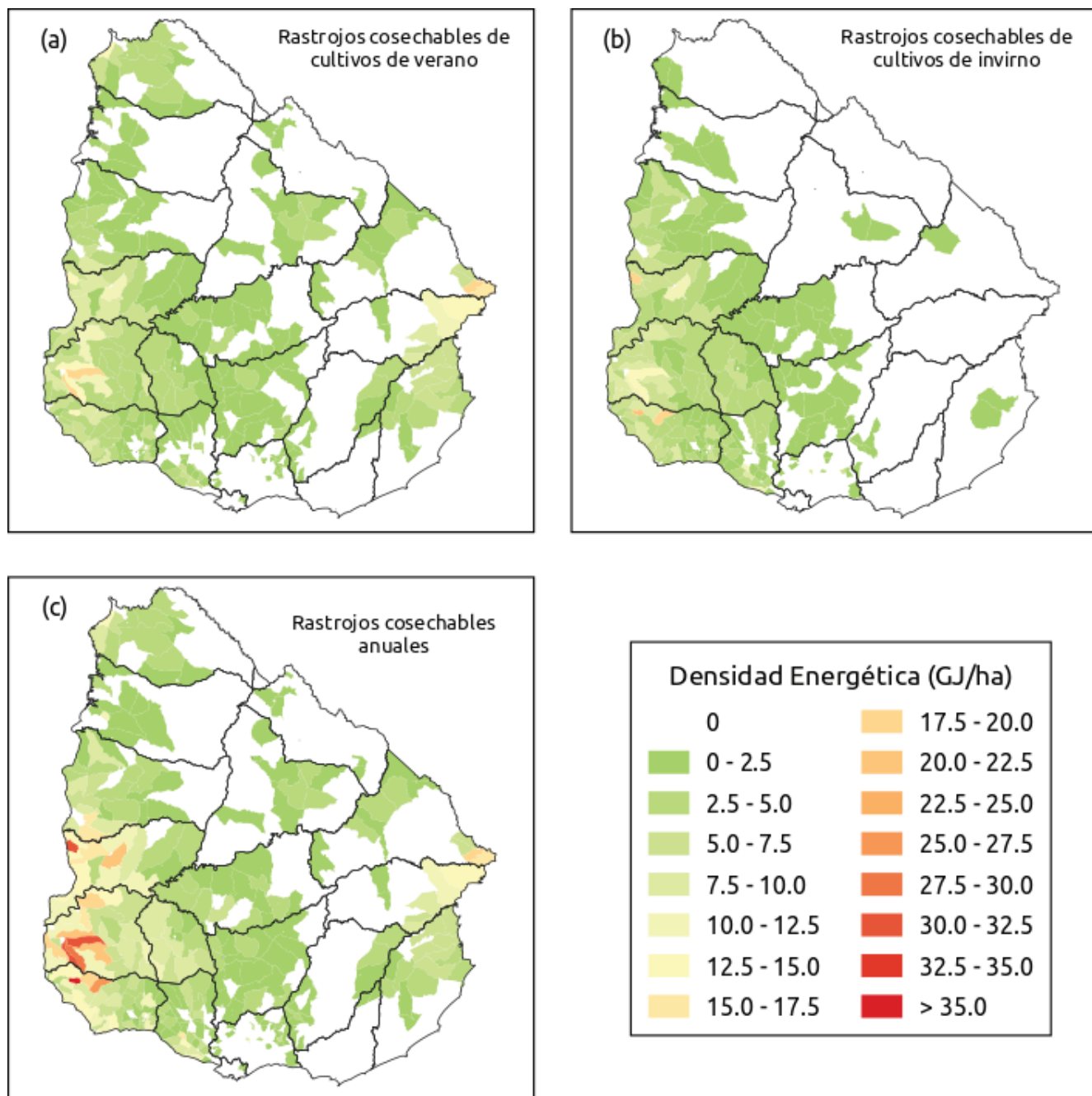
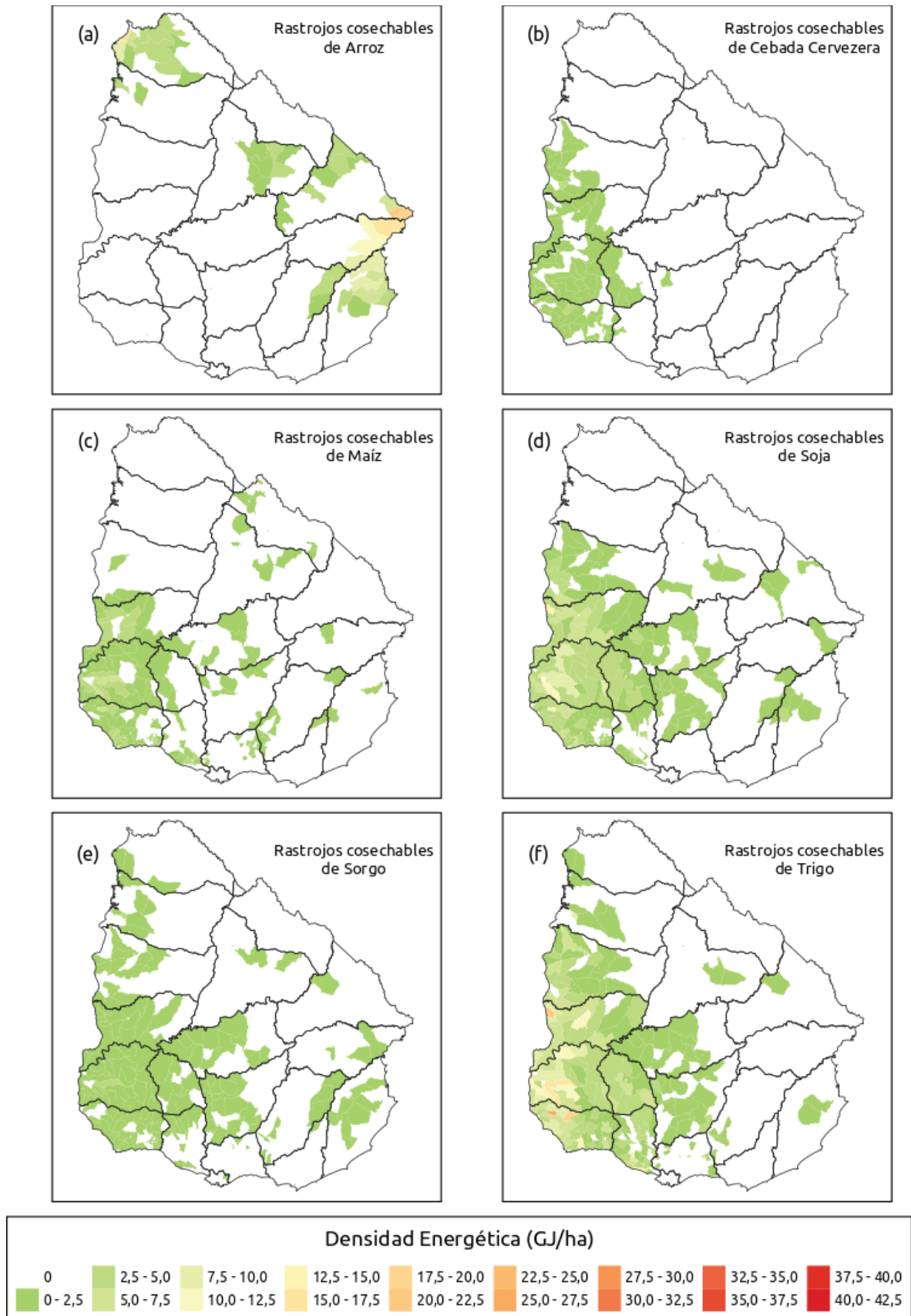


Figura 8. Distribución geográfica de la densidad energética de rastrojos cosechables por cultivo.



Otro foco importante de disponibilidad se encontró en el litoral Este, principalmente en los Departamentos de Cerro Largo y Treinta Y Tres, donde superó los 15 GJ ha^{-1} . Este foco se debe a la disponibilidad de rastrojos de arroz en esta región del país.

La zona Centro y Norte del país presentó disponibilidad de densidades energéticas menores, generalmente por debajo de 10 GJ ha^{-1} , la cual también se divide a grandes rasgos en partes similares entre cultivos de verano e invierno.

Analizando los cultivos de forma independiente, el cultivo de cebada se concentró en el litoral Oeste. Los cultivos de maíz y sorgo también se encontraron con mayor densidad en el litoral Oeste pero con presencia en el Centro y Este del país. Los cultivos de soja y trigo se extendieron por superficies muy similares, con mayores densidades en el litoral Oeste pero con presencia importante en el Centro del país y en menor medida en el Este. Por último, el cultivo de arroz se extendió por el litoral Este y Norte.

Por lo tanto, como análisis preliminar para un estudio de implementación de generación térmica a partir de la combustión de rastrojos, la región del litoral Oeste del país (Colonia, Soriano y Río Negro) es la de mayor concentración de potencial. Además, una planta de combustión de rastrojos debería ser diseñada para trabajar con una variedad de combustibles, pensando en la diversidad de combustibles disponibles y en la complementariedad entre invierno y verano.

CONCLUSIONES

A partir de la estimación de disponibilidad de biomasa residual y la cuantificación de su potencial energético se puede concluir que los rastrojos de cultivos presentan un potencial muy elevado, promediando 1284 ktep por año. Se destaca que la cosecha parcial de los rastrojos de soja, arroz o trigo fue suficiente para satisfacer la demanda de leña del Uruguay (industrial o residencial). En algunas zafras era

posible satisfacer toda la demanda nacional con rastrojos de un solo cultivo.

Existe una gran diferencia en la disponibilidad de biomasa o potencial energético total (a nivel nacional) y por unidad de superficie sembrada (rendimiento de rastrojo cosechable o densidad energética). A nivel nacional, el potencial energético de los rastrojos en los últimos años se ordenó de forma decreciente de la siguiente forma: soja, trigo y arroz, maíz, cebada y sorgo. Mientras que por unidad de superficie cultivada, la densidad energética de los mismos se ordena de forma decreciente como arroz, maíz, trigo y sorgo, cebada y por último soja. Dos tercios de este potencial suele estar disponible en otoño/invierno debido a que son residuos de la cosecha de cultivos de verano.

La disponibilidad de estos rastrojos se encontró principalmente en el litoral Oeste debido a las concentraciones de los cultivos de soja, trigo, sorgo, cebada y maíz. Algunos de estos cultivos también se extendieron por la zona Centro y en menor medida en el Este. Otro foco importante de disponibilidad de rastrojos se encuentra en el litoral Este debido al cultivo de arroz. Los cultivos que presentaron mayores valores de densidad energética por unidad de superficie total (no solo la cultivada) fueron los de soja y trigo en los Departamentos de Soriano y Río Negro, así como el arroz en los Departamentos de Cerro Largo y Treinta y Tres.

Como trabajos a futuro, complementario a los mapas de potencial energético, resulta relevante georeferenciar los focos de consumo de biomasa tradicional (industrias y ciudades) con la finalidad de matchear disponibilidad y consumo para identificar localizaciones y cultivos que minimicen el transporte.

Paralelamente, es de interés realizar ensayos de combustión en una planta piloto y/o en una instalación industrial con la finalidad de identificar los problemas tecnológicos más relevantes y analizar posibles soluciones. ■

REFERENCIAS

- Amanullah & Inamullah. (2016). Dry Matter Partitioning and Harvest Index Differ in Rice Genotypes with Variable Rates of Phosphorus and Zinc Nutrition. *Rice Science*. 23(2). 78–87.
- Avebiom. (2021). Asociación Española de Valorización Energética de la Biomasa. URL: <https://www.avebiom.org/>
- Barbosa-Cortez, L. A., Silva Lora, E. E. & Olivares-Gomez, E. (2008). *Biomassa para energia*. Editora da Unicamp.
- Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Elsevier Inc.
- Batidzirai, B., Valk, M., Wicke, B., Junginger, M., Daioglou, V., Euler, W. & Faaij, A. P. C. (2016). Current and future technical, economic and environmental feasibility of maize and wheat residues supply for biomass energy application: Illustrated for South Africa. *Biomass and Bioenergy*. 92. 106–129.
- Bird, N. (2011). Using a Life Cycle Assessment Approach to Estimate the Net Greenhouse Gas Emission of Bioenergy. *Technical report, International Energy Agency*.
- Bongiovanni, M. G. (2001). Crecimiento de cultivares de soja de gm iii al viii en fechas de siembra de octubre a diciembre, en villa mercedes, campañas agrícolas 1998/99 y 1999/00.
- AUTOR, Mantero, C., Siri, G., Tancredi, N., Amaya, A., Durante, A., Ibañez, A., Ernst, F., Braga, L., & Flores. M. (2017). Cuantificación y evaluación del potencial energético de residuos agrarios y agroindustriales no tradicionales. UdelaR, Montevideo, 2017.
- DIEA-MGAP. (2018). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Anuario Estadístico Agropecuario 2017.
- DIEA-MGAP. (2012). Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. *Censo general agropecuario 2011*.
- DIEA-MGAP. (2020). Oficina de estadísticas agropecuarias (DIEA) / Ministerio de ganadería, agricultura y pesca (MGAP). *Anuario estadístico agropecuario 2020*. URL: <https://descargas.mgap.gub.uy/DIEA/Anuarios/Anuario2020/ANUARIO2020.pdf>.
- Dirección Nacional de Energía (DNE) - Ministerio de Industria Energía y Minería (MIEM). (2019). *Balance Energético 2019*.
- Dirección Nacional de Energía (DNE). (2017). Mapas energéticos. Energía.
- EP. (2009). European Parliament. Renewable energy directive. Directive 200928/EC of the European Parliament and of the council. *Official Journal of the European Union*. 140. 16–62.
- Fan, J., Mcconkey, B., Janzen, H., Townley-smith, L. & Wang, H. (2017). Field Crops Research Harvest index – yield relationship for estimating crop residue in cold continental climates. *Field Crops Research*. 204. 153–157.
- Faroppa, F. (2010). Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional. *Energy Consulting Services SA*.
- Giuntoli, J., Boulamanti, A. K., Corrado, S., Motegh, M., Agostini, A. & Baxter, D. (2013). Environmental impacts of future bioenergy pathways: The case of electricity from wheat straw bales and pellets. *GCB Bioenergy*. 5(5). 497–512.
- Hinge, J. (2009). Elaboration of a Platform for Increasing Straw Combustion in Sweden, based on Danish Experiences. *Danish Technological Institute, Stockholm*.
- Horvat, I. & Dović, D. (2018). Combustion of agricultural biomass - Issues and solutions. *Transactions of Famena*, 42(1) 75–86.

- IPCC. (2006). Capítulo 5: Tierras de Cultivo. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. 1–74.
- Kemanian, A. R., Stöckle, C. O., Huggins, D. R. & Viega, L. M. (2007). A simple method to estimate harvest index in grain crops. *Field Crops Research*, 103. 208–216.
- Khaliq, Q. A., Karim, M. A.; Saleque, M. A., Haque, M. M., Karim, A. J. M. S. & Mamun, M. A. A.(2018). Evaluation of different fertilizer management guidelines for boro rice cultivation in south central coastal region of Bangladesh. *Annals of Agrarian Science*. 16(4). 466–475.
- Ley 15.239 (1981). Senado y la Cámara de Representantes de la República Oriental del Uruguay. *Uso y conservación de los suelos y de las aguas*.
- Lol, R. (2009). Corn Stover Removal for Expanded Uses Reduces Soil Fertility and Structural Stability. *Soil Science Society of American Journal*. 72. 418-426.
- López Moreda, I. (2016). The potential of biogas production in Uruguay. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54. 1580–1591.
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). (2018). Resolución N°397/18.
- Monteleone, M., Bernadette Cammerino, A. R., Garofalo, P. & Kami Delivand, M. (2015). Straw-to-soil or straw-to-energy? An optimal trade off in a long term sustainability perspective. *Applied Energy*. 154. 891–899.
- Naciones Unidas. (2019). Objetivos de Desarrollo Sostenible. URL: www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/
- AUTOR. Aprovechamiento energético de rastrojos en Uruguay Disertación doctoral, Universidad de la República, Uruguay. URL: <https://hdl.handle.net/20.500.12008/31283>
- Ritchie, H. & Roser, M. (2020). Energy. *Our World in Data*. URL: <https://ourworldindata.org/energy>
- Rodríguez Pleguezuelo, C. R., Durán Zuazo, V. H., Muriel Fernández, J. L. & Tarifa, D. F. (2011). Descomposición de hojarasca y reciclado del nitrógeno de frutales tropicales y subtropicales en terrazas de cultivo en la costa de Granada (SE España). *Comunicata Scientiae*. 2(1). 42–48.
- Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain M. S. & Mekhilef, S. (2011). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15, 2262–2289.
- Sastre, C. M., González-Arechavala, Y., & Santos, A. M. (2015). Global warming and energy yield evaluation of Spanish wheat straw electricity generation - A LCA that takes into account parameter uncertainty and variability. *Applied Energy*. 154:900–911.
- Tang, L., Gao, H., Yoshihiro, H. Koki, H., Tetsuya, N., Liu, T. S., Tatsuhiko, S. & Xu, Z. J. (2017). Erect panicle super rice varieties enhance yield by harvest index advantages in high nitrogen and density conditions. *Journal of Integrative Agriculture* 16(7). 1467–1473.
- UNE-EN 14918 (2011). Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico.
- Unkovich, M., Baldock, J. & Forbes, M. (2010). Variability in harvest index of grain crops and potential significance for carbon accounting: Examples from Australian agriculture. *Advances in Agronomy*.
- USDA-NRCS. (2006). Soil Quality National Technology Development Team. Crop Residue Removal For Biomass Energy Production: Effects on Soils and Recommendations. *Soil Quality - Agronomy Technical Note*. 19.
- Vassilev, S. V., Baxter, D., Andersen, L. K. & Vassileva, C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 89. 913–933.
- Werther, J., Saenger, M., Hartge, E. U., Ogada, T. & Siagi, Z. (2000). Combustion of agricultural residues. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26(1). 1–27.
- Whittaker, C., Li Borrion, A., Newnes, L. & McManus, M. (2014). The renewable energy directive and cereal residues. *Applied Energy*. 122:207–215.



Ministerio
de Industria,
Energía y Minería



VIII ENERGY
WEEK
NOVEMBER 2023

URUGUAY
NOVEMBER
6-10 / 2023

Save
theDATE



MEDICIÓN DEL EFECTO DE LAS PARTÍCULAS DE POLVO EN LA GENERACIÓN DE POTENCIA EN MÓDULOS SOLARES FOTOVOLTAICOS

*MEASUREMENT OF THE EFFECT OF DUST PARTICLES ON POWER GENERATION
IN SOLAR PHOTOVOLTAIC MODULES*

Adelmo Miranda ¹, Hector Villatoro ², Franklin Martinez ³

Recibido: 30/3/2023 y Aceptado: 9/5/2023
ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (96 - 109)
ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de Sungrow EMEA de Unsplash.

1 Universidad Tecnológica Centroamérica. Honduras
adelmojose1301@unitec.edu

2 Universidad Tecnológica Centroamérica. Honduras
hvillatoro@unitec.edu

3 Universidad Tecnológica Centroamérica. Honduras
franklin_martinez@unitec.edu



RESUMEN

La acumulación de partículas de polvo es un factor importante que puede afectar el rendimiento y la eficiencia de los módulos solares fotovoltaicos, puede reducir la cantidad de luz solar que llega a las células fotovoltaicas, lo que disminuye la cantidad de energía eléctrica generada. Además, la acumulación de partículas de polvo puede afectar la capacidad de los módulos solares para disipar el calor, lo que provoca un aumento de la temperatura del módulo y esto reduce la eficiencia de las células fotovoltaicas. El objetivo de esta investigación es medir el impacto de las partículas de polvo en la generación de potencia de los módulos solares fotovoltaicos sobre terracería y sobre concreto para determinar cómo la acumulación de partículas de polvo afecta su eficiencia. Para esta investigación se utilizaron dos módulos solares fotovoltaicos, uno de referencia (se limpiaba diariamente) y uno de prueba (sin limpieza), esto para medir la disminución de potencia generada por el módulo de prueba con respecto al módulo de referencia. También, se utilizó un contador de partículas de polvo para contar la cantidad de partículas de polvo acumuladas sobre la superficie del módulo solar fotovoltaico. Existieron pérdidas de hasta 17.9 W de potencia en el módulo de prueba con respecto al módulo de referencia, factores como la lluvia resultaron en una variación de potencia generada por el módulo solar fotovoltaico de prueba. La presente investigación define el efecto que tiene la acumulación de partículas de polvo en la reducción de potencia en los módulos solares fotovoltaicos.

Palabras clave: Módulo solar fotovoltaico, Acumulación de partículas de polvo, Pérdidas de potencia, Potencia máxima, Energía generada.

ABSTRACT

The accumulation of dust particles is an important factor that can affect the performance and efficiency of photovoltaic solar modules. It can reduce the amount of sunlight reaching the photovoltaic cells, which decreases the amount of electrical energy generated. Additionally, the accumulation of dust particles can affect the ability of the solar modules to dissipate heat, which results in an increase in module temperature and reduces the efficiency of the photovoltaic cells. This research aims to measure the impact of dust particles on the power generation of photovoltaic solar modules on soil and concrete surfaces to determine how the accumulation of dust particles affects their efficiency. For this research, two photovoltaic solar modules were used, one as a reference (daily cleaned) and the other as a test module (uncleaned), to measure the decrease in power generated by the test module with respect to the reference module. A dust particle counter was also used to count the amount of dust particles accumulated on the surface of the photovoltaic solar module. Results showed losses of up to 17.9 W in the test module with respect to the reference module. Factors such as rain resulted in variation in power generated by the photovoltaic solar modules. This research defines the effect that the accumulation of dust particles has on the reduction of power in photovoltaic solar modules.

Keywords: *Photovoltaic solar module, accumulation of dust particles, power losses, maximum power, energy generation*

INTRODUCCIÓN

La energía solar fotovoltaica se ha convertido en una de las tecnologías más prometedoras para la generación de energía limpia y renovable en el mundo. Según (Huld & Fthenakis, 2018)

la energía solar posee un alto potencial para satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica a nivel global. Si se gestiona de manera adecuada, la energía solar puede proveer aproximadamente el 23% de la demanda mundial de electricidad para el 2030, y aumentar a un 36% para el año 2050.

Los módulos solares fotovoltaicos son componentes vitales en los sistemas de energía solar y su eficiencia es crucial para maximizar la generación de energía eléctrica. De acuerdo con (Mohanty, 2021) la eficiencia de los módulos solares fotovoltaicos afecta significativamente la producción de energía, especialmente en áreas con altas temperaturas, fuentes cercanas de polvo y humedad.

La acumulación de partículas de polvo puede tener un impacto significativo en la eficiencia de la generación de energía de los módulos solares fotovoltaicos. En una investigación de la literatura científica sobre el impacto de las partículas de polvo en la generación de potencia en los módulos solares realizado por (Alghoul, Ali, & Hussain, 2019) encontró que la acumulación de polvo puede reducir la eficiencia de los módulos solares fotovoltaicos hasta en un 50% y también señaló que este es un problema común en muchas regiones del mundo, y que hay una necesidad urgente de desarrollar tecnologías y estrategias para mitigar este problema. (Kumar & Pandey, 2017) investigó el impacto de la acumulación de polvo en la superficie de los módulos solares. El estudio concluyó que la acumulación de polvo redujo la eficiencia de los módulos solares hasta en un 50%. (Kumar, Kumar, & Singh, 2013) en un estudio realizado en Rajasthan, India en el cual se investigó el efecto del polvo en la producción de energía de los módulos solares concluyeron que la acumulación de polvo reducía la producción de energía en un 17% en promedio. Además, se encontró que la reducción era mayor en los meses de verano debido a la acumulación de polvo y arena. De acuerdo con (Rosas & Gill, 2021), en un periodo de tres meses de operación en

una instalación de módulo solares fotovoltaicos sobre techo se registraron pérdidas de potencia y disminución de rendimiento de 17.91 – 3.27% respectivamente, esto debido a la acumulación de partículas de polvo sobre la superficie de los módulos solares fotovoltaicos y recomendaron que el tiempo de limpieza de los módulos debe realizarse cada tres meses.

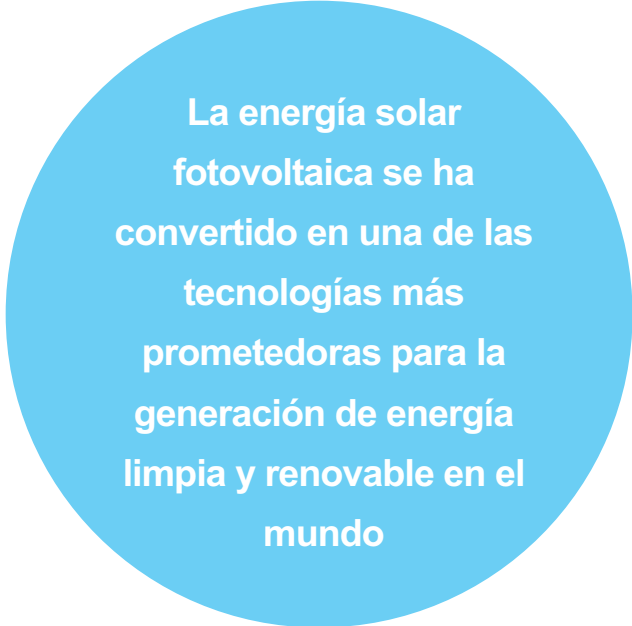
Similar a los estudios mencionados anteriormente, este estudio tiene como objetivo medir el impacto de las partículas de polvo en la generación de potencia de los módulos solares fotovoltaicos sobre dos superficies diferentes, terracería y concreto. Se realizaron mediciones de potencia y de partículas de polvo en dos módulos solares fotovoltaicos durante 10 días para cada superficie. Uno de los módulos se mantuvo en constante limpieza y el otro no se limpió ningún día.

Esta investigación está dividida en cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta el problema, así como los objetivos que se esperan cumplir en el estudio. El segundo capítulo es el marco teórico donde se explican todos los términos de la energía solar y los factores de ensuciamiento de los módulos solares fotovoltaicos. En el tercer capítulo se discute la metodología de la investigación, así como nuestra variable dependiente e independiente. En el cuarto capítulo se presentan los resultados y su análisis en función de los objetivos planteados. Para terminar el quinto capítulo presenta las conclusiones y se brindan recomendaciones para próximos estudios.

METODOLOGÍA

La investigación tiene un enfoque cuantitativo ya que se realizó una recolección y análisis de datos numéricos y estadísticos para obtener resultados cuantificables. Se recolectaron datos de corriente continua, voltaje continuo y potencia generada durante tres semanas para cada una de las siguientes superficies: terracería y concreto. El objetivo era determinar la potencia

generada por el módulo fotovoltaico y la acumulación de las partículas de polvo en un rango de tamaños que van desde 0.3 μm hasta 10 μm . Un módulo se mantuvo limpio como módulo de referencia, mientras que el otro se dejó sin limpiar para realizar comparaciones diarias y evaluar las pérdidas de potencia.



**La energía solar
fotovoltaica se ha
convertido en una de las
tecnologías más
prometedoras para la
generación de energía
limpia y renovable en el
mundo**

Para este estudio, nuestra variable independiente serán las partículas de polvo de 0.3 μm , 2.5 μm , y 10 μm presentes en el módulo solar. La acumulación de partículas de polvo sobre la superficie del módulo solar tendrá un efecto en la generación de potencia eléctrica del módulo solar. Nuestra variable dependiente será la generación de potencia eléctrica del módulo solar, ya que esta potencia eléctrica se verá afectada por la acumulación de partículas de polvo.

Durante un periodo de diez días, el estudio sobre terracería y concreto, en la ciudad de San Pedro Sula, Honduras la cual tiene en aproximado una irradiación global diaria de 5.2 kWh/m² (SOLARGIS, 2020), se llevó a cabo con dos módulos solares fotovoltaicos. Un módulo se mantuvo en constante limpieza como módulo de referencia y se limpió dos veces al día, a las 8 a.m. y antes de realizar las mediciones.

Para esto, se aplicó agua a temperatura ambiente sobre el panel con una toalla absorbente limpia para evitar cambios bruscos en la temperatura del módulo y se secó con una toalla absorbente sin aplicar agua sobre el módulo antes de realizar las mediciones. El otro módulo se mantuvo sin limpieza durante todo el estudio. Cabe resaltar que para este estudio no se tomaron en cuenta factores

como la humedad, temperatura de los módulos y otro tipo de suciedad.

Para este estudio se utilizaron módulos solares policristalinos de 445 W de potencia con las siguientes características:

Bajo las Condiciones de prueba estándar, irradiancia de $1,000 \text{ W/m}^2$

Tabla 1. Especificaciones de módulo solar utilizado para este estudio

Potencia máxima nominal	445 W
Voltaje de potencia máxima	40.9 V
Corriente de potencia máxima	10.89 A
Eficiencia del módulo	20.1%
Voltaje máximo del sistema	1500 V
Corriente de corto circuito	11.54 A
Voltaje de circuito abierto	48.9 V

Fuente: Elaboración propia con información tomada de (Ficha técnica de módulo solar CanadianSolar, 2020)

Para las mediciones eléctricas, se empleó un multímetro diseñado para módulos solares fotovoltaicos, que permitió conectar las salidas de los módulos con el multímetro. Para la medición de las partículas de polvo se utilizó un contador de partículas de polvo de $0.3 \mu\text{m}$, $2.5 \mu\text{m}$ y $10 \mu\text{m}$. Se hicieron un total de nueve mediciones diarias, comenzando a las 8:00 AM y terminando a las 5:30 PM. El método de conteo consistió en colocar el contador de partículas de polvo sobre la superficie del módulo solar sin despegarlo en ningún momento y pasar el contador de partículas de polvo por toda la superficie del módulo. Se programó el contador de partículas de polvo para hacer el conteo de partículas en un intervalo de 2 minutos. Al final de cada día, se registraron los datos, que fueron revisados y archivados en Excel.

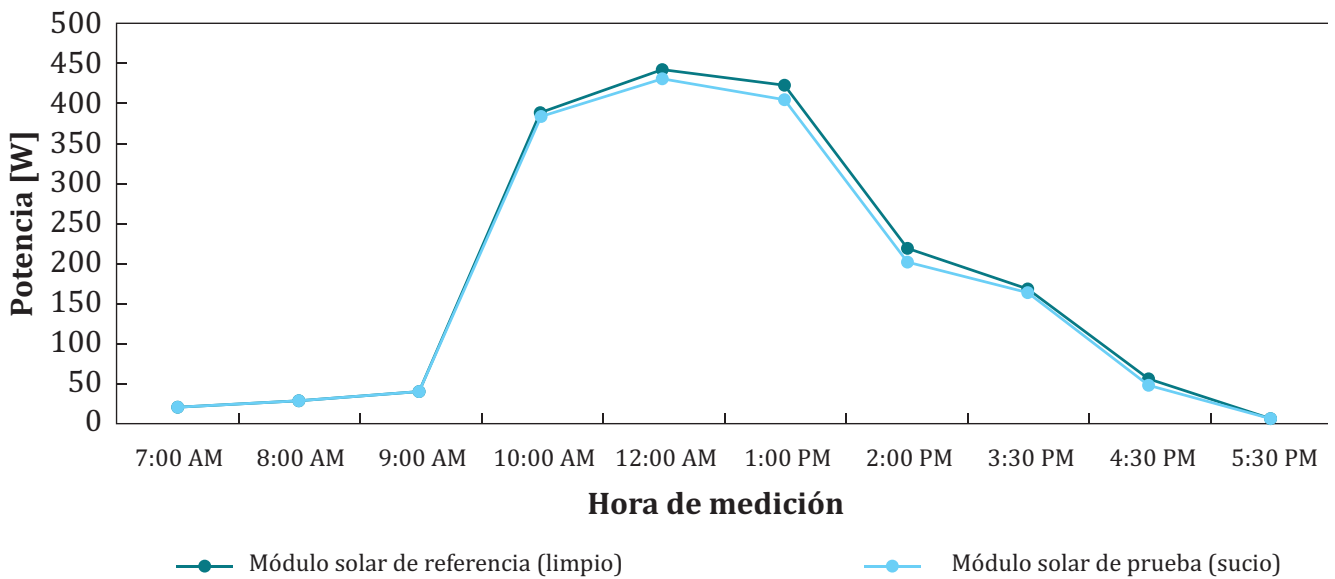
RESULTADOS Y ANÁLISIS

Se realizó una evaluación de las pérdidas de potencia nominal y el rendimiento de los módulos solares fotovoltaicos a través de cálculos de pérdidas de potencia. De la misma forma, se investigó cómo el incremento de la cantidad de partículas de polvo acumulado incide en las pérdidas nominales de potencia. En este estudio, se descartó la contaminación generada por los seres vivos, como el excremento de aves, así como también la presencia de objetos o cuerpos de un tamaño mayor a $10 \mu\text{m}$.

A. Para las mediciones sobre terracería obtuvimos los siguientes resultados

El día que se presentó la mayor cantidad de pérdidas de potencia sobre terracería fue el tercer día de medición, se presentaron pérdidas de 17.9 W en el módulo solar de prueba con respecto al módulo solar de referencia.

Figura 1. Comparación de módulo solar de referencia con módulo solar de prueba

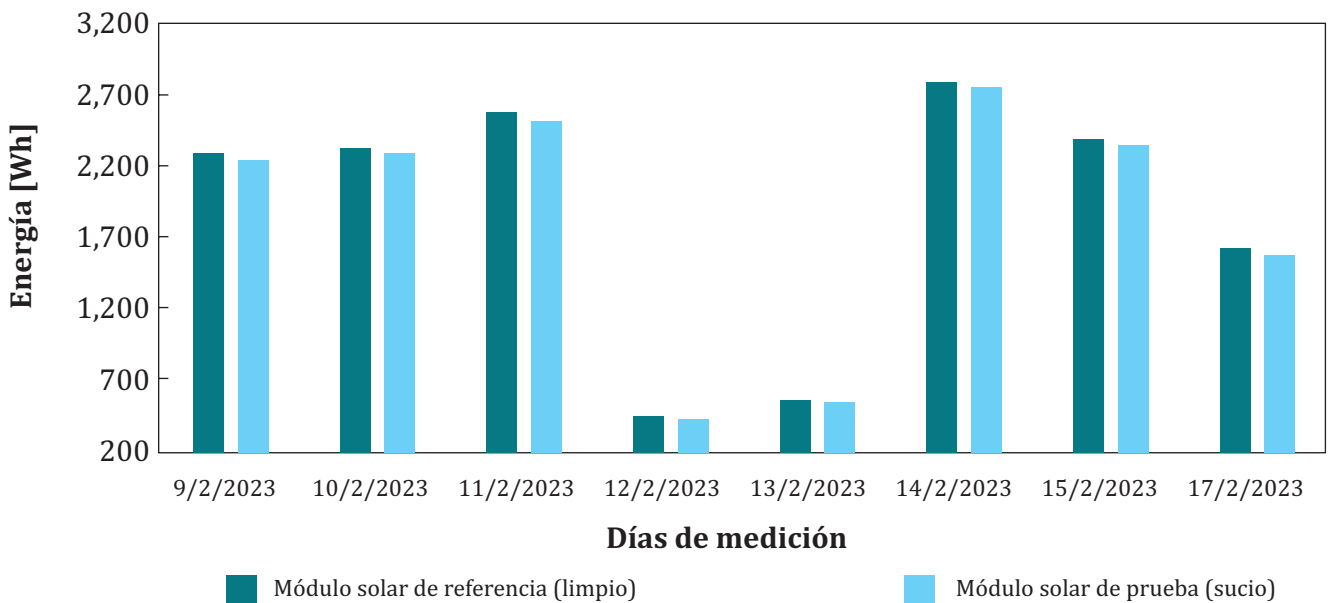


Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de pérdidas de energía se utilizó la suma de Reimann, la cual consiste en una suma de aproximación del área bajo la curva de la potencia eléctrica generada por ambos módulos solares. La mayor cantidad de energía eléctrica generada por el módulo solar de referencia (limpio) fue de 2,793.61 Wh, mientras el módulo

solar de prueba (sucio) la mayor cantidad de energía eléctrica que generó fueron 2,748.50 Wh. La mayor cantidad de pérdidas de energía eléctrica en el módulo solar de prueba (sucio) se presentó el tercer día de medición (11 de febrero), se registraron pérdidas de 59.31 Wh durante el día.

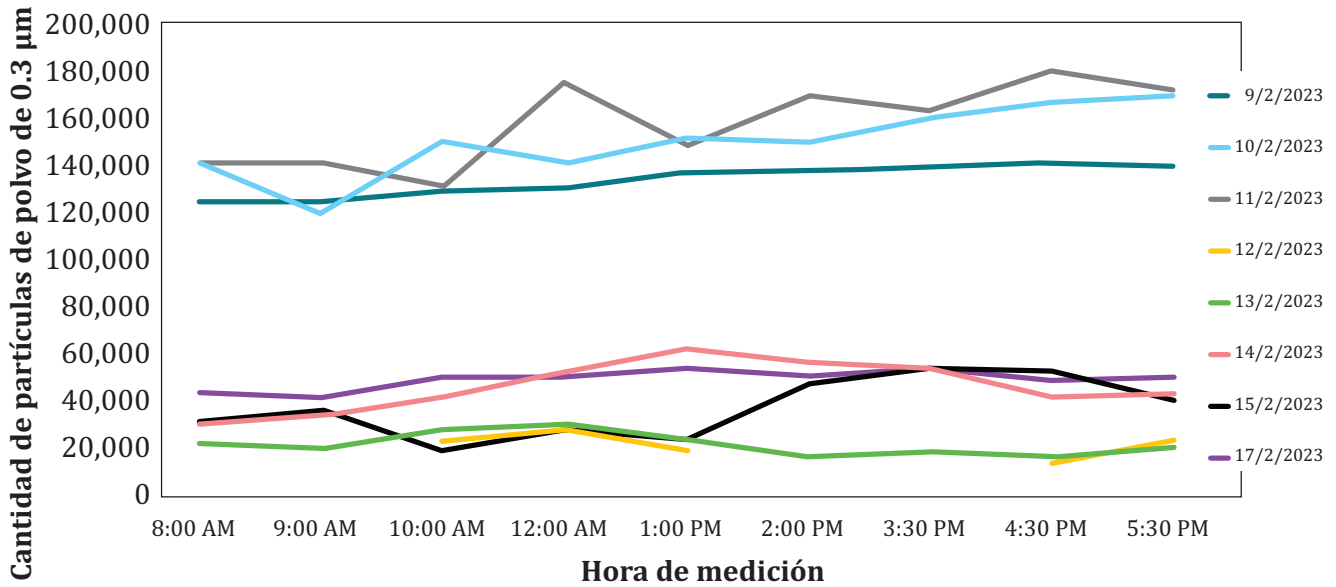
Figura 2. Energía eléctrica generada por ambos módulos solares



Fuente: Elaboración propia

Durante los diez días de medición se encontraron la siguiente cantidad de partículas de polvo de 0.3 µm, 2.5 µm, y 10 µm.

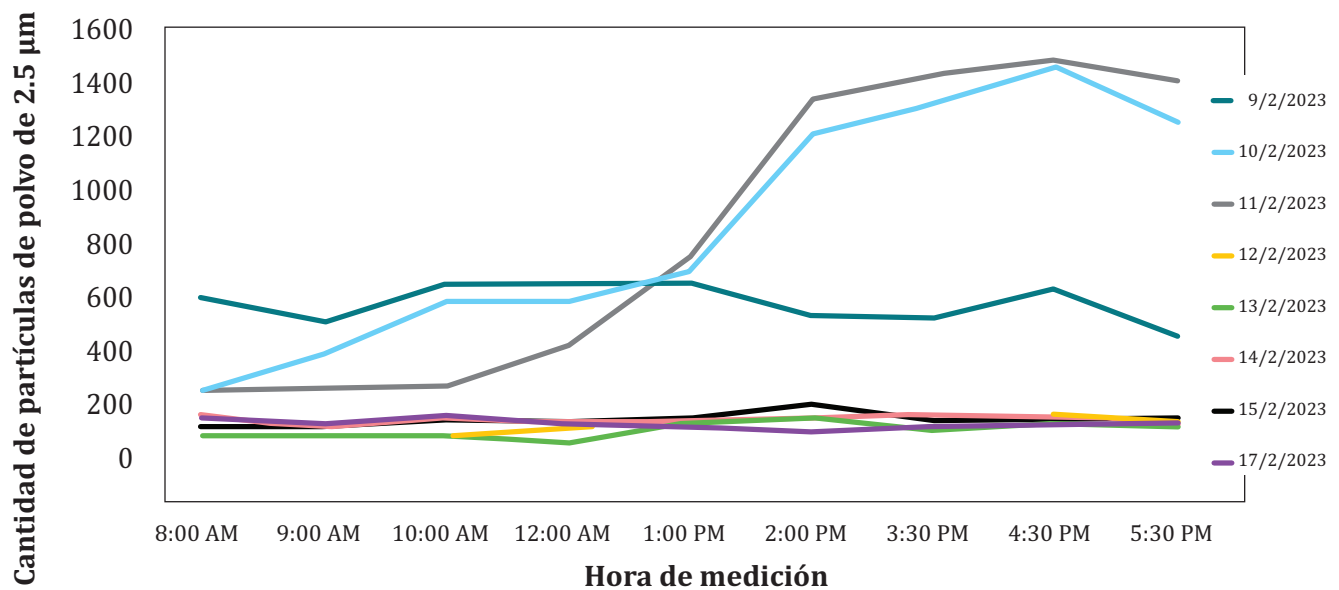
Figura 3. Cantidad de partículas de polvo de 0.3 µm en módulo solar de prueba



Fuente: Elaboración propia

El día 11 de febrero a las 12:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 0.3µm incrementó linealmente con un total de 175,120 partículas.

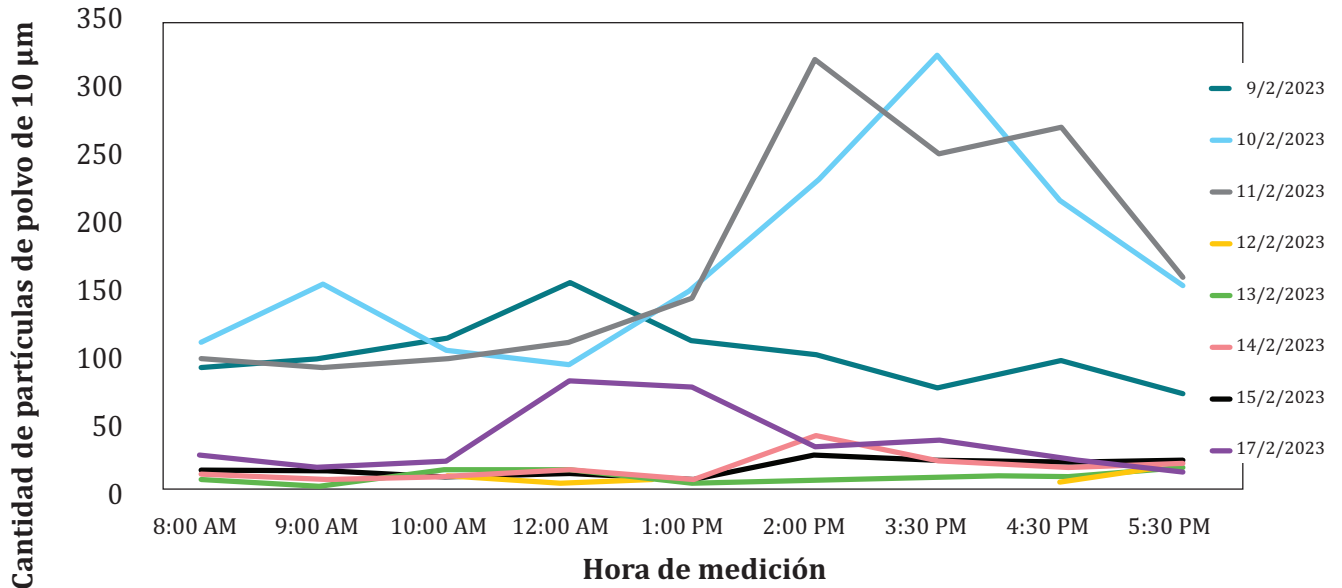
Figura 4. Cantidad de partículas de polvo de 2.5 µm en módulo solar de prueba



Fuente: Elaboración propia

El día 11 de febrero a las 12:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 2.5µm incrementó linealmente con un total de 1,470 partículas.

Figura 5. Cantidad de partículas de polvo de 10 µm en módulo solar de prueba



Fuente: Elaboración propia



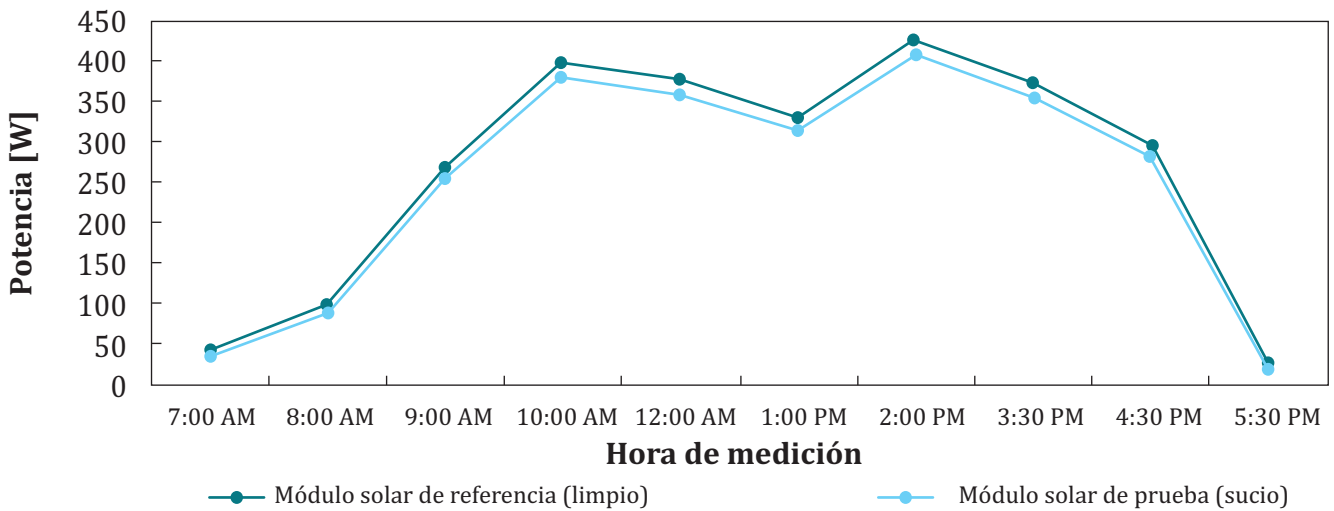
Foto de Forrest Cavale de Unsplash.

El día 11 de febrero a las 12:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 10µm incrementó linealmente con un total de 270 partículas.

B. Para las mediciones sobre terracería obtuvimos los siguientes resultados

El día que se presentó la mayor cantidad de pérdidas de potencia sobre terracería fue el tercer día de medición, se presentaron pérdidas de 18.4 W en el módulo solar de prueba con respecto al módulo solar de referencia.

Figura 6. Comparación de módulo solar de referencia con módulo solar de prueba

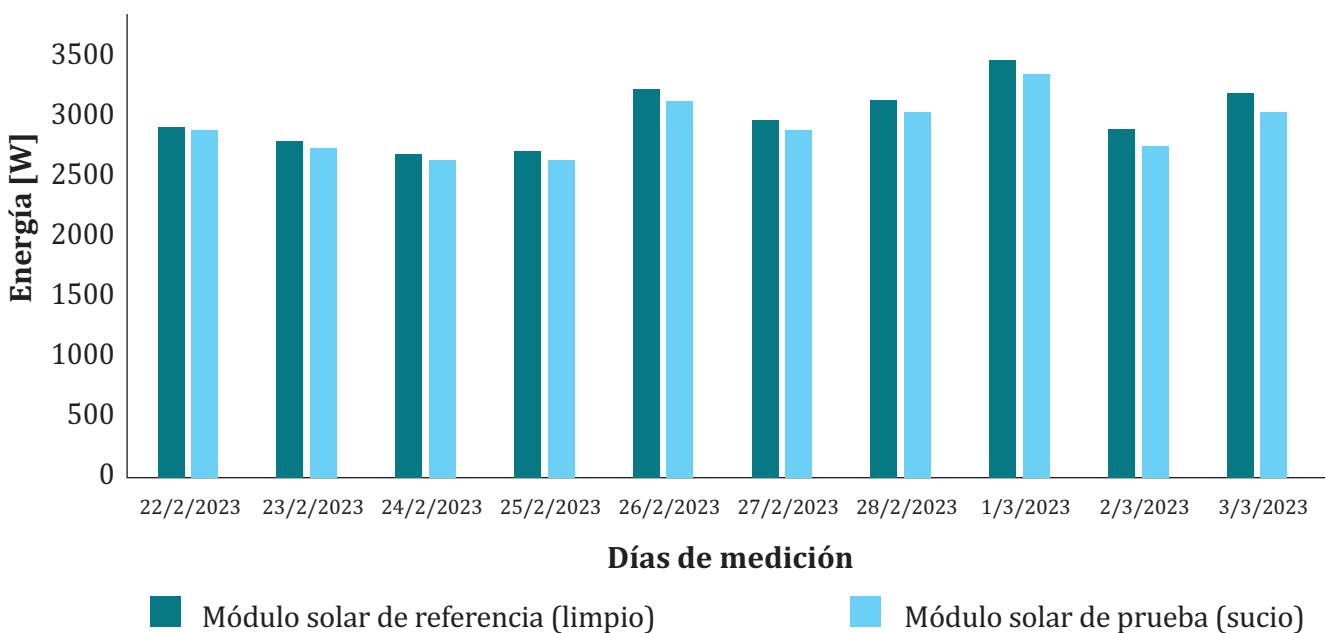


Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de la energía eléctrica generada por el módulo solar de referencia y por el módulo solar de prueba se utilizó la suma de Reimann, la cual consiste en una suma de aproximación del área bajo la curva de la potencia eléctrica generada por ambos módulos solares. La mayor cantidad de energía eléctrica generada por el módulo de referencia fue de

3419.25 Wh, mientras el módulo solar de prueba la mayor cantidad de energía eléctrica que generó fueron 3301.2 Wh. La mayor cantidad de pérdidas de energía eléctrica en el módulo solar de prueba sucio se presentó el último día de medición (3 de marzo), se registraron pérdidas de 157.15 Wh durante el día.

Figura 7. Energía eléctrica generada por ambos módulos solares

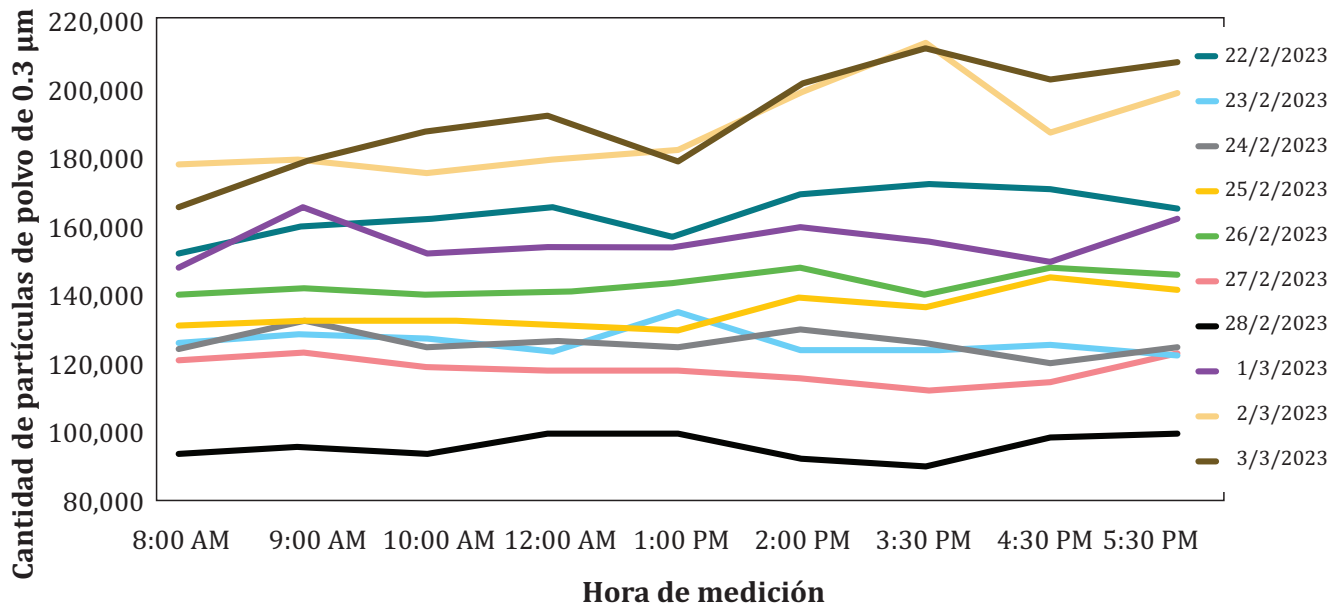


Fuente: Elaboración propia

El día 3 de marzo a las 3:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 0.3µm incrementó linealmente con un total de 211,457

partículas. Durante el tiempo de medición no se presentó ningún tipo de lluvia, lo cual es óptimo para nuestro estudio, ya que las partículas de polvo no fueron limpiadas por la lluvia.

Figura 8. Cantidad de partículas de polvo de 0.3 µm en módulo solar de prueba

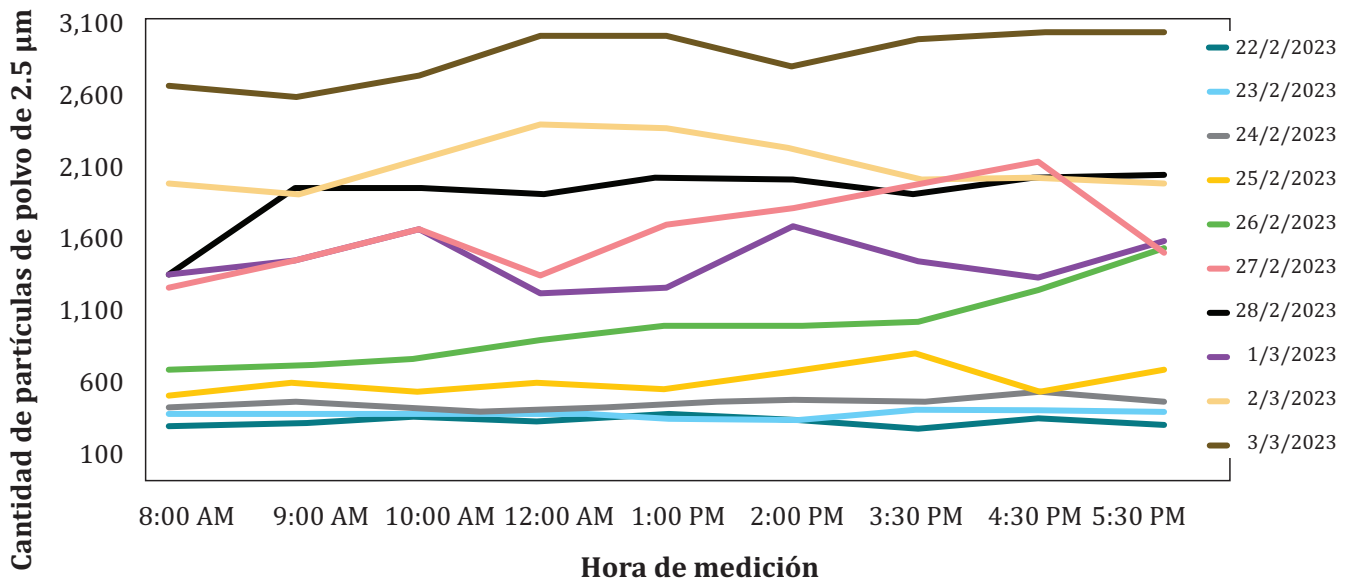


Fuente: Elaboración propia

El día 3 de marzo a las 3:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 2.5µm incrementó linealmente con un total de 2,951 partículas. Durante el tiempo de medición no se presentó ningún tipo de lluvia, lo cual es óptimo para nuestro estudio, ya que las partículas de polvo no fueron limpiadas por la lluvia.

Cuando hay una acumulación de partículas sobre la superficie de un módulo solar, se reduce la cantidad de luz solar que llega a las células fotovoltaicas, por ende, la generación de energía disminuye.

Figura 9. Cantidad de partículas de polvo de 2.5 µm en módulo solar de prueba

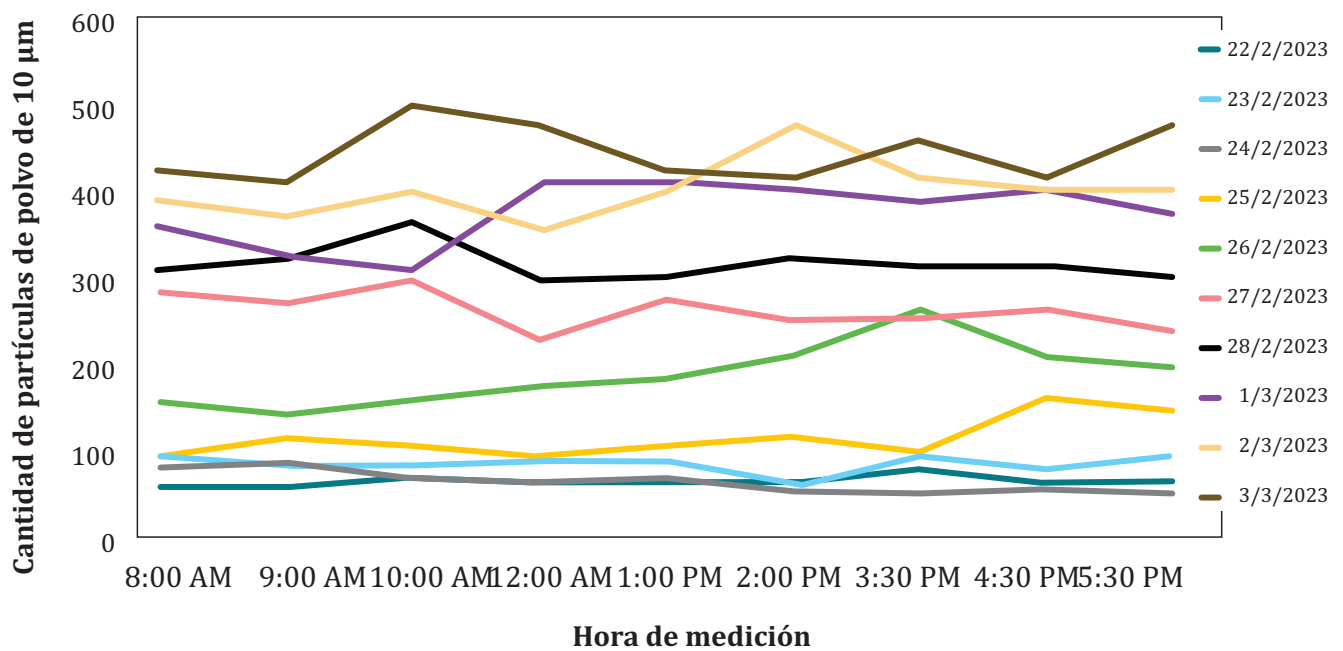


Fuente: Elaboración propia

El día 3 de marzo a las 3:30 PM fue el día que se registró la mayor cantidad de pérdidas de potencia en el módulo de prueba y de la misma manera el incremento de partículas de polvo de 10µm incrementó linealmente con un total de

458 partículas. Durante el tiempo de medición no se presentó ningún tipo de lluvia, lo cual es óptimo para nuestro estudio, ya que las partículas de polvo no fueron limpiadas por la lluvia.

Figura 10. Cantidad de partículas de polvo de 10 µm en módulo solar de prueba



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

La acumulación de partículas de polvo ha sido una gran problemática para la generación de potencia eléctrica en los módulos solares fotovoltaicos. Cuando hay una acumulación de partículas sobre la superficie de un módulo solar, se reduce la cantidad de luz solar que llega a las células fotovoltaicas, por ende, la generación de energía disminuye. De igual forma, la eficiencia de un módulo solar se ve afectada debido a la acumulación de partículas de polvo, lo cual representa una pérdida en el retorno de la inversión para proyectos a gran escala. Para este estudio se realizaron mediciones de potencia y de partículas de polvo en diferentes horas del día en dos módulos solares, uno se utilizó como módulo solar de referencia (limpieza diaria) y el otro se utilizó como módulo solar de prueba (sucio), se hizo esto para poder medir como afecta la acumulación de partículas de polvo en el módulo solar de prueba en comparación con el módulo solar de referencia. Se obtuvo los siguientes resultados:

- El porcentaje de pérdidas del módulo solar de prueba con respecto al módulo solar de referencia fue en promedio de 5% sobre concreto y de 3.81% en promedio sobre terracería, durante diez días de medición para cada una de las superficies.
- Durante diez días de medición sobre concreto se concentraron un total de 207,921 partículas de polvo de 0.3 μ m, 2,987 partículas de polvo de 2.5 μ m y 498 partículas de polvo de 10 μ m. Para terracería se encontraron un total de 179,250 partículas de polvo de 0.3 μ m, 1,401 partículas de polvo de 2.5 μ m, y 313 partículas de polvo de 10 μ m.
- La mayor cantidad de pérdidas de potencia eléctrica en el módulo solar de prueba fueron de 17.9 W sobre terracería y de 18.6 W sobre concreto.

- La energía eléctrica generada por el módulo solar de prueba fue inferior en promedio un 2.91% con respecto al módulo solar de referencia sobre concreto, siendo 157.15 Wh la mayor pérdida registrada en un día de medición. Sobre terracería la energía eléctrica fue inferior en promedio un 2.3% con respecto al módulo solar de referencia, siendo 59.31Wh la mayor pérdida registrada en un día de medición.

La mayor limitante para esta investigación fueron las condiciones climatológicas. Durante nuestras mediciones sobre terracería se presentaron lluvias y cielos completamente nublados durante los últimos cinco días de medición, lo cual resultó en la limpieza natural de nuestro módulo solar de prueba y por ende existe poca variación entre la potencia generada por ambos módulos solares. De la misma forma, los días en los que había presencia de lluvia a la hora de realizar las mediciones correspondientes se decidió no realizar mediciones de partículas de polvo ya que se pondría en riesgo el equipo.

A pesar de la limitación mencionada en el párrafo anterior, se considera que los resultados obtenidos en este estudio tienen una aplicación práctica importante en el diseño de sistemas fotovoltaicos. En particular, se estima que estos resultados pueden ser utilizados en programas de simulación como PVsyst, donde se requiere una evaluación precisa de las pérdidas asociadas a la suciedad de los módulos solares. ■

REFERENCIAS

- Alghoul, M., Ali, S., & Hussain, S. (2019). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Aparicio, M. P. (2010). *Radiación solar y su aprovechamiento energético*. 2010 Maracombo S.A .
- Bergin, M., Ghoroi, C., Dixit, D., & Schauer, J. (2017). Large Reductions in Solar Energy Production Due to Dust And Particulate Air Pollution. *ACS Publications*.
- Biomass Users Networ- Costa Rica . (2002). *Manuales sobre energía renovable: Solar Fotovoltaica*. San José.
- Bulnes, C. A., & Brown, R. B. (2010). *Energía del sol*. 16.
- CandianSolar. (Mayo de 2020). *Canadian Solar*. Obtenido de https://www.canadiansolar.com/wp-content/uploads/2019/12/Canadian_Solar-Datasheet-HiKu_CS3W-MS_EN.pdf
- Carballo, G. (2016). La importancia del uso de paneles solares en la generacion de energía eléctrica . *REDVET*, 1-4.
- Carreras, M. B. (2019). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Editex.
- Castejón, A., & Santamaria, H. G. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid: Editex.
- Costa, S., Diniz, A., & Kazmerski, L. (2015). Dust and soiling issues and impacts realting to solar energy systems. *ScienceDirect*.
- Darwish, Z. A. (2013). Effect of Dust on Photovoltaic Performance Review and Research Status. *ResearchGate*.
- Duque, P. N. (2016). *Análisis de factores que influyen en la suiedad de paneles fotovoltaicos y su efecto sobre la producción de energía eléctrica*. Sevilla.
- ENEE. (Mayo de 2022). *Boletin estadístico Mayo 2022*. Obtenido de <http://www.enee.hn/planificacion/2022/junio/Boletin%20Estadistico%20MAYO%202022.pdf>
- Fuentes, C. (2020). *REVE*. Obtenido de <https://www.evwind.com/2010/12/20/honduras-estan-entre-los-paises-con-mejor-potencial-en-energia-solar/>
- García, J. E., Sepúlveda, S., & Ferreira, J. (2018). Viabilidad técnico-económica de un sistema fotovoltaico en una planta de tratamiento de agua. *INGE CUC*, 41-51.
- Google Earth. (3 de Febrero de 2023). Obtenido de <https://earth.google.com/web/>
- Huld, T., & Fthenakis, V. (2018). *A global review of solar photovoltaic electricity market*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Kumar, G., Kumar, S., & Singh, S. (2013). Effects of Dust on the Performance of Solar Photovoltaic Modules. *Renewable Energy*.
- Kumar, V., & Pandey, A. (2017). *Performance analysis of photovoltaic modules under dust accumulation condition*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Mohanty, S. (2021). *Performance of analysis of different types of solar photovoltaic modules*. *Energy Reports*.
- Moore, D., & McCabe, G. (2019). *Introduction to the Practice of Statistics*. Freeman.
- Ojea, L. (2019 de Agosto de 2019). *El periódico de la energía*. Obtenido de <https://elperiodicodelaenergia.com/la-contaminacion-reduce-la-cantidad-de-electricidad-que-generan-los-paneles-solares-para-autoconsumo-en-las-ciudades/>
- Oliva, A. C., & Herranza, G. S. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Madrid : Editex.

- Pacheco, S. T., Pérez, F. J., Lieberman, G., & Luna, A. L. (2018). Eficiencia en paneles solares. *Revista del Diseño Innovativo*, 13.
- Pantaleón, I. (1 de Abril de 2022). *Forbes Centroamerica*. Obtenido de <https://forbescentroamerica.com/2022/04/01/energia-solar-en-honduras-el-pais-es-el-quinto-lugar-en-capacidad-instalada-en-latinoamerica>
- Pérez, J. A. (Septiembre de 2007). *Revista de la sociedad química del Perú*. Obtenido de http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2007000300007
- Rivera, N. R., & Ramírez, M. Á. (2019). *Medición de la eficiencia energética de los paneles solares de silicio*. Centro de Investigación en materiales avanzados.
- Rosas, H. M., & Gill, L. F. (2021). *Influencia de la acumulación de polvo en la generación de potencia en módulos fotovoltaicos*. Chimbote: Universidad Nacional del Santa.
- Sepúlveda, E. S. (9 de Enero de 2018). *Phineal*. Obtenido de <https://www.phineal.com/el-polvo-enemigo-silencioso-de-la-energia-solar/>
- Serrano, J. C. (2016). *Configuración de instalaciones solares fotovoltaicas*. Paraninfo.
- SOLARGIS. (2020). *SOLARGIS*. Obtenido de <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/honduras>
- SolarPlak. (2020). *SolarPlak*. Obtenido de <https://solarplak.es/energia/diferencias-entre-silicio-monocristalino-y-policristalino/#:~:text=Mientras%20que%20el%20silicio%20monocristalino,m%C3%A1s%20energ%C3%ADa%20solar%20fotovoltaica%20produce.>
- TECNOSOL. (4 de Mayo de 2017). *Características eléctricas de los paneles solares*. Obtenido de <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>
- UNITEC. (6 de Octubre de 2021). *Blog Unitec*. Obtenido de <https://blog.unitec.edu/2021/10/06/honduras-el-pais-de-centroamerica-con-la-planta-solar-fotovoltaica-mas-grande/>
- Vargas, F. L. (2021). *Efecto de la suciedad en el desempeño de módulos fotovoltaicos en Bogotá*. Bogotá : Universidad Distrital Fransisco Jose de Caldas .
- Vásquez, M. C. (2015). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. Cano Pina.
- Yang, C., Huang, C., Chiu, H., & Lan, S. (2004). *Effects of occupational dust exposure on the respiratory health of Portland cement workers*. PubMed.

COMUNIDADES ENERGÉTICAS: MODELOS PARA EL EMPODERAMIENTO DE LOS USUARIOS EN COLOMBIA

ENERGY COMMUNITIES: MODELS FOR USER EMPOWERMENT IN COLOMBIA

Juan Molina Castro ¹, Luisa F. Buitagro ², Sandra Téllez ³, Sandra Giraldo ⁴, Jaime Zapata ⁵

Recibido: 31/3/2023 y Aceptado: 8/5/2023

ENERLAC. Volumen VII. Número 1. Julio, 2023 (110 - 133)

ISSN: 2602-8042 (impreso) / 2631-2522 (digital)



Foto de NASA en Unsplash.

1 Colombia Inteligente. Colombia
juandavid.molina@colombiainteligente.org
<https://orcid.org/0000-0002-7922-2276>

2 Colombia Inteligente. Colombia
luisa.buitrago@colombiainteligente.org

3 Universidad Nacional. Colombia
smtellezg@unal.edu.co
<https://orcid.org/0000-0002-8303-3611>

4 Colombia Inteligente
sayagire@gmail.com

5 XM Colombia Inteligente. Colombia
jazapata@xm.com.co

RESUMEN

La energía comunitaria puede considerarse como un mecanismo que permite que las personas se unan para decidir de forma autónoma sobre la energía que usan, principalmente gestionando energías renovables y servicios relacionados con ellas. Este artículo presenta un panorama general de las comunidades energéticas (CE) y a partir de un análisis comparativo de casos internacionales y del análisis del contexto local, presenta modelos referenciales de CE para soportar la transformación energética y el empoderamiento del usuario en Colombia, considerando sus principales características junto con los modelos de gobernanza y los esquemas transaccionales correspondientes. Estos modelos se plantean a partir de una metodología que puede adaptarse para otros países; también se incluye un análisis de brechas y recomendaciones para la implementación de las CE. Las clasificaciones, esquemas y modelos presentados en este artículo pueden ser de utilidad para el desarrollo de proyectos de energía comunitaria a cualquier nivel y también buscan promover el desarrollo de las comunidades energéticas de forma sistémica, incluyendo aspectos sociales, técnicos, ambientales, financieros, regulatorios y políticos.

Palabras clave: Comunidades Energéticas, Recursos Energéticos, Modelo Comunidad Energética, Gobernanza, Esquema Transaccional.

ABSTRACT

Community energy can be considered as a mechanism that allows people to come together to autonomously decide on the energy they use, mainly by managing renewable energies and related services. This article presents an overview of community energy (CE) and from a comparative analysis of international cases and the analysis of the local context, presents the CE models to support energy transformation and user empowerment in Colombia, considering their main characteristics along with the corresponding governance models and transactional schemes. These models are based on a methodology that can be adapted for other countries; gap analysis and recommendations for the implementation of the EC are also included. The classifications, schemes, and models presented in this article can be useful for the development of community energy projects at any level and also seek to promote the development of energy communities in a systemic way, including technical, environmental, financial, regulatory, and political aspects.

Keywords: Community Energy, Energy Resources, Models, Governance, Transactional scheme.

INTRODUCCIÓN

La transformación energética es necesaria para crear un sistema energético más eficiente, colaborativo y descentralizado, que también ayude a combatir el cambio climático. Uno de los mecanismos para lograr esto es el desarrollo de comunidades energéticas, que permiten a los ciudadanos colaborar en la gestión de sus necesidades energéticas y la sostenibilidad de sus territorios (Lode, Boveldt, Coosemans, & Ramirez Camargo, 2022), (Sæle, Morch, Buonanno, Caliano, & Papadimitriou, 2022), utilizando tecnologías como fuentes renovables de energía, medidores inteligentes, vehículos eléctricos y almacenamiento de energía (Bastos & Trevizan, 2023).

Las comunidades energéticas son un nuevo actor en el sector, que permiten la participación ciudadana y la democratización de la energía (Rescoop.eu / *Electra energy cooperative*/ Heinrich Boell Foundation Office, 2021). Además, las comunidades energéticas pueden mejorar el bienestar social y habilitar oportunidades para que los ciudadanos tengan voz y opciones en la configuración de la transición energética (Hanke, Guyet, & Feenstra, 2022). Algunos de los beneficios sociales que buscan las comunidades energéticas son: construcción de tejido social, autonomía energética, empoderamiento de los consumidores, oportunidades de empleo y mejoramiento del espacio público (Savelli & Mosrty, 2021).

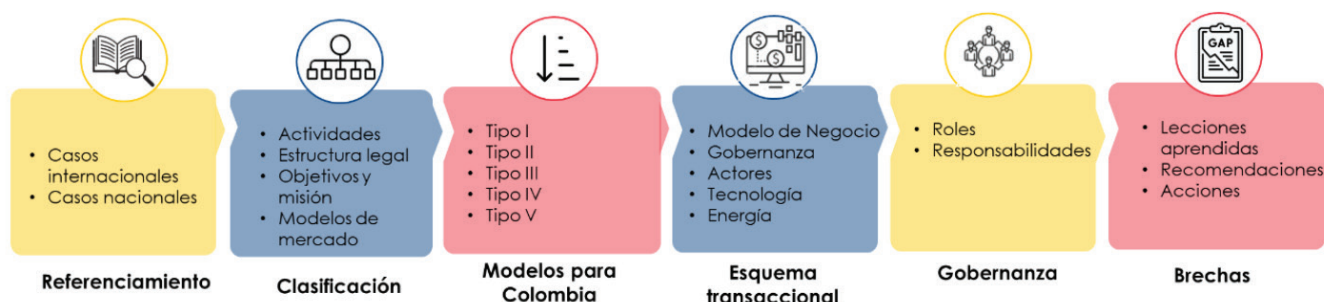
En Colombia, existe el reto de definir los mecanismos que permitan la generación, el consumo, almacenamiento y comercialización de la energía al interior de comunidades energéticas, de tal manera que se habilite la interacción entre los usuarios y sea posible compartir los recursos al interior de la comunidad. De igual manera, también es necesario disponer de una metodología que soporte los esquemas transaccionales de energía y que establezca las condiciones para que los diversos consumidores puedan

compartir las instalaciones de autoconsumo y almacenamiento de energía (Colombia Inteligente, 2019). Por ejemplo, a nivel latinoamericano, se resaltan experiencias para los casos de comunidades energéticas en Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Ecuador, Perú, Venezuela, y Surinam, concluyendo que faltan definiciones políticas, promoción y marcos regulatorios para las CE en la región, además se destaca que los proyectos de CE se ven como una alternativa viable a la red dentro de los asentamientos urbanos (Poque González, Viglio, & da Costa Ferreira, 2022). En ese contexto, este artículo propone 5 niveles de un modelo de comunidad energética, junto con los correspondientes esquemas transaccionales y de gobernanza en el contexto colombiano. Este trabajo se realizó en el marco del Plan Integral de Gestión del Cambio Climático del sector minero energético -PIGCCme del Ministerio de Minas y Energía.

La temática de Comunidades Energéticas es emergente en nuestro país, existen diversas definiciones en la literatura internacional (Rodríguez & Anuzis, 2021) y proyectos a nivel mundial (Nagpal, Avramidis, & Madureira, 2022). Se propone como metodología un primer paso el cual establece el estado del arte y analiza casos de éxito internacionales y nacionales. Luego se plantean clasificaciones y se determinan 5 niveles para un modelo de Comunidad Energética en Colombia, con esquemas transaccionales y modelos de gobernanza específicos. Finalmente, se presentan lecciones aprendidas y recomendaciones basadas en proyectos implementados (ver figura 1).

Para esto se parte de un referenciamiento de experiencias internacionales y nacionales, luego se determina las diferentes clasificaciones existentes para establecer los tipos de esquemas transaccionales y de gobernanza. Finalmente, se presentan las principales barreras y un análisis de brechas para la implementación de comunidades energéticas y en general para la gestión de servicios energéticos a cargo de una comunidad en Colombia.

Figura 1. Metodología de investigación



Fuente: Elaboración propia.

ANTECEDENTES

La evolución del sector energético con nuevas tecnologías y energías renovables, y el desarrollo de mercados que involucran a los usuarios finales, han creado distintos esquemas energéticos con similitudes y diferencias. En la Tabla 1 se

presentan estos conceptos que se relacionan con la integración de energía y la participación de los usuarios, ya sea como consumidores o proveedores de servicios.

Tabla 1. Conceptos relacionados con Comunidades Energéticas

Concepto	Descripción
Microrred	Una microrred es un grupo de cargas interconectadas y Recursos de Energía Distribuidos, con límites eléctricos claramente definidos, que actúa como una entidad controlable única con respecto a la red y puede conectarse o desconectarse de la misma, para operar en modo interconectado o aislado (IEEE, 2017).
Recursos energéticos distribuidos	Los Recursos Energéticos Distribuidos pueden definirse como los recursos energéticos gestionables que se encuentran conectados en las redes de distribución o en las instalaciones de los usuarios finales, como por ejemplo las fuentes primarias dedicadas a la autogeneración y generación distribuida, el almacenamiento de energía, los vehículos eléctricos y la respuesta de la demanda (Colombia Inteligente, 2020) Haga clic o pulse aquí para escribir texto.
Distritos térmicos	Los distritos térmicos (DT), también conocidos como distritos energéticos, son redes que suministran calor o frío a edificios y usuarios individuales de una localidad, a través de una red subterránea desde una central generadora. Permiten economías de escala y conexión de fuentes renovables, calor residual, almacenamiento térmico, redes eléctricas y bombas de calor. (Ministerio de Minas y Energía; UPME; ONUDY; Embajada Suiza en Colombia, 2021).
Plantas virtuales	Las plantas virtuales (VPP: por sus siglas en inglés <i>Virtual Power Plant</i>), pueden considerarse como conexiones virtuales de Recursos Energéticos Distribuidos gestionados de forma coordinada y que son representados como una entidad ante el sistema o mercado.

Energía transactiva	La energía transactiva (TE) se puede definir como "un sistema de mecanismos económicos y de control que permite el equilibrio dinámico de la oferta y la demanda en toda la infraestructura eléctrica utilizando el valor como parámetro operativo clave" (NIST, 2017)
Intercambio entre pares (P2P)	P2P es el intercambio de electricidad entre pares a través de una plataforma electrónica, permitiendo una transacción horizontal en el sector eléctrico. El objetivo es proporcionar a los consumidores un mecanismo transparente y confiable para equilibrar sus preferencias y requerimientos (de Almeida, Cappelli, Klausmann, & van Soest, 2021) y (Larrea Basterra & Bilbao Ozamiz, 2020).

Fuente: Elaboración propia

En la literatura existen diferentes definiciones para el concepto de Comunidades energéticas o Energía Comunitaria. Las comunidades energéticas (CE) se plantean como entidades, formadas por una agrupación de socios (como personas físicas, asociaciones, pymes, administraciones públicas), que voluntariamente y con participación cooperativa, establecen sus objetivos en la obtención de beneficios energéticos, sociales, medioambientales y económicos, para los miembros de una comunidad o terceros (Felice, y otros, 2022). Son un modo de organización entre personas para poder plantear proyectos energéticos, mayoritariamente de origen renovable, gestión eficiente de la energía, ahorro en los consumos o servicios de asesoría (Di Fazio, y otros, 2022) .

A su vez, uno de los conceptos más utilizados es el de comunidades energéticas renovables (REC, por sus siglas en inglés *Renewable Energy Communities*), proyectos en los que participa una comunidad de personas para crear, desarrollar, operar y beneficiarse de un proyecto de energía renovable (CIGRE, 2021) Estos pueden ser de diferentes esquemas y tamaños, según las diversas necesidades y recursos disponibles de la comunidad local. Por otro lado, las comunidades ciudadanas de energía (CEC, por sus siglas en inglés *Citizen Energy Community*) son una nueva entidad que brinda servicios y beneficios a la comunidad local, conformada por ciudadanos, pequeñas empresas y autoridades locales, con énfasis en el acceso no discriminatorio a los mercados eléctricos. No

priorizan ganancias económicas y se pueden considerar cooperativas de energía, donde los ciudadanos comparten y controlan proyectos de energía renovable o eficiencia energética (RESCoop, 2019).

A nivel europeo, existen casos de éxito y proyectos piloto de energía comunitaria. La tabla 2 establece un cuadro comparativo entre las características generales de algunas de las iniciativas por país, lo que permite diferenciar y hallar las similitudes entre ellas.

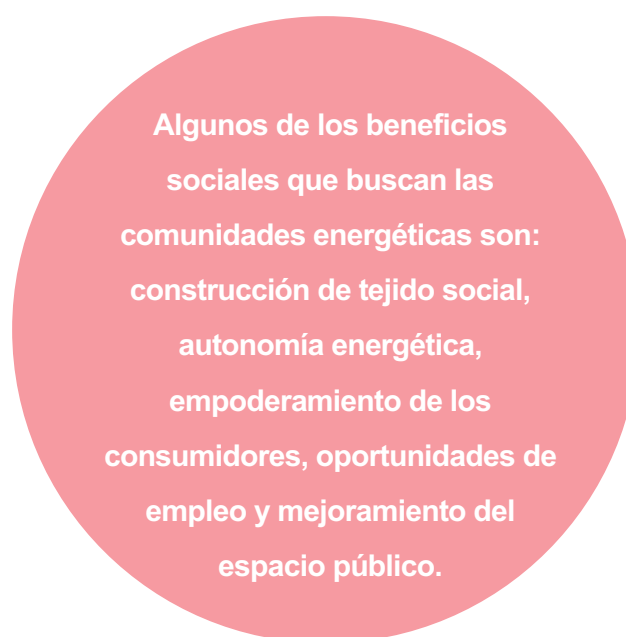


Tabla 2. Análisis comparativo Comunidades Energéticas

País	Objetivo	Esquema de agrupación usuarios	Recursos energéticos	Modelo transaccional
Alemania (BWE, 2012), (Gipe, 2017)	Distribución, suministro y producción de energía.	Cooperativa. Asociación abierta y voluntaria. Sociedades limitadas. Solo miembros locales.	PV, eólica, hídrica, biomasa. Calor y gas. Vehículos eléctricos. Servicios de ahorro energético.	Reinversión de beneficios en proyectos renovables y tecnología. Excedente de energía se vende y se reinvierte en proyectos para beneficio de la CE.
Holanda (SHREC, 2020), (HIER, 2018)	Producir, almacenar y compartir su energía. Operar su propia micro red. Compensar CO ₂	Cooperativas de asociación abierta y voluntaria. asociaciones de propietarios, asociaciones energéticas.	PV. Baterías. DR y P2P Distrito térmico. CHP. Eólico. Vehículos eléctricos.	Generación y suministro, autoconsumo a sus miembros. Tarifas dinámicas de electricidad.
Bélgica (RESCoop, 2019)	Desarrollar proyectos de energía sustentable, descentralizados y democráticos. Reducir emisiones CO ₂	Cooperativa. Adición semi-voluntaria. Abierta a personas naturales y jurídica. Controlado 100% por sus miembros.	PV, eólica e hídrica. Eficiencia energética, biomasa. Almacenamiento. SIN.	Suministro de energía a costo a sus miembros. Pago de dividendos anuales (0-6%). Certificados verdes.
Reino Unido (Verde, Rossetto, Ferrari, & Fonteneau, 2020)	Generación, y venta, electricidad a partir de renovables. Compensación ambiental. Reducción pobreza energética.	Cooperativas municipales. Sociedades de beneficio comunitario. Cooperativas de responsabilidad limitada.	Solar, eólica, hidro y térmico.	Oferta de bonos. Energía de bajo costo.
Grecia (Fajardo García & Frantzeskaki, 2021)	Producción, almacenamiento, consumo propio y venta de energía eléctrica y térmica y de refrigeración.	Cooperativas civiles. Miembros personas físicas o jurídicas, de derecho público o privado, y autoridades locales y regionales, así como sus empresas.	Solar o eólica. Distrito térmico. Hídrico. Biomasa.	Vecino unidad residencial, grupo de empresarios y autoridades locales. Sistema VPP. Compensación en la factura. Sin ánimo de lucro.
España (Tierra, 2020)	Producción, autoconsumo suministro, eficiencia energética, comercialización.	Cooperativas de responsabilidad limitada. Pueden o no ser de la localidad de actuación de la comunidad.	Solar principalmente, eficiencia energética. Vehículos eléctricos. Algo hidráulica y biogás. Cogeneración.	Energía autoconsumo compartido. Excedentes pobreza energética.
Dinamarca (The European Community Power Coalition, 2016)	Producir, consumir, compartir, almacenar y vender la energía eléctrica.	Cooperativas locales y municipales. Limitado a cercanía con la generadora de energía. Miembros cerca de la CE.	Eólica principalmente.	Esquema de compensación a la comunidad.

Fuente: Elaboración propia

En Colombia, se han impulsado iniciativas de generación de energía con recursos locales en comunidades rurales y proyectos administrados por empresas privadas o pequeñas comunidades, como sistemas de generación fotovoltaica, distritos térmicos y P2P. Los distritos térmicos tienen un potencial fuerte para aplicaciones de enfriamiento en centros comerciales y zonas residenciales. Ejemplos notables son el distrito térmico de La Alpujarra que abastece a 6 edificios administrativos (ONUDI, 2023) y el complejo Serena del Mar con sistemas de distritos térmicos para proyectos residenciales, el centro hospitalario y el edificio Universidad de los Andes sede Caribe (Serena del Mar, 2023).

En Medellín, Colombia, se ha desarrollado un esquema de energía P2P y una comunidad solar impulsada por actores de la academia y empresas del sector eléctrico. Este proyecto tiene como objetivo evaluar un esquema de P2P con más de 14 usuarios para intercambiar energía y el desarrollo de una comunidad solar para la instalación y uso comunitario de sistemas fotovoltaicos. La iniciativa se enfoca en diferentes atributos, como la porción de energía renovable, la infraestructura de generación y ubicación. (Blog EnergEIA, 2020).

El Ministerio de Minas y Energía de Colombia lanzó el Reto Comunidades Energéticas 2021 para incentivar la creación de comunidades energéticas en el país. El reto recibió 24 propuestas que buscaban solucionar las necesidades energéticas de sus comunidades mediante el uso de paneles solares, biomasa o energía eólica. La iniciativa ganadora fue el desarrollo de un vivero de plantas ancestrales en la comunidad Los Robles, que recibió un incentivo monetario para implementar la iniciativa piloto en su comunidad. Este reto representa el primer paso para fomentar la creación de comunidades energéticas en Colombia.

En Colombia aún no existe una regulación específica en el tema de comunidades energéticas, sin embargo, en el Plan Nacional de Desarrollo 2022 – 2026 en la sección de la Transición Energética Justa (TEJ), en el artículo 190 se da una definición

de este tipo de comunidades, las cuales pueden ser constituidas para generar, comercializar y/o usar de manera eficiente la energía usando fuentes de energía renovables, y recursos energéticos distribuidos (Departamento Nacional de Planeación, 2022).

De acuerdo con lo anterior, en el año 2023 en el marco de la TEJ se planea implementar dos comunidades energéticas en zonas no interconectadas del país, una de ellas estará ubicada en el departamento de la Guajira y contará con la instalación de 2 soluciones fotovoltaicas que beneficiarán alrededor de 1.500 familias. La otra comunidad energética estará ubicada en el departamento de Nariño en la cual la comunidad de Terán cuenta actualmente con 80 soluciones fotovoltaicas individuales. Para la creación de la comunidad energética se realizará la conversión a una microrred solar fotovoltaica centralizada con capacidad de almacenamiento (IPSE, 2023).

NIVELES DE COMUNIDAD ENERGÉTICA

Hay varias formas de definir un modelo de comunidad energética que serán determinadas por las partes interesadas involucradas, la disponibilidad de recursos y la demanda de la comunidad. La misión y los objetivos generales también influirán en la estrategia, la estructura y las actividades de la organización, así como en el financiamiento (Lopes, Henggeler Antunes, Janda, Peixoto, & Martins, 2016). Después de analizar los casos nacionales e internacionales, se identifican las siguientes características (ver Tabla 3).

Tabla 3. Características de las Comunidades Energéticas

Características	Descripción
En término de las actividades	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de energía renovable. • Distribución de la energía. • Suministro de energía: a través de la compra conjunta de energía 100% renovable en el mercado mayorista de electricidad. • Intercambio de energía entre particulares P2P. • Agregación de energía. • Almacenamiento compartido de energía. • Prestación de servicios de gestión eficiente de la energía. • Prestación de servicios de recarga para vehículos eléctricos.
En términos de la estructura legal o jurídica	<p>La CE es una iniciativa de un grupo de actores y nace con la creación de una entidad jurídica, como, por ejemplo: cooperativas, organizaciones benéficas, fideicomisos de desarrollo o negocios con accionistas comunitarios, aliados, sociedades público-privadas, organizaciones comunitarias (acción comunal, Junta Administradora Local (JAL), comunidades de vecinos, unidades residenciales).</p>
En términos de objetivos y misión	<p>El fin principal de la comunidad energética es generar beneficios sociales y medioambientales en el entorno donde desarrolla su actividad. Puede ser una entidad sin ánimo de lucro o un grupo de empresarios locales que buscan diversificar sus ingresos beneficiando a la comunidad.</p>
En términos del modelo de mercado	<p>La comunidad energética puede:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compartir la energía generada solo con la comunidad o también intercambia con el mercado. • Hacer parte de un mercado con múltiples oferentes simultáneos activos en una conexión, pero diferentes puntos de ubicación. • Ser proveedor de energía a sus miembros y permitir que los miembros puedan dejar la comunidad cuando lo deseen.

Fuente: Elaboración propia

Con base en lo anterior, se establecieron cuatro atributos básicos para el desarrollo de una comunidad energética (ver Tabla 4).

Tabla 4. Atributos para el desarrollo de las Comunidades Energéticas

Atributo	Descripción
Agrupación usuarios	<ul style="list-style-type: none"> • Vecinos de un edificio, viviendas o barrios. • Comunas, municipios. • Islas. • Cadenas o gremios de negocios. • Autoridades locales u otras. • Comunidades étnicas. • Actividades productivas o gubernamentales o ONGs.
Servicios energéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Comunidad solar. • Comunidades de energías renovables. • Cadenas de suministro de Biomasa. • Comunidades de energía y calefacción. • Comunidades de almacenamiento de energía. • Comunidad libre de energía nuclear. • Programas comunitarios de eficiencia energética.
Modelo de negocio	<ul style="list-style-type: none"> • Agregador. • Intercambio entre pares (P2P). • Energía como servicio (EaaS). • Propiedad comunitaria. • Pago por uso (PAYG). • Transacciones de energía – varios modelos.
Gobernanza	<ul style="list-style-type: none"> • Cooperativa. • Organización sin ánimo de lucro. • Asociación. • Fideicomisos comunitarios. • Sociedad. • Corporación. • Compañía de responsabilidad limitada.

Fuente: Elaboración propia

El éxito de las comunidades energéticas depende de una combinación de factores sociales y financieros, como el capital social, el comportamiento cívico, las preocupaciones ambientales y la confianza interpersonal, lo que puede influir en el tamaño, tipo y diseño de los proyectos energéticos comunitarios exitosos. (Caramizaru & Uihlein, 2020).

A continuación, se proponen cinco niveles de CE referenciales para Colombia, dichos niveles aumentan gradual y progresivamente su complejidad y están pensados para dar cubrimiento y solución a las diferentes posibilidades de energía comunitaria que pueden surgir en el país.

Nivel I – Red de conocimiento

En este nivel de comunidad energética, se asocian usuarios para socializar temas energéticos, concienciar sobre el consumo responsable de la energía y fuentes renovables. Se busca que las personas se apropien del conocimiento en torno a la autogestión del consumo de energía. En este nivel, cualquier grupo de personas, instituciones o empresas pueden hacer parte, y no hay transacciones económicas ni se implementa ningún recurso energético.

Nivel II – Desarrollo de espacios comunitarios

Es el nivel de CE más simple de aquellos que involucran el uso de recursos energéticos. En forma general, es un modelo que usa recursos energéticos provenientes de autogeneración o generación distribuida en espacios comunitarios únicamente, tales como piscinas, escuelas, o alumbrado. Las características de este tipo de comunidades se muestran a continuación:

- No hay transferencia de energía a los usuarios particulares que hacen parte de la CE.
- Cualquier grupo de personas con apoyo del gobierno local pueden hacer parte de la CE.
- Deben estar ubicados en la zona de influencia de la CE.
- Pueden estar incluidos los proyectos de gestión eficiente de la energía, aunque no se cuente con un sistema de autogeneración.

Nivel III – Comunidad Transaccional

Es una comunidad que comparte recursos energéticos provenientes de autogeneración o generación distribuida entre miembros de la comunidad que se encuentran ubicados en la misma zona. Este modelo involucra transacciones de energía entre miembros de la CE que son autogeneradores con aquellos que no lo son.

Nivel IV – Comunidad Transactiva

Es un modelo de CE que transa energía proveniente de la autogeneración a partir de recursos energéticos pertenecientes a la CE dentro de la zona de influencia con otros que están fuera de esta. Permite entonces que otros usuarios externos puedan ser parte de la CE. Se pueden incluir almacenamiento, movilidad sos-tenible, autogeneración, proyectos de gestión eficiente de la energía, P2P, energía transactiva.

Nivel V – Integración de comunidades

Es el más complejo de los modelos propuestos de CE. En este, se pueden realizar transacciones energéticas entre dos o más comunidades energéticas aledañas o no. Puede existir todo tipo de recursos energéticos para transacciones: generación a partir de fuentes renovables, generación distribuida, gestión eficiente de la energía, almacenamiento, movilidad, servicios de asesoría en proyectos que involucren constitución de otras CE con uso o no de recursos energéticos.

GOBERNANZA Y ESQUEMAS TRANSACCIONALES

La gobernanza energética se refiere a cómo los actores de una comunidad energética participan en la toma de decisiones energéticas. Las comunidades energéticas desafían a los gobiernos y empresas tradicionales al permitir que los ciudadanos autogestionen sus sistemas de energía. La gobernanza implica alta participación local en la planificación, puesta en marcha y beneficios compartidos. Para el éxito de las comunidades energéticas, se necesitan esquemas transaccionales de energía descentralizados y plataformas distribuidas para el intercambio de servicios energéticos.

De acuerdo con lo anterior, esta sección muestra la definición de los esquemas de gobernanza, y de los esquemas transaccionales para los cinco modelos de comunidades descritos anteriormente.

Esquemas de gobernanza

La gobernanza para las comunidades energéticas se resume de forma simple en dos palabras: participación abierta y voluntaria, en donde la propiedad y control de la gestión energética está en manos de los ciudadanos. En este nuevo modelo, la toma de decisiones debe limitarse a aquellos miembros o accionistas que no se dediquen a una actividad comercial a gran escala y para los que el sector energético no constituya un área o actividad económica principal, en donde los miembros (personas físicas, autoridades locales, micro, medianas y pequeñas empresas) ejercen control efectivo sobre la comunidad energética. En la Figura 2 se presentan los esquemas que explica la manera como se realiza el proceso de gobernanza al interior de cada modelo de comunidad energética y de qué manera se realiza la interacción con otros actores involucrados.

Para el caso de la CE nivel I, se muestra la interrelación que existe entre los niveles gubernamentales, la comunidad (los usuarios de la energía), el mercado (los prestadores de servicios de energía) y un sector denominado terciario. Aun cuando las decisiones tomadas al interior de la comunidad sean gestionadas solo por los miembros de la comunidad, estas tienen en cuenta influencias de los demás actores. Para este modelo, se toman decisiones de tipo informativo en un ejercicio democrático, en donde por votación de la mayoría, los integrantes de la comunidad deciden sobre temas de interés relacionados con la gestión de la energía.

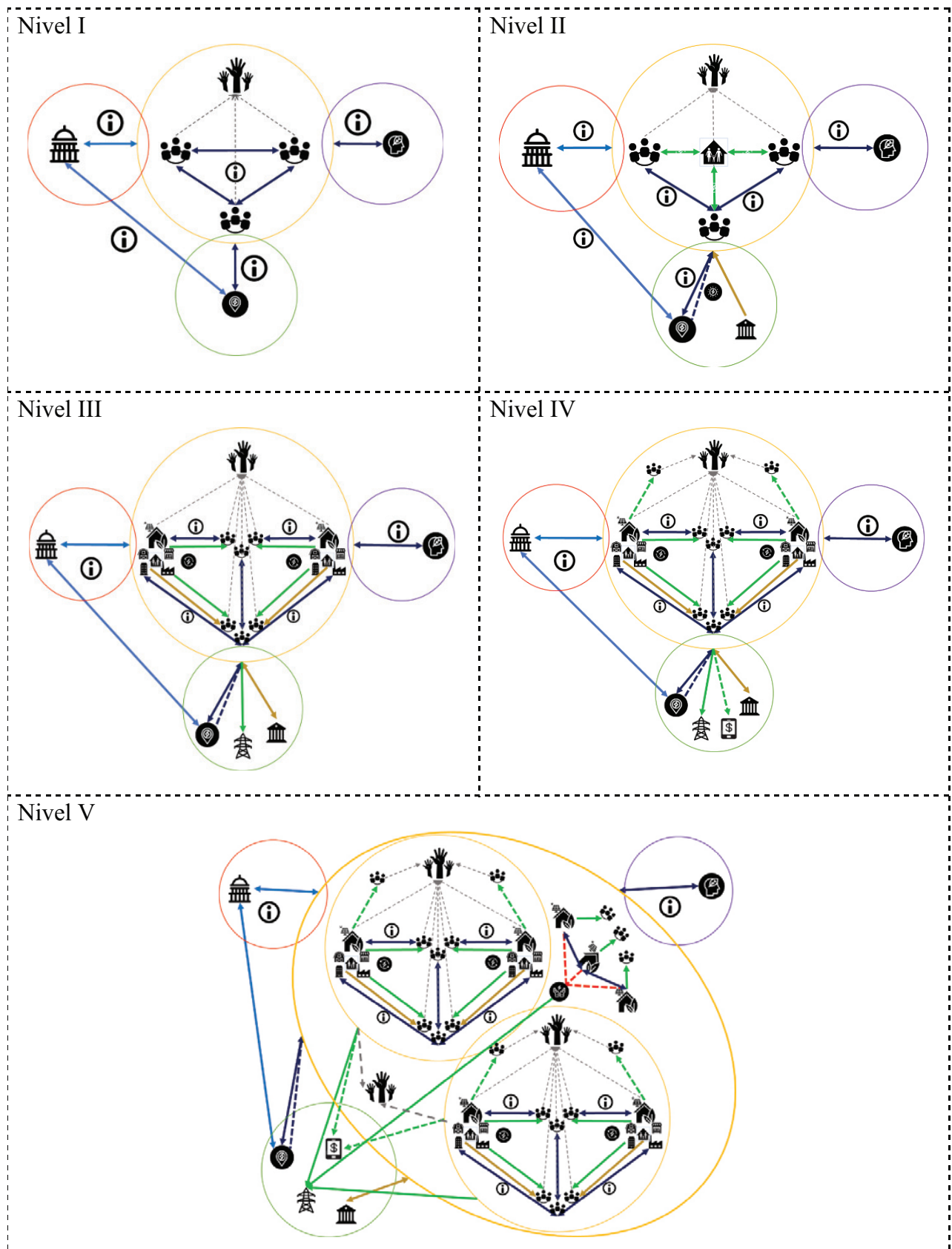
Para el nivel II aparecen nuevas líneas de toma de decisiones que deben ser tenidas en cuenta por la comunidad; también aparecen nuevos actores. Para este tipo de CE se conservan las decisiones de tipo informativo, en un ejercicio democrático, en donde por votación mayoritaria, los integrantes de la comunidad deciden sobre temas de interés relacionados con la gestión de la energía, que incluyen el flujo de información, los recursos financieros necesarios para poner

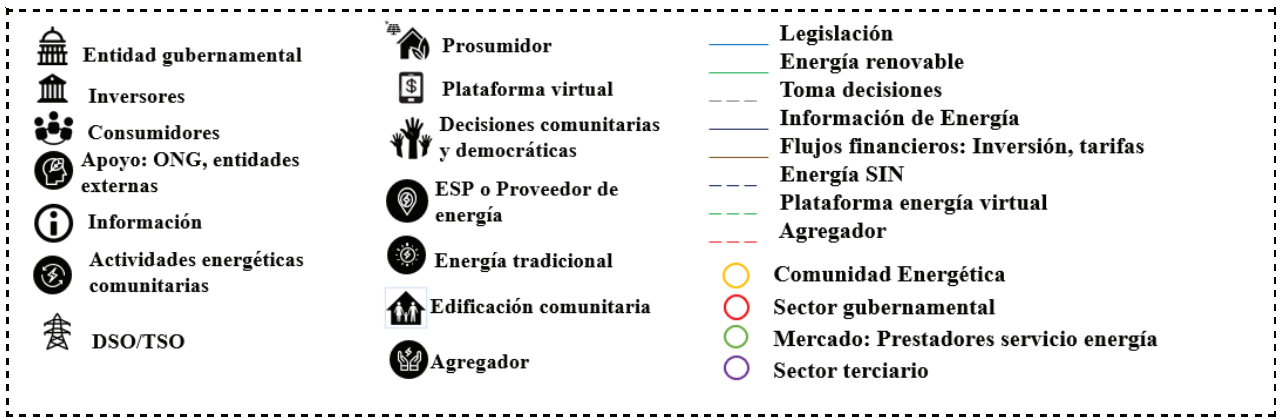
en marcha los proyectos de instalación y gestión de los recursos energéticos.

El modelo de gobernanza del nivel III se basa en que los miembros de la comunidad son generadores y consumidores de energía. Este modelo implica líneas de flujo de energía, información y financieras, y la toma de decisiones relevantes se realiza por asambleas y miembros del órgano administrativo correspondiente. El prosumidor, es clave en este modelo, junto con los inversionistas y generadores tradicionales que apoyan el sistema de circulación de energía. También se destacan los actores involucrados en transacciones económicas de energía cuando hay excedentes de autogeneración para vender por fuera de la comunidad. Es importante que todos los miembros estén geográficamente cercanos a la fuente de energía renovable, y que se implementen prácticas como la gestión eficiente de la energía y el uso de vehículos eléctricos.

Para la CE nivel IV es posible incluir como miembros de la comunidad a otros usuarios que se hallan fuera de la zona geográfica donde se encuentran los prosumidores de la comunidad. Por esto es necesario que entre en juego otro actor que se denomina agente o plataforma virtual, que permite que otros miembros de la comunidad y que no están en la misma área geográfica puedan ser parte de la CE y conectarse de forma remota a la red para recibir energía a través de VPP y pagar por ella un menor costo. Las decisiones que se toman en comunidad incluyen aspectos complejos como la definición del sistema de intercambio de energía entre los miembros de la comunidad, en especial con aquellos que están fuera de la zona geográfica de los prosumidores, definición de los esquemas tarifarios y de facturación para la energía generada y transada entre miembros de la comunidad, establecer como efectuar inversiones que se reciban de fuentes externas y de recursos propios de la comunidad y definir si nuevos usuarios pueden unirse en la figura de agregador para transar energía en el mercado, entre otros.

Figura 2. Niveles de gobernanza para cada tipo de CE.





Fuente: Elaboración propia.

La CE nivel V agrupa a dos o más CE ya constituidas, como miembros de una nueva comunidad que se podría denominar como una Macro-comunidad. En este modelo, el más robusto de todos, es posible incluir todos los DER disponibles, a nivel de mercado, la figura del agregador toma importancia, al igual que disponer de una plataforma virtual que conecte los usuarios miembros de la comunidad que están distantes de la red de generación. Como una comunidad que integra varias comunidades, la toma de decisiones se hace más compleja y por tanto debe ser más cuidadosa. En este modelo, cada CE que la conforma, conserva su esquema de gobernanza determinado de acuerdo con su configuración, a excepción de las decisiones de tipo tarifario. Al hacer parte de otra comunidad mayor, se hace necesario configurar una representación tipo consejo de comunidad, en donde con representación de cada una de las comunidades que la constituye, se tomen las decisiones sobre inversiones relacionadas con la ampliación de la red, esquema tarifario global, reglas de agregación.

Esquemas transaccionales

Los esquemas transaccionales son fundamentales porque habilitan el cumplimiento de objetivos de las CE como el intercambio de energía que permitan el manejo óptimo de las fuentes de energía gestionables y no gestionables y el adecuado suministro a todos los usuarios forta-

leciendo la democratización de la energía. A partir del análisis de los casos referentes, se define el esquema transaccional para CE que se muestra en la Figura 3. Se trata de un modelo de capas y bloques que comprenden los elementos, actores y relaciones generales que componen el esquema transaccional. Para el caso de las CE estos esquemas deben incluir a los siguientes aspectos: consumidores y prosumidores, agregadores, DSO, recursos energéticos, entidades de regulación y supervisión y modelos de negocio.

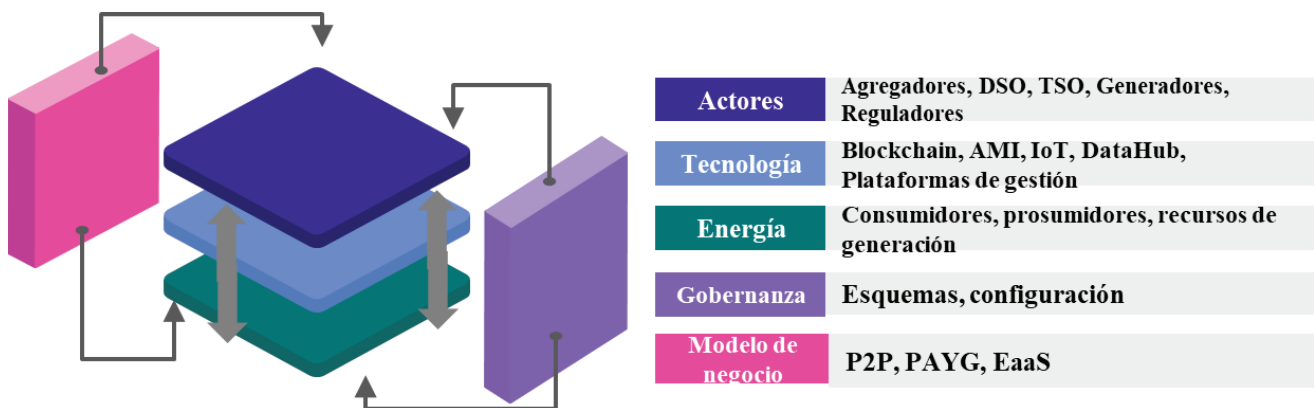
Las comunidades energéticas son una forma de producir y distribuir energía de manera más sostenible y justa, involucrando a los ciudadanos y comunidades locales en el proceso.

Los esquemas transaccionales se conforman por las siguientes capas:

- **Capa energía:** En ella se ubican todos los miembros de la comunidad directamente relacionados con los procesos de generación y consumo de energía: Consumidores, prosumidores y todos los recursos energéticos gestionables y no gestionables.
- **Capa tecnología:** Es la encargada de habilitar los flujos bidireccionales de potencia e información entre todos los elementos de la comunidad energética a través de tecnologías como Blockchain, infraestructuras de medición avanzada (AMI), centros de datos, dataHub y todas las plataformas de gestión de información.

- **Capa actores:** Hace referencia a todas las organizaciones y personas que interactúan cumpliendo funciones necesarias para la comunidad. Algunos ejemplos son los agregadores, empresas DSO, TSO, generadores y entidades de regulación, vigilancia y control.
- **Capa gobernanza:** Aquí se ubican los elementos y acciones necesarios para conformar las configuraciones, esquemas y reglas bajo las cuales opera la CE.
- **Capa modelo de negocio:** También podría llamarse Mercado de Energía, se refiere a todos los modelos económicos y de intercambio de bienes y servicios como por ejemplo P2P, Energía como Servicios (EaaS), Pago por uso (PAYG), trueques, donaciones.

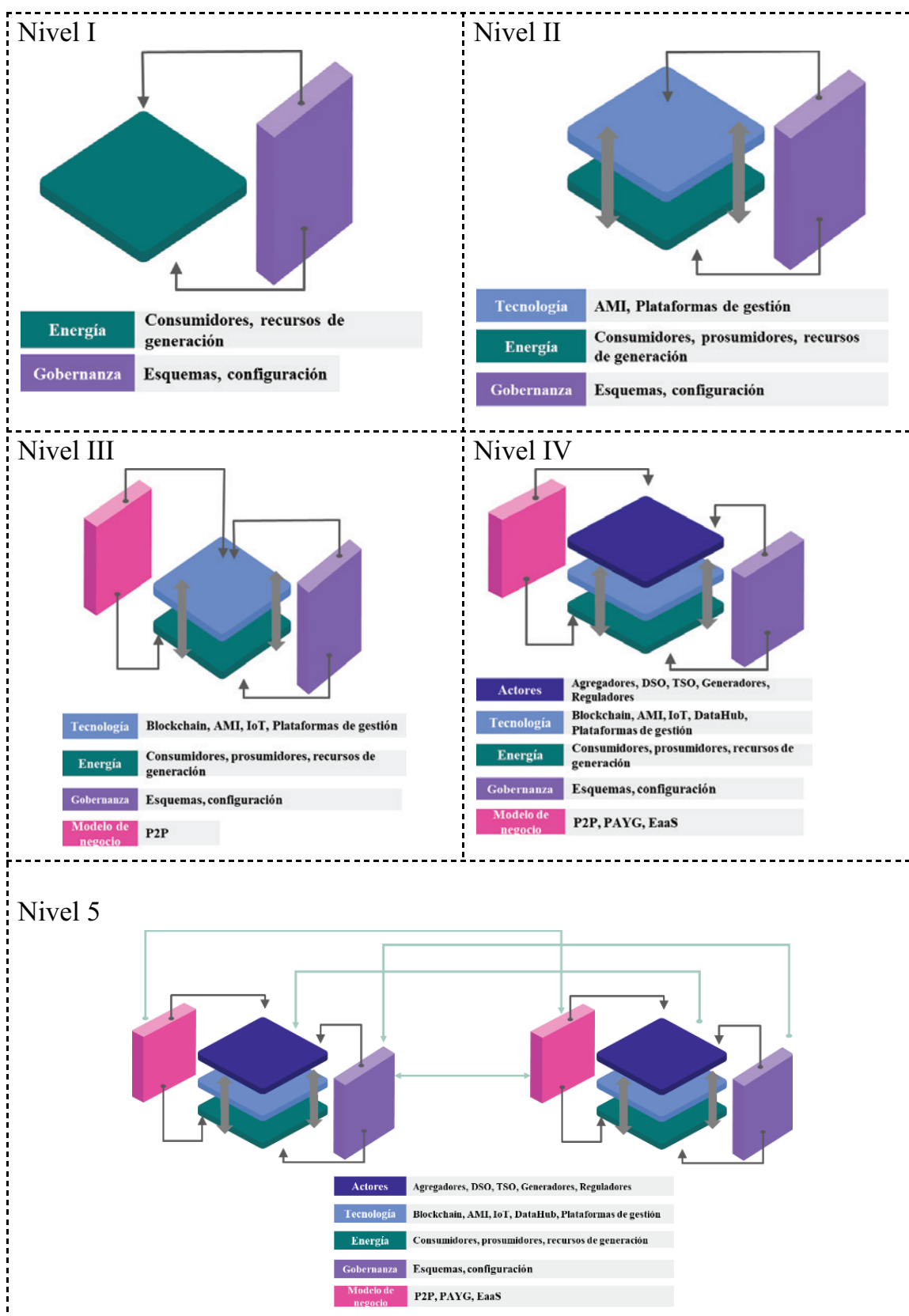
Figura 3. Esquema transaccional general para CE



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con el tipo de comunidad, entre las diferentes capas se intercambia información técnica o comercial, como disponibilidades de flexibilidad de generación o de demanda, flujos de energía, comunicaciones, dinero, tokens, entre otros. Es importante tener en cuenta que el esquema transaccional está determinado por la presencia e interrelación de todas las capas.

Figura 4. Esquemas transaccionales para cada tipo de CE



Fuente: Elaboración propia

Al establecer únicamente el modelo de negocios (por ejemplo, P2P) o la tecnología a utilizar (por ejemplo, Blockchain), el esquema transaccional queda incompleto. Por lo tanto, para cada referente o piloto de CE tiene un arreglo particular para realizar sus transacciones que permita satisfacer las necesidades y objetivos.

La Figura 4 muestra los esquemas transaccionales particulares para cada modelo.

ANÁLISIS DE BRECHAS Y ACCIONES DE MITIGACIÓN

Con base en los niveles establecidos y las experiencias nacionales, se realizó un ejercicio cualitativo de identificación y calificación (con el grupo de trabajo colaborativo de demanda activa de Colombia Inteligente) de brechas para

la implementación de comunidades energéticas y en general para la gestión de servicios energéticos a cargo de una comunidad. Las brechas identificadas para las Comunidades Energéticas se han clasificado en: i) Sociales, ii) Tecnológicas, iii) Ambientales, iv) Financieras y v) Políticas y regulatorias. Para cada clasificación, se presenta la valoración de cada una de acuerdo con el nivel de impacto evaluado en un ejercicio colaborativo con varias entidades del sector (dificultad para desarrollar una CE), así: Ninguno (1), bajo (2), medio (3), alto (4), muy alto (5) y las acciones de mitigación.

Sociales

Estas brechas corresponden a aquellas debidas a la interacción entre miembros de la comunidad (ver tabla 3).

Tabla 3. Brechas sociales para el desarrollo de Comunidades Energéticas

ID	Brecha	Impacto
S1	Dificultades para la creación del grupo gestor y posterior crecimiento de la comunidad.	5
S2	No existen incentivos para que las comunidades energéticas se constituyan como actores activos para mitigar la pobreza energética.	4
S3	No hay suficiente nivel de conocimiento para constituir, administrar y poseer proyectos de energía, particularmente aquellas ubicadas en zonas alejadas.	4
S4	No hay suficiente conocimiento acerca de las diferentes tecnologías de generación y plataformas de manejo de datos por parte de las comunidades (es difícil lograr la participación activa y la toma de decisiones de los miembros teniendo en cuenta esa limitación).	3
S5	Falta de información y formación de la ciudadanía en materia energética (GEE) que limita en gran medida la participación de la comunidad.	3
S6	Falta de caracterización de las comunidades (estado, necesidades, potenciales, identificación de problemáticas y soluciones locales) ¿Cuál es el nivel de “poder” de la comunidad para resolver sus problemas (empoderar)?	4
S7	Falta de canales habilitados para manifestar sus problemáticas.	3

Fuente: Elaboración propia

Tecnológicas

Estas brechas están relacionadas con el acceso y conocimiento a nivel de las tecnologías relacionadas con la gestión energética y en general de la función y operación de una comunidad energética (ver tabla 4)

Tabla 4. Brechas tecnológicas para el desarrollo de Comunidades Energéticas

ID	Brecha	Impacto
T1	No se tienen herramientas técnicas para definir la arquitectura tecnológica y el esquema transaccional de la comunidad.	5
T2	No están ampliamente establecidos y difundidos los desarrollos tecnológicos que permitan los intercambios de energía entre pares y la comercialización de energía mediante esquemas diferentes al tradicional.	4
T3	Desconocimiento de las tecnologías que resuelven las necesidades energéticas dificulta la caracterización y selección de un modelo tipo (guía) para diseñar y desarrollar una CE.	4
T4	No existen mecanismos establecidos para identificar proveedores de tecnología.	4
T5	Desconocimiento por parte de las comunidades sobre los beneficios económicos, energéticos y ambientales asociados al uso de nuevas tecnologías.	4

Fuente: Elaboración propia

Ambientales

Desde el punto de vista ambiental pueden existir algunas brechas relacionadas con la generación de residuos en la operación de las tecnologías de generación, aunque en general, las CE deben su constitución a la necesidad de gestionar su propia energía usando sistemas renovables o de menor impacto al medio ambiente (ver tabla 5).

Tabla 5. Brechas sociales para para el desarrollo de Comunidades Energéticas

ID	Brecha	Impacto
A1	Oposición por parte de la comunidad debido a que tecnologías puedan impactar el medio ambiente (por ejemplo, parques eólicos o fotovoltaicos tienen un impacto en el paisaje, y uso del suelo, etc.)	3
A2	Generación de residuos y la disposición final por operación de los sistemas de energía renovables (Generación por biogestor).	2
A3	Contaminación de suelos y fuentes acuíferas por residuos de sistemas de autogeneración con fuentes convencionales.	2

Fuente: Elaboración propia

Financieras

En estas se incluyen aquellas brechas relacionadas con los recursos económicos y financieros necesarios para la creación, implementación y funcionamiento de las comunidades energéticas, los cuales pueden ser quienes generen mayores limitantes a la hora de emprender un proyecto de esta naturaleza (ver tabla 6).

Tabla 6. Brechas financieras para para el desarrollo de Comunidades Energéticas

ID	Brecha	Impacto
F1	No existen mecanismos generalizado de subvención y financiamiento para el desarrollo específicos de proyectos de comunidades energéticas.	5
F2	Alta inversión inicial de los proyectos de CE.	5
F3	Altos costos de las energías renovables frente a los sistemas fósiles, particularmente en los sistemas aislados.	4
F4	Incremento de los costos logísticos para la prestación del servicio de energía, principalmente por la dificultad de acceso (por ejemplo, en zonas aisladas).	4
F5	No existen mecanismos de protección del usuario ante la insolvencia de la CE.	4
F6	Falta de esquemas para la generación de ingresos (procesos productivos).	3
F7	Dificultad de recursos (proyectados) para garantizar el AOM de la CE.	5

Fuente: Elaboración propia



Políticas y regulatorias

En ese sentido, se presentan las brechas desde el punto de vista de la legislación, la regulación y de políticas públicas que habilitan la creación de comunidades energéticas en el territorio colombiano (ver tabla 7).

Tabla 7. Brechas políticas y regulatorias para para el desarrollo de Comunidades Energéticas

ID	Brecha	Impacto
PR1	No están claramente establecidos ni regulados los actores y los mercados energéticos asociados a las CE (transacción energética y gestión servicios DER).	5
PR2	No existen mecanismos regulatorios que permitan los intercambios de energía entre pares y la comercialización de energía mediante esquemas diferentes al tradicional.	5
PR3	No hay políticas a nivel nacional y local para fomentar el establecimiento y la gestión de comunidades energéticas.	4
PR4	No hay una definición clara de los trámites administrativos necesarios para la constitución de este tipo de proyectos.	4
PR5	Ausencia de lineamientos y herramientas para formación y financiación a las entidades locales para que actúen como promotoras de las comunidades energéticas y para que este tipo de proyectos sean viables.	4
PR6	Poca difusión entre las comunidades de los mecanismos de fomento en proyectos de energías renovables comunitarios para fortalecer los usos productivos de la energía.	4
PR7	No se dispone de licencias y permisos para la implementación de proyectos de este tipo.	4
PR8	Ausencia de mecanismos de gestión de la información (no se logra identificar una comunidad con las entidades territoriales).	3
PR9	La limitación de los OR para desarrollar esquemas de CE (señales regulatorias para el no uso de los DER en su territorio).	3

Fuente: Elaboración propia

A partir de las brechas y presentadas, en la Tabla 8 se presentan de forma unificada las acciones, el responsable y el horizonte de ejecución para mitigar el efecto de cada una de las brechas de acuerdo con la clasificación establecida

previamente. Se debe tener en cuenta que el Corto Plazo (CP) es hasta mediados del 2023, el Mediano Plazo (MP) cubre 2 años a partir del segundo semestre del 2023 y Largo Plazo (LP) en los años siguientes.

Tabla 8. Acciones de mitigación para las brechas propuestas

Acción	Brecha	Responsable de la acción	Horizonte
Valorar potencialidades de los miembros.	A2	Comunidades, entidades regionales, MINMINAS, IPSE	Corto plazo
Visibilizar y difundir beneficios de las CE a miembros potenciales.	A1	Comunidades	Corto plazo
Definir los criterios para acceder a estas líneas de financiación y que se pueda garantizar los recursos.	F1	MINMINAS, FENOGE, CREG, UPME	Corto plazo
Establecer mecanismos de financiación específicos para el inicio del proyecto.	F2	MINMINAS, FENOGE, CREG, Comunidades	Corto plazo
Establecer una mesa de trabajo que identifique las necesidades específicas de mercado.	PR1, PR9	MINMINAS, CREG, Utilities, UPME	Corto plazo
Establecer una mesa de trabajo que promueva y defina regulaciones y mecanismos que permitan intercambios de energía entre pares.	PR2, PR9	MINMINAS, CREG, Utilities, UPME	Corto plazo
Desarrollar programas de para los grupos gestores.	A2, T5, F2	MINMINAS, IPSE, comunidades, entidades aliadas	Corto plazo
Difundir beneficios de las CE.	A1, PR3, PR6, PR8	MINMINAS, IPSE, comunidades, entidades aliadas	Corto plazo
Establecer una mesa de trabajo que identifique las necesidades específicas de mercado, defina regulaciones y mecanismos.	F3, F4, F5, PR1, PR2, PR3, PR5, PR8, PR9	MINMINAS, IPSE, comunidades, entidades aliadas	Corto plazo
Concientización para reducir pobreza energética	A2	Entidades regionales, MINMINAS, IPSE, FENOGE, UPME	Mediano plazo
Segmentar a los usuarios	A3, A5	Comunidades energéticas, academia	Mediano plazo

Mecanismos de acceso continuo a los datos y la información.	A4	MINMINAS, IPSE, CREG, FENOGE, UPME	Mediano plazo
Fortalecer las capacidades técnicas y académicas de los profesionales.	T1	Academia, MINMINAS, MinCiencias	Mediano plazo
Gestión de plataformas intercambio energético.	T2	MINMINAS, IPSE, UPME, Utilities, Academia	Mediano plazo
Establecer los modelos de comunidades bases para Colombia	T3	MINMINAS, IPSE, UPME, Entidades regionales, Academia	Mediano plazo
Promover participación activa de los miembros durante la implementación del proyecto.	A2	Comunidades	Mediano plazo
Reducir la amplitud del proyecto e iniciar con algo de menor volumen.	F2	Comunidades, Academia	Mediano plazo
Brindar capacitación y apoyo continuo en gestión energética	A3, A4, A5, A6	MINMINAS, IPSE, comunidades, entidades aliadas	Mediano plazo
Crear y difundir una base de datos con toda la información relacionada.	T4	MINMINAS, IPSE, UPME Entidades regionales	Largo plazo
Aprovechamiento de materiales	A3	Comunidades, MinAmbiente	Largo plazo
Crear alianzas para reducir costos de transporte y desarrollo en zonas aisladas.	F4	MINMINAS, IPSE, comunidades, entidades aliadas	Largo plazo

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con lo discutido en el presente artículo se puede concluir que las comunidades energéticas son una forma de producir y distribuir energía de manera más sostenible y justa, involucrando a los ciudadanos y comunidades locales en el proceso.

Estas pueden contribuir significativamente a la transición hacia sistemas energéticos más limpios y justos, ofreciendo oportunidades para la innovación social y tecnológica. De igual forma se ha destacado la importancia de la gobernanza participativa y la toma de decisio-

nes democráticas en la implementación de las comunidades energéticas, así como la necesidad de marcos regulatorios claros y favorables para su desarrollo.

De igual forma en este documento se plantearon cinco niveles de CE que pueden implementarse en Colombia, teniendo en cuenta los modelos de gobernanza y los esquemas transaccionales correspondientes. Para que un esquema de energía comunitaria pueda guiarse por alguno de los niveles propuestos se recomienda que la comunidad defina claramente sus objetivos energéticos y organizacionales, los recursos disponibles, los actores involucrados y el rol que debe cumplir cada uno.

Se recomienda incorporar tecnologías y procesos de formación para que el usuario final gestione eficientemente los recursos energéticos y para desarrollar comunidades energéticas que promuevan el uso compartido de los recursos y energías renovables. Estos modelos beneficiarían a usuarios y al medio ambiente, y fomentan el consumo sostenible. Se insta a los actores del sector energético a seguir explorando y promoviendo estas alternativas que involucren la activa participación de los usuarios y comunidades en la gestión de la energía. ■

REFERENCIAS

de Almeida, L., Cappelli, V., Klausmann, N., & van Soest, H. (2021). Peer-to-Peer Trading and Energy Community in the Electricity Market - Analysing the Literature on Law and Regulation and Looking Ahead to Future Challenges. Robert Schuman Centre for Advanced Studies .

Poque González, A. B., Viglio, J. E., & da Costa Ferreira, L. (2022). Energy communities in sustainable transitions: the South American case. *Sustainability in Debate*.

Bastos, A. F., & Trevizan, R. D. (2023). Feasibility of 100% Renewable-Energy-Powered Microgrids Serving Remote Communities. 2023 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), (págs. pp. 1-5). Washington, DC, USA. doi:doi: 10.1109/ISGT51731.2023.10066456.

Blog EnergEIA. (2020). Blog EnergEIA. Obtenido de <https://medium.com/blog-energeia/piloto-de-intercambio-de-energ%C3%ADa-p2p-en-medell%C3%ADn-protagonista-en-reporte-de-irena-13ba4c13d0>

BWE. (2012). Community Wind Power local energy for local people international. Obtenido de https://www.wind-energie.de/fileadmin/redaktion/dokumente/dokumente-englisch/publications/bwe_broschuere_buergerwindparks_engl_10-2012.pdf

Caramizaru, A., & Uihlein, A. (2020). Energy communities: an overview of energy and social innovation. Belgium: European Commission.

CIGRE. (2021). Documento Técnico Regulación , Normativa y Nuevos Mercados en Microrredes en el Sector Eléctrico Colombiano.

Colombia Inteligente. (2020). Recursos Energéticos Distribuidos Acciones para su Integración. Medellín, Colombia.

Departamento Nacional de Planeación. (2022). Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026.

- Di Fazio, A., Losi, A., Russo, M., Cacace, F., Conte, F., Iannello, G., . . . Saviozzi, M. (2022). Methods and Tools for the Management of Renewable Energy Communities: the ComER project. 2022 AEIT International Annual Conference (AEIT), (págs. 1-6). Rome, Italy.
- Fajardo García , G., & Frantzeskaki , M. (2021). Las comunidades energéticas en Grecia . REVESCO. Revista de Estudios Cooperativos.
- Felice, A., Rakocevic, L., Leen, P., Messagie, M., Coosemans, T., & Ramirez Camargo, L. (2022). Renewable energy communities: Do they have a business case in Flanders? *Applied Energy*.
- Gipe, P. (2017). WIND-WORKS: Bürger-Windpark Lübke-Koog 25-Year Anniversary-A Review.
- González, F. M., & Balsategui, S. D. (2022). Energy Transition in Smart Cities: STARDUST Project. 2022 37th Conference on Design of Circuits and Integrated Circuits (DCIS), (págs. 01-05). Pamplona, Spain. doi: 10.1109/DCIS55711.2022.9970098
- Hanke, F., Guyet, R., & Feenstra, M. (2022). 12 - Energy communities' social role in a just energy transition. En R. G. Florian Hanke, *Energy Communities* (págs. 195-208). Academic Press.
- Heuninckx, S., Boveldt, G., Macharis, C., & Coosemans, T. (2022). Stakeholder objectives for joining an energy community: Flemish case studies. *Energy policy*, 162(112808).
- HIER. (2018). Local Energy Monitor | HIER opgewekt. .
- IEEE . (2017). IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. *IEEE Std 2030.7-2017*, 1-43.
- IPSE. (2023). El IPSE priorizó las dos primeras Comunidades Energéticas de las zonas no interconectadas de Colombia en 2023. Obtenido de <https://ipse.gov.co/blog/2023/03/16/el-ipse-priorizo-las-dos-primeras-comunidades-energeticas-de-las-zonas-no-interconectadas-de-colombia-en-2023/>
- Larrea Basterra, M., & Bilbao Ozamiz, M. (2020). Modelos de Negocio en Recursos Distribuidos de Electricidad.
- Lode, M., Boveldt, G. t., Coosemans, T., & Ramirez Camargo, L. (2022). A transition perspective on Energy Communities: A systematic literature review and research agenda. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Lopes, M., Henggeler Antunes, C., Janda, K., Peixoto, P., & Martins, N. (2016). The potential of energy behaviours in a smart(er) grid: Policy implications from a Portuguese exploratory study. *Energy Policy*, 233-245.
- Ministerio de Minas y Energía; UPME; ONUDY; Embajada Suiza en Colombia. (2021). *Distritos térmicos en Colombia*. Bogotá, Colombia.
- Nagpal, H., Avramidis, I. -I., & Madureira, F. C. (2022). Local Energy Communities in Service of Sustainability and Grid Flexibility Provision: Hierarchical Management of Shared Energy Storage. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 13(3), 1523-1535. doi:10.1109/TSTE.2022.3157193.
- NIST. (2017). *Transactive Energy: An Overview*. Obtenido de Smart Grid Group: <https://www.nist.gov/el/smart-grid-menu/hot-topics/transactive-energy-overview>
- ONUDI. (2023). *Distritos Térmicos Colombia*. Obtenido de <https://www.distritoenergetico.com/>
- RESCOOP. (2019). *EU projects - REScoop*. .
- Rescoop.eu / Electra energy cooperativ e/ Heinrich Boell Foundation Office. (2021). *Mapping the Social Impact of Energy Communities*. Thessaloniki, Greece.
- Rodríguez, C. R., & Anuzis, A. J. (2021). Potencialidad para la Implementación de Comunidades Energéticas Sustentables en la Provincia de Córdoba, Argentina. *ENERLAC*, 172 - 191.
- Sæle, H., Morch, A., Buonanno, A., Caliano, M., & Papadimitriou, M. D. (2022). Development of Energy Communities in Europe. 18th International Conference on the European Energy Market (EEM), (págs. 1-5). Ljubljana, Slovenia. doi: 10.1109/EEM54602.2022.9921054

Savelli, I., & Mosrty, T. (August 2021 de 2021). Better together: Harnessing social relationships in smart energy communities. *Energy Research & Social Science*, 78(102125).

Serena del Mar. (2023). Ciudades planeadas para el futuro con energías sostenibles. Obtenido de <https://serenadelmar.com.co/ciudades-planeadas-para-el-futuro-con-energias-sostenibles-districto-termico-serena-del-mar/>

SHREC. (2020). Energy cooperatives united in the Netherlands | Interreg Europe. .

The European Community Power Coalition. (2016). Community energy: A practical Guide to Reclaiming Power. Obtenido de <https://communitypowercoalition.eu/>

Tierra. (2020). Comunidades Energéticas Renovables: Análisis del impacto energético y socioeconómico .

Verde, S., Rossetto, N., Ferrari, A., & Fonteneau, T. (2020). The Future of Renewable Energy Communities in the EU.





Av. Mariscal Antonio José de Sucre
N58-63 y Fernandez Salvador
Quito - Ecuador

Tel. (+593 2) 2598-122 / 2598-280
/ 2597-995

enerlac@olade.org

