

INTEGRACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES A REDES DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA EXISTENTES

[Juan C. Salavarieta](#), Consultor en Innovación Tecnológica (COLINNOVACION)

Resumen — En el país se encuentran zonas geográficas en donde se presentan una alta probabilidad de inversión en proyectos asociados con generación eléctrica a través de fuentes no convencionales de energía. Estas zonas del país son ricas en radiación solar y viento constante, lo que motiva a las empresas a desarrollar proyectos de generación aprovechando condiciones geográficas y medioambientales. Sin embargo, es fundamental determinar los problemas y retos para la incorporación de dichos proyectos de generación al STN (Sistema de Transmisión Nacional) y determinar las especificaciones técnicas que lo hacen viable.

Palabras Clave — FNCER, Fuentes no Convencionales de Energía, Energía Eólica, Energía Solar Fotovoltaica.

1. INTRODUCCIÓN

Colombia en la actualidad enfrenta grandes retos para lograr la integración de sistemas de fuentes no convencionales de energía como la generación eólica y solar a gran escala. Por tanto, se hace necesario realizar investigaciones de carácter tanto técnico como tecnológico que permitan identificar desde los impactos económicos que tendría la implementación de este tipo de proyectos para las empresas, al igual que los mecanismos de integración de este tipo de generación al sistema de transmisión nacional (STN) ya que por su naturaleza requerirán de medios de almacenamiento y de transmisión que no han sido aún utilizados en gran escala en Colombia, por lo que definir metodologías para lograr integrarlas al STN es de vital importancia para lograr el éxito en este tipo de esquemas de generación.

La naturaleza de las fuentes de energía no convencional es caracterizada por inyecciones fluctuantes de potencia, en un sistema de transmisión que puede ser controlada o mitigada con nuevas tecnologías asociadas, como, por ejemplo, el almacenamiento de energía. A su vez, el desarrollo de parques eólicos o granjas solares de gran escala se ve afectado por factores de impacto técnico, ambiental y social que requieren ser analizados.

Uno de los retos que se presentan se centra en que las fuentes de energía renovable han incrementado su participación de manera exponencial en los mercados eléctricos mundiales, es por eso que los sistemas convencionales de generación, transmisión y distribución, y los esquemas de mercado locales enfrentan nuevos retos para ser más eficiente su operación, desarrollo y pla-

neación. Las experiencias internacionales demuestran que a través de diversos estudios y reportes elaborados por centros de investigación, agencias estatales, consultores independientes e investigadores como por ejemplo la IEA (International Energy Agency) que reflejan lo que en años recientes se ha constituido en toda una línea de investigación y estudio alrededor de los aspectos que requieren ser abordados al momento en que inicia la concepción de este tipo de proyectos (IDB, 2012).

Los impactos estudiados sugieren la necesidad de aplicar cambios a las prácticas operacionales, introducir nuevos mecanismos de mercado y realizar inversiones en infraestructura con nuevos sistemas y esquemas organizacionales (UPME, 2016).

El desarrollo de un proyecto de generación de energía no convencional y su respectiva interconexión al STN (Sistema de Transmisión Nacional), como se muestra en la figura 1, debe tener en cuenta los impactos asociados a la operación y al desarrollo de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica en sistemas de transmisión de AT (alta tensión) y la transmisión en HVDC / HVAC (High Voltage Direct Current / High Voltage Alternate Current) para la conexión y optimización de la operación de generación. Este tipo de proyectos deben evaluar lo siguiente (Zahedi, 2011):

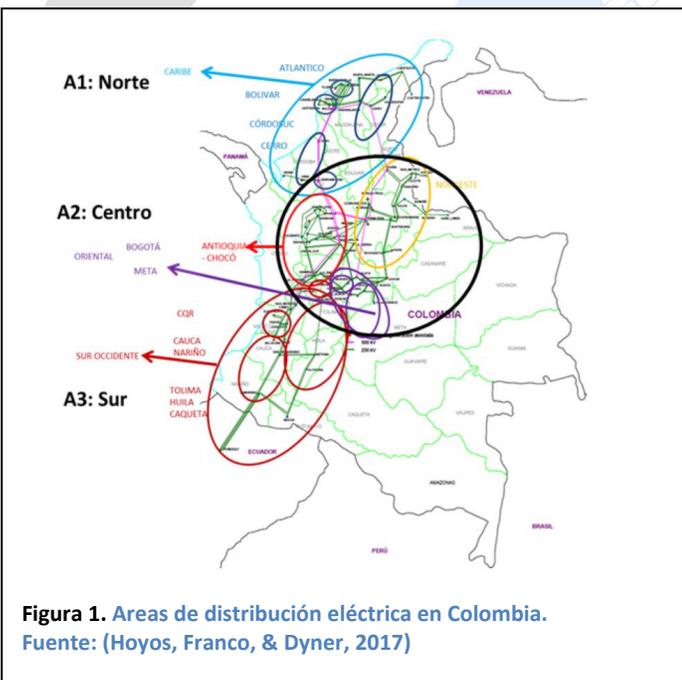
- Alternativas de conexión de parques eólicos y granjas solares entre 300 a 400 MW y los impactos de estabilidad del sistema interconectado nacional (SIN), (ver Figura 1), por la integración este tipo de proyectos en el sistema colombiano usando tecnologías de conexión HVAC (líneas de transmisión AC convencionales de alta

tensión) y HVDC.

- Impactos en capacidad de transmisión y estabilidad, se originan al ubicar grandes equipos de almacenamiento de energía eléctrica en sistemas de transmisión, lo que permite disminuir la variabilidad de la potencia generada y aportada por el generador al SIN.

- Determinar las tecnologías de almacenamiento de energía que permitan aprovechar el recurso con el fin de reconocer los posibles beneficios de la incorporación de los sistemas de almacenamiento en redes de transmisión.

- Evaluación inicial de los impactos ambientales de orden mayor de la utilización de las tecnologías de transmisión y de almacenamiento de energía en AT (Alta Tensión), que permitan viabilizar el proyecto



El siguiente artículo hace una introducción a los modelos usados para la implementación de fuentes no convencionales de energía al SNT, analizando los beneficios e impactos de su implementación

2. MODELOS de PLANEACIÓN DE LA OPERACIÓN DE GENERACIÓN

Los modelos de planeación son usados para analizar cómo evoluciona y cómo se comporta la sostenibilidad del sistema energético. Son generalmente modelos Bottom-up, que a partir de un conjunto de tecnologías de generación e información de demanda determinan el costo/beneficio de las alternativas de planeación y con-

tribuyen a alcanzar eficiencia en términos de política y estrategia energética. (Bhattacharyya & Timilsina, 2010).

Cada modelo es más una herramienta que una solución estándar y permite representar la complejidad del sistema eléctrico y de generación, donde se puede considerar la operación agregada o individual de las plantas, analizando el horizonte de la operación y las restricciones técnicas del sistema para adecuarse a los límites del costo de la inversión. A continuación, se resumen algunos de los modelos más populares usados en el planeamiento de la expansión y operación generación:

MARKAL y TIMES con la participación de diferentes laboratorios y grupos de investigación y auspiciado por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) es una familia de herramientas que permiten evaluar el progreso de un sistema energético sobre un periodo de 40 a 50 años (Loulou, Goldstein, & Noble, 2004). TIMES es un modelo de generación basado en programación lineal que permite minimizar los costos del sistema y cuya optimización incluye toda la cadena del proceso de generación (Loulou, Goldstein, & Noble, 2004).

MADONE es desarrollado por Electricité de France (EDF) y evalúa el sistema eléctrico europeo por completo: Es un modelo multi-energético (varias fuentes de energía) que puede tratar con la variabilidad y la incertidumbre en la oferta y demanda de energía. El modelo Continental, también desarrollado por EDF, hace simulaciones sobre el despacho de energía para sistemas hidro-térmicos, incluyendo los costos de inversión en generación, los precios de la energía y la remuneración de los agentes (Burtin & Silva, 2015).

WASP, desarrollado para la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA por sus siglas en inglés), es un modelo usado para determinar la expansión óptima de generación considerando los requerimientos de confiabilidad del sistema (IAEA, 1985). Este modelo fue tradicionalmente empleado en sistemas con alta componente térmica.

LEAP/OSeMOSYS, permite calcular los escenarios de expansión de la operación y de la transmisión bajo un esquema de menor costo de inversión y operación usando un modelo de despacho (Bhattacharyya & Timilsina, 2010).

SUPER OLADE, modela la expansión de la generación y transmisión eléctrica de un sistema hidro-térmico interconectado a mediano y largo plazo, lo que permite una optimización del costo de la inversión, minimizando el riesgo de pérdidas de energía (Schaeffer, y otros, 2014).

OPTGEM es un modelo para la planificación de la expansión de la generación e interconexiones energéticas. El

objetivo de este modelo es determinar el esquema de inversión de mínimo costo (suma de los costos de inversión más el valor esperado de los costos de operación) destinado a la construcción de nuevas plantas de generación y líneas de interconexión entre sistemas. (ETESA, 2009).

3. BENEFICIOS DE LA INTEGRACIÓN DE FUENTES RENOVABLES

Es necesario identificar los beneficios que se obtienen de la integración de fuentes no convencionales de energía a redes de energía consolidadas en los sistemas de transmisión locales. Diversas fuentes como como (Zahedi, 2011), (IDB, 2012) & (IRENA, 2016) plantean beneficios a nivel macro como los de política de Estado como son: la seguridad energética, el logro de beneficios ambientales, la mitigación del cambio climático, la reducción de la contaminación del aire y mejoramiento de la salud pública, la generación de empleo. Esto lleva a los países a plantear una estrategia que lleve a su industria energética a ser base de crecimiento económico.

El Centro de Investigación en Energía de Holanda - Energy Research Centre of the Netherlands - (ECN, 2014) establece las características que van a ser impactadas en mayor medida al momento de hacer una integración a una red eléctrica, se debe considerar que estas dependen de factores particulares a cada sistema y cada caso:

- Factores de carga y los niveles de penetración involucrados.
- Perfiles de generación de las fuentes variables integradas.
- Curvas de carga y su correlación con la generación a partir de diferentes fuentes.
- La magnitud de la demanda pico.
- La mezcla de generación.
- El tamaño del área geográfica considerada y del área de balanceo en donde se realice el proyecto.
- Las conexiones de transmisión entre regiones / países.
- El diseño mismo de las redes de distribución.

En cuanto a los niveles de penetración de fuentes de energía no convencionales a la red, autores como (Georgilakis, 2006), (ECN, 2014), (IEA, 2014) & (Ueckerdt, Hirth, Luderer, & Edenhofer, 2014) coinciden en establecer una especie de regla general empírica, indicando que a niveles bajos de penetración en términos de la generación anual del sistema (del orden de 2%, 3%) no suelen evidenciarse mayores impactos (caso del escenario supuesto por (UPME-BID, 2015) para Colombia), mientras que los efectos empiezan a notarse con niveles de penetración superiores en el orden de 5% a 10% y progresivamente van cobrando mayor relevancia cuan-

do se alcanzan órdenes de penetración del 30% o 40% que son los máximos observados al día de hoy a nivel internacional (en promedio anual, no pico) Ibid.).

Es importante comentar que en el año 2015 el país con mayor índice de penetración en materia de la participación de renovables variables en su producción de energía eléctrica fue Dinamarca con un 42% de su electricidad generada a partir de energía eólica (The Guardian, 2016).

4. IMPACTOS DE LA INTEGRACIÓN DE FUENTES RENOVABLES

A su vez, los impactos de la integración de fuentes no renovables de energía a los que hace referencia la literatura en este campo de investigación, pueden clasificarse en cuatro categorías, las cuales se enumeran a continuación (ECN, 2014):

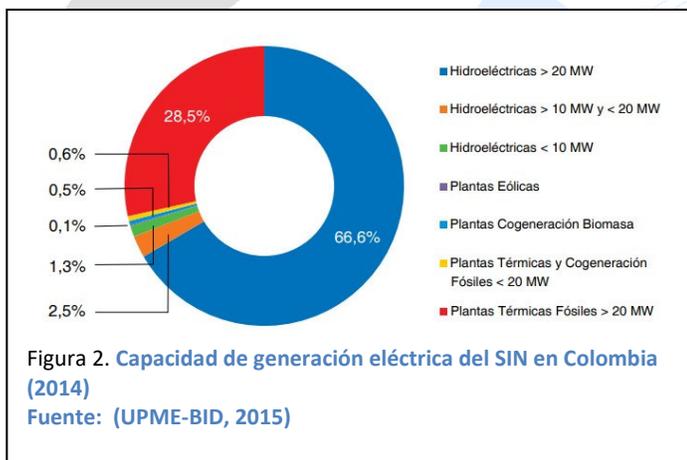
1. Impactos sobre el balance / control de frecuencia del sistema: categoría en la que se tienen en cuenta los costos asociados a la necesidad de incrementar el nivel de reserva energética y estabilidad del sistema, al igual que los costos ocasionados por la disminución de la potencia y el ciclo de generación exigido a plantas por los centros de despacho existentes, a su vez se tiene en cuenta la operación de estos equipos a un nivel de menor eficiencia y menor costo-efectividad.
2. Impactos sobre la red del sistema: se hace referencia tanto a redes de transmisión, como redes de distribución, cubriendo la necesidad de tener nuevas líneas para acceder a las zonas donde se cuenta con el recurso, lo mismo que de repotenciar o reforzar líneas existentes para atender nuevas exigencias operacionales. En este frente se pueden presentar igualmente beneficios en términos de reducción de pérdidas y desplazamiento en el tiempo de expansión de redes en el caso de sistemas de generación distribuida (IEA - RETD, 2014).
3. Impactos sobre la expansión y suficiencia del sistema: en esta categoría se contempla la disminución en el uso de plantas convencionales, dando lugar al llamado Utilisation Effect (el cual se centra en tecnologías que pueden conducir a formas nuevas y potencialmente más eficientes de utilizar la electricidad), y la necesidad de mantener plantas térmicas para darle seguridad o estabilidad al sistema.
4. Impactos sobre el mercado mayorista y sus precios: donde se incluyen en manera proporcional los efectos sobre los ingresos, la rentabilidad y la competitividad de las empresas generadoras, contando tanto a los que incluyen como a los que no incluyen las energías renovables entre sus portafolios.

Muchos de estos impactos se pueden mitigar con una

buena predicción de la energía disponible y diseño de los parques eólicos o plantas solares. Otras requieren ajustes a los esquemas de operación, expansión y manejo de los mercados.

5. MODELAMIENTO DE PLANTAS DE GENERACIÓN CON FUENTES VARIABLES

Se debe tener en cuenta como punto de partida las series debidamente caracterizadas de los recursos naturales utilizados para la producción de electricidad. Se hace necesario el modelamiento energético de las plantas que generan esa transformación energética a través de tecnologías hoy en día ampliamente desarrolladas como son aerogeneradores convencionales y paneles solares fotovoltaicos. En la siguiente figura, se puede observar la distribución por fuente de la mezcla energética en el país.



De manera general, se puede hablar de tres tipos de modelamiento que son utilizados en los estudios de planeamiento e integración de las energías renovables y que corresponden a: i) modelos de reducción de la demanda, ii) equivalentes hidro-térmicos, y iii) modelos independientes.

En el primer caso, se hace una modelación de la producción energética de las fuentes de energía renovable modificando la demanda horaria en función de dicha producción. Para esto, se define un perfil de producción horaria con base en el comportamiento del recurso (teniendo en cuenta condiciones climáticas promedio) y se reduce en esa misma medida la cantidad de energía demandada por el sistema. Pese a la facilidad de su utilización, esta alternativa de modelamiento presenta serios inconvenientes al momento de considerar la intermitencia y la incertidumbre en el comportamiento de los recursos renovables, ya que se deben tener en cuenta pronósticos de demanda semanales o mensuales, los cuales presentan deficiencias en la toma de datos.

El modelamiento bajo este principio considera que la

reducción en demanda se producirá con certeza y no hay manera de incorporar la probabilidad de una producción diferente, implicando adicionalmente distorsiones en la estimación del precio de la energía al no ser posible asumir tarifas de consumo y generación distintas entre sí para la generación distribuida. Adicionalmente, en análisis locales en los que la energía producida por los recursos renovables pueda superar la demanda, este enfoque presenta el problema de la aparición de bloques de demanda negativos (Carvacho Villanueva, 2011). Por los inconvenientes mencionados, el uso de esta alternativa de modelamiento resulta poco apropiado (Logan, Neil, & Taylor, 1994).

El segundo caso, en países como Colombia y Chile en los que se utiliza software específicamente diseñado para sistemas eminentemente hídricos y térmicos (como son el MPODE y el PLP - Modelo de Operación Económica de Largo Plazo de un Sistema Eléctrico), se ha hecho referencia al modelamiento de las energías renovables utilizando equivalentes hidro-térmicos, buscando la representación de la producción de energía de plantas eólicas y solares a partir de plantas hídricas equivalentes.

Esta alternativa cobra sentido en la medida en que una planta hídrica (a filo de agua) genera su energía según el comportamiento inmediato de una serie de caudales, de manera comparable a como sucede con un aerogenerador o un panel solar (a partir de una serie de velocidades de viento, o una serie de radiación solar, respectivamente). Luego, las metodologías de modelamiento utilizando esta alternativa consisten en hallar los caudales hídricos equivalentes que en conjunto con una planta filo de agua de determinadas especificaciones, mejor recrean la generación eléctrica producida a partir de la serie de viento o radiación solar y la planta de interés modelada (UPME, 2016) (Carvacho Villanueva, 2011).

Este tipo de modelamiento hidráulico para las energías renovables variables permite tener en cuenta la estocasticidad del recurso, y no presenta inconvenientes con relación a la formación de precios. A su vez, las dificultades que pueden resultar en su uso, están relacionadas con el detalle de modelamiento de tal generación que al ser transformada a una representación hídrica puede presentar pérdidas de información que afectan la precisión de los análisis, relacionadas con las aproximaciones utilizadas para representar la no linealidad de la curva de potencia de los aerogeneradores.

Para finalizar, la tercera alternativa de modelamiento consiste en usar modelos independientes de manera directa para cada fuente de generación renovable, que a partir de la información sobre el recurso permitan calcular la producción energética más probable. Se suelen calcular promedios de la producción en intervalos de tiempo, pero existen técnicas que permiten modificar los modelos para caracterizar de la mejor manera posible la generación de las fuentes en función de la resolu-

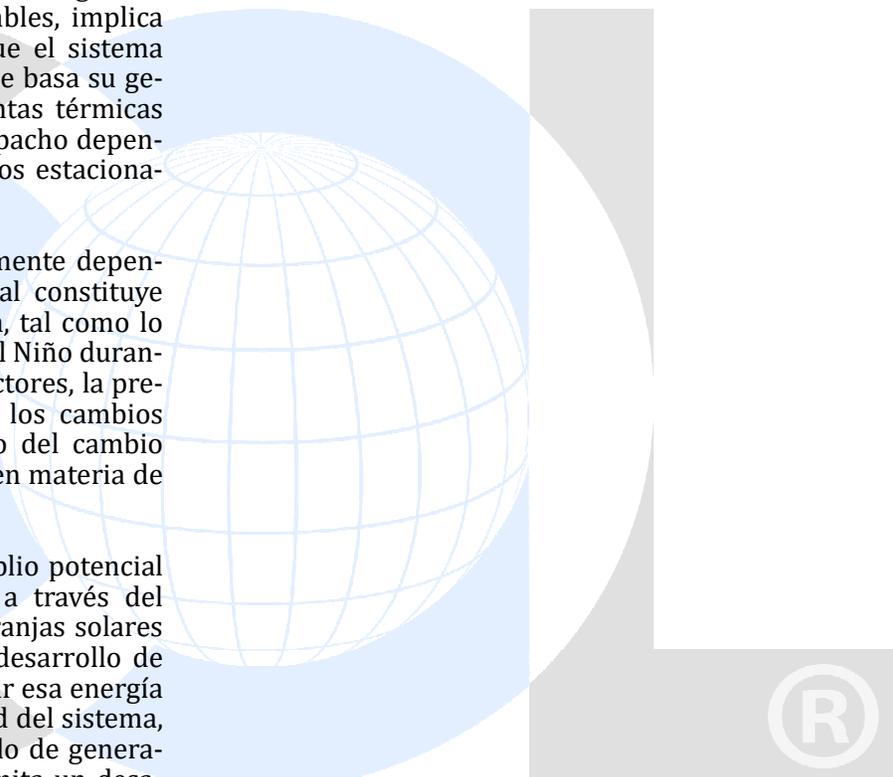
ción temporal seleccionada y de la información de recursos disponible. Por su mayor grado de precisión, es la alternativa de modelamiento que permite identificar y obtener el mayor detalle de información sobre las características, la producción y el comportamiento de la planta de generación a modelar (Carvacho Villanueva, 2011).

6. CONCLUSIONES

Adaptar el sistema eléctrico colombiano a un nuevo modelo de funcionamiento por medio de tecnologías de generación de energía con fuentes renovables, implica un desafío que debe ser estudiado, ya que el sistema colombiano es un sistema convencional que basa su generación en plantas hidroeléctricas y plantas térmicas (Ver figura 2), cuya participación en el despacho depende principalmente de los ciclos hidrológicos estacionales y fenómenos climáticos que los altera.

La matriz energética de Colombia es altamente dependiente de la energía hidroeléctrica, lo cual constituye una amenaza para la seguridad energética, tal como lo ha demostrado el impacto del fenómeno del Niño durante las últimas décadas. Además de estos factores, la previsible escasez de gas natural, sumada a los cambios en los patrones de precipitación producto del cambio climático, podría contribuir a los riesgos en materia de seguridad energética (BID, 2017)

El país, al momento de aprovechar el amplio potencial de generación eólica y solar disponible a través del desarrollo de grandes parques eólicos y granjas solares (UPME-BID, 2015), deberá invertir en el desarrollo de nuevas líneas de transmisión para distribuir esa energía y de refuerzos que garanticen la estabilidad del sistema, para esto, es esencial indagar en el modelo de generación para el país más apropiado, que permita un desarrollo del sector eléctrico con un enfoque de sostenibilidad y eficiencia largo plazo para el país.



INNOVACION

BIBLIOGRAFÍA

- Bhattacharyya, S. C., & Timilsina, G. R. (2010). A review of energy system models. *International Journal of Energy Sector Management*, 494-518.
- Burtin, A., & Silva, V. (2015). *Technical and Economic Analysis of the European Electricity System with 60% RES*. EDF Research and Development Division.
- Carvacho Villanueva, J. (2011). *Integración de generación eólica en estudios de coordinación hidrotérmica de mediano/largo plazo*. Santiago de Chile.
- ECN. (2014). *Cost and revenue related impacts of integrating electricity from variable renewable energy into the power system - A review of recent literature*.
- ETESA. (2009). *Metodología del Modelo Optgen y Metodología del Modelo SDDP*.
- Georgilakis, P. S. (2006). *Technical challenges associated with the integration of wind power into power systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 852-863.
- Hoyos, S., Franco, C., & Dyrer, I. (2017). Integración de fuentes no convencionales de energía renovable al mercado eléctrico y su impacto sobre el precio. *Ingeniería y Ciencia - EAFIT*, 115,146.
- IAEA. (1985). *Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook*. *Technical Reports Series*. International Atomic Energy Agency. Obtenido de https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TRS1/TRS2_41_Web.pdf
- IDB. (2012). *Societal benefits from renewable energy in Latin America and the Caribbean*. Technical Note: No. IDB-TN-623.
- IEA - RETD. (2014). *Residential Prosumers - Drivers and Policy Options (Re-Prosumers)*.
- IEA. (2014). *Grid Integration of Renewables: Executive Summary*.
- IRENA. (2016). *Renewable energy benefits: measuring the economics*.
- Logan, D., Neil, C., & Taylor, A. (1994). *Modeling Renewable Energy Resources in Integrated Resource Planning*. Boulder, Colorado: National Renewable Energy Laboratory. NREL.
- Loulou, R., Goldstein, G., & Noble, K. (2004). *Documentation for the MARKAL Family of Models*. Energy Technology Systems Analysis Programme.
- Schaeffer, R., Szklo, A., Lucena, A., Soria, R., González, E., Rathmann, R., & Chávez, M. (2014). *Manual de planificación energética*. OLADE Project.
- The Guardian. (16 de enero de 2016). *Denmark broke world record for wind power in 2015*. Obtenido de <http://www.theguardian.com/environment/2016/jan/18/denmark-broke-world-record-for-wind-power-in-2015>
- Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., & Edenhofer, O. (2014). *System LCOE: What are the costs of variable renewables?* Potsdam-Institute for Climate Impact Research.
- UPME. (2016). *Plan de expansión de referencia. Generación - Transmisión 2015-2029*.
- UPME-BID. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.
- Zahedi, A. (2011). *A review of drivers, benefits, and challenges in integrating renewable energy sources into electricity grid*. Queensland, Australia: School of Engineering and Physical Sciences, James Cook University.

INNOVACION