



Tomado de: <https://pixabay.com/es/solarpark-de-parques-e%C3%B3licos-1288842/>

# Prospectiva de las energías eólica y solar fotovoltaica en la producción de energía eléctrica

## Prospective of wind and solar photovoltaic energy for electricity production

Aurelio Beltrán-Telles<sup>1\*</sup>

Mario Morera-Hernández<sup>2</sup>

Francisco Eneldo López-Monteagudo<sup>1</sup>

Rafael Villela-Varela<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Av. Ramón López Velarde núm. 801, Zacatecas, Zacatecas, México, C.P. 98060.

<sup>2</sup>CUJAE, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Departamento de Ingeniería, calle 114, núm. 11901, entre Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, CUBA. C.P. 19390.

**\*Autor para correspondencia:**

atellesz@yahoo.com.mx

Fecha de recepción:

31 de mayo de 2015

Fecha de aceptación:

16 de agosto de 2016

### RESUMEN

El incremento en el precio de los combustibles fósiles y los problemas de contaminación derivados de su quema, han provocado la intensificación del aprovechamiento de las energías renovables para producir energía eléctrica. El objetivo de este estudio fue estimar el desarrollo de las energías renovables solar-fotovoltaica y eólica en la generación de energía eléctrica, comparándola con la producida con combustibles fósiles. Se consultaron varios reportes, emitidos por organismos gubernamentales y no gubernamentales, sobre el consumo energético mundial, para producir energía eléctrica a base de combustibles fósiles y de energías renovables, sobre la problemática del cambio climático y las políticas establecidas para in-

corporar energías renovables en el portafolio energético mundial. Los resultados indicaron que las plantas de generación de energía eléctrica, a partir de energía eólica y solar-fotovoltaica, son competitivas respecto a las plantas que utilizan recursos fósiles. A corto plazo, se esperan leyes regulatorias, con sanciones por contaminación, para limitar los efectos en el cambio climático, lo que elevará el costo de producción de las plantas convencionales, favoreciendo el desarrollo de las plantas de energías renovables, principalmente la solar-fotovoltaica, la cual tiene el mayor crecimiento de las energías renovables.

**PALABRAS CLAVE:** energías renovables, energía solar fotovoltaica, energía eólica, energía eléctrica, costo.

**ABSTRACT**

The increase in the price of fossil fuels and the pollution problems arising from their burning has resulted in the intensification of the use of renewable energy sources to produce electricity. The purpose of this study was to estimate the development of solar photovoltaic and wind energy in electricity generation, compared to the generation produced with fossil fuels. Several reports issued by governmental and non-governmental bodies on global energy consumption to produce electricity from fossil fuels and from renewable energy sources, on climate change and on policies to incorporate renewable energy sources in the global energy portfolio were consulted. The results indicated that electric power from wind and solar photovoltaic energy generation plants are competitive with respect to the plants that use fossil resources. In the short run, regulatory laws that include pollution-related sanctions to limit the effects on climate change are expected to emerge. Such laws are likely to raise the cost of production of conventional plants, while favoring the development of renewable energy plants, mainly solar photovoltaic, which has the fastest growing renewable energy.

**KEYWORDS:** renewable energies, solar-photovoltaic energy, wind energy, electricity production, cost.

**INTRODUCCIÓN**

La población estimada a nivel mundial, en 2016, es de 7 mil 413 millones de personas y se espera que para el 2038 sea de 9 mil millones (WM, 2016). Este aumento poblacional presiona a las economías de los diferentes países a crecer para satisfacer las necesidades de sus habitantes; por ejemplo, China e India tienen proyectado un crecimiento del 5.5 % por año (Morales, 2014; BP3, 2016). El crecimiento poblacional y económico demanda el uso de energía, que proviene principalmente de los recursos energéticos fósiles (petróleo, gas, carbón), los cuales se han aprovechado por más de 100 años como fuente de calor, energía luminosa, combustible para vehículos y para generar energía eléctrica (INEEL, 2009; UK, 2009; DOE, 2013). Se considera que esta dependencia en los recursos fósiles provo-

cará finalmente su agotamiento (STATOIL, 2014). Un inconveniente adicional en el uso de estos recursos naturales, es que, al quemar los combustibles fósiles para producir energía, generan grandes cantidades de CO<sub>2</sub>, principal gas de efecto invernadero (GEI) de origen antropogénico (IDEAM, 2007; BP, 2014; STATOIL, 2014); y se le considera una de las principales causas del cambio climático, por lo que cada vez se establecen políticas más restrictivas a nivel mundial en el uso de estos recursos (IEA-WOE1, 2013; IPCC, 2013; IPCC, 2014).

La energía eléctrica ha representado un desarrollo tecnológico de gran impacto en el crecimiento económico de la humanidad y actualmente constituye aproximadamente el 65 % de la producción de energía a nivel mundial. Sin embargo, aunque la instalación de plantas de generación de energía eléctrica a partir del petróleo, gas y carbón, pareciera bastante atractiva, al evaluar la inversión neta en este sector durante los últimos años, se observa que las inversiones en energía renovable para la generación adicional de energía eléctrica presenta un mayor incremento que las inversiones para generar más combustibles fósiles (IEA, 2012; IEA2, 2013; REN21, 2013; BP2, 2014; REN21, 2014). Algunas de las energías renovables consideradas, son: solar, eólica hidráulica, biomasa, biocombustibles, mareomotriz, geotérmica, hidrógeno y celdas de combustible, entre otras.

Existe especial interés en las energías solar y eólica, por encontrarse disponibles en mayor o menor medida en cualquier parte del mundo y porque su aprovechamiento permite un crecimiento económico sustentable que no se encuentra atado a la volatilidad del precio de los combustibles fósiles (Bimal, 2013; REN21, 2013; BP, 2014). Otro tipo de energía en desarrollo es la que proviene de los biocombustibles, pero existe la preocupación de que su uso provoque escasez y encarecimiento de los alimentos (Agüero-Rodríguez y col., 2015).

La generación de electricidad a partir de energía nuclear sigue siendo de gran importancia

actual, pero ha perdido interés prospectivo a nivel mundial, debido a la catástrofe ocurrida en Fukushima, Japón, en 2011, al dañarse algunos reactores nucleares, y la fuga de combustible radiactivo en uno de ellos, produciendo gran contaminación, daño ecológico y muertes; además de que refrescó la memoria del desastre de Chernóbil. Estos eventos provocaron que algunos países, entre ellos Alemania y principalmente el mismo Japón, establecieron políticas con la intención de eliminar los reactores nucleares, o políticas de seguridad mucho más restrictivas. Además, se propusieron objetivos para incorporar diferentes niveles de energía eléctrica a partir de la energía solar y eólica (IEA, 2012; Euro, 2013; IEA, 2014).

El acuerdo de la Convención Marco Sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC, por sus siglas en inglés United Nations Framework Convention on Climate Change), de París Francia, en 2015, y firmado en abril de 2016, va a impactar en el desarrollo de las energías renovables. En especial el objetivo 13, en donde los países que conforman las Naciones Unidas se comprometen a tomar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos (CMCC, 2015). De esto, puede desprenderse, que las empresas que no hagan sus proyecciones con base en políticas de desarrollo sustentable, y utilicen tecnologías bajas en carbono para disminuir los gases de efecto invernadero, tendrán pérdidas financieras considerables (IEA5, 2014; CMCC1, 2016).

El objetivo del presente estudio fue determinar el desarrollo de las energías renovables solar fotovoltaica y eólica, en la generación de energía eléctrica, como fuentes alternativas a la energía obtenida mediante el uso de combustibles fósiles.

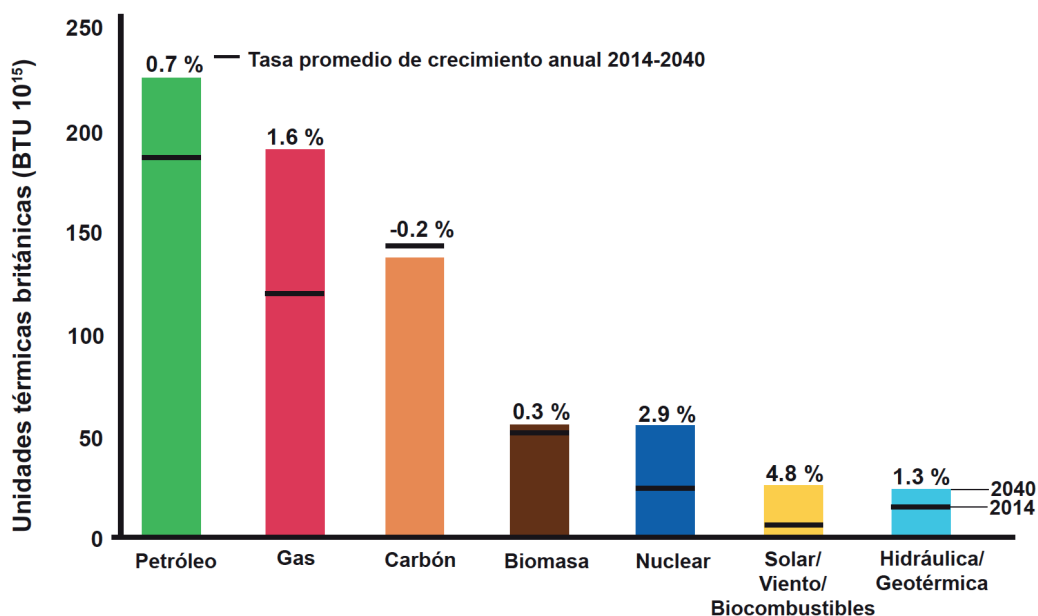
### Consumo actual y prospectivo de energía a nivel mundial

Los combustibles fósiles atienden la demanda actual energética y se estima que abastecerán el 80 % de la demanda energética requerida en 2040, pero la perspectiva de su incremento en la generación de energía primaria (industria, transporte y otros), se considera será marginal desde el presente hasta el 2035 o 2040 (EM, 2016).

En la Figura 1 puede observarse una proyección del consumo energético en los próximos años. Se aprecia como el uso de gas continuará incrementando con una tasa anual de crecimiento del 1.6 % al 1.8 % al 2040, mientras que la del petróleo será del 0.8 %. El carbón tendrá un decremento, calculándose en el 0.2 %. Se estima que el petróleo, que actualmente satisface en promedio el 31 % del total energético requerido, pasará a satisfacer solo el 25 % de la energía consumida en 2040; por su parte, el uso del carbón pasará del 35 % en 2014 al 25 % en 2040, y el uso del gas incrementará del 21 % actual al 23 %; en tanto que las energías renovables que se utilizan actualmente en un 1 %, se estima que incrementarán 4.8 % en 2040. El porcentaje restante se distribuye en hidráulico, biomasa y nuclear (IEA2, 2013; IEA8, 2013; BP, 2014; BP2, 2014; STATOIL, 2014; EM, 2016).

En la actualidad, la generación de energía eléctrica requiere una gran cantidad de consumo de combustibles fósiles, generando un alto nivel de contaminación ambiental, que va en contra del conjunto de políticas elaboradas por diferentes agencias y estados, a nivel mundial, para mantener un escenario de incremento global de temperatura máximo de 2 °C. Estas políticas buscan también limitar la concentración de GEI en la atmósfera, en alrededor de 450 ppm (partes por millón) de CO<sub>2</sub> (Escenario 450), y están contenidas en el acuerdo Kioto y la UNFCCC (IEA-OECD1, 2013; IPCC, 2014). La creciente preocupación se debe a que la quema de combustibles fósiles es una de las actividades de los seres humanos que más contribuyen al cambio climático, debido a la emisión de GEI, lo que provoca cambios en la radiación solar entrante, la radiación infrarroja saliente y en las propiedades de la superficie de la tierra que alteran el balance de energía del sistema climático (INEEL, 2009; IPCC, 2014).

Para estudiar el cambio climático se han desarrollado diferentes perspectivas sobre su evolución, considerando las emisiones de gases de origen antropogénico de forzamiento radiativo, denominadas rutas de concentración represen-



■ Figura 1. Tasa de crecimiento anual estimada para satisfacer la demanda mundial de combustible al 2040, partiendo de los valores reportados en 2010 (EM, 2016).

Figure 1. Estimated annual growth rate to meet global demand for fuel by 2040, based on the values reported in 2010 (EM, 2016).

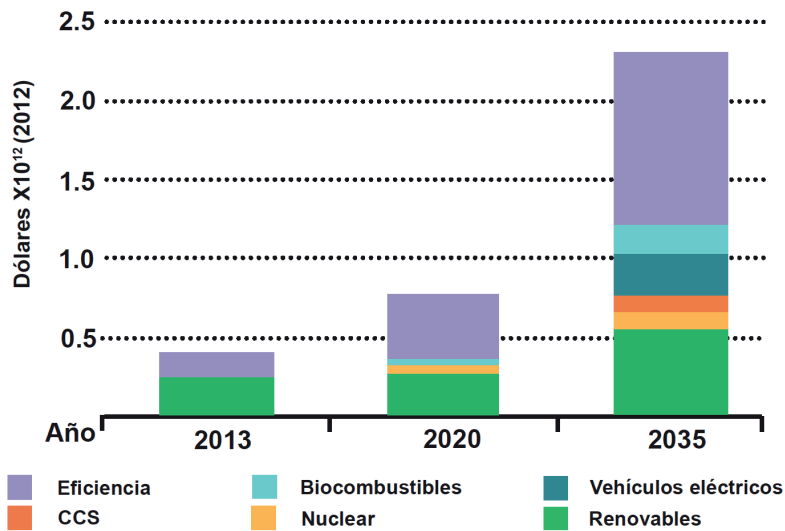
tativa (RCP, por sus siglas en inglés: Representative Concentration Pathways). Dentro de estas rutas se encuentra la RCP4.5, que es un escenario de mitigación, que considera alcanzar un nivel inferior de forzamiento radiativo de  $4.5 \text{ Wm}^2$ , que equivale a 500 ppm, de donde se desprende el objetivo 450 ppm como valor factible de ser alcanzado (IPCC, 2014). Es en este escenario, donde el potencial de la energía solar para mitigar el cambio climático en el corto plazo (2020), como a largo plazo (2050), es excepcional, ya que sólo existe una pequeña cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$ , procedentes de la fabricación de los dispositivos y construcción de la planta. Otro factor que puede impactar en reducir el cambio climático es el amplio desarrollo de los vehículos eléctricos, que tienen la capacidad de desplazar a los vehículos de combustión interna, y pueden utilizar la energía eléctrica generada de manera inmediata en la carga de las baterías, y con ello eliminar una gran fuente de contaminación (IEA, 2013; BP1, 2014).

En la Figura 2, se muestra la prospectiva global en investigación, hasta el año 2035, en tecnologías de bajo contenido de  $\text{CO}_2$ . Se puede observar un incremento mayor en los recursos para

investigación en el área de energías renovables entre 2020 y 2035, comparado con lo mostrado en los años previos (BP, 2014; IEA-WEIO, 2014).

El papel de la energía solar puede pasar de ser un margen pequeño de contribución, como se considera actualmente, a llegar a ser la más importante fuente energética en el 2050, debido a que este tipo de energía tiene el potencial más amplio de todo el portafolio de energías disponibles, con un 40 % (IEA6, 2014; REN21, 2014).

La energía del viento o eólica, está basada indirectamente en la energía del sol. Una pequeña proporción de la radiación solar recibida por la Tierra, se convierte en energía cinética. La causa principal es el desequilibrio entre la salida de energía neta de altas latitudes y la entrada de energía neta a bajas latitudes. La rotación de la Tierra, características geográficas y gradientes de temperatura, afectan la localización y naturaleza de los vientos resultantes. El uso de la energía del viento requiere que la energía cinética se transforme en energía mecánica (movimiento de las aspas) y ésta en energía eléctrica, a través de generadores, para que llegue a ser útil (IEA-WOE1, 2013; IEA3, 2014).



■ Figura 2. Inversión mundial en tecnologías de bajo carbono y eficiencia energética en el escenario 450 (IEA-WEIO, 2014).

Figure 2. Global investment in low-carbon and energy efficient technologies in the 450 scenario (IEA-WEIO, 2014).

La energía eólica ofrece un gran potencial a corto plazo (2020) y largo plazo (2050) para la reducción de las emisiones de GEI (IEA1, 2013; IEA4, 2013). Existen diferentes tecnologías de energía eólica, disponibles en una amplia gama de aplicaciones; pero su principal uso, relevante para la mitigación del cambio climático, es la generación de electricidad a partir del viento, utilizando grandes turbinas conectadas a la red, ya sean desplegadas en tierra o en altamar (IEA4, 2013).

La tecnología para la conversión de la energía eólica en energía eléctrica se considera una tecnología madura y ampliamente utilizada a nivel mundial. Sin embargo, de acuerdo con el potencial disponible en todo el mundo, según los estudios, su uso se encuentra todavía en un nivel muy bajo (IEA3, 2014). La capacidad técnica para la producción mundial de energía eólica es superior al volumen actual de producción de electricidad. Se estima un potencial de generación de 19 400 TWh/a en tierra, que puede alcanzar un máximo de 125 000 TWh/a combinando su producción en tierra y cerca de la costa, aún considerando la existencia de posibles obstáculos que frenen su desarrollo (IEA4, 2013; IEA6, 2014).

### Capacidad actual de generación de energía eólica-eléctrica instalada

La capacidad instalada para la generación de energía eólica-eléctrica se ha incrementado de manera gradual a partir de 2005 y se ha mantenido hasta 2015 (Figura 3a). Sin embargo, existe una fluctuación en la tasa de incremento anual, apreciándose tres periodos muy definidos (Figura 3b), el primero abarca de 2005 a 2009, en el que se presenta un incremento del 25.53 % hasta el 31.40 %. A partir de 2009, disminuye la tasa de crecimiento para alcanzar su valor mínimo en 2013, pasando de 31.40 % a 12.72 %. En los últimos dos años (2014 a 2015), la tasa de incremento en la capacidad instalada vuelve a mostrar tendencia positiva, alcanzando un valor favorable de 17.02 %, pero aún lejano del 31.4 % histórico registrado en 2009 (REN21, 2013; REN21, 2014; REN21, 2015; REN21, 2016).

La capacidad de generación de electricidad, a partir de la energía eólica, no está distribuida en forma homogénea. El 83.69 % de la capacidad está instalada en 10 países, en los que China es el principal generador, con una capacidad de producción de 144.83 GW (GigaWatts),

le siguen Estados Unidos (EE. UU.) (74.14 GW), Alemania (44.83 GW), India (25 GW), España (22.4 GW), Inglaterra (13.79 GW), Canadá (10.69 GW), Francia (9.48 GW), Italia (8.62 GW) y Brasil (8.62 GW). Esto significa que el resto de los países solo tienen una capacidad instalada de 70.6 GW, de los 433 GW a nivel mundial (IEA4, 2013; REN21, 2014; REN21, 2015; REN21, 2016). El 74.76 % de la capacidad de generación añadida en 2015 se concentró en cuatro países: China, Alemania, EE. UU. y Brasil, este último por segundo año consecutivo aparece entre los diez países con mayor capacidad instalada (EWEA, 2015; REN21, 2015; REN21, 2016).

En cuanto al desarrollo tecnológico, los 10 principales fabricantes de turbinas, que capturaron el 73.2 % de ventas del mercado mundial en 2015, frente al 77 % en 2012, se distribuyeron de la siguiente manera: China (5), Europa (4), y EE. UU. (1). En el 2015, China dominó el mercado con el 28 %, seguida por Dinamarca con 11.8 % y EE. UU. con un 9.5 % (REN21, 2015; REN21, 2016). En el 2015, la marca Goldwind obtuvo el primer lugar en ventas, con un 12.5 %, Vestas el segundo con el 11.8 %, GE Wind el tercero y Siemens obtuvo el cuarto lugar (REN21, 2014; REN21, 2015; REN21, 2016).

### Capacidad de generación de energía fotovoltaica eléctrica instalada

La capacidad instalada de generación de electricidad a partir de la energía solar, usando paneles fotovoltaicos, incrementó de 5.1 GW en 2005 a 227 GW en 2015 (Figura 4) (REN21, 2013; REN21, 2014; REN21, 2015; REN21, 2016).

Los principales países productores de energía eléctrica, a partir de la energía solar fotovoltaica, en el periodo de 2009 a 2015, fueron: China, que pasó de generar 7 % de la producción mundial en 2012, ocupando el cuarto lugar; al 19.03 % en 2015, ubicándose en el primer sitio; Alemania obtuvo el primer lugar en 2009, generando el 47 % de la producción mundial; y en 2015 ocupó el segundo lugar con 18.6 %. En ese mismo año, Japón obtuvo el tercer sitio con 15.1 %; EE. UU., el cuarto con 11.27 %; Ita-

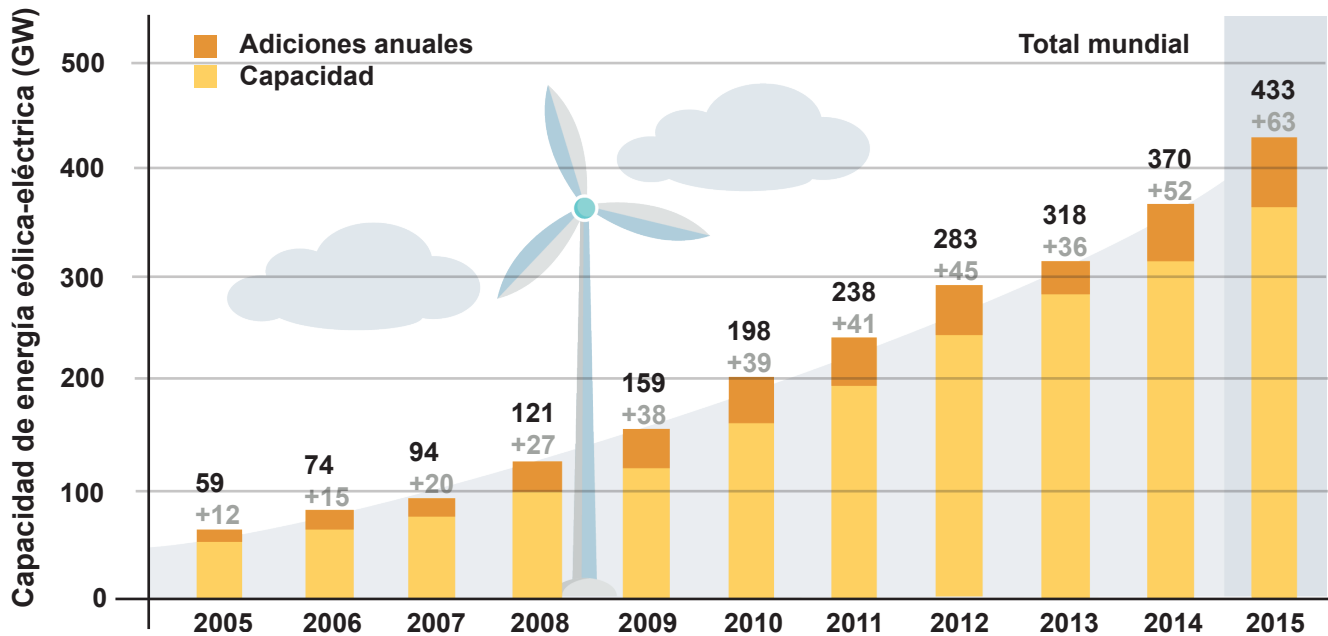
lia el quinto con 8.37 %; Reino Unido ocupó la sexta posición en 2015 con 3.9 %; seguida por Francia, España, Australia e India (IEA8, 2013; REN21, 2014; REN21, 2015; REN21, 2016). La capacidad de generación de energía fotovoltaica eléctrica, añadida en 2015, para los principales países, fue de: 43.2 GW en China; 34.3 GW en Japón; y 25.6 GW en EE. UU. (REN21, 2014; REN21, 2015). En 2014, la India apareció por primera vez entre los 10 países con mayor capacidad instalada (REN21, 2015; REN21, 2016). China dominó el mercado en 2014 con el 67 % del total mundial de producción de energía fotovoltaica eléctrica; seguida por Europa con el 8 %, en tercer lugar, Japón con 5.1 %. El cuarto lugar lo ha mantenido Canadá con un 4.6 %. Aunque no está representado en los 15 principales fabricantes, la India está aumentando la fabricación de una amplia gama de productos y componentes para sistemas solares, con el fin de alcanzar sus objetivos nacionales de energía (REN21, 2013; REN21, 2014; REN21, 2015).

En cuanto al desarrollo tecnológico, el 60 % del total de paneles solares fue producido en 2014 por 11 empresas, mencionadas en orden descendente por volumen producido: Trina solar (China), Yingli (China), Canadian Solar (China), Jinko Solar (China), JA Solar (China), Sharp (Japón), ReneSola (China), First Solar (EUA), Hanwha SolarOne (South Korea), Kyocera (Japón), y SunPower (EUA) (REWE, 2014; REN21, 2015).

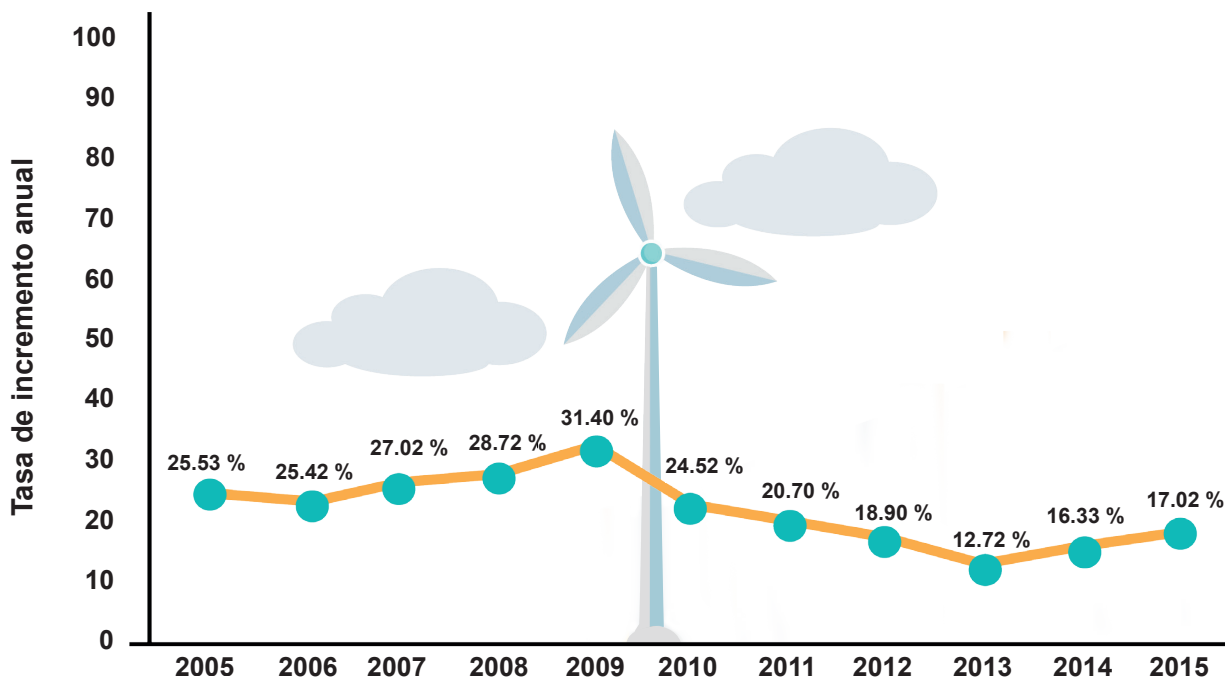
### Costo de generación de la electricidad

El costo de producción de la energía eléctrica es un parámetro que puede permitir visualizar, en el futuro inmediato, qué tipo de plantas serán las que predominen. Para determinar el costo se realizan dos tipos de estudio, uno es el costo normalizado de la electricidad (CNE), el segundo, es el estudio del costo normalizado de la electricidad evitado en el proyecto de generación (CNEE). Se propone además un tercer estudio, que será el costo social normalizado de la electricidad (CSNE) (WEC, 2013; EIA, 2016).

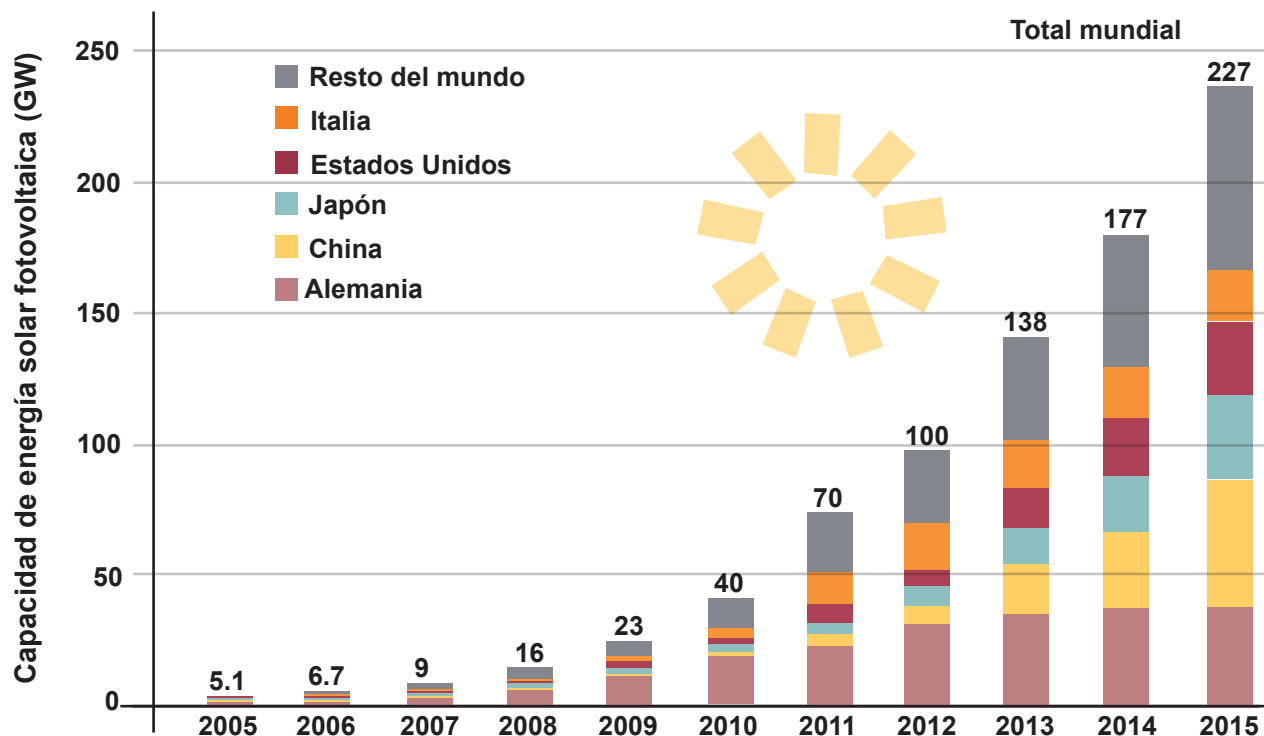
El estudio del CNE considera el costo (US\$/MWh) de construir y operar una planta de ge-



■ Figura 3a. Capacidad mundial de energía eólica-eléctrica y adiciones anuales, 2005 a 2015 (REN21, 2016).  
 Figure 3a. Power wind-electricity global capacity and annual additions, 2005 to 2015 (REN21, 2016).



■ Figura 3b. Tasa de incremento anual de la capacidad mundial de energía eólica-eléctrica.  
 Figure 3b. Annual increase rate of global wind-electricity power capacity.



■ Figura 4. Capacidad mundial solar fotovoltaica por país, 2005 a 2015 (REN21, 2016).

Figure 4. Solar PV global capacity by country, 2005 to 2015 (REN21, 2016).

neración de más de un ciclo de vida y el riesgo financiero asumido. Los insumos clave para calcular el CNE incluyen gastos de capital, costos de la materia prima utilizada, como carbón y gas natural (EIA, 2016), gastos de operación, mantenimiento, una tasa de utilización supuesta para cada tipo de planta y los ingresos, con lo cual se determina la viabilidad del proyecto. Mientras el estudio CNEE considera qué costos pueden ser evitados, considerando que cada país o región tienen variaciones. Por ejemplo, el costo del combustible en un país productor puede ser más barato que el costo que se debe pagar por transportarlo a otra región. Pueden existir estímulos fiscales para empresas que contribuyan en la mejora del medio ambiente o la planta que no necesita insumos, entre otros (EIA, 2016). Finalmente, se sugiere un tercer estudio que puede ser determinante para definir la viabilidad de un proyecto, el CSNE; en este estudio se considera además, incluir costos por la posibilidad de daño ecológico (WEC, 2013; EIA, 2016).

La Administración de Información de Energía de Estados Unidos desarrolló un modelo que genera los valores CSNE y CNEE, a partir de los resultados de estudios para plantas que se prevé predominen en los próximos 30 años y que funcionan con gas natural, carbón, energía solar fotovoltaica y eólica, tanto en tierra como en altamar (EIA, 2016).

En la Tabla 1, se presentan los resultados obtenidos, mediante este modelo, donde puede observarse como para el 2040 los costos de la energía eléctrica a partir de la energía eólica y solar, considerando tanto el CNE como CNEE son competitivos *vs.* carbón y gas natural. Sólo la eólica de altamar presenta diferencia importante entre ambos resultados.

### Tecnologías en desarrollo para hacer más accesible la energía solar y eólica

La factibilidad de que las energías renovables, en especial la solar y eólica, puedan ser incorporadas en un volumen lo suficientemente gran-



de para impactar en la solución del problema energético a nivel mundial, puede visualizarse con base en un análisis del estado actual de la tecnología y los proyectos que sobre dichas energías tienen países, como: China, Alemania y EE. UU. para los próximos ocho años (DENA, 2013; SUNSHOT, 2014). Por ejemplo, uno de los objetivos que se han establecido, para el óptimo aprovechamiento de la energía solar, es el alcanzar una eficiencia en paneles fotovoltaicos del 20 % para el 2020, con costos que permitan su máxima rentabilidad. Actualmente, la empresa SunPower, una de las más importantes empresas fabricantes de paneles fotovoltaicos a nivel mundial, declara en la hoja de datos de sus paneles de la serie SPR-E20-327, una eficiencia del 24.7 %; en tanto que Yingli Solar, con su serie de paneles panda YL280C-30b, garantiza una eficiencia del 17.1 %, y Trina Solar, en su serie TSM-PC14, garantiza el 15.7 % de eficiencia. Estos rendimientos actuales son interesantes, porque hasta hace algunos años la eficiencia máxima promedio estaba entre el 12 % y 15 %, por lo que se espera que varios fabricantes superen ampliamente la eficiencia mínima requerida antes del 2020. Por otro lado, los equipos de electrónica de potencia, involucrados en la conversión, como son rectificadores, elevadores, reductores e inversores, presentan una gran variedad de topologías, las cuales se ven

mejoradas cada día, mejorando la calidad de la conversión y logrando interactuar de manera más eficiente con la red general de energía eléctrica o en microrredes. También se están fabricando dispositivos de última generación (MOSFET's, IGBT's, GTO's, entre otros), involucrados en el desarrollo de dichos equipos, con materiales como Carburo de silicio (SiC), con lo cual se puede tener un manejo de mayor densidad de energía y altas velocidades de conmutación (Ino, 2014). En el campo de la energía eólica, la tecnología se desarrolla considerando si los equipos se van a utilizar en tierra o altamar. Para plantas en tierra, el desarrollo se centra en el diseño de generadores más eficientes y en la longitud óptima de las palas, con los que se pueda obtener el máximo de energía para vientos de baja velocidad; usualmente se fabrican para potencias entre 2 MW y 3 MW. Para plantas en altamar, se ofrecen turbinas compactas de 2 MW a 3 MW, y se investiga en turbinas de 6 MW, que pueden ser instaladas en zonas de tifones, para aprovechar su energía potencial, ya que pueden soportar altas velocidades de vientos (WP, 2015).

La implementación de algoritmos de control automático es cada día más sofisticada, debido al desarrollo de dispositivos microprocesadores que manejan la información a muy altas veloci-

■ **Tabla 1. Costo estimado de la energía eléctrica (US\$/MWh) que se producirá en plantas que entrarán en operación en 2022 según la fuente de energía a utilizar.**

Table 1. Estimated cost of electric power (US\$/MWh) in plants that will start operating in 2022 according to the energy source to be used.

	CNE 2022			CNEE 2022	CNE 2040	CNEE 2040
	Mínimo	Promedio	Máximo	Promedio	Promedio	Promedio
Carbón	\$ 129.90	\$ 139.50	\$ 162.30	\$ 61.10	\$ 125.80	\$ 63.60
Gas natural ciclo combinado convencional	\$ 53.40	\$ 58.10	\$ 67.40	\$ 61.00	\$ 57.60	\$ 64.00
Gas natural ciclo combinado con tecnología de captura de carbono	\$ 78.00	\$ 84.80	\$ 93.90	\$ 61.00	\$ 81.10	\$ 64.40
Viento	\$ 43.00	\$ 64.50	\$ 78.50	\$ 56.50	\$ 58.80	\$ 58.80
Viento en altamar	\$ 137.10	\$ 158.10	\$ 213.90	\$ 61.20	\$133.70	\$ 64.60
Solar	\$ 65.60	\$ 84.70	\$ 126.20	\$ 67.10	\$ 65.50	\$ 70.70

Costos calculados a partir de los datos de EIA, 2016.

dades, lo que permite que las plantas de generación fotovoltaica y eólica, interactúen con la red eléctrica, monitoreando tanto la demanda de energía, así como la disponibilidad de esta en los diferentes puntos de consumo y generación, con lo cual se logra el máximo aprovechamiento de dichas energías, a pesar de su intermitencia (Smart, 2010).

### **Factores que limitan la expansión de las energías solar y eólica**

Los factores que limitan la expansión de las energías solar y eólica se dividen en técnicas virtuales y políticas; entre las cuales destacan el alto costo inicial de la planta de generación y la necesidad de una autoridad responsable de equilibrar la oferta y la demanda en una zona geográfica determinada (redes inteligentes) (Luckow y col., 2015). En algunos países existen diferentes compañías que suministran la energía eléctrica, por lo que se hace necesario una coordinación entre estas. La construcción de plantas eólicas y solares debe contar con una normatividad clara, que determine los lugares donde está permitida su construcción, donde no sólo se maximice la producción de energía, sino que considere minimizar los impactos sobre la fauna, cuestiones visuales y otros aspectos. Lo anterior reduciría los tiempos de trámites de permisos y por lo tanto pérdidas económicas y de tiempo. También se deben identificar puntos clave, donde la red de transmisión necesitará expansiones en la próxima década, además de un estudio de pronósticos del fin de la vida útil de plantas de combustibles fósiles y las nuevas plantas añadidas de estos. Adicionalmente, se deben construir líneas de transmisión de alta tensión de corriente directa HVDC, para transmitir las energías renovables a los centros de población, ya que los análisis económicos indican ser factibles comparativamente con las líneas de corriente alterna. Existen también opiniones, que señalan que los altos niveles de penetración, de la generación de energía fotovoltaica en los sistemas de distribución, hacen que la red eléctrica sea vulnerable a fluctuaciones de la potencia real, calidad de la energía, cortes, cambios de voltaje y frecuencia (NREL, 2014). Sin embargo, un estudio realizado en 2015, por

las compañías General Electric y el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de Estados Unidos, da a conocer que la red podría responder de manera oportuna y fiable, si la normatividad respecto a plantas de generación distribuidas, permite el uso de características avanzadas de los dispositivos de conversión (inversores) (NREL, 2015). Finalmente, la política de estado debe ser clara en sus objetivos de incorporación de las energías renovables y que estos no estén sujetos a incertidumbres, así como a los incentivos y precios de la energía producida.

### **CONCLUSIONES**

El análisis de costos indica que la construcción de una planta de generación de electricidad, a partir de combustibles fósiles, sigue siendo una alternativa económicamente viable. Sin embargo, esta tecnología se enfrenta a los retos de la fluctuación de costos y la normatividad internacional para limitar los gases de efecto invernadero. Además, del agotamiento de estos recursos en un futuro no muy lejano. Por otra parte, los costos de inversión en una planta eólica, ubicada en una zona con velocidad de viento adecuada, pueden ser equiparables o menores que los requeridos para construir una planta convencional, especialmente considerando los incentivos actuales para esta actividad económica y que la tecnología para generar electricidad de origen eólico se considera madura, perfectamente establecida y utilizada en un nivel muy bajo respecto a su potencial. Por su parte, las plantas solares fotovoltaicas son competitivas, desde el punto de vista que no requieren combustibles para su funcionamiento, no están sujetas a las fluctuaciones de costos de estos, requieren poco mantenimiento y el análisis económico indica una pequeña diferencia en el costo de la energía producida, con respecto a dichas plantas. Costo que disminuye de manera constante, al mejorar la eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos y la tecnología asociada a la incorporación de dichas energías a la red pública de distribución de energía. El establecimiento de leyes regulatorias, con sanciones por contaminación, para

limitar los efectos en el cambio climático, favorecerán el desarrollo de las plantas de energías

renovables, principalmente las fotovoltaicas, en el corto o mediano plazo.

## REFERENCIAS

- Agüero-Rodríguez, J. C., Tepetla-Montes, J. y Torres-Beristáin, B. (2015). Producción de biocombustibles a partir de la caña en Veracruz, México: perspectivas y riesgos socio-ambientales. *CienciaUAT*. 9(2): 74-84.
- Bimal, B. K. (2013). Global energy scenary and impact of power electronics in 21st Century. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 60(7): 2638-2651.
- BP, British Petroleum (2014). Energy outlook 2035. [En línea]. Disponible en: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2015/bp-energy-outlook-2035-booklet.pdf>. Fecha de consulta: 6 de julio de 2014.
- BP1, British Petroleum (2014). Energy in 2013: Taking stock. [En línea]. Disponible en: [http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/speeches/2014/energy\\_in\\_2013\\_taking\\_stock.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/speeches/2014/energy_in_2013_taking_stock.pdf). Fecha de consulta: 2 de agosto de 2014.
- BP2, British Petroleum (2014). Statistical review of world energy. [En línea]. Disponible en: [http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de\\_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp-country/de_de/PDFs/brochures/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf). Fecha de consulta: 10 de agosto de 2014.
- BP3, British Petroleum (2016). Energy Outlook 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>. Fecha de consulta: 19 de septiembre de 2016.
- CMCC, Convención Marco sobre Cambio Climático (2015). Aprobación del acuerdo París. [En línea]. Disponible en: <http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/spa/109s.pdf>. Fecha de consulta: 13 de mayo de 2016.
- CMCC1, Acción climática (2016). Las empresas que no se preparen para una economía baja en emisiones afrontarán pérdidas. [En línea]. Disponible en: <http://newsroom.unfccc.int/es/noticias/las-empresasno-preparadas-ante-los-riesgos-climaticos-tendran-perdidas/>. Fecha de consulta: 9 de junio de 2016.
- DENA, German Energy Agency (2013). Renewables-Made in Germany. [En línea]. Disponible en: [http://www.renewables-made-in-germany.com/.../EMP12\\_121109.pdf](http://www.renewables-made-in-germany.com/.../EMP12_121109.pdf). Fecha de consulta: 20 de mayo de 2015.
- DOE, U.S. Department of Energy (2013). Fossil energy study guide: Oil. [En línea]. Disponible en: [http://energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/HS\\_Oil\\_Studyguide\\_draft2.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2013/04/f0/HS_Oil_Studyguide_draft2.pdf). Fecha de consulta: 30 de agosto de 2016.
- EIA, U.S. Energy Information Administration (2016). Levelized cost and levelized avoided cost of new generation resources in the annual energy Outlook 2016. [En línea]. Disponible en: [https://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity\\_generation.pdf](https://www.eia.gov/forecasts/aeo/pdf/electricity_generation.pdf). Fecha de consulta: 27 de agosto de 2016.
- EM, Exxon Mobil (2016). The Outlook for energy: a view to 2040. [En línea]. Disponible en: <http://cdn.exxonmobil.com/~media/global/files/outlook-for-energy/2016/2016-outlook-for-energy.pdf>. Fecha de consulta: 25 de noviembre de 2016.
- Euro, Euroserv'ER Report (2013). The State of Renewable Energies in Europe. [En línea]. Disponible en: [http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat\\_baro/barobilan/barobilan13-gb.pdf](http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/stat_baro/barobilan/barobilan13-gb.pdf). Fecha de consulta: 26 de agosto de 2016.
- EWEA, European Wind Energy Association (2015). Wind in power 2014 European statistics. [En línea]. Disponible en: <http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-Annual-Statistics-2014.pdf>. Fecha de consulta: 15 de mayo de 2015.
- IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y cambio climático. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbd2-9300-4280-befec11cf15f06dd>. Fecha de consulta: 30 de agosto de 2016.
- IEA, International Energy Agency (2012). Renewable energy coming of age, in *The Journal of the International Energy Agency*. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/media/ieajournal/IEAEnergy\\_Issue2.pdf](http://www.iea.org/media/ieajournal/IEAEnergy_Issue2.pdf). Fecha de consulta: 20 de enero de 2013.
- IEA, International Energy Agency (2013). Global EV outlook understanding the electric vehicle landscape to 2020. [En línea]. Disponible en: [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook\\_2013.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook_2013.pdf). Fecha de consulta: 14 de octubre de 2013.
- IEA, International Energy Agency (2014). Technology roadmap solar photovoltaic energy. [En línea]. Disponi-

ble en: [https://www.iea.org/publications/freepublication/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy\\_2014edition.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublication/publication/TechnologyRoadmapSolarPhotovoltaicEnergy_2014edition.pdf). Fecha de consulta: 12 de noviembre de 2014.

IEA1, International Energy Agency (2013). Key world energy statistics. [En línea]. Disponible en: <http://www.iea.org/search/?q=%20Key%20World%20Energy%20Statistics#gsc.tab=0&gsc.q=%20Key%20World%20Energy%20Statistics&gsc.page=1>. Fecha de consulta: 17 de noviembre de 2013.

IEA2, International Energy Agency (2013). Technology roadmap carbon capture and storage 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.iea.org/search/?q=Technology%20Roadmap%20%20Carbon%20capture%20and%20storage%202013#gsc.tab=0&gsc.q=Technology%20Roadmap%20%20Carbon%20capture%20and%20storage%202013&gsc.page=1>. Fecha de consulta: 3 de julio de 2013.

IEA3, International Energy Agency (2014). Tracking clean energy progress 2014. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking\\_clean\\_energy\\_progress\\_2014.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Tracking_clean_energy_progress_2014.pdf). Fecha de consulta: 9 de diciembre de 2014.

IEA4, International Energy Agency (2013). Technology roadmap wind energy 2013. [En línea]. Disponible en: <http://www.iea.org/search/?q=Technology%20Roadmap%20Wind%20Energy%202013#gsc.tab=0&gsc.q=Technology%20Roadmap%20Wind%20Energy%202013&gsc.page=1>. Fecha de consulta: 3 de octubre de 2013.

IEA5, International Energy Agency (2014). Energy policy highlights. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1](http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1). Fecha de consulta: 6 de junio de 2014.

IEA6, International Energy Agency (2014). The power of transformation wind, sun and the Economics of Flexible Power Systems. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1](http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1). Fecha de consulta: 17 de julio de 2014.

IEA8, International Energy Agency (2013). Energy

statistics of OECD countries. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1](http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1). Fecha de consulta: 10 de enero de 2014.

IEA-OECD1, International Energy Agency (2013). Electricity in a climate-constrained world data and analysis. [En línea]. Disponible en: [http://www.oecd-ilibrary.org/energy/climate-and-electricity-annual-2012\\_9789264175556-en](http://www.oecd-ilibrary.org/energy/climate-and-electricity-annual-2012_9789264175556-en). Fecha de consulta: 9 de septiembre de 2013.

IEA-WEIO, International Energy Agency (2014). World energy investment outlook. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics\\_b%20\(2013\)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1](http://www.iea.org/search/?q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries#gsc.tab=0&gsc.q=%20IEA%20Statistics_b%20(2013)%20Energy%20Statistics%20of%20OECD%20Countries&gsc.page=1). Fecha de consulta: 3 de agosto de 2014.

IEA-WOE1, International Energy Agency (2013). Redrawing the energy-climate MAP, executive summary world energy outlook special report. [En línea]. Disponible en: [http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2013\\_Climate\\_Excerpt\\_ES\\_WEB.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2013_Climate_Excerpt_ES_WEB.pdf). Fecha de consulta: 17 de agosto de 2013.

INEEL, Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (2009). La generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles. [En línea]. Disponible en: <http://www.ineel.mx/boletin042009/divulga.pdf>. Fecha de consulta: 29 de agosto de 2016.

Ino, K. (2014). New era of power electronics by SiC power devices evolution, 2014, in *International Conference on Planarization/CMP Technology (ICPT)*. [En línea]. Disponible en: <https://ecopyright.ieee.org/xplore/ie-notice.html>. Fecha de consulta: 22 de enero de 2015.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2013). Renewable energy sources and climate change mitigation 2012. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [En línea]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf). Fecha de consulta: 27 de agosto de 2016.

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2014). Mitigation of climate change 2014. [En línea]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_full.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf). Fecha de consulta: 16 de octubre de 2014.

Luckow, P., Fagan, B., Fields, S., and Whited, M. (2015). Technical and institutional barriers to the expansion of wind and solar energy. [En línea]. Disponible en: [http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/Barriers-to-Wind-and-Solar-15-047\\_0.pdf](http://www.synapse-energy.com/sites/default/files/Barriers-to-Wind-and-Solar-15-047_0.pdf). Fecha de consulta: 15 de junio de 2016.

Morales-Ramírez, D. y Alvarado-Lagunas, E. (2014). Análisis del consumo de energía eléctrica domiciliar en Tampico, Tamaulipas. *CienciaUAT*. 8(2): 62-67.

NREL, National Renewable Energy Laboratory (2014). IEEE 1547 and 2030 standards for distributed Energy resources interconnection and interoperability with the electricity grid. [En línea]. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63157.pdf>. Fecha de consulta: 20 de octubre de 2016.

NREL, National Renewable Energy Laboratory (2015). Advanced inverter functions to support high levels of distributed solar. [En línea]. Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/62612.pdf>. Fecha de consulta: 25 de julio de 2016.

REN21, Renewable Energy Policy Network (2013). Renewable energy policy network for the 21st Century 2013. [En línea]. Disponible en: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013\\_lowres.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/GSR2013_lowres.pdf). Fecha de consulta: 3 de septiembre de 2013.

REN21, Renewable Energy Policy Network (2014). Renewables global status report, 2014. [En línea]. Disponible en: [http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014\\_full%20report\\_low%20res.pdf](http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2014/GSR2014_full%20report_low%20res.pdf). Fecha de consulta: 16 de noviembre de 2014.

REN21, Renewable Energy Policy Network (2015). Renewables global status report, 2015. [En línea]. Disponible en: [http://www.Ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015-Onlinebook\\_low1.pdf](http://www.Ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015-Onlinebook_low1.pdf). Fecha de consulta: 16 de agosto de 2015.

REN21, Renewable Energy Policy Network (2016). Renewables Global status report 2016. [En línea]. Disponible en: [http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_Full\\_Report\\_REN21.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf). Fecha de consulta: 9 de junio de 2016.

REWE, Renewable Energy World Editors (2014). Top 10 PV module suppliers for 2014: same group, different order. [En línea]. Disponible en: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2014/12top-10-pv-module-suppliers-for-2014-same-group-difer.htmlferent-ord>. Fecha de consulta: 26 de agosto de 2015.

Smart, Oracle solutions for smart grid (2010). Technology and applications for your utility's future. [En línea].

Disponible en: <http://www.oracle.com/us/industries/utilities/solutions-smart-grid-br-194388.pdf>. Fecha de consulta: 30 de enero de 2016.

STATOIL, State oil and gas company (2014). Energy perspectives long-term macro and market Outlook. [En línea]. Disponible en: <http://www.statoil.com/no/NewsAndMedia/News/2014/Downloads/Energy%20Perspectives%202014.pdf>. Fecha de consulta: 12 de abril de 2015.

SUNSHOT, U.S. Department of Energy (2014). Tackling challenges in solar: 2014 portafolio. [En línea]. Disponible en: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/2014\\_SunShot\\_Initiative\\_Portfolio8.13.14.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/08/f18/2014_SunShot_Initiative_Portfolio8.13.14.pdf). Fecha de consulta: 20 de mayo de 2015.

UK, Energy Research Centre (2009). Global oil depletion. [En línea]. Disponible en: <https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=depletion%20of%20oil%20reserves%20in%20the%20world%20pdf>. Fecha de consulta: 1 de septiembre de 2016.

WEC, World Energy Council (2013). World energy perspective cost of energy technologies. [En línea]. Disponible en: [http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WEC\\_J1143\\_CostofTECHNOLOGIES\\_021013\\_WEB\\_Final.pdf](http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/WEC_J1143_CostofTECHNOLOGIES_021013_WEB_Final.pdf). Fecha de consulta: 12 de mayo de 2013.

WM, Worldometers (2016). World population clock. [En línea]. Disponible en: <http://www.worldometers.info/world-population/>. Fecha de consulta: 14 de abril de 2016.

WP, Wind Power (2015). Ten of the biggest and the best manufacturers. [En línea]. Disponible en: <http://www.windpowermonthly.com/article/1352888/ten-biggest-best-manufacturers>. Fecha de consulta: 12 de marzo de 2016.