

# **SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS**

## **COMITÉ DE SEGUIMIENTO DEL MERCADO MAYORISTA DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Informe No 107 – 2016**

### **COMPETITIVIDAD DE LA ENERGIA EOLICA Y SOLAR EN EL MERCADO DE ENERGIA MAYORISTA**

**Preparado por:**

**Argemiro Aguilar Díaz**

**Gabriel Sánchez Sierra**

**Bogotá, Junio 16 de 2016**

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>COMPETITIVIDAD DE LA ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR EN EL MEM.....</b>	<b>2</b>
2.1	POTENCIAL DE COLOMBIA .....	2
2.1.1	<i>Eólico.....</i>	2
2.1.2	<i>Solar.....</i>	3
2.2	SITUACIÓN ACTUAL DE LA ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR EN COLOMBIA.....	3
2.3	EXPERIENCIAS INTERNACIONALES .....	5
2.3.1	<i>China .....</i>	5
2.3.2	<i>Estados Unidos.....</i>	6
2.3.3	<i>Alemania.....</i>	7
2.3.4	<i>España.....</i>	8
2.3.5	<i>Japón.....</i>	9
2.3.6	<i>Italia.....</i>	9
2.3.7	<i>India.....</i>	9
2.4	IMPACTOS AMBIENTALES Y EN COMUNIDADES.....	10
2.4.1	<i>Generación Eólica.....</i>	10
2.4.2	<i>Generación Solar.....</i>	11
2.4.3	<i>Impactos en las Comunidades .....</i>	12
2.5	COSTOS .....	12
2.5.1	<i>Costos de Sistemas Eólicos y Foto-Voltaicos .....</i>	12
2.5.2	<i>Costos de Energía Eólica y Solar F-V.....</i>	13
2.5.3	<i>Beneficios Ambientales de la Energía Eólica y Solar.....</i>	15
2.6	RETOS PARA EL DESARROLLO DE ENERGÍA EÓLICA Y SOLAR.....	16
2.6.1	<i>Subsidios y Financiamiento.....</i>	16
2.6.2	<i>Cargo por Confiabilidad .....</i>	19
2.6.3	<i>Expansión de la Transmisión.....</i>	20
2.7	ASPECTOS OPERATIVOS DE LAS PLANTAS EÓLICAS Y SOLARES.....	21
2.7.1	<i>Variabilidad de la Generación .....</i>	23
2.7.2	<i>Desafíos para la Operación de la Red.....</i>	24
2.7.3	<i>Complementariedad Hidroeléctrica .....</i>	24
2.7.4	<i>Impactos en la Generación con Combustibles Fósiles .....</i>	25
2.7.5	<i>Cortes de Energía Solar y Eólica .....</i>	25
2.7.6	<i>Control de Potencia Activa.....</i>	26
2.7.7	<i>Control de Potencia Reactiva .....</i>	30
2.8	MEDIDAS PARA INTEGRAR LA GENERACIÓN EÓLICA Y SOLAR A LA RED.....	32
2.8.1	<i>Predicción Avanzada de la Energía Eólica y Solar.....</i>	33
2.8.2	<i>Despacho Rápido y Áreas Mayores de Balance .....</i>	34
2.8.3	<i>Manejo de Reservas.....</i>	34
2.8.4	<i>Flexibilidad del Mercado.....</i>	35
2.8.5	<i>Respuesta de la Demanda.....</i>	35
2.8.6	<i>Fuentes Flexibles de Generación.....</i>	36
2.9	IMPACTO DE LAS ENERGÍAS EÓLICA Y SOLAR EN LOS MERCADOS.....	36
2.10	ASPECTOS REGULATORIOS.....	40
2.11	OPORTUNIDADES DE DESARROLLO EN COLOMBIA .....	41
2.12	REFLEXIONES .....	42

## Resumen Ejecutivo

El CSMEM analizó el estado del desarrollo de la energía eólica y solar en el mundo y las posibilidades de su integración al MEM, para lo cual consultó una serie extensa de publicaciones recientes, incluyendo entre otros aspectos tecnológicos, económicos, operativos, ambientales y experiencias internacionales. Este informe se concentra en el análisis de la participación de la energía eólica y solar foto-voltaica en la generación de electricidad con plantas de una capacidad que les permita participar en el despacho centralizado.

En Colombia el potencial eólico más importante se encuentra localizado en el departamento de la Guajira y gran parte de la región Caribe, considerado de los mejores de Sur América y que podría significar una capacidad instalable cercana a 18.000 MW. En cuanto a la energía solar existen niveles de radiación que pueden llegar a los 6,0 kWh/m<sup>2</sup>/d en la Guajira, buena parte de la Costa Atlántica y en Arauca, Casanare, Vichada y Meta.

El desarrollo de la energía eólica en Colombia es incipiente y solo existe el proyecto Jeripachi en la Guajira; por otra parte, respecto al desarrollo de la energía solar foto-voltaica para generación de electricidad, solamente existen experiencias en pequeña escala. La alta dependencia de recursos hidráulicos para la generación eléctrica y la escasez de gas natural, evidencian la necesidad de diversificar la matriz de generación eléctrica, para lo cual la energía eólica y solar podrían desempeñar un papel importante.

El calentamiento global ha llevado a la sustitución de las fuentes de generación eléctrica con base en combustibles fósiles por energías limpias como la solar y la eólica. Sin embargo, dichas energías presentan algunos efectos contaminantes, entre otros, al paisajismo, a la fauna especialmente las aves, al uso de la tierra, el ruido y la utilización de materiales peligrosos en la construcción de los paneles.

Desde el 2013 los costos de la energía solar foto-voltaica han venido cayendo a una tasa promedio del 15% anual. También el costo de la energía eólica se ha venido reduciendo como resultado del aumento del tamaño de las turbinas y el aumento del tamaño de los proyectos. Si bien, los costos "nivelados" de la energía eólica y solar (valor presente neto de todos los costos de capital y operación de una unidad de generación durante toda su vida útil, dividido por el número de MWh de energía que espera producir), a primera vista resultan competitivos, estos valores están afectados por subsidios directos o indirectos y no incluyen el costo de la intermitencia de generación, ni el costo asociado al hecho de

que no puedan ajustarse para suplir los cambios que presenta la demanda eléctrica durante el día.

El desarrollo de la energía renovable no convencional, enfrenta varios desafíos comunes: la necesidad de subsidios, ya que aún los precios continúan siendo más caros que los de combustibles fósiles convencionales en la mayoría de casos; políticas contraproducentes debido a subsidios que distorsionan el mercado y el proteccionismo comercial; inestabilidad institucional y regulatoria que disuade a posibles inversionistas; financiación y apoyo insuficiente.

La regulación colombiana contempla la metodología para determinar la energía firme del Cargo por Confiabilidad para plantas eólicas. Para plantas solares fotovoltaicas, aún no se ha definido una metodología, pero existe un proyecto que se encuentra en proceso de discusión.

En Colombia la complementariedad existente de la generación eólica con la generación hidroeléctrica, debido a la disponibilidad alterna de vientos y precipitación hídrica ante cambios de origen climático como el Niño y los períodos cíclicos naturales de lluvias y sequías, permite que la operación conjunta de plantas eólicas e hidroeléctricas, supere la energía firme de estas plantas operando en forma aislada.

Cuando las fuentes renovables están localizadas en sitios remotos de los centros de carga, que es lo usual para estos proyectos, los costos de la transmisión asociada tienen un impacto muy importante. Así, para integrar las energías renovables a la red, es común identificar áreas geográficas con concentración de este tipo de recursos, para desarrollar planes de transmisión en gran escala con el fin de evacuar la energía del área.

A nivel mundial existe una penetración de las energías renovables para generación eléctrica, las cuales deben ser integradas a los sistemas de potencia existentes, diseñados para manejar cargas variables; las fuentes renovables presentan un reto debido a que su oferta es variable e incierta. Esta integración aumenta la necesidad de servicios complementarios, mientras que los recursos tradicionales que proporcionan esos servicios se vuelven menos disponibles, o económicamente inviables.

Con baja penetración de la generación eólica y solar, las características del equipo y las limitaciones de integración no tienen un impacto significativo en la operación de la red. Sin embargo, con niveles de penetración importantes, la integración a la red ha surgido como un límite potencial sobre el desarrollo ulterior de estos recursos.

El desarrollo tecnológico ha permitido que hoy en día los parques eólicos y solares sean capaces de ofrecer la gama completa de servicios complementarios que las plantas hidroeléctricas y térmicas convencionales ofrecen, a menudo con mayor velocidad y precisión. Los sistemas de control de las plantas eólicas y solares regulan la potencia neta activa y reactiva de intercambio entre la planta y la red, permitiendo la regulación de voltaje, proporcionando respuesta del gobernador de frecuencia y minimizando las tasas de cambio de potencia.

Existe una gran variedad de medidas disponibles para resolver los desafíos de integración de la generación variable renovable. Las soluciones más económicas y viables están asociadas a la infraestructura de la red, las prácticas operativas, el parque generador y la estructura regulatoria.

La mayoría de los mercados de la electricidad fueron diseñados inicialmente con la suposición de que las plantas térmicas y las plantas hidroeléctricas proporcionarían el grueso de los servicios. Sin embargo, las energías renovables variables, así como otros tipos de recursos nuevos como la generación distribuida, el almacenamiento y la respuesta de la demanda, pueden influir en los resultados del mercado y en las necesidades de diversos productos de mercado.

Para mantener la confiabilidad, un sistema de potencia requiere sus recursos para proporcionar numerosas reservas operacionales que se usan para mantener la frecuencia del sistema, administrar los flujos de potencia dentro de los límites normales y de contingencia, administrar la potencia reactiva para mantener el voltaje local, etc. Muchos de estos servicios no tienen mercados competitivos; la energía eólica y solar pueden proporcionarlos con alta velocidad y precisión y pueden ser más económicos que los de unidades generadoras convencionales.

Cuando la energía proviene de generadores con combustible gratis, como la eólica y la solar, éstos presentan ofertas de precio bajas correspondientes a sus costos marginales, tendiendo a reducir el precio de despeje del mercado. Durante períodos extremos de exceso de energía, generación alta y carga baja, algunas veces el precio del mercado puede ser negativo, porque las fuentes renovables prefieren aceptar un precio negativo, en lugar de renunciar a los créditos impositivos a la producción u otras fuentes de ingresos y los generadores inflexibles pueden preferir continuar operando en lugar de apagar.

Si el mercado energético consiste principalmente de fuentes renovables de energía, los precios de la energía pueden ser bastante bajos la mayor parte del tiempo. Los ingresos

en los mercados de hoy en día están dominados por la energía (kWh), pero otros servicios del sistema también son necesarios para la confiabilidad operativa y en algunos mercados la capacidad a largo plazo, o la energía firme (caso colombiano). El resultado podría ser un cambio importante en la composición de los ingresos para las plantas de energía, con menos ingresos provenientes de la venta de energía y mayores proporcionados por la capacidad, energía firme y los servicios del sistema.

La existencia del recurso solar y eólico son la base para un desarrollo importante de generación eléctrica; sin embargo, la ausencia de proyectos en Colombia responde a la existencia de barreras que impiden o comprometen su viabilidad, por factores tales como la falta de la infraestructura eléctrica para transmitir la energía producida, la complejidad de los procesos de negociación con las comunidades involucradas y la expedición de licencias ambientales, la existencia de un marco regulatorio que ha sido desarrollado para un mercado en competencia, donde actualmente las fuentes renovables no convencionales difícilmente pueden competir con los recursos convencionales existentes de generación eléctrica.

# 1 Introducción

El análisis llevado a cabo por el CSMEM sobre la competitividad de la energía eólica y solar en el MEM, fue realizado con base en la consulta de una serie extensa de publicaciones recientes, incluyendo entre otros aspectos tecnológicos, económicos, ambientales, operativos y experiencias internacionales.

En el mundo la dependencia del petróleo, el carbón, el gas natural y también de los combustibles nucleares, para el abastecimiento energético y en particular para la generación eléctrica, ha generado la necesidad de utilizar recursos renovables, que permitan reducir las emisiones de efecto invernadero y mitigar el cambio climático que viene experimentando el planeta.

Estados Unidos, Noruega, China, Japón y la Comunidad Europea lideran la generación de electricidad producida a partir de fuentes renovables: energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y biomasa.

La producción de energía eléctrica con base en fuentes renovables incluye alternativas diferentes a la energía eólica y solar, como son la hidroenergía, geotérmica y biomasa. El presente informe se concentra en el análisis de la participación de la energía eólica y solar foto-voltaica en la generación de electricidad para el MEM, con plantas que hoy en día pudieran pertenecer al despacho centralizado, de tal manera que no cubre la generación distribuida.

## 2 Competitividad de la Energía Eólica y Solar en el MEM

Colombia cuenta con una matriz energética relativamente rica tanto en combustibles fósiles como en recursos renovables; sin embargo, la producción energética del país se basa en un 93% con recursos fósiles y solamente 4% de hidroenergía<sup>1</sup>. Respecto a la generación de electricidad en el país, la energía hidroeléctrica contribuye con el 70% y el resto (30%) es de origen térmico, principalmente a base de carbón, gas natural y combustibles líquidos.

### 2.1 Potencial de Colombia

#### 2.1.1 Eólico

Desde el punto de vista del recurso eólico en Colombia, el potencial más importante se encuentra localizado en el departamento de la Guajira y gran parte de la región Caribe, aunque también existe potencial en los departamentos de Santander y Norte de Santander y zonas específicas de Risaralda, Tolima, Valle del Cauca, Huila y Boyacá.

El potencial eólico de la Guajira es considerado de los mejores de Sur América con velocidades de viento promedio del orden de 9 m/s (a 80 m de altura) que podría significar una capacidad instalable cercana a 18.000 MW eléctricos, comparable con la capacidad total actualmente instalada en el SIN.

La tabla No 1 presenta los potenciales de generación eólica para las diferentes regiones del país.

**Tabla No 1 – Potencial Eólico en Colombia**

Área	Potencial Eólico (MW)
Costa Norte	20.000
Santanderes	5.000
Boyacá	1.000
Risaralda - Tolima	1.000
Huila	2.000
Valle del Cauca	500

Fuente: Huertas L., Pinilla A<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> UPME, "Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia", 2015

<sup>2</sup> Huertas L., Pinilla A. "Predicción de rendimiento de parques eólicos como herramienta de evaluación". EPM, Universidad de los Andes, 2007.

## 2.1.2 Solar

Según el Atlas de Radiación Solar de la UPME, existen niveles de radiación solar que pueden llegar a los 6,0 kWh/m<sup>2</sup>/d en la Guajira, buena parte de la Costa Atlántica y en Arauca, Casanare, Vichada y Meta. Estos niveles son comparables con los que se presentan en sitios de excelente radiación solar, tales como el desierto de Atacama en Chile, o los estados de Arizona y Nuevo México en Estados Unidos. En regiones como la Costa Pacífica colombiana existen niveles que siendo inferiores al promedio nacional, están por encima de los niveles promedio recibidos en Alemania.

La tabla No 2 presenta los valores de irradiación promedio para diferentes regiones del país.

**Tabla No 2 – Irradiación Solar en Colombia**

Área	Irradiación promedio (kWh/m <sup>2</sup> /d)
Guajira	6,0
Costa Atlántica	5,0
Orinoquía	4,5
Región Andina	4,5
Amazonía	4,2
Costa Pacífica	3,5

Fuente: UPME, IDEAM, 2005.

## 2.2 Situación Actual de la Energía Eólica y Solar en Colombia

Hasta el momento el desarrollo de la energía eólica en Colombia es incipiente y el único proyecto existente es el del parque eólico Jeripachi, con una capacidad instalada de 19,5 MW, distribuidos en 15 aerogeneradores de 1,3 MW cada uno, de propiedad de EPM, el cual entró en operación el 19 de abril del 2004 y está localizado en el departamento de la Guajira.

Respecto al desarrollo de la energía solar foto-voltaica para generación de electricidad, existen experiencias en pequeña escala correspondientes a sistemas instalados en los sectores comercial e industrial y soluciones en Zonas no Interconectadas. La implementación y masificación de pequeños sistemas de autogeneración distribuida pueden permitir a los usuarios generar su propia energía, con los consecuentes beneficios que conlleva: eliminación de pérdidas eléctricas, reducción de redes eléctricas, disminución de costos de energía, etc.

La expedición de la Ley 1715 de 2014 y el interés existente por parte de empresas dedicadas al desarrollo de proyectos eólicos y solares, así como el posible apoyo

financiero de agencias y bancos multilaterales, permiten prever la introducción de estas tecnologías en la matriz de generación de electricidad en Colombia.

La alta dependencia de recursos hidráulicos para la generación eléctrica y la escasez de gas natural, han mostrado durante los fenómenos del Niño ocurridos desde la existencia del MEM, el riesgo de escasez y los altos precios de la energía, que evidencian la necesidad de diversificar la matriz de generación eléctrica, para lo cual la energía eólica y solar podrían desempeñar un papel importante.

La tabla No 3 presenta la capacidad total de los proyectos de generación registrados ante la UPME, discriminados por tipo de tecnología. Estos proyectos se encuentran en diferentes fases de desarrollo: Fase 1, etapa de pre-factibilidad; Fase 2, etapa de factibilidad; Fase 3, con diseños definitivos<sup>3</sup>.

**Tabla No 3 - Proyectos de Generación Registrados**

<b>Tecnología</b>	<b>Capacidad MW</b>	<b>Proyectos</b>
Hidráulica	4.336	141
Eólica	1.285	11
Térmica	1.024	20
Solar	121	9
Geotérmica	50	1
<b>Total</b>	<b>6.816</b>	<b>182</b>

Fuente: UPME

Como puede observarse, en el caso hipotético en que todos los proyectos de generación registrados ante la UPME se llegaran a implementar, la participación hidráulica de estos nuevos proyectos es de 63,6%, mientras la participación de la eólica y la solar es de 20,6% y la térmica 15,0%. Consecuentemente la participación de la generación hidráulica permanecería prácticamente en el mismo porcentaje actual del orden de 70%, mientras que la participación de los proyectos eólicos y solares corresponderían al 6%.

Por otra parte, en relación al planeamiento indicativo llevado a cabo por la UPME para el horizonte 2015-2029, se consideraron varios escenarios de análisis que incluyeron en algunos casos entre 1.624 MW y 3.131 MW de recursos eólicos en el norte de la Guajira, o entre 2.198 MW y 3.705 MW con fuentes renovables no convencionales de energía, específicamente geotermia, biomasa, generación eólica y solar fotovoltaica distribuida<sup>4</sup>.

<sup>3</sup> UPME, "Registro de proyectos de generación", Abril 30, 2016.

<sup>4</sup> UPME, "Plan de expansión de referencia generación – transmisión 2015-2029", Diciembre 2015

Al respecto, las principales conclusiones que se obtuvieron de este ejercicio con la introducción de energías renovables no convencionales son:

- En general, para reemplazar 1 MW térmico generado con carbón, se requieren alrededor de 2,5 MW eólicos.
- Con la entrada de los recursos renovables, el costo marginal de la energía del SIN sufre una reducción importante ya que los costos variables de estos recursos son cero.
- Es evidente la complementariedad existente entre la generación eólica y los recursos hidroeléctricos del interior; en momentos donde el aporte hidroenergético es reducido, la producción eólica es alta.
- La incorporación de los parques eólicos de la Guajira implica desarrollos de la red de transmisión importantes, que contemplan desde los refuerzos en el SIN hasta la red propia necesaria para concentrar la generación desde los diferentes parques (colectoras y su conectividad).
- Es importante que los promotores de los proyectos eólicos indiquen desde ya la intención de la conexión, para poder optimizar el desarrollo necesario de red de transmisión.

## **2.3 Experiencias Internacionales**

### **2.3.1 China**

En generación eólica China es el líder mundial, tiene la más grande capacidad instalada y un rápido crecimiento de nuevas instalaciones; con gran territorio y extensas costas, China tiene recursos excepcionales de viento para desarrollar la energía eólica, tal que su potencial estimado es de 2.380 GW en la parte continental y 200 GW costa afuera.

En el 2015 China adicionó 30.500 MW de capacidad eólica para generación eléctrica, alcanzando una capacidad instalada eólica total de 145.100 MW. La energía eólica generada en el mismo año fue 186,3 TWh que representaron el 3,3% del total de la electricidad consumida<sup>5</sup>.

China, la nación con la población y la huella de carbón más grandes del mundo, tiene un claro compromiso para desarrollar las energías renovables con el fin de abastecer la demanda de energía de su población. En el año 2015 China fue a nivel mundial el más grande productor y comprador de paneles solares, en su gran mayoría celdas

---

<sup>5</sup> Wikipedia, "Wind power in China", 2015, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_China](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_China)

fotovoltaicas, las cuales en buena parte han sido instaladas en áreas remotas, utilizando granjas solares gigantescas que le venden energía a las compañías de electricidad.

El drástico incremento de energía solar en China busca cubrir la angustiada necesidad de electricidad del país y además reducir la crisis severa que tienen con la contaminación del aire. Mientras en Alemania y otros países se han otorgado subsidios generosos para instalar paneles solares, en China el gobierno lo que ha hecho es empujar agresivamente a las instituciones financieras para dar incentivos en la instalación de paneles solares<sup>6</sup>.

China invirtió el año pasado en energías renovables el 36% del total mundial, correspondiente a US\$ 102.900 millones en energía eólica y solar; sin embargo, el país está rezagado en maximizar el retorno en dólares, especialmente para la energía eólica. China cerró el 2015 con casi dos veces la capacidad eólica instalada en los Estados Unidos, pero generó menos energía eólica. Investigadores de la Universidad de Harvard y la Universidad de Tsinghua analizaron las causas de esta situación y encontraron que se debió a los retrasos en la conexión a la red de nuevos parques eólicos, equipos (turbinas) de baja calidad y el favorecimiento deliberado de los operadores de red por la energía a base de carbón sobre la eólica. Pero esa conclusión es sorprendente porque minimiza el papel de los vientos relativamente débiles de China - un factor a menudo citado en anteriores estudios.

En el 2015 los operadores de red chinos cortaron 34 TWh de energía eólica, desperdiciando tanta energía como la que fue producida por todas las granjas eólicas de Inglaterra; el corte también ocurrió en un 10% de la energía solar, lo cual es un síntoma de la inflexibilidad de las redes eléctricas. En el norte de China con vientos ricos, las centrales eléctricas de carbón suministran calefacción y electricidad y por tanto deben generar durante el invierno, congestionando las líneas de transmisión y desplazando a la energía eólica<sup>7</sup>.

### **2.3.2 Estados Unidos**

Con una capacidad eólica instalada de 74.400 MW le sigue en tamaño a China; sin embargo, teniendo en cuenta que Estados Unidos tiene un factor de utilización más alto que China, es el líder mundial en producción de electricidad a partir de energía eólica, generando en el 2015 190,9 TWh de electricidad equivalentes al 4,44% de la energía eléctrica total. El desarrollo de la energía eólica en Estados Unidos ha sido soportado

---

<sup>6</sup> Justine Walton, "The 5 countries that produce the most solar energy", Investopedia, Sep 28, 2015,

<sup>7</sup> Peter Fairlay, "Why China's Wind Energy Underperforms", IEEE Spectrum, May 23, 2016

principalmente a través de un subsidio a la producción, el cual se paga a los productores con base en la cantidad de electricidad producida<sup>8</sup>.

Estados Unidos ha continuado con su agresivo desarrollo de la energía solar, con un incremento en la capacidad instalada en el 2014 del 30% y con una inversión de US\$ 18.000 millones; buena parte de ese incremento es atribuible a los incentivos sustanciales otorgados por el gobierno al sector residencial. Las compañías de electricidad también han aumentado su capacidad con 3.900 MW instalados en el 2014. Como el costo de la energía solar ha llegado a ser competitivo con las fuentes no renovables de energía, se considera que la capacidad eléctrica instalada seguirá aumentando considerablemente e inclusive por encima de los 18.300 GW reportados en el 2014<sup>9</sup>.

### **2.3.3 Alemania**

Alemania ha sido el país que ha estado al frente del desarrollo de la energía solar a partir de celdas fotovoltaicas; en el 2014 tenía instalados 38.200 MW de un total de 177.000 MW instalados a nivel mundial. En varias ocasiones la energía solar ha abastecido el 50% de la demanda diaria del país y a largo plazo se ha movido hacia las energías limpias, llegando a tener el mercado más grande del mundo en energías renovables. Su objetivo para el año 2050 es que su generación de electricidad dependa 100% de la energía solar y otras fuentes renovables<sup>10</sup>.

En el 2011 la capacidad instalada de energía eólica en Alemania era 29.075 MW; la generación neta de electricidad a partir de fuentes renovables no convencionales se incrementó de 6,3% en el año 2002 al 30% en el 2014. La generación pico combinada de energía solar y eólica alcanzó el 74% en abril del 2014 y la eólica en su mejor día generó 562 GWh. Existen más de 23.000 turbinas de viento y 1,4 millones de sistemas solares F-V distribuidos en todo el país. Desde el año 2011 Alemania ha venido trabajando en un plan para aumentar la comercialización de la energía eólica, focalizándose especialmente en las granjas de viento costa afuera, teniendo a este respecto un desafío importante en la construcción de redes de transmisión para evacuar la potencia desde el Mar del Norte hasta las zonas industriales del sur del país<sup>11</sup>.

---

<sup>8</sup> Wikipedia, "Wind power in the United States", 2015, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_the\\_United\\_States](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_the_United_States)

<sup>9</sup> Op cit 6

<sup>10</sup> Op cit 6

<sup>11</sup> Wikipedia, "Wind power in Germany", 2014, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_Germany](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Germany)

Los subsidios en Alemania para las fuentes alternas de energía tales como eólicas, solares y biomasa han sido muy generosos durante los últimos 15 años y han logrado que estas fuentes bajo condiciones adecuadas de tiempo y clima abastezcan el 50% de la demanda eléctrica. Específicamente en el año 2014 las fuentes renovables entregaron el 27,8% de la energía consumida, cuando en Estados Unidos solamente alcanzaron el 13,7%. El acceso preferencial que tienen las fuentes renovables ha causado una fuerte caída en los precios del mercado eléctrico, lo cual le ha ocasionado serios problemas a la generación con energía nuclear o con carbón; sin embargo, los usuarios han recibido muy poco de dicho beneficio, porque los costos subsidiados de las renovables se les han trasladado a dichos usuarios en sus facturas, en forma de cargos de red. Las tarifas residenciales de electricidad en Alemania son las más altas del continente europeo y son 25% más costosas que las del promedio en Estados Unidos<sup>12</sup>.

### **2.3.4 España**

La electricidad generada a partir de fuentes renovables en España en el 2014 alcanzó el 42,8% de la demanda eléctrica del país. En el 2015 la capacidad eólica total instalada fue de 23.000 MW. España también se posicionó como uno de los líderes en la utilización de la energía solar, alcanzando en el 2015 una capacidad instalada total de 7.000 MW.

El desarrollo de la energía renovable en España se basó originalmente en subsidios que permitieron un crecimiento acelerado de la industria solar y eólica a nivel nacional; sin embargo, cuando los subsidios fueron eliminados drásticamente debido a la crisis económica española, a partir del 2012 la instalación de sistemas de energía renovable cayó considerablemente.

En el 2015 cuando la energía solar fotovoltaica se hizo competitiva en el mercado eléctrico, gracias a las radiaciones solares abundantes y a la caída en los precios de dichos sistemas, el gobierno español introdujo un "impuesto solar" haciendo menos viable esta tecnología e imponiendo multas draconianas de hasta 60 millones de euros para cualquiera que incumpla el pago de dicho impuesto. Al respecto el gobierno afirma que los que generan su propia energía a partir de sistemas solares fotovoltaicos, requieren el respaldo de la red nacional y consecuentemente deben contribuir al pago de los costos asociados en la red. Por otra parte, la industria solar argumenta que el gobierno está tratando de proteger a los generadores convencionales<sup>13</sup>.

---

<sup>12</sup> Geoffrey Smith, "Germany's renewables push is killing its energy companies", Fortune Magazine, Nov 11 2015, <http://fortune.com/2015/11/11/germany-renewables-subsidies-e-on-loss-nuclear/>

<sup>13</sup> Wikipedia, "Renewable energy in Spain", 2015, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy\\_in\\_Spain](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_Spain)

### **2.3.5 Japón**

Japón que es uno de los países más densamente poblados del mundo, no puede darse el lujo de cubrir extensas áreas de tierra con paneles solares; sin embargo, a pesar de la escasez mencionada, es uno de los líderes más importantes en producción de energía solar, con una capacidad instalada en el 2014 de 23.300 MW.

Después del desastroso accidente nuclear ocurrido en el 2011 en la planta nuclear de Fukushima, Japón decidió desarrollar en forma agresiva la energía solar, como parte de un plan para duplicar la capacidad de energía renovable del país en el año 2030. La necesidad de espacios disponibles hizo que Japón fuera muy creativo para hallar tales espacios e instalar paneles solares, entre otros, en muchas canchas de golf abandonadas, como también desarrollando "islas solares flotantes" con paneles a prueba de agua<sup>14</sup>.

### **2.3.6 Italia**

Italia tiene una capacidad instalada en energía solar de 18.500 MW, la cual abastece alrededor del 10% de las necesidades de energía eléctrica del país. Los subsidios que se venían entregando para desarrollar la energía solar se terminaron, causando la venta de algunas de esas instalaciones y en algunos casos el cierre total de ellas, trayendo como consecuencia que la alta capacidad de energía solar en Italia muy posiblemente se reduzca<sup>15</sup>.

En el 2014 en Italia se instalaron solamente 105 MW de capacidad eólica lo que representa una caída de 76% en comparación con el año 2013; la capacidad total eólica alcanzó los 8.663 MW. La tendencia decreciente es el resultado de la eliminación de los subsidios a las energías renovables que empezó a implementarse a finales del 2012<sup>16</sup>.

### **2.3.7 India**

El desarrollo de la energía eólica en la India empezó en los años 90 y se ha incrementado significativamente durante los últimos años, llegando a ser el cuarto país en capacidad eólica instalada a nivel mundial con 26.769 MW, distribuidos a lo largo y ancho del país, que corresponden al 14% del total de la capacidad eléctrica instalada.

---

<sup>14</sup> Op cit 6

<sup>15</sup> Op cit 6

<sup>16</sup> International Energy Agency IEA Wind, "Member country activities for Italy", 2014, <http://www.ieawind.org/countries/italy.html>

En cuanto a la energía solar la India tiene una combinación excelente para el desarrollo de esta energía: alta densidad de población y alta radiación solar; además, teniendo en cuenta su gran extensión, la red eléctrica interconectada no cubre todo el país y la primera aplicación de la energía solar fue el bombeo de agua, sustituyendo entre 4 y 5 millones de bombas a base de combustible diésel. Su capacidad solar total instalada es 6.762 MW<sup>17</sup>.

## **2.4 Impactos Ambientales y en Comunidades**

### **2.4.1 Generación Eólica**

Las turbinas eólicas deben estar espaciadas aproximadamente de 5 a 10 diámetros de rotor, entonces las turbinas y la infraestructura que las rodea (incluyendo vías y líneas de transmisión) ocupan una pequeña porción de la superficie total de una instalación eólica. Las instalaciones eólicas costa afuera requieren grandes cantidades de espacio, debido a que las turbinas y las aspas son más grandes; dependiendo de su ubicación, pueden competir con una variedad de actividades en el mar, como la pesca, las actividades recreativas, la extracción de arena y grava, la extracción de petróleo y gas, la navegación y la acuicultura.

La disrupción panorámica (contaminación paisajística), es inevitable debido al tamaño de las aspas de las turbinas de viento y además debido a que normalmente están ubicadas en áreas que no han sido utilizadas para el desarrollo de otras formas de energía. En efecto, esta situación motivó en parte el desarrollo de las granjas eólicas costa afuera, primero utilizando estructuras submarinas y posteriormente mediante boyas flotantes. También, la estética de los molinos de viento puede resultar en cambios significativos en el paisajismo de la zona afectada.

La producción de ruido también se considera que impacta la salud de las comunidades, el nivel del ruido varía dependiendo del diseño de la turbina, de la topografía, la velocidad y dirección del viento y la hora del día. La mayoría de los sonidos generados por turbinas eólicas es aerodinámico, provocado por el movimiento de los álabes de la turbina a través del aire; también hay sonido mecánico generado por la propia turbina.

Otro efecto ambiental tiene que ver con el impacto de los aerogeneradores sobre la fauna, especialmente de aves y murciélagos, debido a los accidentes mortales ocurridos por colisiones con turbinas de viento y debido a cambios en la presión del aire causada

---

<sup>17</sup> Wikipedia, "Renewable energy in India", Mar 31, 2016, [https://en.m.wikipedia.org/wiki/Renewable\\_energy\\_in\\_India](https://en.m.wikipedia.org/wiki/Renewable_energy_in_India)

por el hilado de las turbinas, así como la perturbación del hábitat. La escala de dicho impacto puede o no ser significativo, dependiendo de las circunstancias específicas.

### **2.4.2 Generación Solar**

El impacto ambiental de la energía solar tiene que ver con el uso de la tierra, el uso del agua, la pérdida del hábitat y la utilización de materiales peligrosos en la construcción de los paneles; dicho impacto puede variar significativamente dependiendo de la tecnología utilizada, la cual se divide en dos categorías: celdas solares fotovoltaicas F-V y plantas termoeléctricas con energía solar concentrada.

En relación al uso de la tierra y dependiendo de la localización del desarrollo solar, pueden presentarse problemas relativos a la degradación del suelo, que resultan en compactación del suelo, alteración de los canales de drenaje, e incremento de deslizamientos y erosión. En general todas las plantas requieren áreas grandes para coleccionar la radiación solar, cuando se usan para generar electricidad a gran escala. El área total requerida varía dependiendo de la tecnología, la topografía del sitio y la intensidad del recurso solar. Se estima que para una planta de generación fotovoltaica, el sistema requiere entre 14.000 y 40.500 m<sup>2</sup> por MW, mientras que para la tecnología con energía solar concentrada, se requiere entre 16.000 y 67.000 m<sup>2</sup> por MW.

A diferencia de los proyectos eólicos, es más difícil encontrar tierra para compartir entre el proyecto solar y los usos agrícolas, sin embargo, el impacto de las plantas solares se puede minimizar ubicándolas en minas abandonadas y zonas desérticas.

En cuanto a las plantas solares concentradas, al igual que todas las termoeléctricas requieren agua de enfriamiento y su cantidad depende del diseño de la planta, su localización y el tipo de enfriamiento. La tecnología húmeda de recirculación con torres de enfriamiento, utiliza entre 600 y 650 galones de agua por MWh de electricidad producido.

Los paneles fotovoltaicos contienen materiales peligrosos y aunque bajo condiciones normales están sellados, existe potencial de contaminación ambiental, si se dañan o son manipulados o desechados al final de su vida útil en forma incorrecta. En particular los trabajadores de las industrias manufactureras enfrentan riesgos asociados con la inhalación de polvo de silicón. La película de las celdas fotovoltaicas tiene materiales muy tóxicos y si no se manejan y se desechan adecuadamente, estos materiales pueden causar riesgos ambientales serios o amenazas a la salud pública.

### **2.4.3 Impactos en las Comunidades**

Los proyectos de generación con fuentes renovables, no están exentos de enfrentar la incertidumbre asociada con proyectos con tecnologías convencionales, como son el rechazo de las comunidades, o la oposición de ciertos sectores por temas sociales o ambientales, asociados a las instalaciones de generación y a la infraestructura requerida para la transmisión de la energía.

## **2.5 Costos**

### **2.5.1 Costos de Sistemas Eólicos y Foto-Voltaicos**

Muchos de los costos de energía renovable citados en estudios y reportes, están focalizados en sistemas instalados de tamaño considerable, utilizados por compañías de electricidad. Los costos de capital, operación y mantenimiento pueden variar significativamente con el tamaño del proyecto y su localización geográfica. Por ejemplo, en regiones con precios altos de energía eléctrica y/o fuertes incentivos financieros (fotovoltaica en California, New Jersey y Colorado, o eólica en Alemania y España), o zonas especialmente atractivas para el desarrollo de una tecnología específica, se presentan diferencias de costo que son el resultado de la madurez del mercado local y la competencia.

La información relativa a los costos de la energía solar foto-voltaica es abundante debido a que es una tecnología ampliamente difundida. Sin embargo, la información a menudo es obsoleta como resultado de la reducción significativa en el precio de los paneles, la moderada reducción en el precio de los inversores, la reducción de los costos de instalación debido a la escala de los proyectos, el incremento de la competencia y a que el desarrollo de nuevas tecnologías tiene una curva de aprendizaje que reduce los costos con el tiempo. Desde el 2013 hasta hoy el costo de la energía solar foto-voltaica ha venido cayendo a una tasa promedio del 15% anual.

El costo de la energía eólica también se ha venido reduciendo como resultado del aumento del tamaño de las turbinas y el aumento del tamaño de los proyectos. Por el contrario, los costos de operación y mantenimiento de los sistemas eólicos, no necesariamente se reducen con el incremento del tamaño de los proyectos. Las instalaciones más viejas tienen costos más altos de operación y mantenimiento,

comparados con los de las nuevas turbinas, que tienen mejor diseño y costos más bajos de operación y mantenimiento durante la vida útil<sup>18</sup>.

La tabla No 4 muestra los costos de sistemas eólicos y solares F-V, estos valores deben ser tomados como órdenes de magnitud para un análisis preliminar de la viabilidad económica de un proyecto y no como cifras sólidas y concluyentes.

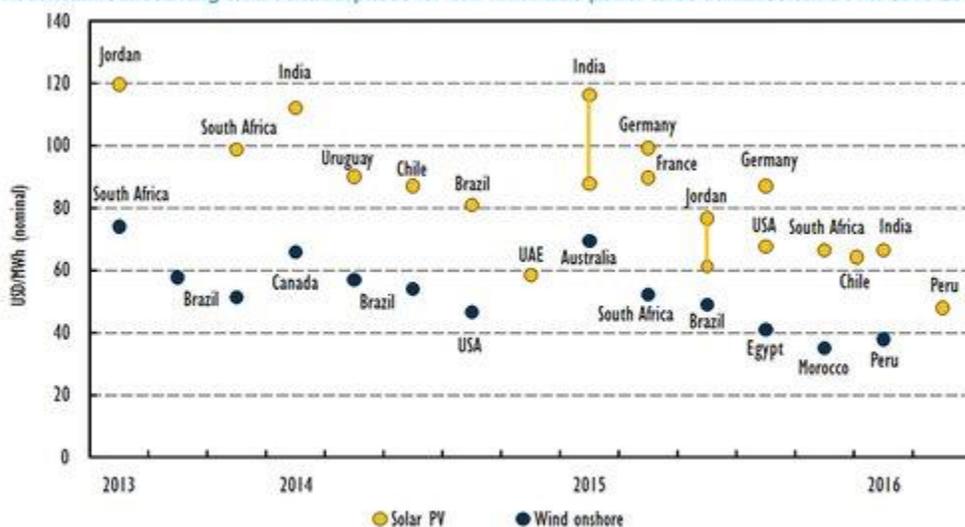
**Tabla No 4 – Costos de Sistemas Eólicos y Solares F-V**

Tecnología	US\$/kW	Costos Fijos O&M US\$/kW-año	Vida Útil (años)
<b>Solar F-V</b>			
1 a 10 MW	2.025	16	33
< 10 kW	3.897	21	33
<b>Eólica</b>			
1 a 10 MW	2.346	33	20
< 10 kW	7.645	40	14

Fuente: NREL, feb 2016.

## 2.5.2 Costos de Energía Eólica y Solar F-V

Recent announced long-term contract prices for new renewable power to be commissioned over 2016-2019



Fuente: International Energy Agency IEA.

Gráfico No 1 Tendencia de los Precios de Energía Eólica y Solar F-V

<sup>18</sup> National Renewable Energy Laboratory - NREL, Energy analysis, "Energy technology cost and performance data", Updated February 2016. [http://www.nrel.gov/analysis/tech\\_lcoe\\_re\\_cost\\_est.html](http://www.nrel.gov/analysis/tech_lcoe_re_cost_est.html)

El gráfico No 1, muestra desde el año 2013 hasta la fecha, la tendencia a nivel mundial de los costos de la energía eólica y solar F-V en US\$/MWh. Estos "costos nivelados" representan el valor presente neto de todos los costos de capital y operación de una unidad de generación durante toda su vida útil, dividido por el número de MWh de energía eléctrica que cada proyecto específico espera producir.

Como se observa del gráfico, a partir del 2013 los costos de la energía tanto solar F-V como eólica han venido cayendo en forma significativa, particularmente en el caso de la energía solar su reducción ha sido considerable.

Es interesante notar que entre el 2015 y el 2016 los costos de la energía oscilan entre US\$120/MWh y US\$40/MWh, que corresponderían en pesos colombianos a \$360/kWh y \$120/kWh respectivamente. Estos costos al ser comparados con los costos actuales de la energía y los que ocurrieron durante el reciente fenómeno del Niño 2015-2016, a primera vista resultan altamente competitivos; sin embargo, es importante mencionar que estos valores incluyen subsidios directos o indirectos a través de contratos de largo plazo PPA (Power Purchase Agreement), que de alguna forma se trasladan al usuario.

Los subsidios entregados a la energía renovable para generación de electricidad, son uno de los temas más discutidos en políticas públicas, miles de millones de dólares se han gastado para promover el uso de la energía solar y la energía eólica, con la ilusión de que estas energías algún día prácticamente eliminarán el uso de combustibles fósiles, para reducir las cantidades de dióxido de carbono que se están emitiendo a la atmósfera. Esta idea parece estar funcionando, los paneles fotovoltaicos han reducido a la mitad su precio desde el año 2008 y el costo de capital de una planta de energía solar se ha reducido en un 22% entre el 2010 y el 2013 y en algunos pocos lugares la energía solar provee electricidad a la red en forma más económica que las plantas convencionales de gas o carbón.

Si bien es cierto que el costo de los paneles solares es fácil de calcular, el costo de la electricidad producida por esta energía no lo es, ya que dicho costo no depende solamente del combustible utilizado, sino también de: el costo de capital, el tiempo de operación de la planta y si la planta genera durante la demanda pico.

Para poder analizar todo esto, como fue mencionado anteriormente, los economistas utilizan los "costos nivelados" o sea el valor presente neto de todos los costos de capital y operación de la unidad generadora durante su vida útil, dividido por los MWh producidos.

Como lo plantea el profesor Paul Joskow del Massachusetts Institute of Technology, el problema radica en que los costos nivelados no incluyen:

- El costo de la intermitencia de generación. La energía eólica no genera electricidad en un día calmado sin viento, al igual que la solar tampoco lo efectúa en la noche o disminuye su producción bajo condiciones de nubosidad.
- Las energías renovables no pueden ajustarse para suplir los cambios que presenta la demanda eléctrica durante el día.

En resumen, si las energías renovables tienen el mismo "costo nivelado" de las energías convencionales, la calidad de su energía es inferior y los "costos nivelados" no sirven para comparar diferentes formas de generación de electricidad<sup>19</sup>.

### 2.5.3 Beneficios Ambientales de la Energía Eólica y Solar

De acuerdo con los análisis del ciclo de vida de diferentes tecnologías para generación eléctrica, los factores de emisiones promedio de CO2 asociados a las plantas eléctricas, se presentan en la tabla No 5.

**Tabla No 5 Emisiones de CO2 por Tecnología**

Tecnología	Emisiones de CO2 en kg eq/MWh		
	Mínima	Media	Máxima
Carbón	740	820	910
Gas Ciclo Combinado	410	490	650
Solar F-V	18	48	180
Geotérmica	6	38	79
Solar Concentrada	8,8	27	6,3
Hidroeléctrica	1	24	2.200
Eólica Costa Afuera	8	12	35
Nuclear	3,7	12	110
Eólica Continental	7	11	56

Fuente: Yale University, Journal of industrial ecology analyzing CO2, 2012

Claramente se observa que las plantas eléctricas eólica y solar, tienen un nivel de emisiones de CO2 inferior al de las fuentes convencionales, lo cual significa un beneficio en relación a la contaminación ambiental, que normalmente no se tiene en cuenta en las evaluaciones económicas, de las diferentes tecnologías utilizadas para generación de electricidad.

<sup>19</sup> The Economist, "Sun, wind and drain", July 26 2014. <http://www.economist.com/news/finance-and-economics/216co8646-wind-and-solar-power-are-even-more-expensive-commonly-thought-sun-wind-and>

Finalmente, según el análisis llevado a cabo por la UPME sobre la rentabilidad de las energías eólica y solar en Colombia, es claro que los incentivos que otorga la Ley 1715 (Renta, IVA, aranceles y depreciación acelerada de activos), no son suficientes y se deberían aumentar, para alcanzar una rentabilidad que sea suficientemente atractiva para el sector privado<sup>20</sup>.

## 2.6 Retos para el Desarrollo de Energía Eólica y Solar

### 2.6.1 Subsidios y Financiamiento

Para hacer que las matrices de energía sean más ecológicas se requiere de un marco de incentivos y políticas que incentiven a los inversionistas a desarrollar proyectos con energías renovables no convencionales, muchas de las cuales aún no han alcanzado la paridad de precios con los recursos energéticos convencionales<sup>21</sup>.

El desarrollo de energía renovable no convencional, enfrenta varios desafíos comunes:

- **Subsidios de precios para renovables.** A pesar que los precios son cada vez más bajos, siguen siendo más caros que los combustibles fósiles convencionales en la mayoría de casos. Por lo tanto, los incentivos de mercado y regulaciones del gobierno son necesarias para la adopción de energías renovables.
- **Políticas contraproducentes.** Los subsidios que distorsionan el mercado (tales como los subsidios a combustibles fósiles y topes de precios de servicios públicos) y el proteccionismo comercial (por ejemplo, impuestos a tecnologías renovables y normas nacionales), solo sirven para exacerbar los subsidios y reducir la competitividad relativa de las energías renovables.
- **Inestabilidad institucional y regulatoria.** Incluso las políticas bien diseñadas, experimentan problemas en la implementación, fijación de precios y permisos cuando están mal gestionadas. Esta inestabilidad combinada con las distorsiones del mercado, disuade a posibles inversionistas, tanto del sector privado como de fondos multilaterales, de desarrollar nuevos proyectos.
- **Financiación y apoyo insuficiente.** Todos los inversionistas privados, de asistencia bilateral para el desarrollo y fondos multilaterales tienen diferentes grados de aversión al riesgo. Los países en desarrollo con marcos regulatorios impredecibles, mercados distorsionados y/o inadecuada capacidad institucional, son percibidos por los inversionistas como ineficaces y riesgosos, incluso cuando la demanda de energía renovable es alta.

---

<sup>20</sup> Op Cit 1

<sup>21</sup> Jarrod Russell, "Incentivos para la generación de electricidad en una Economía verde: marcos efectivos de América Latina", Soluciones Prácticas, Febrero – Junio de 2015.

América Latina está adaptando las estrategias de los países desarrollados para incentivar la integración de energía renovable no convencional. Con el tiempo, dichas estrategias impulsan la inversión en industrias de energía renovable, reduciendo el costo de capital al atraer mayores inversiones, aumentando el capital humano nacional y diversificando las tecnologías disponibles en el mercado. A continuación se presentan las experiencias más importantes en cuanto al uso de energías renovables no convencionales en América Latina.

### **Caso Brasil**

Brasil siempre ha dependido de las centrales hidroeléctricas a gran escala, que satisfacen el 80% de la generación eléctrica. En el 2001, en medio de severas sequías y el desplome de la producción hidroeléctrica, el racionamiento eléctrico indujo a las autoridades a tomar medidas. El sistema de tarifas fijas especiales de incentivo (FIT – Feed-in Tariff) fue adoptado por Brasil en el 2002, dando un inicio rápido a la industria de energía renovable del país. El FIT asegura que los productores de energía renovable puedan vender a un precio fijo garantizado a través de un contrato (PPA, Power-Purchasing Agreement) por un período específico de tiempo (por lo general de 5 a 20 años); este mecanismo reduce la percepción de riesgo de los inversionistas.

A partir del año 2012, 65 países en el mundo han usado mecanismos FIT. Generalmente, los proyectos de generación FIT reciben un subsidio sobre el precio de los recursos convencionales de electricidad. Brasil a partir de la implementación de este mecanismo y con contratos de 20 años, ha desarrollado 1.182 MW eólicos, 1.157 MW en pequeñas centrales hidroeléctricas y 533 MW de biomasa.

Los precios FIT aprobados por el gobierno fueron: US\$150/MWh para energía eólica, US\$96/MWh para pequeñas centrales hidroeléctricas y US\$70/MWh para biomasa. Para tener una idea del costo de los subsidios pagados por el desarrollo de recursos renovables no convencionales, el precio mayorista de la energía en Brasil en el 2001 era de US\$ 22/MWh, lo que implica que la diversificación tuvo un costo con valor entre US\$ 48/MWh y 128/MWh.

El precio FIT se revisa en cada nueva licitación y busca corregir las ineficiencias presentadas en el esquema utilizado, incluyendo: subsidios mal calculados, efectos con el trámite de permisos ambientales, construcción y conexiones con la red.

El financiador más importante de las energías renovables en Brasil ha sido el Banco de Desarrollo de Brasil que ha otorgado préstamos a 16 años con tasas bajas de interés, no cobra intereses durante la construcción y durante seis meses al inicio de las operaciones. Además, existen incentivos fiscales complementarios: a) exenciones fiscales para compra, o importación de equipos para el desarrollo de infraestructura y para venta de equipos de generación solar y eólica; b) descuentos en los cargos de distribución y transmisión.

Desde el 2012 la medición neta de energía eléctrica permite a los hogares y las empresas intercambiar su exceso de energía solar por la energía que consumen en la noche.

### **Caso Perú**

Perú tiene el objetivo de diversificar su matriz energética mediante la utilización del potencial de energía renovable del país. En la actualidad, el total de la generación eléctrica proviene de dos fuentes: el 56% de energía hidroeléctrica y el 44% de gas natural. Perú promueve la energía renovable otorgando reducciones de impuestos en todas las fases de planeación e implementación de dichos proyectos. También brinda tarifas fijas especiales FIT para la venta final de energía. Para crear un entorno de inversión apropiado, el gobierno peruano otorga contratos especiales y la financiación en forma de:

- Una concesión por 30 años bajo un régimen fiscal del 30% de impuesto a la renta, efectivo durante el PPA. Si uno de los contratos genera pérdidas a causa de los impuestos, dichas pérdidas pueden ser compensadas con los beneficios derivados de otro contrato.
- Exención para todos los bienes e insumos requeridos para desarrollar los recursos en régimen de concesión.
- Un régimen de depreciación acelerada de un máximo de 20% para efectos del impuesto de la renta, sobre el material y maquinaria utilizados para producir electricidad.
- Cada cinco años, el MEM determina la cantidad mínima de fuentes renovables que deben ser contratadas en las subastas públicas.

### **Caso Chile**

Chile en los últimos 5 años invirtió US\$ 4.500 millones en la industria de energía renovable, siendo el tercero después de Brasil (US\$ 70.000 millones) y México (US\$ 5.800 millones) en América Latina. En el 2006 estableció el Estándar de Portafolios de Renovables (EPR), el cual requería que las compañías de servicios públicos obtuvieran el 5% de su electricidad a partir de fuentes renovables de energía no convencional para

el año 2014, más un 0,5% adicional por año a partir de esa fecha. Sin embargo, a partir del 2013 estableció que los servicios públicos obtengan el 20% de su energía de renovables no convencionales para el 2020.

El país enfrentó varias barreras para empezar a desarrollar su potencial energético renovable no convencional: poca participación gubernamental en el sector energía; altos costos iniciales de inversión sin fabricantes de tecnología energética; restricciones de recursos financieros por parte de los bancos locales; infraestructura de red deficiente; pocos ingenieros eléctricos; dificultad en el desarrollo de las conexiones a las líneas de transmisión; y problemas para negociar PPAs a largo plazo.

A pesar de ello, el potencial del mercado chileno de energía renovable se debe a dos razones:

- Gran potencial para el desarrollo de nuevas fuentes de energía renovables: eólica, geotérmica (con 10% de los volcanes activos del mundo), y solar (los recursos solares más grandes del mundo se encuentran en el desierto de Atacama).
- Escasos recursos domésticos de combustible fósil para la producción de electricidad, un crecimiento económico sostenido, centros urbanos muy dispersos, y una industria minera intensiva en energía hacen que el mercado chileno de electricidad y transmisión sea uno de los más caros de América Latina.

Chile se ha convertido en uno de los primeros mercados donde la energía solar fotovoltaica es viable sin subsidios y es el primer país sudamericano con una planta de potencia solar concentrada (Concentred Solar Power - CSP). Esto tiene mucho que ver con los niveles de radiación que recibe el país, así como sus altos costos de electricidad y la dispersión geográfica de sus ciudades.

## **2.6.2 Cargo por Confiabilidad**

A la fecha la regulación colombiana contempla la metodología para determinar la ENFICC y las Obligaciones de Energía Firme – OEF, del cargo por confiabilidad para plantas eólicas. Esta metodología fue definida en la Resolución CREG 148 de 2011 y modificada con la Resolución 061 de 2015.

Para plantas eólicas con información de las velocidades medias de vientos, inferiores a 10 años, la ENFICC Base (100% PSS) se calcula con un factor diario de utilización de la planta de 6% de su capacidad efectiva neta, equivalente en energía y para la ENFICC 95% PSS, con un factor de utilización de 7,3%.

Para el cálculo de la ENFICC de plantas eólicas con registros de velocidades de vientos superiores a 10 años, la ENFICC se determina a partir de la serie de velocidades de viento con mediciones de cada 10 minutos.

Para la determinación de la ENFICC de plantas solares fotovoltaicas, la regulación aún no contempla una metodología definitiva, pero la Resolución CREG 227 de 2015 presenta un proyecto de metodología que se encuentra en discusión por los agentes e interesados en el tema.

La propuesta existente para plantas solares fotovoltaicas, que posean información histórica de longitud igual o superior a 10 años, de irradiación horizontal y temperatura ambiente, medidas en el sitio de planta, estima la ENFICC como función de las series históricas mencionadas, las constantes específicas de pérdidas del sistema solar y de la tecnología de la estructura de soporte, el índice de indisponibilidad histórica forzada IHF, y la potencia del conjunto de módulos fotovoltaicos solares kWpeak.

En caso de no contar con las medidas suficientes de irradiación horizontal y temperatura ambiente en el sitio de la planta, se deberá presentar un dictamen técnico para desarrollar la estimación de las series históricas, con base en mediciones en el sitio de la planta y registros de otros puntos de medición.

### **2.6.3 Expansión de la Transmisión**

Los costos totales de una planta fósil nueva y su transmisión asociada pueden ser menores que el desarrollo de fuentes renovables, debido a los altos costos relativos del capital de las eólicas y fotovoltaicas y la carga adicional de los costos de transmisión, cuando las fuentes renovables están localizadas en sitios remotos de los centros de carga.

Un reto para los reguladores es la asignación de las responsabilidades de planear, construir y cargar los costos de transmisión para integrar las energías renovables en gran escala a la red. Una opción para integrar las renovables a la red, consiste en usar un esquema de transmisión cooperativo, con la participación de varios generadores, lo cual evita la necesidad de conexiones individuales a la red de alto voltaje para uso exclusivo de cada generador. Este esquema aprovecha las economías de escala provenientes de la participación de varios generadores, asignando los costos de la transmisión solamente a los generadores responsables por ella. Se utiliza un esquema simple MW-milla, a través del cual los cargos anuales para cada generador son calculados en proporción al uso de cada proyecto.

La coordinación entre la generación con recursos renovables y la red de transmisión es crucial; experiencias como la que ocurrió en China en el 2010, donde debido al rápido crecimiento de la energía eólica en forma descoordinada con la red de transmisión, llevó a que el 30% de la capacidad eólica no estuviese integrada a la red. Para esas plantas que estaban conectadas entre sí pero no con la red, ocurrió una pérdida de 6.000 GWh de energía, debido a problemas operacionales.

Otro concepto que busca resolver el problema de la transmisión para la generación de energías renovables es el de la creación de "zonas de energía renovable", donde a través de un proceso de planeamiento se identifican áreas geográficas de energía renovable y se desarrollan planes de transmisión en gran escala para evacuar la energía de la zona. Los planes alternativos se comparan y se selecciona el mejor para ser desarrollado. Una vez el diseño de la transmisión ha sido aprobado y programado para la construcción, los desarrolladores de plantas eólicas pueden seleccionar la ubicación de sus nuevas plantas e iniciar la construcción. Texas es un buen ejemplo de esta experiencia y ha desarrollado un plan de transmisión de 2.300 millas a 345 kV, para evacuar la energía eólica adicional correspondiente a 11.5 GW.

## **2.7 Aspectos Operativos de las Plantas Eólicas y Solares**

A nivel mundial existe una penetración de las energías renovables para generación eléctrica, las cuales deben ser integradas a los sistemas de potencia existentes, diseñados para manejar cargas variables; con la entrada de la generación a partir de fuentes renovables, se presenta un nuevo desafío consistente en el manejo de una oferta variable e incierta.

La integración en la red de las plantas de energía eólica y solar es complicada por la variabilidad del viento y del sol y las características técnicas de sus generadores. Con altos niveles de penetración de la energía eólica y solar, aumenta la necesidad de servicios complementarios, mientras que los recursos tradicionales que proporcionan esos servicios se vuelven menos disponibles, o económicamente inviables<sup>22</sup>.

Durante la última década han ocurrido grandes avances en tecnología eólica, permitiéndole convertirse en la principal fuente de energía. Estos avances se refieren fundamentalmente a la funcionalidad y el rendimiento de los aerogeneradores para

---

<sup>22</sup> Jason MacDowell, Sudipta Dutta, et al, "Serving the future", IEEE Power and Energy Magazine, November/December 2015.

operar integrados en la red. Una parte clave de esta tecnología es el sistema de control de planta eólica, que coordina el comportamiento individual de los aerogeneradores para conseguir la compatibilidad con la red, generalmente sin la necesidad de equipamiento suplementario para regular la potencia activa y reactiva.

Una planta típica eólica o solar funciona dentro de la red, como una fuente de generación sustancialmente diferente a las centrales eléctricas convencionales; la diferencia más importante es que la energía eólica y solar como fuente de combustible, es inherentemente incontrolable y varía a lo largo del tiempo. Además, las características eléctricas de inducción, doble alimentación y convertidor completo que poseen sus generadores, presentan diferentes respuestas de perturbación y generación respecto a los generadores síncronos convencionales. Históricamente, a la potencia activa producida por las plantas eólicas y solares, se les permitió fluctuar de acuerdo con el viento y las radiaciones disponibles y dichas plantas no fueron obligadas a participar en el sistema de regulación de voltaje y frecuencia o en el control de intercambios entre áreas.

El modo incontrolado de potencia activa generada puede tener un impacto en la red, incluyendo variaciones de frecuencia y voltaje y aumento de la regulación o de los requisitos de rampa en los recursos de generación convencional. Estos efectos son particularmente significativos en las redes con alta penetración de recursos renovables variables. Además, una planta de energía cuya potencia de salida no está controlada, por su naturaleza no puede participar en la regulación de frecuencia de red, de modo que cuando la generación eólica y solar desplaza la generación convencional, la carga de prestar los servicios complementarios tales como la regulación, recae en mayor medida sobre el resto de los generadores convencionales.

También históricamente, a las plantas eólicas y solares les fue permitido absorber la energía reactiva de las redes, o en el mejor de los casos, mantener un determinado factor de potencia. Esto es sustancialmente diferente a lo que se exige del modo de funcionamiento de las centrales eléctricas convencionales, que generalmente regulan los voltajes de la red de interconexión. Sin un control coordinado de las plantas para el intercambio de potencia reactiva con la red, una planta típica eólica o solar no proporciona regulación de voltaje a la red; además, las variaciones de voltaje causadas por las variaciones de potencia activa no son mitigadas.

Con baja penetración de la generación eólica y solar, estas características del equipo y las limitaciones de integración no tienen un impacto significativo en la práctica. Sin embargo, la generación eólica y solar está alcanzando niveles de penetración

importantes en muchas regiones y la integración a la red ha surgido como un límite potencial sobre el desarrollo ulterior de estos recursos respetuosos con el medio ambiente. Por lo tanto, las empresas de interconexión y las entidades regulatorias imponen códigos de red que exigen rendimiento de las plantas eólicas y solares, similar al proporcionado por las plantas de energía convencionales que utilizan vapor, gas y turbinas hidroeléctricas con generadores síncronos. Hoy en día los parques eólicos y solares son capaces de ofrecer la gama completa de servicios complementarios que las plantas hidroeléctricas y térmicas convencionales ofrecen, a menudo con mayor velocidad y precisión.

Los sistemas de control de las plantas eólicas regulan la potencia neta activa y reactiva de intercambio entre la planta y la red. Esto permite que las plantas eólicas regulen la magnitud de voltaje de la red, proporcionen respuesta del gobernador de frecuencia y minimicen las tasas de cambio de potencia. La capacidad reactiva puede lograrse con o sin velocidad suficiente del viento para operar las turbinas. Este sistema de control de las plantas eólicas es un esquema jerárquico que controla cada uno de los aerogeneradores, para aplicar regulación de los parámetros de red como el voltaje o la potencia, de forma altamente precisa, estable, de lazo cerrado y los parámetros de interface de red, como el factor de potencia o la generación neta de potencia.

### **2.7.1 Variabilidad de la Generación**

La variación en la producción de energía solar durante el día y el año es altamente predecible, porque el movimiento del sol es conocido. Otra fuente de variabilidad menos predecible es la presencia de nubes que pueden pasar sobre las plantas de energía solar y limitar la generación durante cortos períodos de tiempo. La nubosidad puede provocar cambios muy rápidos en la generación de los sistemas fotovoltaicos, pero los impactos en la red eléctrica se minimizan si los proyectos solares están distribuidos geográficamente, de modo que no todos estén afectados por las nubes al mismo tiempo, suavizando la variabilidad. Para las grandes plantas fotovoltaicas, la nubosidad normalmente afecta sólo a una parte del proyecto en un momento determinado, mientras que las nubes viajan a través del sistema.

En comparación con la energía solar, la energía eólica es menos predecible, sujeta a cambios diarios y estacionales del clima. A menudo, la energía eólica está más disponible en el invierno o por la noche, cuando el viento sopla más fuerte. Esto puede plantear problemas en algunos casos si la generación corresponde a un periodo de baja carga.

Una diferencia clave en la variabilidad de la energía eólica y solar es que los cambios en la generación eólica normalmente ocurren más despacio, mientras que los cambios grandes ocurren durante el transcurso de las horas, cuando una tormenta se mueve a través de una planta de energía eólica. Esto contrasta con el cambio rápido en la producción de energía solar que resulta de la nubosidad.

### **2.7.2 Desafíos para la Operación de la Red**

La incertidumbre y la variabilidad de la generación eólica y solar plantean desafíos para los operadores de la red. La variabilidad de las fuentes de generación puede requerir medidas adicionales para equilibrar el sistema, necesitándose mayor flexibilidad para adaptar la variabilidad de la oferta con los niveles de carga. A veces la generación eólica aumenta a medida que aumenta la carga, pero en los casos en que la generación renovable aumenta cuando los niveles de carga disminuyen, o viceversa, se requieren medidas adicionales para balancear el sistema. Los operadores del sistema deben asegurarse que disponen de recursos suficientes para acomodar hacia arriba o hacia abajo las rampas de generación de energía eólica y mantener el equilibrio del sistema.

Otro desafío se produce cuando la generación eólica o solar está disponible durante los periodos de baja carga; en algunos casos los generadores convencionales pueden necesitar bajar su generación a niveles mínimos.

A diferencia de la generación eólica, la solar es a menudo más coincidente con la carga. Sin embargo, en regiones con picos de carga en la noche, la pérdida de generación solar al atardecer puede hacer más difícil el cubrimiento de la demanda en las horas de la noche; no obstante, estos eventos se pueden prever, porque se conoce cuando el sol sale y se oculta cada día, permitiendo planificar este aspecto de la variabilidad de la energía solar, aumentando los niveles de reserva operacional, focalizándose en la variabilidad impredecible debida a las nubes.

### **2.7.3 Complementariedad Hidroeléctrica**

La energía hidroeléctrica puede ser usada de manera efectiva para balancear y complementar la generación variable de otras fuentes renovables como la energía eólica y solar F-V. Esta situación ha sido demostrada en varios países, entre otros, Noruega, Suecia, Finlandia y Canadá.

En Colombia se han realizado estudios que demuestran la existencia de patrones de complementariedad estacional entre los recursos eólicos e hidráulicos. La energía eólica

parece estar disponible cuando su contribución a la red nacional más se necesita, es decir, durante los períodos secos y en cierta medida durante el atardecer cuando ocurre la demanda pico. Los resultados sugieren que la energía firme de la operación conjunta de plantas eólicas e hidroeléctricas, supera la energía firme de estas plantas operando en forma aislada<sup>23</sup>.

#### **2.7.4 Impactos en la Generación con Combustibles Fósiles**

La presencia adicional de energía eólica y solar en redes eléctricas puede causar el encendido y apagado de las plantas a carbón o gas natural con más frecuencia, o modificar sus niveles de generación frecuentemente, para acomodar los cambios en la generación variable. Este tipo de operación puede provocar un aumento en el desgaste de las unidades y una disminución en la eficiencia. Los costos de estos ciclos varían según el tipo de generador; generalmente, las unidades térmicas de carbón tienen los costos más altos, aunque las de ciclo combinado y muchas turbinas de combustión también pueden tener costos significativos.

En particular, para las centrales de carbón los efectos pueden incluir aumento en los daños de las calderas, como resultado de los esfuerzos térmicos.

Los ciclos de arranque y parada también pueden afectar las emisiones procedentes de plantas generadoras con combustibles fósiles, ya que las plantas operan con cargas parciales. Aunque la energía solar y eólica desplazan emisiones, reduciendo el uso de plantas con combustibles fósiles para la generación de electricidad, las emisiones evitadas se erosionan como resultado del ciclo de operaciones mencionado.

#### **2.7.5 Cortes de Energía Solar y Eólica**

Con el incremento y la penetración de la energía eólica y solar, los cortes de esta generación cada vez son más frecuentes. Esta restricción puede afectar los ingresos de proyectos de energía eólica y solar y sus impactos son específicos al balance generación-carga de cada zona, debido a las diferencias en las características de la red, las prácticas operativas y otros factores como el clima.

Los cortes de generación normalmente son involuntarios y corresponden a una reducción en la producción de un generador respecto a lo que podría producir, dados los recursos disponibles. Pueden producirse cuando los operadores ordenan a los generadores

---

<sup>23</sup> Vergara, Deep, Toba, Crampton, Leino, "Wind energy in Colombia", World Bank Study, Jul 2010.

solares y eólicos reducir su producción, para reducir al mínimo la congestión de la transmisión, o administrar el sistema, o para conseguir la combinación óptima de recursos. También pueden ocurrir por razones tales como el exceso de generación durante períodos de baja carga, que podrían causar que los generadores convencionales alcancen los umbrales mínimos de generación, debido a problemas de interconexión o de voltaje, o para mantener los requisitos de frecuencia, especialmente para pequeñas redes aisladas.

Los cortes son limitaciones usadas como herramientas para mantener el balance energético del sistema, incluyendo también la capacidad de las redes, la energía hidroeléctrica y térmica, la respuesta a la demanda, almacenamiento y cambios institucionales. La decisión de usar los cortes es principalmente una cuestión de economía y práctica operativa.

Las prácticas varían considerablemente de una región a otra y de acuerdo al diseño de los mercados. En lugares con mercados de energía mayorista centralizados y experiencia con energía eólica, los procesos de reducción manual de energía eólica están siendo reemplazados progresivamente, por la transparencia de los mecanismos de mercado, basados en el envío de ofertas para el despacho económico.

Algunas reducciones en la generación están determinadas por cómo el operador de la generación eólica evalúa el despacho versus no-despacho. Otras reducciones están determinadas por el operador del sistema interconectado, en respuesta a posibles eventos de confiabilidad.

### **2.7.6 Control de Potencia Activa**

Los controles avanzados de potencia activa ofrecidos hoy como parte de los sistemas eólicos, gestionan la generación de potencia eléctrica tan bien como cualquier generador convencional. En algunos aspectos las plantas eólicas con estos controles avanzados, ofrecen incluso mejor control que las unidades convencionales, porque la generación puede ser afinada para mitigar desviaciones de la frecuencia, poco después de la pérdida de gran cantidad de generación en el sistema.

### **Respuesta del Gobernador de Frecuencia**

El conjunto de funciones de control de potencia activa ofrecido en los sistemas de control de la planta eólica, es muy semejante a los controles del gobernador en la generación hidroeléctrica y térmica. Ellos responden a diferencias significativas en la frecuencia de

la red, aumentando o disminuyendo la potencia de salida de acuerdo con los eventos de subida y bajada de frecuencia en la red.

Los eventos de sobre-frecuencia en la red son estresantes para los componentes eléctricos. Además, las oscilaciones temporales de alta frecuencia pueden impactar la confiabilidad; por ejemplo, la oscilación de regreso de alta frecuencia tras una gran perturbación en la red, puede causar disparo de plantas agravando el evento. Cuando está habilitada, la respuesta del sistema de control de la planta crece rápidamente, reduciendo la potencia de salida para la duración del evento de frecuencia. Este comportamiento es similar al del control de gobernador en la generación térmica, excepto que es más rápido.

La respuesta del gobernador no ha sido históricamente considerada como un servicio complementario, sino como una expectativa de generación en sistemas interconectados. En la práctica tradicional, es común que las plantas hidroeléctricas y térmicas tengan habilitadas las funciones de gobernador, aunque frecuentemente se encuentran excepciones.

En el caso de proveer la respuesta del gobernador de parques eólicos, es sumamente importante considerar la asimetría inherente de la generación de energía: la energía eólica disponible en cualquier momento establece el límite superior de la potencia disponible. Los aerogeneradores están diseñados para maximizar la producción de energía eléctrica, con base en la entrada de energía eólica con la mayor eficiencia posible. Ninguna acción de control por parte de las turbinas de viento puede aumentar este límite superior. Por lo tanto, normalmente es posible generar menos energía que la que está disponible en el viento, pero nunca más sobre una base sostenida, porque la operación se vuelve menos eficiente y económica.

Por comparación, la respuesta "hacia abajo" esencialmente no tiene costo de oportunidad y puede ser suministrada de forma muy efectiva como un servicio complementario. Por su controlabilidad y velocidad, la respuesta de las plantas eólicas, puede ser notablemente superior a la disponible en generadores térmicos convencionales o en centrales hidroeléctricas y por tanto, tiene un valor significativo para la confiabilidad del sistema.

### **Programación de Generación y Tasa de Control de Rampa**

Como se mencionó anteriormente, la generación eólica puede generalmente producir menos energía que la que está disponible en el viento, pero no producir más. Limitar la

generación de una planta de energía eólica, llamado "corte", puede ser necesario por varias razones: la congestión (incapacidad de la red para aceptar o entregar energía a causa de las limitaciones de la infraestructura de transmisión) y las limitaciones de reserva (incapacidad de aceptar la energía eólica debido a restricciones de otros recursos que prestan diversos servicios complementarios de reserva).

La capacidad de sostener fuertemente la generación y la rampa de generación, permiten a la generación eólica ofrecer las mismas ventajas para la red, como cualquier otra tecnología convencional y debido a que la velocidad de la rampa puede ser más rápida o más lenta para eólicas, puede decirse que es más flexible.

Una técnica de limitación se utiliza para maximizar la captura de energía de la planta y al mismo tiempo imponer un límite de rampa de generación general para el sistema. El limitador de rampa no impone una tasa de cambio en una sola turbina produciendo potencia, hasta que la tasa de cambio de potencia de la planta se acerca al límite. Esta técnica permite que cada turbina, responda a los cambios locales en las condiciones del viento y que cada turbina varíe su potencia (rampa), independientemente de las otras turbinas. Sólo cuando la respuesta colectiva de toda la planta se aproxima al límite de la rampa, el control impone un límite de rampa para la planta.

La funcionalidad de la respuesta del gobernador es más probable que sea valiosa y económica en momentos de grandes vientos y carga eléctrica baja. Los límites de velocidad de rampa se pueden ajustar para satisfacer los requisitos de las redes y aplicaciones específicas. Se pueden imponer límites de velocidad de rampa para condiciones operativas de la red que justifiquen su utilización y no necesiten su activación continua.

### **Respuesta de Inercia Controlada - Respuesta Rápida de Frecuencia**

La respuesta de los sistemas de potencia a las perturbaciones del sistema es motivo de gran preocupación para los responsables de la planificación y la operación de la red. Los eventos del sistema que incluyen la pérdida de generación, normalmente provocan depresiones transitorias de la frecuencia del sistema.

La tasa de disminución de frecuencia, la profundidad de la reducción de frecuencia y el tiempo requerido para que la frecuencia del sistema vuelva a la normalidad, son índices críticos del rendimiento del sistema de potencia, que se ven afectados por las características dinámicas de la generación conectada a la red. Normalmente, en los primeros segundos después de una pérdida de una planta generadora grande, la

dinámica de la frecuencia del sistema está dominada por la respuesta inercial de la generación. El comportamiento de la generación sincrónica convencional es bien conocido y es requerido por la red para un funcionamiento seguro. Los turbo-generadores sincrónicos, inherentemente contribuyen a la red con algo de su energía inercial almacenada, debido a las propiedades físicas de la unidad, reduciendo la tasa inicial de pérdida de frecuencia y permitiendo acciones más lentas del gobernador para estabilizar la frecuencia de la red. Sin embargo, la mayoría de los generadores eólicos modernos de clase MW no presentan esta respuesta inercial. Esto plantea preocupaciones en los sistemas con alta penetración de generación eólica, por su inaceptable respuesta de frecuencia.

Hoy ya está disponible una capacidad de respuesta inercial para aerogeneradores, para eventos grandes de pérdida de frecuencia, similar a la disponible con generadores síncronos convencionales. La respuesta de la generación eólica no es inherente, ni se basa sólo en la física; es una respuesta controlada en los primeros diez segundos de un gran evento. Por lo tanto, esta respuesta también puede caracterizarse como respuesta rápida de frecuencia. La mayoría de los grandes fabricantes de equipos eólicos ofrecen la funcionalidad de respuesta inercial de frecuencia rápida, aunque mediante diferentes metodologías de control y ejecución de las estrategias.

El control tiene una serie de diferencias respecto de la respuesta de inercia inherente de una máquina sincrónica. En primer lugar y la más importante, el control es asimétrico: sólo responde a las bajas frecuencias. Los controles de frecuencia alta son manejados por separado, por un controlador diferente. En segundo lugar, la zona muerta se asegura que el controlador sólo responda a los eventos grandes, aquellos para los cuales la respuesta inercial es importante para mantener la estabilidad de la red y para los que las consecuencias disruptivas, puedan resultar en deslastre de carga por baja frecuencia. Por último, una respuesta inercial controlada significa que la velocidad es una función de los parámetros de control. Los ajustes estándar están sintonizados para proporcionar una buena coordinación, no sólo con la respuesta inercial de otra generación en el sistema, sino también con la respuesta del gobernador de generación convencional.

La respuesta inercial no ha sido tradicionalmente considerada como un servicio complementario, sino como una característica natural e incontrolable del sistema eléctrico. Por consiguiente, la introducción de tecnologías que facilitan la respuesta inercial controlable y que requiere cambios específicos de generación, es un cambio sustancial. En última instancia, los códigos de la red pueden ser modificados (y en algunos casos, ya lo han sido) para incluir algún tipo de requisito de respuesta inercial.

### 2.7.7 Control de Potencia Reactiva

Para muchas plantas eólicas, especialmente proyectos grandes remotos, los enfoques tradicionales de gestión de la potencia reactiva ya no son aceptables. Una planta grande de energía eólica puede contener cien o más turbinas eólicas individuales, separadas por decenas o incluso cientos de kilómetros del sistema colector eléctrico. Sin embargo, las necesidades del sistema de potencia están ubicadas en el punto de interconexión con la red.

Los controladores de la planta eólica de algunos fabricantes logran mejor control voltaje/voltamperios reactivos (VAR), mediante el uso de capacidades inherentes de potencia reactiva integradas en cada aerogenerador y controlan de forma precisa los voltamperios de la turbina, para mantener el voltaje de salida en el punto de interconexión. Este sistema de control coordinado detecta condiciones AC del sistema y ordena a las turbinas individuales dentro de una planta, ajustar sus objetivos de control local para satisfacer las necesidades del sistema. Este control jerárquico minimiza el parpadeo de voltaje (flicker), mejora la estabilidad del sistema, reduce el riesgo de un colapso de voltaje y minimiza el impacto de las interrupciones del sistema.

Esto proporciona dos ventajas principales. En primer lugar, minimiza el impacto de las fluctuaciones de potencia activa sobre el voltaje de la red, por variación del viento. En segundo lugar, el rápido y preciso control de voltaje refuerza eficazmente la red y mejora la resistencia del sistema de potencia ante grandes perturbaciones.

La regulación de voltaje de las plantas de viento es una tecnología probada que ha estado disponible por muchos años. El sistema de control de planta también puede controlar VAR en el punto de interconexión a distancia de la planta de energía eólica, coordinar bancos de condensadores estáticos adicionales y el control de la secuencia de arranque y parada de la planta eólica.

#### **Regulación de Voltaje**

Como la densidad de los proyectos de las plantas eólicas aumenta, especialmente en las áreas geográficas que mejor se adaptan a la producción de energía eólica, surgen nuevos retos en la coordinación de varias plantas de energía eólica operando en modo de regulación de voltaje. Uno de esos desafíos es equilibrar la energía reactiva de las contribuciones de dos o más plantas, a fin de evitar la lucha que tiende a ocurrir, con una planta abasteciendo potencia reactiva y otra planta cercana consumiendo potencia reactiva, resultando en poca contribución de potencia reactiva a la red.

En Norteamérica es requisito proporcionar regulación de voltaje a la interconexión; la regulación exige que los reguladores de voltaje se activen y sigan un programa de voltaje predeterminado. Históricamente, el requisito de capacidad reactiva se impuso en generadores individuales (por ejemplo, 0,90/-0,95 en los terminales de la máquina). Con las eólicas, estos tipos de requisitos se han transformado en rangos de potencia reactiva mínima especificada en el punto de interconexión (por ejemplo, factor de potencia  $\pm 0,95$ ). La intención es lograr la neutralidad tecnológica y permitir una combinación de potencia reactiva de los turbogeneradores y otros equipos dentro de una planta, para satisfacer el requisito.

Esto plantea una interesante oportunidad de suministrar servicios complementarios: las plantas eólicas con estos tipos de controles podrían ser diseñadas para ofrecer capacidad reactiva significativamente mayor que el mínimo requerido por el código de red.

### **Control de Potencia Reactiva sin Viento**

El último avance en tecnología eólica proporciona control de potencia reactiva de salida, incluso cuando el aerogenerador está parado. Actualmente, todos los aerogeneradores clase MW paran en respuesta a las velocidades sostenidas del viento por debajo de un umbral mínimo, o cuando el viento supera un corte de alta velocidad. También pueden ser desconectados de la red en respuesta a perturbaciones graves del sistema. Bajo tales condiciones, tanto la potencia activa para servir la carga y la potencia reactiva para apoyar el voltaje del sistema se pierden.

Los generadores eólicos de última tecnología están equipados con control de la entrega de potencia reactiva, incluso cuando las turbinas de viento no están funcionando. Esa función normalmente no puede ser proporcionada por el generador convencional (generación térmica o hidroeléctrica), debido a que la producción de energía reactiva de estos generadores requiere que el generador (y por lo tanto la turbina) continúen girando a la velocidad síncrona.

Desde una perspectiva sistémica, la capacidad de suministro de potencia reactiva es similar a la proporcionada por diversos dispositivos dinámicos (condensadores síncronos, condensadores estáticos, STATCOMs) que se utilizan para el refuerzo de la red donde es necesario el apoyo dinámico de voltaje.

Los generadores eólicos utilizan grandes convertidores de potencia. Esto desacopla la velocidad del generador de la frecuencia del sistema y permite una amplia gama de velocidades de funcionamiento. Los convertidores de potencia se basan en dos componentes principales: el convertidor del lado del generador y del lado de la línea que se conecta a la red. Es importante reconocer que el inversor de la línea es auto-conmutable. Esto proporciona la habilidad de ofrecer independientemente potencia activa y reactiva. Cuando no hay potencia activa disponible en la turbina, el convertidor puede seguir entregando o absorber la potencia reactiva.

La necesidad de la potencia reactiva y en particular, el valor de reactivos rápidos y dinámicos, del tipo que pueden ser entregados por las turbinas eólicas, es bien conocida. No obstante, los mercados de servicios complementarios que ofrecen incentivos a participantes independientes para brindar este servicio, es apenas incipiente. El comportamiento es similar a los condensadores sincrónicos tradicionales y la aplicabilidad paralela a las situaciones en donde los generadores (normalmente, generadores de turbina de gas) se suministran con un embrague, que permite el funcionamiento como un condensador síncrono, cuando las condiciones de la red y del mercado lo exigen. Históricamente, esta capacidad suele ser propiedad de la empresa, por lo que se carece de mecanismos de mercado transparente.

El valor operacional sistémico de ser capaz de entregar la potencia reactiva es muy específico de la ubicación, mucho más que el control de la potencia activa. Los beneficios más importantes se observan en sistemas con requisitos sustanciales de potencia reactiva dinámica. Estos incluyen proyectos muy grandes, proyectos que están físicamente remotos, con conexiones eléctricas débiles a la red, y proyectos en zonas con cargas fuertes y variables. Las centrales eólicas equipadas con este sistema proporcionan refuerzos eficaces de red, manteniendo la regulación de voltaje continua.

## **2.8 Medidas para Integrar la Generación Eólica y Solar a la Red**

Existe una gran variedad de medidas disponibles para resolver los desafíos de integración de la generación variable renovable. Existen dos elementos básicos para seleccionar el método para enfrentar la variabilidad e incertidumbre de la generación renovable: la relación costo-eficiencia del método y las características del sistema de potencia existente. Las soluciones más económicas y viables están asociadas a la infraestructura de la red, las prácticas operativas, el parque generador y la estructura regulatoria.

Generalmente los sistemas requieren flexibilidad adicional para poder dar cabida a la variabilidad de las energías renovables; ésta puede lograrse mediante cambios institucionales, las prácticas operativas, el almacenamiento, la flexibilidad de la demanda, flexibilidad de los generadores y otros mecanismos. Algunas de ellas han sido adoptadas porque reducen los costos del sistema de potencia, independientemente de la generación renovable variable<sup>24</sup>.

### **2.8.1 Predicción Avanzada de la Energía Eólica y Solar**

La predicción avanzada puede ayudar a reducir la incertidumbre de la generación renovable. El uso de los pronósticos ayuda a los operadores de la red a hacer más eficiente la entrada y salida de generadores para acomodar los cambios en la generación eólica y solar y prepararse para los eventos extremos en los que la generación renovable es inusualmente alta o baja. Los pronósticos además pueden ayudar a reducir la cantidad de reservas operacionales necesarias del sistema, reduciendo los costos de balancear el sistema. Hoy, los errores de predicción suelen oscilar entre 3% y 6% de la capacidad nominal con una hora de anticipación y entre 6% y 8%, con un día de antelación, sobre una base regional.

Los pronósticos con un día de anticipación pueden ser usados para tomar decisiones de compromiso de la unidad, que pueden llevar a la eficiencia operativa y el ahorro de costos. Las previsiones a corto plazo pueden ser utilizadas para determinar la necesidad de un generador de arranque rápido, la respuesta de la demanda, u otra opción de mitigación y por lo tanto mejorar la confiabilidad de la unidad.

La predicción solar está emergiendo, aunque no es ampliamente utilizada en la actualidad. Las nubes son la principal causa de la variabilidad de la generación solar, aparte de los cambios previsible durante el transcurso del día y durante todo el año. La capacidad para predecir con exactitud la energía solar depende del carácter de la nubosidad, incluida la cantidad de agua o hielo en las nubes y los aerosoles. Para evaluar el impacto a corto plazo de la proximidad de las nubes en la generación solar, se pueden usar imágenes del cielo. Para predecir los impactos durante las próximas horas, las imágenes satelitales pueden ser usadas para evaluar la dirección y velocidad de acercamiento de las nubes. Para períodos más largos, se pueden utilizar modelos meteorológicos para determinar cómo las nubes se forman y cambian.

---

<sup>24</sup> L. Bird, M. Milligan, D. Lew, "Integrating variable renewable energy: challenges and solutions", National Renewable Laboratory, US Department of Energy, September 2013.

## **2.8.2 Despacho Rápido y Áreas Mayores de Balance**

El despacho rápido ayuda a gestionar la variabilidad de la generación renovable porque reduce la necesidad de regular los recursos, mejora la eficiencia y facilita el acceso a un conjunto más amplio de recursos para equilibrar el sistema. Cuando los generadores tienen programas de generación fijos durante largos períodos de tiempo, por ejemplo una hora, lo que ha sido práctica común en Estados Unidos, los generadores se comprometen a cumplir su programación y no estar disponibles para ayudar a balancear el sistema, en caso de desviaciones de la programación. Con despachos rápidos, los niveles de carga y generación pueden ser más balanceados, reduciendo la necesidad de reservas de regulación más caras. Esto permite un equilibrio más eficiente y la utilización más económica de los recursos.

Los estudios realizados han demostrado que los costos de integración son menores en las áreas con mayor velocidad de despacho. También se encontró que la programación horaria tuvo un mayor impacto sobre los requisitos de la regulación de la variabilidad introducida por el viento y la energía solar.

El tamaño de las áreas de balance y el aumento de la frecuencia del despacho pueden reducir la reserva de regulación. Un mercado de desbalance de energía es un mercado centralizado, que facilita el despacho rápido de generación de menor costo, a través de las áreas de balance, para hacer frente a los desbalances de energía, o a las diferencias entre energías programadas y reales. Un ejemplo específico de las áreas de balance lo conforman los sistemas de CAISO y PacifiCorp en California, que esperan reducir los costos, proporcionando una mayor eficiencia en el balance, mediante la reducción de la variabilidad total del sistema CAISO-PacifiCorp.

## **2.8.3 Manejo de Reservas**

El manejo de las reservas puede ser modificado para ayudar a solucionar el problema de la variabilidad de la energía eólica y solar. Con la reducción de los requisitos de reserva global se pueden obtener importantes ahorros de costos. Para manejar la variabilidad de la generación se usa colocar límites sobre energía de las rampas eólicas, para reducir la necesidad de las reservas y permitir que las energías renovables variables proporcionen las reservas u otros servicios complementarios.

Al limitar las rampas, los niveles de reservas se establecen para enfrentar eventos de baja probabilidad y cambios grandes en la producción eólica; los límites modestos en las rampas de la generación eólica pueden reducir significativamente la necesidad de

balancear las reservas, obteniendo ahorros de costos. Los eventos de rampas que afectan las plantas en toda el área de balance, resultan de fenómenos meteorológicos de gran escala, los cuales son más fáciles de predecir que los eventos meteorológicos locales. Con la imposición de límites de rampa en los generadores eólicos, cuando los eventos meteorológicos de gran escala se prevén, las exigencias de reservas para balance se pueden reducir significativamente.

Otra opción es diseñar los incentivos para que las plantas de energía eólica y solar puedan proporcionar la regulación, la inercia u otros servicios complementarios, si es rentable hacerlo. Las plantas eólicas y solares, son buenas para proporcionar reducción de generación a muy bajo costo.

#### **2.8.4 Flexibilidad del Mercado**

El costo marginal de la energía eólica y solar es casi cero; por lo tanto, cuando forman parte del despacho de un mercado energético, en general los precios de la energía disminuyen. Aunque esto puede ser una ventaja para los consumidores, existen dudas acerca de la viabilidad de este tipo de mercado, porque algunos generadores pueden obtener ingresos insuficientes para cubrir sus costos fijos y variables. Esto ha llevado a tener gran interés en el fomento de los mercados capacidad.

Otra preocupación es si los mercados de energía, incluso con despacho económico rápido en pasos de 5 minutos, proporcionan suficientes incentivos a los productores para operar de manera flexible.

#### **2.8.5 Respuesta de la Demanda**

La respuesta de la demanda también puede ayudar en la integración de la generación renovable variable, especialmente en el caso de rampas rápidas o eventos extremos. La respuesta de la demanda puede ser utilizada para el suministro de reservas y servicios complementarios, así como para la reducción de picos. Por ejemplo, ERCOT (Texas) obtiene la mitad de sus reservas rodantes, de la respuesta de la demanda. El uso de la respuesta de la demanda para equilibrar el sistema durante eventos poco frecuentes en los que hay una baja o un exceso sustancial de oferta de generación renovable, puede conducir al ahorro de costos, en comparación con el mantenimiento continuo de reservas adicionales. La respuesta de la demanda se puede considerar como parte del portafolio de medidas que pueden complementar la propagación de una penetración más alta de energías renovables variables.

## **2.8.6 Fuentes Flexibles de Generación**

La flexibilidad para acomodar la energía eólica y solar también puede lograrse mediante la utilización de fuentes de generación flexibles. La flexibilidad de las fuentes de generación de energía puede medirse por sus tasas de rampa, rango de control de salida, exactitud de respuesta, así como los tiempos mínimos de producción y parada, el tiempo de arranque, costos de ciclo y nivel de generación mínima. Algunas formas de flexibilidad son inherentes a determinados tipos de generadores, mientras que otros pueden ser afectados por el diseño de la planta o la manera en que se opera. El aumento de la flexibilidad de las plantas existentes puede requerir desembolsos de capital, así como impactos en la eficiencia de la planta y en los costos de mantenimiento.

Generalmente, las turbinas de combustión de gas natural, las centrales hidroeléctricas y los motores de combustión interna, son los generadores más flexibles si no están sujetos a otras limitaciones, mientras que las plantas de carbón y las unidades nucleares de carga base se encuentran entre las menos flexibles. Las plantas térmicas de vapor tienen una cantidad considerable de inercia térmica en la caldera, que limita su capacidad de rampa rápida hacia arriba o hacia abajo. La mayoría de las centrales eléctricas de carbón fueron diseñadas para operar a niveles altos relativamente constantes, para proporcionar carga base de generación.

La flexibilidad del parque generador puede lograrse mediante modificaciones a las unidades existentes, o mediante la adición de nuevas unidades flexibles. Los costos de uso y desgaste pueden reducirse mediante el mantenimiento preventivo o correctivo, cambio en los procedimientos operativos y mejoras del equipamiento. La obtención de un parque generador con la flexibilidad necesaria, es una condición necesaria, pero no suficiente, para una integración eficiente de las energías renovables variables. Los mercados y los procesos operacionales deben permitir que el operador del sistema tenga acceso a esta flexibilidad.

## **2.9 Impacto de las Energías Eólica y Solar en los Mercados**

La mayoría de los mercados de la electricidad fueron diseñados inicialmente con la suposición de que las plantas térmicas y las plantas hidroeléctricas proporcionarían el grueso de los servicios. Sin embargo, las energías renovables variables (eólica y solar fotovoltaica), así como otros tipos de recursos nuevos como la generación distribuida, el almacenamiento y la respuesta de la demanda, pueden influir en los resultados del mercado y en las necesidades de diversos productos de mercado. La forma como está diseñado un mercado puede tener una enorme influencia, en la facilidad para integrar las

características de los recursos que proveen las tecnologías nuevas. Diseños pobres del mercado pueden tener un impacto muy importante en la red de transmisión, en términos de aumento de costos, degradación de la confiabilidad y aspectos relativos a la competencia<sup>25</sup>.

Para mantener la confiabilidad, un sistema de potencia requiere sus recursos para proporcionar varios servicios diferentes. Numerosas reservas operacionales se usan para mantener la frecuencia del sistema, minimizar el error de control de área de un área operativa, administrar los flujos de potencia dentro de los límites normales y de contingencia, administrar la potencia reactiva para mantener el voltaje local, proporcionar el servicio de arranque en negro para soportar la recuperación del sistema durante los períodos de restauración, etc.

En muchos sistemas, algunos de esos servicios como la reserva operacional utilizada para soportar eventos de contingencia y la reserva de regulación (AGC) utilizada para controlar los desequilibrios de corto plazo, tienen precios de mercado dinámicamente competitivos. Estos servicios tienen costos diferentes para los distintos recursos y en diferentes momentos. Pero muchos de los servicios del sistema no tienen mercados competitivos.

Muchos servicios del sistema son proporcionados tradicionalmente por centrales eléctricas, con grandes generadores rodando que se sincronizan con la frecuencia de la red. En contraste, la mayoría de tecnologías de energía eólica y solar F-V tienen interfaces con el resto del sistema basadas en inversores, que no son sincrónicos con la frecuencia de la red y tienen un límite superior de generación disponible que cambia con las condiciones climáticas (variable) y que no es perfectamente conocido de antemano (incierto). A pesar de estas limitaciones, como fue visto anteriormente, estas tecnologías nuevas pueden ofrecer una considerable flexibilidad con tasas de rampa rápida, capacidad para proporcionar energía a cualquier nivel de salida, capacidad para inyectar la potencia reactiva en todo momento (incluso sin viento o sol) y capacidad de interpretar rápidamente la frecuencia del sistema y responder mediante un control rápido. Los recursos renovables variables y otras tecnologías emergentes pueden ofrecer los servicios del sistema, haciéndolo en forma diferente.

Estas tecnologías también difieren en su economía. Para proporcionar un servicio de reserva de "elevación" (aumento rápido de generación para corregir la reducción de

---

<sup>25</sup> Mark Ahlstrom, Erik Ela, et al, "The evolution of the market", Power and Energy magazine, November/December 2015.

frecuencia), un generador debe tener algún margen de maniobra más allá de su nivel actual de generación. Las plantas convencionales suelen funcionar a un nivel de generación económico costo-efectivo, pero normalmente tienen un margen más allá de este nivel que puede ser utilizado para situaciones de emergencia. En contraste, los incentivos y las fuentes de combustible gratis, fomentan maximizar la generación solar y eólica y pueden operar siempre a su máxima producción, sin una reducción de la eficiencia, de modo que la reserva de "elevación" suele no estar disponible a menos que el viento y la energía solar intencionalmente se restrinjan. No obstante, la energía eólica y solar pueden proporcionar muchos servicios del sistema con alta velocidad y precisión y pueden ser más económicas para obtener algunos de los servicios de las unidades convencionales durante más periodos de tiempo.

Los operadores del sistema de potencia definen a través de un proceso de programación y arranque de generadores, cuales pueden resultar necesarios para los próximos días y horas (unit commitment); luego informan a cada generador del nivel exacto de generación que deben proporcionar (despacho). Estas decisiones están optimizadas para minimizar el costo y consideran numerosas restricciones de unidades específicas y del sistema. La mayoría de los operadores del sistema incluyen ahora generadores eólicos y solares en este proceso, con base en predicciones del viento y sol y las ofertas del costo de la energía.

La suposición general de los mercados energéticos competitivos es que cada generador ofrecerá a su costo marginal de producción. Las ofertas de menor costo se seleccionan y el precio del mercado se despeja al costo marginal del último incremento de suministro, a menos que haya escasez. Normalmente a todas las unidades que despejan el mercado se les paga este precio de despeje, tal que las unidades con costos operativos menores reciben un mayor margen de beneficio, por encima de sus costos operativos variables, que puede utilizarse para compensar los costos fijos y de capital. El generador que despeja el precio del mercado, sólo cubre sus costos variables de operación para ese período.

Los mercados energéticos fueron originalmente diseñados en torno a la hipótesis que la energía adicional es útil y su precio está determinado por el costo del combustible para la unidad marginal. Cuando la energía proviene de generadores con combustible gratis, como la eólica y la solar, éstos presentan ofertas de precio bajas correspondientes a sus costos marginales, tendiendo a reducir el precio de despeje del mercado. Durante períodos extremos de exceso de energía (generación alta y carga baja), algunas veces el precio del mercado puede ser negativo, porque las fuentes renovables prefieren aceptar un precio negativo, en lugar de renunciar a los créditos impositivos a la

producción u otras fuentes de ingresos, y los generadores inflexibles (como los nucleares y plantas grandes de carbón) pueden preferir continuar operando en lugar de apagar. Los precios negativos causan que los generadores deban pagar (en lugar de ser pagados), si ellos entregan energía a la red. Si bien el concepto de precios negativos puede parecer inusual, es una consecuencia lógica de la "oferta y demanda", que refleja la voluntad de los participantes del mercado para modificar sus acciones en respuesta a las señales de los precios.

Si el mercado energético consiste principalmente de fuentes renovables de energía, los precios de la energía pueden ser bastante bajos la mayor parte del tiempo, lo cual ya está siendo observado en algunas partes de Europa.

Los ingresos en los mercados de hoy en día están dominados por la energía (kWh), pero otros servicios del sistema también son necesarios para la confiabilidad operativa y en algunos mercados la capacidad a largo plazo, o la energía firme (caso colombiano), se compensa con pagos, para tenerlos disponibles en los próximos meses o años, para cumplir objetivos de confiabilidad a largo plazo, incluso cuando esos recursos podrían proporcionar poca o ninguna energía. Muchos factores, incluyendo el gas natural más barato y el crecimiento de las energías renovables con combustible gratis del viento y del sol, tienden a reducir el promedio de pagos por energía eléctrica. Los cambios en la mezcla de generación también están motivando la definición y valoración de los servicios del sistema, explícitamente asignando un valor a tales servicios.

Mientras tanto, si los grandes recursos de capital que aún son necesarios a largo plazo, están ganando menos en el mercado de energía, pueden exigir más ingresos en los mercados de capacidad. El resultado podría ser un cambio importante en la composición de los ingresos para las plantas de energía, con menos ingresos provenientes de la venta de energía y mayores proporcionados por la capacidad, energía firme y los servicios del sistema.

El diseño de los mercados de electricidad está continuamente experimentando cambios, en un esfuerzo por mejorar y para responder a la tecnología, la economía y los cambios de política. La penetración creciente de las energías renovables variables es un catalizador para la evolución del mercado, pero hay muchos factores adicionales. La eficiencia energética y la recesión mundial han reducido la demanda, el crecimiento espectacular del gas de esquisto (shale gas) en los Estados Unidos ha reducido el precio del carbón en Europa, y el sistema de comercio de emisiones no ha logrado ofrecer un precio considerable en las emisiones de CO<sub>2</sub>. La combinación de esos factores ha resultado en una crisis en el mercado europeo de la electricidad.

## 2.10 Aspectos Regulatorios

Con base en investigaciones y experiencias internacionales, el National Renewable Energy Laboratory – NREL identifica los principales aspectos regulatorios asociados con el crecimiento de la utilización de las fuentes de energía renovable variable - ERV, especialmente eólica y solar en el contexto de la evolución de los sistemas de potencia<sup>26</sup>.

Sobre la base de la experiencia internacional, no existe un enfoque único para abordar la regulación de las fuentes ERV. Muchas variables configuran los problemas que pueden aparecer en un contexto dado: las características del sistema de potencia, la disponibilidad espacial y geográfica de los recursos renovables variables, la organización institucional del sistema de potencia, los objetivos de la política pública y los asuntos de política económica de los sistemas de potencia. A pesar de todas estas variables, surgen problemas comunes para la implementación de estas energías, clasificados en cuatro grupos:

- Facilitar la nueva generación de energías renovables variables.  
De acuerdo con los lineamientos de política energética, los reguladores desempeñan un papel para facilitar nueva generación de ERV a través de diversos mecanismos, entre ellos la fijación de tarifas, la organización de subastas, influyendo en los códigos de red y la interconexión de la nueva generación ERV.
- Asegurar una adecuada infraestructura de red.  
Los reguladores desempeñan un papel en la conformación del desarrollo de la infraestructura de la red del sistema de potencia, lo cual es fundamental en la penetración de las ERV y de su integración al sistema.
- Asegurar a corto plazo la seguridad de abastecimiento (flexibilidad).  
Los reguladores desempeñan un papel en el fomento de la flexibilidad del sistema de potencia, la cual a su vez es fundamental en la integración de ERV en los sistemas de potencia, especialmente a medida que crecen los niveles de penetración.
- Garantizar la seguridad de suministro a largo plazo (suficiencia de recursos)  
Los reguladores desempeñan una función clave para garantizar los recursos adecuados del sistema, incluida la incorporación de ERV en la planificación de recursos y gestionando los posibles impactos económicos de otros recursos en el sistema.

---

<sup>26</sup> Mackay Miller and Sadie Cox, "Overview of variable renewable energy regulatory issues", NREL, US Department of Energy, May 2014.

Estos cuatro grupos están interrelacionados, aumentando a medida que crecen los niveles de penetración de ERV. Las experiencias internacionales de los nuevos retos y soluciones proceden de países como Alemania, Australia, Dinamarca, Guatemala, India, México, el Reino Unido y los Estados Unidos.

## **2.11 Oportunidades de Desarrollo en Colombia**

La irradiación solar promedio de 194 W/m<sup>2</sup> para el territorio nacional y los vientos localizados con velocidades medias de 9 m/s en la Guajira, representan potenciales atractivos para el desarrollo de la energía solar F-V y eólica. Esto, combinado con la tendencia de costos descendentes de la tecnología y la gran dependencia del recurso hídrico para la generación de electricidad con los riesgos de cambio climático asociados, llevan a analizar la utilización de recursos renovables no convencionales, dentro de un esquema de competitividad en el MEM.

La existencia del recurso solar y eólico son la base para un desarrollo importante de generación eléctrica a partir de estas fuentes en el corto y mediano plazo; sin embargo, la ausencia de proyectos responde a la existencia de barreras que impiden o comprometen su viabilidad, por factores tales como la falta de la infraestructura eléctrica para transmitir la energía producida, la complejidad de los procesos de negociación con las comunidades involucradas y la expedición de licencias ambientales, la existencia de un marco regulatorio que ha sido desarrollado para un mercado en competencia, donde actualmente las fuentes renovables no convencionales difícilmente pueden competir con los recursos convencionales existentes de generación eléctrica.

La complementariedad existente de la generación eólica con la generación hidroeléctrica, debido a la disponibilidad alterna de vientos y precipitación hídrica ante cambios de origen climático como el Niño y los períodos cíclicos naturales de lluvias y sequías, es una fortaleza para el SIN. Sin embargo, bajo la regulación existente del MEM, para concretar este beneficio, se requeriría que los generadores eólicos lleguen a acuerdos comerciales con los generadores hidroeléctricos existentes. Otra posible opción sería que los proyectos por desarrollar, desde su inicio contemplen una integración de generación hidráulica-eólica.

El recurso solar F-V en Colombia cuenta con la ventaja de tener un buen promedio de irradiación a lo largo del año, debido a que no existen las estaciones; por otra parte, este recurso en un buen número de regiones, sus niveles de radiación son altos y comparables con los mejores del mundo. Además, hoy en día dados los costos nivelados

de la generación solar F-V, en algunos casos pueden llegar a ser competitivos con las tarifas del mercado minorista de energía eléctrica.

Dependiendo del comportamiento de los precios internacionales del gas natural licuado, el uso de los recursos eólico y solar en la Costa, podría sustituir generación eléctrica con gas procesado en la planta de regasificación de Cartagena. Así mismo, estos recursos podrían llegar a sustituir la generación térmica con combustibles líquidos que ocurre bajo ciertas restricciones de seguridad, o bajo la ocurrencia del fenómeno del Niño.

## 2.12 Reflexiones

- Según análisis llevados a cabo por la UPME, para reemplazar en el SIN 1 MW térmico generado con carbón, se requieren alrededor de 2,5 MW eólicos. Esto significa que para instalar 100 MW se requerirían del orden de US\$150 millones con una planta a carbón, mientras que su equivalente, una planta eólica de 250 MW podría costar del orden de US\$500 millones. Esta situación obedece principalmente a la intermitencia de la generación eólica y solar, frente a la continuidad que puede ofrecer una planta convencional.
- Teniendo en cuenta que la generación de electricidad con fuentes eólicas y solares, es intermitente y no puede ajustarse para suplir los cambios de la demanda eléctrica durante el día, la calidad de su energía es inferior a la producida por las plantas convencionales y sus "costos nivelados" no sirven para ser comparados con otras formas de generación de electricidad.
- Dado que los costos marginales de las plantas eólicas y solares son próximos a cero (combustible gratis), estas plantas desplazan recursos de mayor costo en el despacho, reduciendo en forma importante el costo marginal del sistema. También, sus rentas infra-marginales son superiores a las de la generación convencional, lo que les permite una mayor recuperación de sus costos de capital.
- Si el mercado energético consiste principalmente de fuentes renovables de energía, los precios de cierre del mercado y por tanto los de la energía pueden ser bastante bajos la mayor parte del tiempo; esto necesariamente impacta negativamente los ingresos de los recursos convencionales, lo cual ya está siendo observado en algunas partes de Europa.

- Ante la evidente complementariedad existente entre la generación eólica y la generación hidroeléctrica, debido a la disponibilidad alterna de vientos y precipitación hídrica, la energía firme de la operación conjunta de plantas eólicas e hidroeléctricas, es superior a la energía firme de estas plantas operando en forma aislada. Los beneficios de la asociación operativa hidroeléctrica-eólica con proyectos específicos, debiera ser contemplada en la regulación.
- La incorporación de los parques eólicos y solares al SIN, requiere la identificación de las áreas específicas donde estén concentrados, para que la infraestructura de transmisión del SIN requerida, se desarrolle en forma óptima para todos los recursos del área y la red de conexión propia interconecte todos los generadores y de igual forma se compartan sus costos.
- Muchos servicios complementarios del sistema son proporcionados tradicionalmente por centrales eléctricas convencionales. Las nuevas tecnologías desarrolladas para los generadores eólicos y solares, pueden ofrecer los mismos servicios en forma eficiente, considerable flexibilidad, mejor precisión y respuestas más rápidas.
- Los ingresos en los mercados de hoy en día están dominados por la energía (kWh), pero otros servicios complementarios del sistema también son necesarios para la confiabilidad operativa. El crecimiento de la penetración de las energías renovables y otros factores, tienden a reducir el precio de la energía eléctrica, motivando además la definición y valoración de los servicios complementarios del sistema, lo cual debería llevar a la creación de nuevos mercados competitivos para tales servicios.
- De la experiencia internacional es importante mencionar que la mayoría de los desarrollos acelerados de fuentes renovables variables, cuando han sido sustentados generosamente con subsidios, han llevado:
  - En el caso de Alemania, a que las tarifas residenciales sean las más altas de Europa y el acceso preferencial que tienen las fuentes renovables ha causado una fuerte caída en los precios del mercado eléctrico; sin embargo, los usuarios han recibido muy poco de dicho beneficio, porque los costos subsidiados de las renovables se les han trasladado a sus facturas en forma de cargos de red.
  - En el caso de Italia, debido a la crisis económica europea, cuando los subsidios que se venían entregando para desarrollar la energía solar se

terminaron, causaron la venta de algunas de esas instalaciones y en algunos casos el cierre total de ellas.

- En el caso de España, los subsidios permitieron un crecimiento acelerado de la industria solar y eólica a nivel nacional; sin embargo, cuando los subsidios fueron eliminados debido a la crisis económica española, la instalación de sistemas de energía renovable cayó considerablemente.
- En Colombia la ausencia de proyectos de generación eólica y solar corresponde a la existencia de barreras que impiden o comprometen su viabilidad, por factores tales como la falta de la infraestructura eléctrica para transmitir la energía producida, la complejidad de los procesos de negociación con las comunidades involucradas y la expedición de licencias ambientales, la existencia de un marco regulatorio que ha sido desarrollado para un mercado en competencia, donde actualmente las fuentes renovables no convencionales difícilmente pueden competir con los recursos convencionales existentes de generación eléctrica. Además, los incentivos que otorga la Ley 1715 de 2014, aparentemente son insuficientes para los desarrolladores de estos proyectos.