

Artículo de revisión.

Cómo citar: H. Porras et al., "Un análisis de las implicaciones de la falta de cobertura de energía renovable no convencional en Colombia", *Inventum*, vol. 13, no. 25, pp. 41-52, julio - diciembre, 2018. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.13.25.2018. 41-52

Editor: Corporación Universitaria Minuto de Dios – UNIMINUTO.

Recibido: 30 de mayo de 2018

Aceptado: 28 de junio de 2018

Publicado: 3 de septiembre de 2018

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

# UN ANÁLISIS DE LAS IMPLICACIONES DE LA FALTA DE COBERTURA DE ENERGÍA RENOVABLE NO CONVENCIONAL EN COLOMBIA

## AN ANALYSIS OF THE ECONOMIC CONSEQUENCES OF THE LACK OF COVERAGE OF NON-CONVENTIONAL RENEWABLE ENERGY IN COLOMBIA

## UMA ANÁLISE DAS IMPLICAÇÕES ECONÔMICAS DA FALTA DE COBERTURA NÃO CONVENCIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL NA COLÔMBIA

Héctor Porras; Angélica Martínez; Milton M. Herrera

### Resumen

Uno de los desafíos para el mercado de la energía renovable en Colombia es el suministro de energía en regiones apartadas. Si bien Colombia ha tenido iniciativas en la promoción de energía renovable, actualmente existen regiones que carecen de suministro de electricidad. La falta de infraestructura y suministro de electricidad conlleva problemas relacionados con el número de usuarios cubiertos, desarrollo industrial y condiciones ambientales que afectan la competitividad de las regiones. Este artículo propone un análisis de las implicaciones que se generan por la falta de cobertura de electricidad en las regiones apartadas de Colombia. Un análisis basado en un modelo de simulación es desarrollado en este artículo, con el fin de entender y proponer alternativas políticas a las implicaciones por la falta de suministro energético. Los resultados evidencian que la falta de suministro afecta los indicadores de competitividad de un país o región, lo cual no permite el desarrollo adecuado de tecnologías de energía no convencional tales como solar, biomasa y eólica.

**Palabras clave:** Electricidad, simulación, competitividad, energía renovable, suministro de electricidad.

### Abstract

One of the challenges of the Non-Conventional Renewable Energy market in Colombia is to guarantee power supply to remote regions. Although the country has presented initiatives for the promotion of renewable energy, there are regions which do not have access to power supply yet. The lack of energy infrastructure and supply causes issues in terms of the number of users receiving the service, industrial development and environmental conditions affecting competitiveness in the regions. This article presents an analysis of the consequences of the lack of energy coverage in remote areas of the country. The authors developed a simulation model which they

Héctor Porras  
esarmiento@uniminuto.edu  
Universidad Piloto de Colombia

Angélica Martínez  
angelicae.martinezr@utadeo.edu.co  
Universidad Jorge Tadeo Lozano, Colombia

Milton M. Herrera  
milton.herrera@unimilitar.edu.co  
Universidad Militar Nueva Granada, Colombia



used for the analysis of data, in order to understand and suggest political options to the implications of the lack of power supply. According to the results, it has an impact on the competitiveness indexes of a country or region, which prevents the appropriate use of non-conventional energy technologies, such as sun, biomass and wind energy.

**Keywords:** Electricity, simulation, competitiveness, renewable energy, power supply.

### **Resumo**

Um dos desafios para o mercado da energia renovável na Colômbia é o fornecimento de energia em regiões afastadas. Conquanto Colômbia teve iniciativas na promoção de energia renovável, atualmente existem regiões que carecem de fornecimento de eletricidade. A falta de infraestrutura e fornecimento de eletricidade implica problemas relacionados com o número de usuários cobertos, desenvolvimento industrial e condições ambientais que afetam a competitividade das regiões. Este artigo propõe uma análise dos envolvimento que se geram pela falta de abrangência de eletricidade nas regiões afastadas de Colômbia. Uma análise baseada num modelo de simulação é desenvolvido neste artigo, com o fim de entender e propor alternativas políticas aos envolvimento pela falta de fornecimento energético. Os resultados evidenciam que a falta de fornecimento afeta os indicadores de competitividade de um país ou região, o qual não permite o desenvolvimento adequado de tecnologias de energia não convencional tais como solar, biomassa e eólica.

**Palavras-chave:** Eletricidade, simulação, competitividade, energia renovável, fornecimento de eletricidade.

## INTRODUCCIÓN

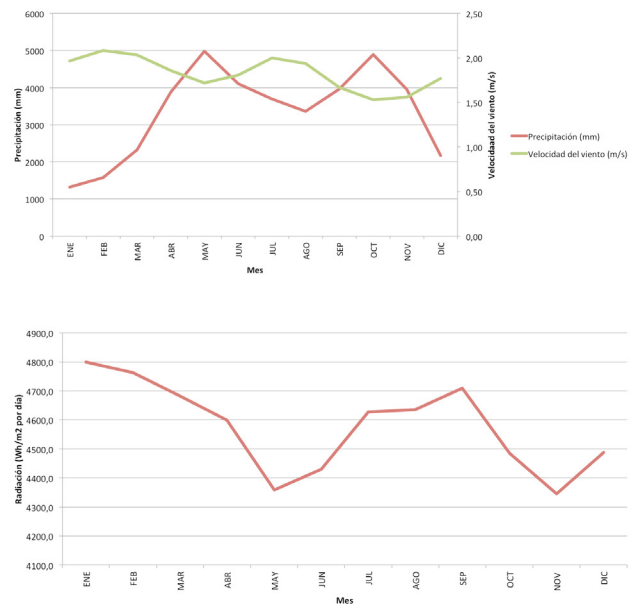
Las fuentes de energía se pueden clasificar de acuerdo con la disponibilidad de los recursos en renovables y no renovables. Las primeras se caracterizan por la disponibilidad y recuperación en el tiempo. Las fuentes no renovables por el contrario se agotarán en el futuro. En este sentido, se habla de las tecnologías de energía renovable como transformadoras de los flujos de energía de la naturaleza, por lo que tendrán un efecto por el cambio climático. Este efecto se enmarca en los impactos ambientales que alrededor de las tecnologías de energía no renovable se generan. En Latinoamérica y el Caribe se proyecta que las emisiones de CO<sub>2</sub> aumenten hasta 1806 ppm para el 2025, debido al incremento en el uso de combustibles de carbón mineral y combustibles líquidos [1]. Por consiguiente, el desarrollo potencial de tecnologías de energía renovable conduce a la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> basado en el diseño de políticas públicas que lo permitan.

Las energías renovables desempeñan un papel importante en la sostenibilidad ambiental, económica y social de un país [2], [3], [4]. La promoción de tecnologías limpias o no convencionales, tales como la energía solar fotovoltaica, eólica y biomasa, contribuyen a mitigar el efecto de los gases de efecto de invernadero. Por lo tanto, se ha convertido en un desafío para los países de América Latina, principalmente Brasil, Colombia, Chile, Argentina y Ecuador el desarrollo de políticas energéticas e industriales que permitan el despliegue de tecnologías limpias [5], [6].

El potencial de generación de energías renovables no convencionales en los países latinoamericanos genera una posibilidad de diversificación para la matriz energética permitiendo el suministro en regiones aisladas [7]. Sin embargo, la expansión de estas tecnologías limpias no ha sido posible por limitaciones relacionadas con el desarrollo de políticas industriales que permitan mejorar y garantizar el ambiente de inversión de las compañías del sector energético. Otro obstáculo está relacionado con la insuficiente diversificación de productos de la industria del sector energía, debido al posicionamiento de las energías no renovables, basadas en energía fósil y la generación hidráulica. Esta situación se ve reflejada en una matriz energética principalmente conformada por fuentes energéticas convencionales (hidráulica y térmica) y con una baja participación de energías no convencionales.

Una dificultad importante en la penetración y expansión de las energías renovables no convencionales es su producción intermitente, debido a las variaciones climáticas propias de este tipo de fuentes [8]. Si bien este es un inconveniente, la coordinación de la generación eléctrica con respecto a los periodos de mayor y menor producción permite que esta dificultad se mitigue [9]. En este contexto, un análisis de la complementariedad de las fuentes renovables no convencionales puede contribuir a la competitividad de regiones con un alto potencial de producción energética. La figura 1 presenta el potencial mensual de energía solar, hidráulica y velocidad del viento en Colombia en el periodo 2015. Esta condición exhibe como los recursos energéticos se complementan en cada uno de los meses de un año. Por lo tanto, la complementación puede ser un factor determinante para la competitividad de las regiones del país.

Figura 1. Potencial mensual de los recursos de generación de energía en Colombia en el año 2015



Fuente: Modificado a partir de [10].

El crecimiento económico de una región está relacionado con el incremento en el consumo energético [11]. El desarrollo industrial, por lo tanto, conlleva un aumento en los indicadores de consumo de energía a un precio más bajo y competitivo con respecto a otros países o regiones. Este artículo muestra una aproximación de la relación entre la industria energética y la cobertura de electricidad (número

1 Accidente en tránsito al lugar de trabajo.

2 Seguridad y Salud en el Trabajo.

de usuarios) como indicador de desarrollo de la industria de electricidad, así como el impacto de la insuficiente cobertura de electricidad.

Estudios previos muestran la importancia de las energías renovables no convencionales y sus efectos positivos en comunidades aisladas [12], [13], [7]. En este sentido, una mirada desde las alternativas políticas para el desarrollo de energía en regiones apartadas contribuye a la construcción de un marco de desarrollo de la industria de energías no convencionales para Colombia.

El impacto social de una baja cobertura de electricidad en regiones apartadas mitiga la posibilidad de aumentar los indicadores de competitividad y bienestar social de las comunidades [14]. En este sentido, la necesidad de íticas alternativas que contribuyan a mejorar el desarrollo industrial, a través de la cobertura de tecnologías limpias a precios más bajos, debe estar orientada por un conjunto de posibilidades para el despliegue de las energías no convencionales.

Las siguientes secciones que conforman este artículo se encuentran divididas como sigue. La sección 2 presenta los antecedentes de investigación que soportan la hipótesis de los autores y la importancia del tema en términos de desarrollo industrial de las regiones. La sección 3 muestra una visión general del método utilizado para abordar la hipótesis planteada por los autores. La sección 4 muestra los resultados del modelo de simulación para el caso de Colombia. Los resultados son discutidos a partir de alternativas de política en tres aspectos fundamentales de análisis: condiciones ambientales, desarrollo industrial y nivel de bienestar. La sección 5 presenta las conclusiones preliminares del estudio.

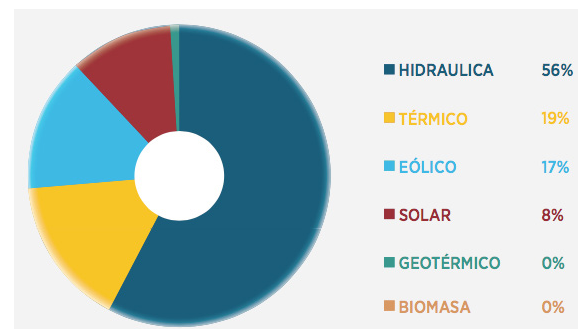
## ANTECEDENTES

A partir de la Ley 113 de 1928, el Gobierno colombiano declara la generación de energía eléctrica como prioridad pública. Sin embargo, solo a principios de los años 90 se avanza en la modernización del sector eléctrico, incorporando la participación privada y liberando el mercado de electricidad [15]. Posteriormente, en el año 2001 a través de la Ley 697, el país desarrolla una agenda para reformar el sector energético e incentivar la inversión extranjera, con el fin de promover la extracción de hidrocarburos y la expansión de la capacidad instalada. Esta visión extractiva ha llevado a preocupantes consecuencias en el orden ambiental, social y económico

de algunas regiones, como por ejemplo Putumayo, Antioquía, Boyacá y Choco. Una consecuencia de las políticas extractivas en términos sociales está relacionada con el desplazamiento de poblaciones e impactos que comprometen la sostenibilidad ambiental [14], [16].

La matriz energética de Colombia está conformada principalmente por la generación de energía hidráulica que alcanza el 66%, seguida por la generación térmica con el 33% de participación del mercado eléctrico [17]. Esta participación da cuenta de la baja porción e interés de la producción de energías renovables no convencionales. Con la Ley 1715 del año 2014, una oportunidad para la promoción y difusión de energías renovables no convencionales se ha generado. En el caso de Colombia, la Ley 1715 del 2014 regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético de la nación; sin embargo, este marco legal no presenta un enfoque claro que permita identificar donde dirigir los esfuerzos que incentiven una producción de energía en firme [18]. En este contexto, la auto-generación es, por lo tanto, un aspecto primordial en esta ley. Posibilitar las condiciones para que la autogeneración y la respuesta de la demanda tengan un mayor papel en la oferta debe convertirse en eje primordial para el desarrollo energético del país [18]. Los sistemas de energía solar se convierten en una alternativa para el desarrollo de las regiones a partir de la producción energética en los hogares colombianos [19]. La figura 2 presenta la matriz energética que se proyecta para el año 2023. A pesar del incremento de participación de energías no convencionales en 17% energía eólica y 8% solar, es posible que no sea suficiente para el despliegue de estas tecnologías limpias.

Figura 2. Matriz energética proyectada para el 2023



Fuente: [20].

A pesar del lento crecimiento para el despliegue de la energía solar fotovoltaica en Colombia, un auge

de compañías de instalación y montaje de paneles solares se ha desarrollado en las principales ciudades del país, como se ilustra en la tabla I. Un mayor número de compañías de instalación de paneles solares se ubica en Bogotá con 5 compañías, le sigue Medellín con 4 compañías y por último Cali con 2 compañías. Sin embargo, este número ha venido en aumento con respecto al creciente interés de los

usuarios institucionales. Esto implica el desarrollo de políticas industriales que fomenten el desarrollo no solo industrial, sino de innovación e investigación, que permita aumentar la competitividad en este sector. En este sentido, una gran cantidad de nuevos proyectos de energía solar se han comenzado a desarrollar en el país, como se presenta en la tabla II.

**Tabla I.** Algunas compañías de instalación y montaje de paneles solares en Colombia para el año 2018

NOMBRE DE LA EMPRESA	CIUDAD	FUENTE
SAUFER SOLUCIONES	Bogotá	www.energiasolar.saufer.com.co
CELSIA	Medellín	www.celsia.com
	Cali	
HYBRYTEC	Medellín	www.hybrytec.com
GLOBALEM SAS	Bogotá	www.globalem.co
INVERSIONES FERNANDO IRAL S.A.S	Medellín	www.ifi.com.co
ORQUIDEA SOLAR S.A	Medellín	www.orquideasolar.co
SOLARMAX	Cali	www.solarmax.co
SOLEN TECHNOLOGY	Bogotá	www.solentechnology.com
INGSOLAR	Bogotá	www.ingsolar.com.co
ENERGIA INTEGRAL ANDINA	Bogotá	www.energiaintegralandina.com

Fuente: Elaboración propia.

**Tabla II.** Muestra de algunos proyectos de sistemas de energía solar fotovoltaica en Colombia

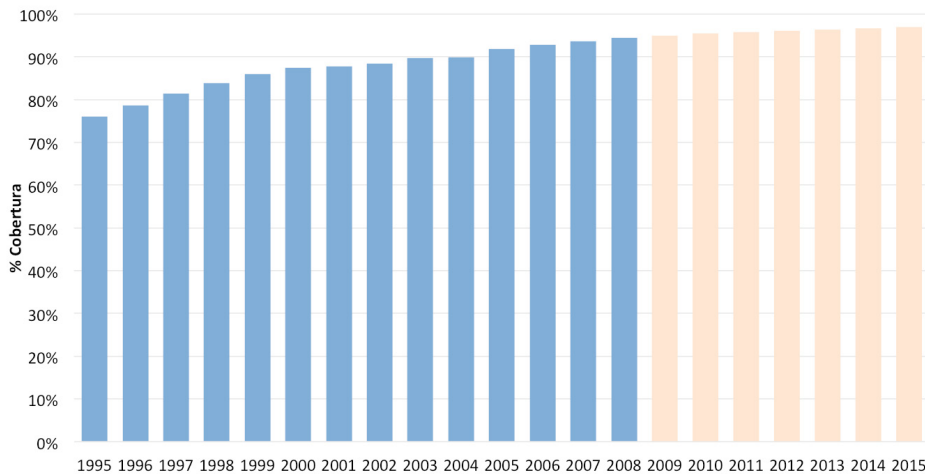
	N.º DE SISTEMAS	CAPACIDAD AGREGADA (KW)
Sistema de capacidad instalada >100 kWp	6	1412
Sistema de capacidad instalada entre 30 y 100 kWp	10	444
Sistema de capacidad instalada entre 10 y 30 kWp	28	419
Sistema de capacidad instalada entre 3 y 10 kWp	34	194
Sistema de capacidad instalada <3 kWp	55	70
<b>Total</b>	<b>133</b>	<b>2539</b>

Fuente: [10].

El sistema eléctrico se clasifica en Sistema Interconectado Nacional (SIN), encargado de la distribución en zonas de alto porcentaje de urbanización y número de habitantes, y Zonas No Interconectadas (ZNI), que se caracterizan por densidades poblacionales bajas y con escaso nivel de desarrollo. La figura 3 muestra la cobertura desde 1995 hasta el 2008

del SIN que no incluye las ZNI, mientras que a partir del 2009 hasta el 2015 se muestra la cobertura total que incluye las ZNI. El sistema SIN cubre el 34% del territorio de Colombia y atiende el 97% de la población, mientras que ZNI comprenden el 66% del territorio nacional y alcanzan el 3% de la población.

Figura 3. Dinámica del índice de cobertura de electricidad para el periodo 1995 al 2015



Fuente: [21].

La cobertura en las áreas urbanas es de 99%, mientras que en el área rural solo alcanza el 87% [21]. Los departamentos con mayor número de usuarios y menor porcentaje de cobertura están cubiertos en el SIN, mientras que para el ZNI ocurre todo lo contrario. En este sentido, la figura 4 presenta el número de interrupciones del servicio de electricidad al año que se produce por departamentos de acuerdo con la empresa prestadora del servicio. Esto evidencia que, en los departamentos de Tolima, Córdoba, Sucre, Bolívar, Atlántico, Magdalena, Cesar y La Guajira, el promedio de interrupciones del servicio de electricidad es mayor, lo cual conlleva una baja productividad asociada a las compañías industriales del sector acompañada con altos precios de electricidad.

La cobertura eléctrica en el país es de suma relevancia, ya que de acuerdo con la calidad y precio del servicio eléctrico los niveles de competitividad y productividad de las organizaciones pueden variar. Los precios y calidad del servicio influyen en la estructura de costos de las organizaciones, lo cual

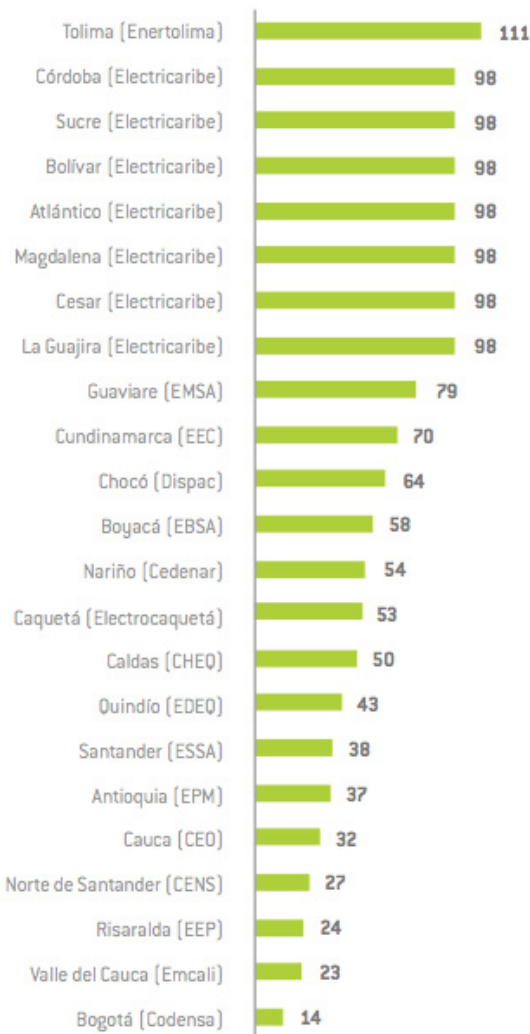
determina la certidumbre de la prestación de servicios o producción de bienes [18]. En términos de precio del mercado, Colombia exhibe uno de los mayores precios de energía industrial en la región, el cual es superior en un 12% al precio promedio, como se muestra en la figura 5.

Por lo tanto, la cobertura del suministro en las industrias desempeña un papel importante para la competitividad. Colombia en este aspecto ocupa la posición 79 entre 137 países en el indicador de confiabilidad de suministro eléctrico [22]. Esto evidencia la necesidad del desarrollo de políticas alternativas para el desarrollo de la industria de energías renovables no convencionales para el país.

En resumen, una preocupación de la insuficiente cobertura en regiones apartadas produce un efecto económico que trasciende en los niveles de competitividad del país. Este problema es abordado en este artículo, a través del modelado, para proponer alternativas de política para el problema de cobertura y sus implicaciones económicas.



**Figura 4.** Frecuencia promedio de las interrupciones a los usuarios (número/año) para el año 2017



Fuente: [18].

## MATERIALES Y MÉTODOS

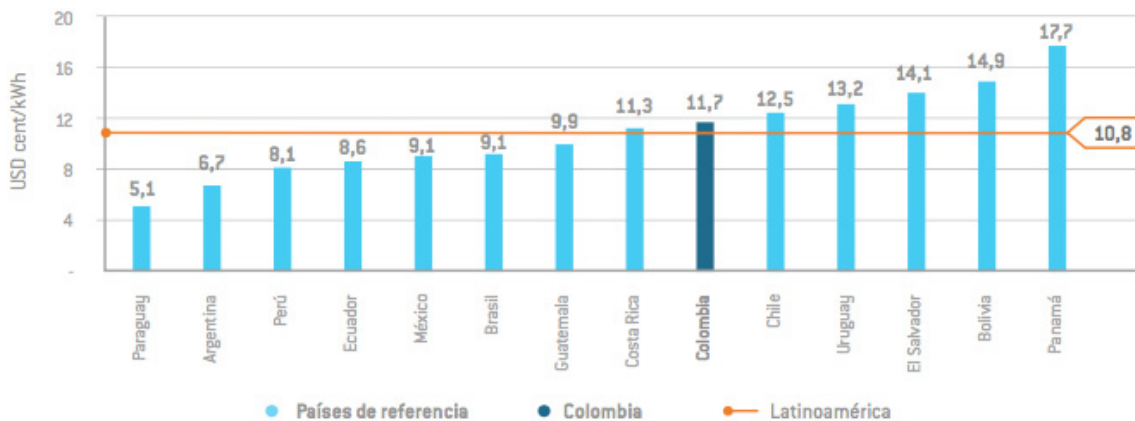
El análisis de alternativas de política propuesto en este artículo se basa en la metodología de simulación de la dinámica de sistemas [23]. Esta metodología ha sido aplicada en varios estudios relacionados con el mercado de la electricidad [24], [25], [26], [27], [28].

Inicialmente, se realiza una representación de la estructura del sistema utilizando un diagrama causal, el cual permite mostrar las relaciones de las variables y los ciclos de realimentación que se vinculan a los comportamientos del sistema y del problema en estudio. Posterior a esta representación, se desarrolla una estructura de simulación basada en un diagrama de flujo y niveles que permite representar las relaciones obtenidas del diagrama causal y simular el comportamiento de las alternativas de política para el análisis de la cobertura y las implicaciones económicas. Finalmente, se presentan los resultados de simulación y contribuciones al problema en estudio.

### A. Hipótesis dinámica

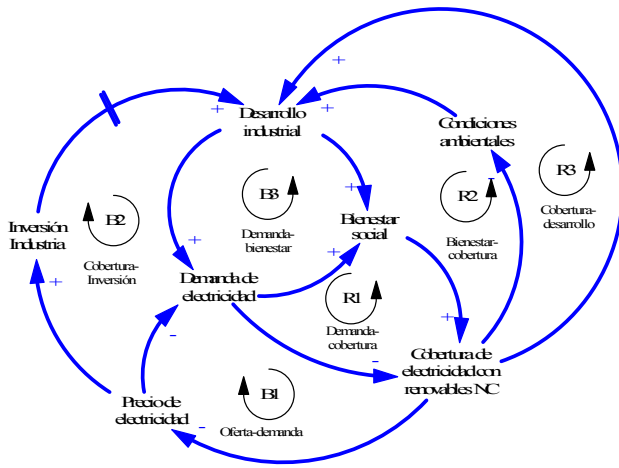
La hipótesis dinámica se desarrolla sobre una estructura del diagrama causal que se presenta en la figura 6. A través de esta representación se analiza la falta de cobertura de electricidad con fuentes de energía no convencional y las implicaciones con el desarrollo industrial. La estructura del diagrama causal propuesto se basa en otro estudio empírico anteriormente desarrollado en regiones aisladas de Colombia [29].

**Figura 5.** Tarifas industriales para el consumo mensual superior a 500.000 kWh, segundo trimestre de 2017



Fuente: [18].

Figura 6. Diagrama causal para el análisis de la cobertura y sus implicaciones económicas



Fuente: Elaboración propia.

El diagrama causal está compuesto por tres bucles de balance y tres de refuerzo. Por una parte, el bucle B1 representa la dinámica del mercado entre la oferta y demanda (precio, demanda y cobertura). El bucle B2 representa el efecto de la inversión industrial sobre el desarrollo industrial y este a su vez sobre la cobertura de electricidad con fuentes renovables no convencionales. Finalmente, el bucle B3 representa la dinámica de demanda sobre el bienestar social y esta como impacto sobre la cobertura y las condiciones climáticas que equilibran el sistema. Por otra parte, el refuerzo R1 representa el efecto de la demanda sobre la cobertura de electricidad. El bucle de refuerzo R2 representa la relación entre el bienestar y la cobertura y, por último, R3 representa la relación entre cobertura y desarrollo industrial.

### B. Diagrama de flujos y niveles

El diagrama de flujos y niveles es una representación del diagrama causal que permite realizar la simulación del sistema en estudio [30]. Este diagrama está compuesto por una serie de ecuaciones diferenciales que permiten calcular las variaciones sobre el tiempo de una variable determinada. En este caso, la ecuación (1) permite medir el cambio de la cobertura de electricidad de fuentes renovables no convencionales (FRNC) sobre el desarrollo industrial y las condiciones ambientales, ecuaciones (2) y (3), respectivamente. Estas dos condiciones afectan el nivel de bienestar que puede estar medido como el nivel de pobreza de una región determinada.

$$NC(t) = NC(t - dt) + \int_{t=0}^T [Inc(s)] ds \quad (1)$$

$$DI(t) = DI(t - dt) + \int_{t=0}^T [Ti(s) - Td(s)] ds \quad (2)$$

$$CA(t) = CA(t - dt) + \int_{t=0}^T [Ic(s) - Rc(s)] ds \quad (3)$$

Donde,

$NC(t)$ : Nivel de cobertura FRNC.

$Inc(s)$ : Incremento FRNC.

$DI$ : Desarrollo industrial.

$Ti$ : Tasa de incremento de desarrollo industrial.

$Td$ : Tasa de decrecimiento de desarrollo industrial.

$CA$ : Condiciones ambientales.

$Ic$ : Tasa de incremento de condiciones ambientales.

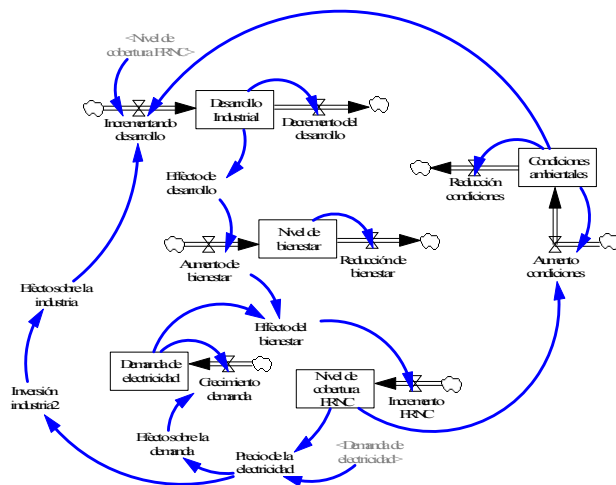
$Rc$ : Tasa de reducción de condiciones ambientales.

El diagrama de flujos y niveles propuesto para la simulación se presenta en la figura 7.

## IV. RESULTADOS

Los resultados de simulación muestran el impacto de la cobertura de las FRNC sobre tres aspectos fundamentales de análisis: condiciones ambientales, desarrollo industrial y nivel de bienestar. Los escenarios de simulación propuestos para el modelo contemplan los parámetros asociados en la tabla III. Adicionalmente, se presenta las condiciones de operación de los escenarios de simulación propuestos, basadas en los periodos presidenciales (4 años).

Figura 7. Diagrama de flujos y niveles propuesto para el modelo de simulación



Fuente: Elaboración propia.



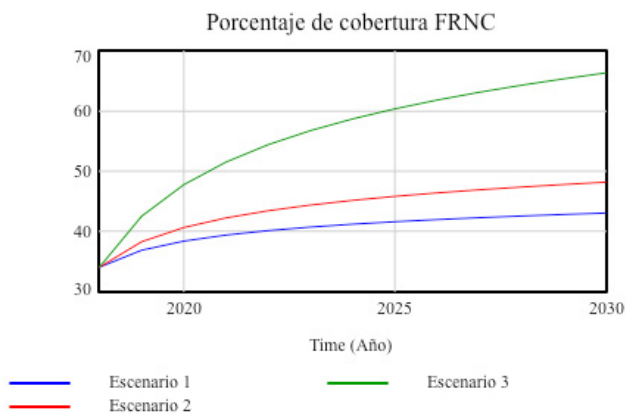
**Tabla III.** Escenarios de Simulación Propuestos

	CARACTERÍSTICA
Escenario 1	El escenario asume un retraso de cobertura de electricidad de 12 años y despliegue lento de FRNC
Escenario 2	El escenario asume un retraso de cobertura de electricidad de 8 años y despliegue promedio de FRNC
Escenario 3	El escenario asume un retraso de cobertura de electricidad de 4 años y despliegue intensivo de FRNC

Fuente: Elaboración propia.

La figura 8 presenta los resultados para cada escenario propuesto relacionado con el despliegue de las FRNC y los retardos de cobertura de electricidad. Los resultados muestran el comportamiento del porcentaje de territorio cubierto por las FRNC entre el periodo de simulación que comprende 12 años a partir del 2018. En este caso, los resultados evidencian que el aumento del porcentaje de cubrimiento de las FRNC requiere menor tiempo para su despliegue, lo cual se evidencia en el escenario 3. Esto quiere decir que un retraso mayor para el despliegue de las FRNC genera un impacto en el suministro de electricidad en términos del porcentaje de cobertura de una región.

**Figura 8.** Comportamiento del nivel de cobertura de fuentes renovables no convencionales

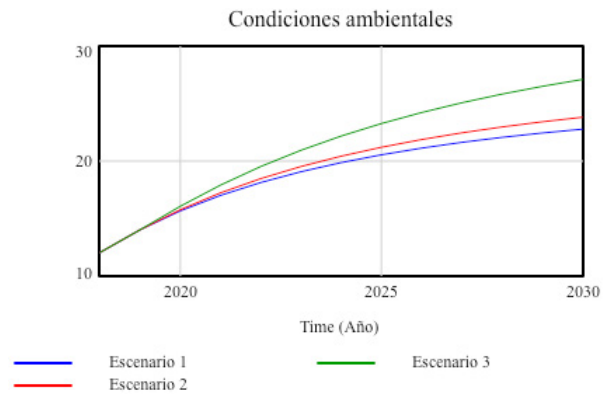


Fuente: Elaboración propia.

La implicación del cambio en la cobertura de electricidad sobre el comportamiento de la variable de condiciones ambientales se observa en la figura 9. El porcentaje que determina el impacto positivo sobre la condición ambiental, por ejemplo, reducción de emisiones, está relacionado con los cambios en la cobertura del suministro de electricidad basados FRNC. Los resultados evidencian que el despliegue de las FRNC permite un aumento en las condiciones ambientales pasando de un 12% a 26%. Otros trabajos

anteriores demuestran también las bondades en este aspecto de las energías renovables no convencionales [4].

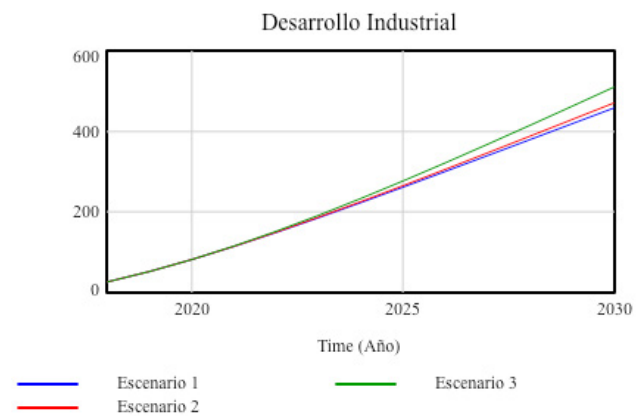
**Figura 9.** Comportamiento de la variable condiciones ambientales (porcentaje)



Fuente: Elaboración propia.

La figura 10 muestra los resultados de los escenarios de simulación medido como el incremento de la capacidad de producción en unidades de la industria agregada. Estos resultados muestran que para los escenarios 1 y 2 los incrementos son muy similares y que para los tres escenarios solo se evidencia una diferencia significativa después del año 2023, mayor en el escenario 3. Esto implica un mayor esfuerzo en el despliegue de las FRNC que contribuyan a un mayor desarrollo de las capacidades de la industria.

**Figura 10.** Dinámica del desarrollo industrial (incremento en capacidad de producción-unidades)

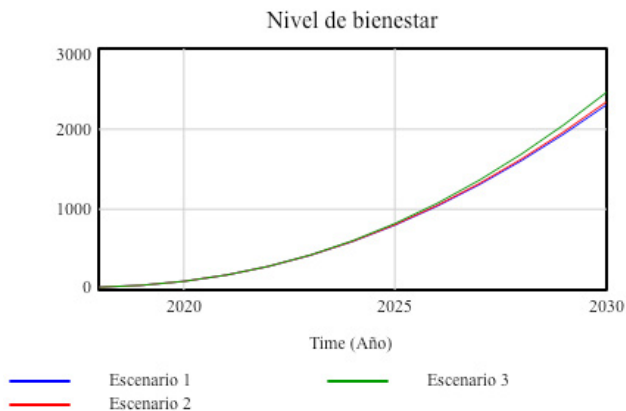


Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, los resultados del nivel de bienestar como unidad en usuarios cubiertos se presenta en

la figura 11. Los resultados muestran que el escenario 3 marca una leve diferencia a partir del año 2025, lo cual indica que el caso de las FRNC requiere de un menor tiempo de desarrollo para lograr un mejor nivel de bienestar y cobertura de usuarios. Si bien no existe una diferencia significativa entre los dos primeros escenarios y el tercer escenario, esto evidencia la necesidad de una política alternativa enfocada en el despliegue de FRNC que permitan mejores niveles de cobertura y desarrollo industrial.

Figura 11. Comportamiento de número de usuarios cubiertos-nivel de bienestar



Fuente: Elaboración propia.

## CONCLUSIONES

El artículo presenta tres escenarios que evalúan el incremento de capacidad de producción (desarrollo industrial), las condiciones ambientales y el número de usuarios cubiertos por el suministro de electricidad (nivel de bienestar), con el fin de proponer alternativas de política basadas en el despliegue de las FRNC y el análisis de las demoras en la cobertura de electricidad. La estructura del modelo contribuye en el análisis dinámico de las relaciones que impactan el desarrollo industrial combinadas con las consideraciones de suministro de electricidad en términos de condiciones ambientales y cobertura de usuarios. A diferencia de otros modelos propuestos en la literatura [5, 19, 6], este modelo propone un análisis desde el desarrollo de la industria de electricidad (capacidad de producción) relacionado con el análisis de los niveles de cobertura y condiciones ambientales.

Las implicaciones económicas y desarrollo industrial deben contemplar el tiempo de despliegue y desarrollo de las FRNC, con el fin de entender las futuras

capacidades de la industria de la electricidad en las regiones. Una reducción en los tiempos de apropiación de las tecnologías limpias no convencionales permite no solo el desarrollo industrial, sino también contribuye en el bienestar de una población, medido como la reducción del nivel de pobreza. El trabajo concluye con una propuesta política de alternativas para la implementación de energías no convencionales en regiones apartadas.

## REFERENCIAS

- [1] K. H. Solangi, M. R. Islam, R. Saidur, N. A. Rahim, H. Fayaz, "A review on global solar energy policy". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 2149-2163, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.01.007
- [2] O. Bahn, N. R. Edwards, R. Knutti, T. F. Stocker, "Energy policies avoiding a tipping point in the climate system", *Energy Policy* 39, 334-348, 2011. doi: 10.1016/j.enpol.2010.10.002
- [3] A. Bazmi, G. Zahedi, "Sustainable energy systems: Role of optimization modeling techniques in power generation and supply. A review". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 3480-3500, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2011.05.003
- [4] M. Jimenez, C. Franco, I. Dyner, "Diffusion of renewable energy technologies: The need for policy in Colombia". *Energy* 111, 818-829, 2016. doi: 10.1016/j.energy.2016.06.051
- [5] S. Arango, I. Dyner, E. Larsen, "Lessons from deregulation: Understanding electricity markets in South America". *Util. Policy* 14, 196-207, 2006. doi: 10.1016/j.jup.2006.02.001
- [6] M.M. Herrera, A. Guerrero, C. Sandoval, "A review of the photovoltaic supply chain in Latin America : challenges and opportunities". *Rev. Virtual Pro*
- [7] J. Silveira, C. Tuna, W. Lamas, "The need of subsidy for the implementation of photovoltaic solar energy as supporting of decentralized electrical power generation in Brazil". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 20, 133-141, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2012.11.054
- [8] H. de Faria, F. Trigo, J. Cavalcanti. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. *Renew. Sustain. Ener-*

- gy Rev. 75, 469-475, 2017. doi: 10.1016/j.rser.2016.10.076
- [9] M. Hasani, S. Hosseini, Dynamic assessment of capacity investment in electricity market considering complementary capacity mechanisms. *Energy* 36, 277-293, 2011. doi: 10.1016/j.energy.2010.10.041
- [10] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), Banco Interamericano de Desarrollo (BID), Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia, Ministerio de Minas y Energía, 2015
- [11] H. Pao, H. Fu, "Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 25, 381-392, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.05.004
- [12] J. Cherni, I. Dyer, F. Henao, P. Jaramillo, R. Smith, R. Font, "Energy supply for sustainable rural livelihoods. A multi-criteria decision-support system". *Energy Policy* 35, 1493-1504, 2007. doi: 10.1016/j.enpol.2006.03.026
- [13] F. Henao, J. Cherni, P. Jaramillo, I. Dyer, I., "A multicriteria approach to sustainable energy supply for the rural poor". *Eur. J. Oper. Res.* 218, 801-809, 2012. doi: 10.1016/j.ejor.2011.11.033
- [14] A. Cherp, V. Vinichenko, J. Jewell, E. Brutschin, B. Sovacool, "Integrating techno-economic, socio-technical and political perspectives on national energy transitions: A meta-theoretical framework". *Energy Res. Soc. Sci.* 37, 175-190, 2018. doi: 10.1016/j.erss.2017.09.015
- [15] M. Zuluaga, I. Dyer, I., "Incentives for renewable energy in reformed Latin-American electricity markets: the Colombian case". *J. Clean. Prod.* 15, 153-162, 2007. doi: 10.1016/j.jclepro.2005.12.014
- [16] A. Juárez, A. Araújo, J. Rohatgi, O. de Oliveira Filho, "Development of the wind power in Brazil: Political, social and technical issues". *Renew. Sustain. Energy Rev.* 39, 828-834, 2014. doi: 10.1016/j.rser.2014.07.086
- [17] [Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2016). Boletín estadístico de Minas y Energía 2012-2016 [Online]. Disponible en [http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin\\_Estadistico\\_2012\\_2016.pdf](http://www1.upme.gov.co/PromocionSector/SeccionesInteres/Documents/Boletines/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf)
- [18] Consejo Privado de Competitividad, "Informe nacional de competitividad 2017-2018 271", 2017
- [19] L. Cardenas, M. Zapata, C. Franco, I. Dyer, "Assessing the combined effect of the diffusion of solar rooftop generation, energy conservation and efficient appliances in households". *J. Clean. Prod.* 162, 491-503, 2017. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.06.068
- [20] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), "Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano-Marzo de 2017 Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo de Generación [Online]. Disponible en [http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2017/Informe\\_de\\_variables\\_Mar\\_2017.pdf](http://www.siel.gov.co/portals/0/generacion/2017/Informe_de_variables_Mar_2017.pdf)
- [21] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), "Encuesta de desarrollo e innovación tecnológica en la industria manufacturera". *Dane* 3, 1-18
- [22] K. Schwab, The Global Competitiveness Report The Global Competitiveness Report 2017-2018, World Economic Forum, 2017. doi: 92-95044-35-5
- [23] J. Forrester, "Industrial dynamics". *J. Oper. Res. Soc.* 48, 1037-1041, 1997
- [24] I. Dyer, E. Larsen, "From planning to strategy in the electricity industry". *Energy Policy* 29, 1145-1154, 2001. doi: 10.1016/S0301-4215(01)00040-4
- [25] A. Ford, "System Dynamics and the Electric Power Industry". *Syst. Dyn. Rev.* 13, 57-85. doi: 10.1002/(SICI)1099-1727(199721)13:1<57::AID-SDR117>3.0.CO;2-B
- [26] M.M. Herrera, I. Dyer, F. Cosenz, F., Effects of the penetration of wind power in the Brazilian electricity market. *Rev. Ing. Ind.* 15, 309-319
- [27] R. Naill, "A system dynamics model for national energy policy planning". *Syst. Dyn. Rev.* 8, 1-19, 1992. doi:10.1002/sdr.4260080102

- [28] J. Sterman, *Business dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Cambridge: McGraw-Hill, 2000
- [29] C. Franco, I. Dyer, S. Hoyos, Contribution of the Energy At Development of Islated Communities in Not Interconnected Zones: a Case of Application of the Systems Dynamics and Sustainable Livelihood. *Dyna* 75, 199-214, 2008
- [30] M.M. Herrera-Ramírez, J. Orjuela-Castro, H. Sandoval-Cruz, M. Martínez-Vargas, *Modelado dinámico y estratégico de la cadena agroindustrial de frutas*. Bogotá: Universidad Piloto de Colombia