

Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: una revisión en el contexto energético mundial

Smart Grid and solar photovoltaic energy as renewable energy source for the distributed generation in the global energy context

Luis Humberto Berrío*

Universidad de Antioquia, Medellín (Colombia)

Carlos Zuluaga**

Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia)

*Ingeniero Electrónico de la Universidad de Antioquia (UdeA), Medellín (Colombia). Especialista y Magíster en Ingeniería (área Automática) de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) y estudiante de Maestría en Administración (UdeA). Funcionario de la Gerencia Desarrollo e Innovación de Empresas Públicas de Medellín (EPM). *berrio77@yahoo.com*

**Magíster en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB), Medellín (Colombia). Coordinador y docente de la Maestría en Ingeniería (área Automática), Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín (Colombia). *carlos.zuluaga@upb.edu.co*

Correspondencia: Luis Berrío, Empresas Públicas de Medellín (EPM), Subdirección Investigación y Desarrollo Negocios Energía de Empresas Públicas de Medellín (EPM), carrera 58 n° 42-125. Medellín (Colombia).

Resumen

La Red Inteligente, considerada la siguiente generación de la red eléctrica tradicional, tiene entre sus objetivos la integración de fuentes de energía renovables. Por su parte, la demanda energética actual obliga a buscar nuevas formas de generación de energía, entre las cuales las fuentes de energía renovable están teniendo gran acogida, ya que son formas alternativas de generación de energía diferentes a las fuentes convencionales y no contaminan el medio ambiente. De hecho, este estudio aborda el tema de las energías renovables, y hace especial énfasis en los sistemas fotovoltaicos, que son una tecnología promisoría para generar energía eléctrica a partir de la energía solar. Además se muestra el contexto actual y los escenarios futuros de la utilización de la energía solar en el mundo, tanto en la parte técnica como en el campo económico, regulatorio y social. Las políticas de Estado y las reducciones en los costos de las tecnologías determinarán qué tanto demorará la migración a las redes inteligentes. Los resultados de esta investigación muestran no solo la necesidad de un marco regulatorio en cuanto a generación distribuida a partir de energías renovables, sino cómo la energía solar fotovoltaica, potenciada dentro de las redes inteligentes, está siendo considerada una alternativa eficiente y económica para la generación de energía, utilizada cada vez más a nivel mundial.

Palabras clave: Red Inteligente, energía renovable, energía solar, sistemas fotovoltaicos, generación distribuida.

Abstract

Smart Grid, considered the next generation of the traditional power grid, has among its objectives the integration of renewable energy sources. Meanwhile, the current energy demand leads to find new ways of generating energy, where renewable energy sources are having a great response, because they are alternative forms of energy generation different to conventional sources and do not pollute the environment. In fact, this study addresses the issue of renewable energy and makes emphasis on photovoltaic systems that are a promising technology for generating electrical energy from solar energy. Also, it shows a contextualization of current and future scenarios for the use of solar energy in the world in the technical, economical, regulatory and social fields. The National policies and the reductions in the technology costs will determine the delay towards Smart Grids. The results of this research show not only the need for a regulatory framework regarding distributed generation with renewable energy, but how photovoltaic solar energy is currently considered an efficient and economical alternative for the energy generation, fostered by the Smart Grids and increasingly used worldwide.

Keywords: smart Grid, renewable energy, solar energy, photovoltaic systems, distributed generation.

Fecha de recepción: 10 de enero de 2013
Fecha de aceptación: 2 de enero de 2014

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de energía está aumentando en todo el mundo, y actualmente se busca la forma de adquirir algún tipo de energía para satisfacer las necesidades que cada vez son mayores. Mientras estas necesidades aumentan, los recursos energéticos más comunes (como el petróleo, carbón, gas natural y uranio), se hacen más escasos. Se deben desarrollar técnicas para obtener y utilizar energías renovables (*RE: Renewable Energy*) que permitan suplir estas necesidades, de manera que su transporte y precio sean asequibles para la sociedad de consumo [1]. Las tecnologías que más se destacan actualmente son aquellas que emplean *RE* con sistemas ecológicos e inteligentes [2].

La generación de energía eléctrica, que usa celdas solares, ha generado un gran interés a lo largo del tiempo. Una celda solar fotovoltaica (*PV - Photovoltaic*) es, esencialmente, un semiconductor que puede generar un potencial eléctrico cuando es ionizado por radiación [3], [4]. Con otras palabras, una celda solar puede convertir energía de radiación solar directamente a electricidad, pero para almacenar la energía se hace uso de baterías recargables. Estas baterías tienen un alto costo y al monitorearlas se pueden conocer sus estados de carga, con el fin de hacer uso de esta energía [5] o para llevar acciones de reparación y mantenimiento [6]. Se hace indispensable contar con un nivel de referencia que permita identificar el momento en que se debe conmutar a un estado de carga de batería o el momento en que se puede exportar dicha energía a otros sistemas para su uso, además de sistemas convertidores de Corriente Directa a Corriente Alterna (DC/AC), para que electrodomésticos comunes puedan utilizarla [7] o convertidores solo en Corriente Directa (DC/DC) [8].

La utilización razonable y eficaz de la energía solar es una buena alternativa para afrontar la crisis energética mundial en la actualidad. Con el fin de reducir el costo de la energía solar, el estudio sobre la mejora de la eficiencia de la energía solar es muy importante. Para ello se han propuesto varias formas de mejorar la eficiencia de la energía solar. Entre estas propuestas se encuentra el estudio técnico de los convertidores de los paneles solares, el diseño de un sistema automático de seguimiento de la carga y descarga de las baterías, y el control de la energía solar para el almacenamiento y la descarga adecuada de las baterías, para así evitar el mal uso y deterioro de las mismas [9], [10], [11].

A su vez, la red eléctrica tradicional está migrando a una red eléctrica moderna, que cuenta con un sistema de comunicación que permite monitorear y controlar la red de manera eficaz, en tiempo real y eficiente, y un sistema eléctrico automatizado, ambos enmarcados dentro de la *Smart Grid* (SG-Red Inteligente). Además, más del 80 % de la energía producida proviene de los combustibles fósiles, que contaminan el medio ambiente, creando un calentamiento global. Las RES están empezando a ser vistas como la panacea para resolver problemas del cambio climático. De hecho, las fuentes de energía renovable (RES-Renewable Energy Sources) abastecen el 15-20 % de la demanda energética actual. Tecnologías PV a pequeña escala son costo-efectivas para proveer electricidad en áreas remotas y rurales, tales como Australia, donde el precio de la energía se ha mantenido bajo gracias a que tiene abundancia de carbón, con el que se genera $\frac{3}{4}$ de la electricidad del país, aunque tiene una de las tasas per cápita más altas del mundo respecto a los GEI [12].

2. METODOLOGÍA

En este artículo se presentan los tópicos más importantes en el estado del arte de SG y la energía solar, como energía renovable. Se realizó una revisión bibliográfica de manera sistemática sobre los trabajos científicos, congresos nacionales e internacionales más recientes y relevantes relacionados con ambos temas. Con base en esta revisión se identificaron las diferencias entre la red eléctrica tradicional y las redes inteligentes, se determinaron los retos, barreras y el esquema topológico de una SG. Dentro de uno de los frentes de SG, haciendo énfasis en los sistemas fotovoltaicos, se analiza la situación actual del mundo en cuanto a la energía solar, que es identificada como una de las fuentes de energía con mayor potencial para proveedores y usuarios finales, dando a conocer la importancia del marco regulatorio y el papel del Estado en el despliegue y masificación de la tecnología. Al final se presentan los resultados y conclusiones.

3. SMART GRID

SG es la tendencia y la siguiente generación de las redes eléctricas. Tanto Estados Unidos como la Unión Europea estiman que la mejor solución para la seguridad eléctrica, relacionada con la estabilidad social y el desarrollo económico, está enmarcada dentro del concepto de SG. Desde que fue pro-

puesto el concepto SG se popularizó en el mundo y ha sido desarrollado en muchos países, y ha llegado a ser considerado la siguiente generación de las redes eléctricas.

La red eléctrica tradicional es un sistema rígido, que carece de flexibilidad en el sistema de generación, transmisión y distribución [13]. Además, es difícil crear un sistema configurable, que sea monitoreado en tiempo real y que permita mayor portabilidad de algunos de sus componentes a lo largo de la red eléctrica actual. Por su parte, los Sistemas de Control de Supervisión y Adquisición de Datos (SCADA) generalmente tienen un período de muestreo alto, que generan errores en la estimación y hacen que exista poca visibilidad del sistema [14]. Estos sistemas tradicionales tienen deficiencias para el autorrestablecimiento y requieren de redundancias en la topología de red.

Diferencias entre la red eléctrica tradicional y la Smart Grid

SG requerirá de las siguientes consideraciones, que difieren de una red tradicional [13], [14]:

- Equipos de generación más pequeños y equipos de almacenamiento *plug-and-play*: los equipos deben cubrir también el lado primario de la red, como *switches* inteligentes, equipos de alta capacidad de almacenamiento de energía de bajo precio y alta calidad.
- Mayor interacción con los usuarios: interacción bidireccional entre usuarios y el proveedor de energía. Esto permitiría interactuar con los equipos del usuario durante la operación y consideraría al usuario como un agente con importante participación activa dentro del sistema eléctrico.
- La evaluación del riesgo de SG es más compleja cuando se trata el tema de RES, debido a que estas pueden provenir de diferentes fuentes y métodos, como la solar, eólica y marítima, entre otras. Estas RES pueden ser afectadas por condiciones ambientales como la radiación solar o la velocidad del viento, y ser más estocásticas que la generación de energía en hidroeléctricas o por quema de carbón.

Entre los principios de operación de una SG están [15]: autorrecuperación, con el fin de detectar, analizar, responder y restaurar el servicio; empoderamiento e incorporación activa del usuario, por medio de la gestión de la demanda; tolerabilidad a ataques de seguridad informática; incorporación de una variedad de opciones de generación, que sean sostenibles; habilitación e incentivos a los mercados eléctricos; optimización del uso de los activos y minimización los costos de Operación y Mantenimiento (O&M), mientras se mantiene la seguridad de operación de la red; e incentivos para la sostenibilidad del medio ambiente y garantías de confiabilidad en el suministro de energía.

La *Smart Grids European Technology Platform* ha definido la SG como “una red eléctrica que puede integrar eficientemente el comportamiento y las acciones de todos los usuarios conectados a esta –generadores y consumidores– con el fin de asegurar eficiencia de manera económica y un sistema eléctrico sostenible con bajas pérdidas y altos niveles de calidad, disponibilidad y seguridad”. Por lo tanto, una SG debe emplear productos y servicios innovadores, junto con monitoreo inteligente, control, comunicación y tecnologías de autorrestablecimiento [16], [17]. La seguridad, especialmente para las comunicaciones, es uno de los requisitos más críticos de SG, debido a la información que se podría tener por cliente [18], [19].

Esquema de una Smart Grid

La SG está constituida por dos tipos de redes: una red eléctrica y una red de comunicaciones. Tradicionalmente, la energía es generada en la planta eléctrica primaria (Colombia tiene centrales hidroeléctricas en su mayoría), pasando a través del sistema de transmisión, que maneja altas magnitudes de tensión, luego a través del sistema de distribución, y finalmente llega al usuario o consumidor final de energía, por medio de transformadores que convierten los niveles de media tensión en baja tensión [13], [20]. Hoy en día, la generación distribuida permite inyectar energía al sistema de distribución tradicional. En la figura 1 se muestra el esquema de una SG, donde los medidores inteligentes permiten registrar el flujo de energía de manera bidireccional, dado el caso que el usuario final tenga algún mecanismo de generación distribuida.

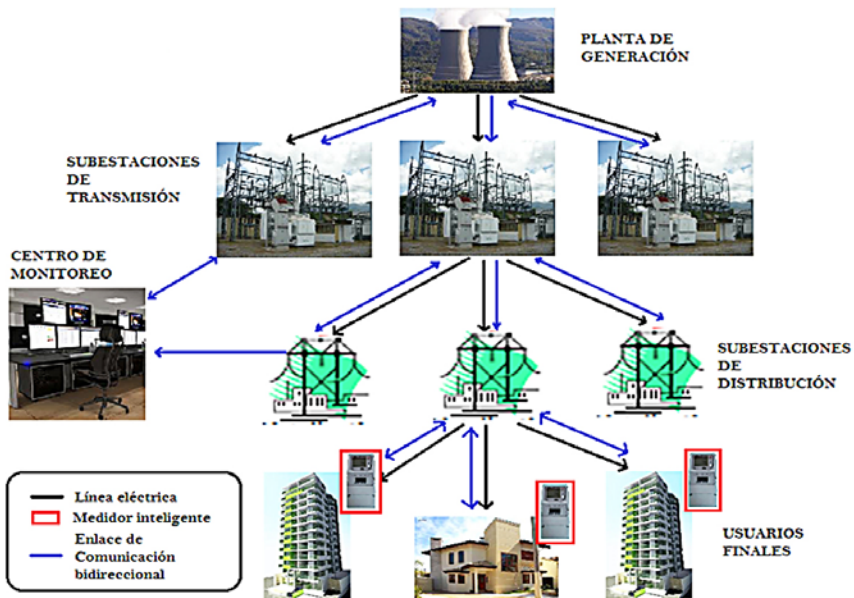


Figura 1. Esquema de una SG [13]

La red de ultra-alta tensión (UHV-*Ultra High Voltage*) es considerado el *backbone* de una potente SG [21]. Allí se pueden monitorear las líneas de transmisión para concentrar y coleccionar datos, tales como los parámetros ambientales en las líneas y torres (temperatura, humedad, contaminación y vientos, entre otros). A través del Servicio General de Paquetes de Radio (GPRS) o del Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM) se pueden transmitir estos datos a un *Data Center* remoto, que permitirá detectar de manera preventiva amenazas potenciales. Por otra parte, el concepto de control de demanda se deriva del hecho de que las empresas prestadoras de servicios públicos (*utilities*) podrán controlar algunos dispositivos y equipos de consumo del cliente durante períodos críticos de demanda [22]. Mientras que la respuesta de demanda permite a los usuarios ajustar sus perfiles de carga de acuerdo con el mercado de precios de energía [13]. Las señales de respuesta de demanda permitirán ayudar a los clientes a gestionar sus necesidades de energía basados en la información de precios del mercado energético [23].

Retos identificados para la implementación de una Smart Grid

Entre las barreras y retos que existen para implementar una SG están [13], [24], [25], [26], [27]:

- Costo, confiabilidad y legislación. El costo y el beneficio no están divididos equitativamente entre las partes involucradas en el despliegue de la SG.
- La solución del operador de red es percibida por el consumidor como un problema, ya que se ve como una violación de derechos.
- Integración de RES a gran escala, que pueden entregar energía a la red y reducir el potencial impacto negativo sobre el medio ambiente, y hacer comparaciones justas con una base de línea.
- Generación distribuida y desarrollo coordinado de la red de energía a varios niveles de tensión.
- Carencia de tecnologías de almacenamiento (no están listas para el mercado) y superconductividad.
- Colectar datos con una apropiada frecuencia y con una adecuada ubicación de los sensores.
- Determinar beneficios sociales y monetarios, tales como aire limpio, seguridad, disminución de la dependencia de combustibles fósiles y carbón, y reducidos costos de bienes y servicios.
- Extrapolar resultados de pocos circuitos a áreas de control más amplias.
- Interpretar la respuesta de la SG ante perturbaciones eléctricas, para el autorrestablecimiento de la red.
- Estrategias de desarrollo de SG, y uso de métodos de cálculo y evaluaciones apropiadas.
- Mejoramiento de control de la red de energía basado en tecnologías de electrónica de potencia.
- Monitoreo seguro del sistema de energía, simulación y toma de decisiones inteligentes.
- *Interoperabilidad*. El número de actores en el sector eléctrico está en constante aumento.

- *Escalabilidad*. El aumento de los actores en el sector eléctrico también implica problemas de escalabilidad, y es estimulado por la aparición de productores de microenergía.
- *Descubrimiento*. Los actores en el mercado energético pueden descubrir nuevos servicios sobre la marcha de SG, por lo que la competencia entre ellos será a alto nivel y las preferencias de los usuarios puede diferir por el valor agregado en dichos servicios.
- *Movilidad*. Los generadores y consumidores de energía en SG podrán ser móviles.
- *Integración de servicios*. La capa física, la capa de datos y la capa del negocio tendrán que interactuar de manera más cercana. Además, contar con aplicaciones de restauración y emergencia.
- *Topología de red*. La infraestructura actual es altamente jerárquica tanto en la parte física como en los sistemas de información para la gestión del sistema eléctrico. Solo algunos grandes clientes industriales y comerciales pueden justificar el gasto de una infraestructura de medición avanzada, comunicaciones y tecnologías en tiempo real, por lo que las políticas de Estado deben impulsar estos despliegues [28].
- *Medidores Inteligentes*. Deben ser el *gateway* de los hogares hacia el mundo exterior, y tener una inteligencia embebida y mayores funcionalidades que un medidor convencional [18], [29], [30], [31]. La creciente presión regulatoria hacia una mayor eficiencia energética, el avance descentralizado de fuentes de energía, las ofertas de servicios innovadores y nuevas aplicaciones para los clientes impulsarán la tecnología de medición inteligente (*Smart Metering Technology*) [32].
- *Tiempo Real*. Las operaciones relacionadas con la energía, tales como el control, actuación, distribución y comercialización, tienen una alta dependencia del tiempo.

4. ENERGÍAS RENOVABLES

Acorde con las estadísticas, se espera que las fuentes de energías convencionales puedan ser usadas por 200-300 años de acuerdo con la velocidad de desarrollo actual [33]. El desarrollo sostenible de las sociedades requiere un balance entre la generación de energía y la protección del medio ambiente.

Las RES están generando cada vez más un mayor impacto en el mundo, y su incertidumbre viene disminuyendo [34]. El sector energético es el responsable del 60 % de las emisiones globales de Gases de Efecto Invernadero (GEI), y la falta del servicio básico de energía (1,5 billones de personas en el mundo) impacta la cobertura de las necesidades de la población. De hecho, las comunidades rurales representan el 85 % de las zonas con pobreza energética, pero el acceso a la energía es más afectado por la poca capacidad de pago que por el despliegue de infraestructura eléctrica o fuentes de generación.

Colombia ocupa el séptimo lugar en el *ranking* de 26 países que hacen los mayores esfuerzos para fomentar el crecimiento de la energía limpia o bajas en carbono. La baja inversión en materia de energía limpia y la poca financiación de proyectos verdes impidieron un mejor posicionamiento del país [35].

Una evaluación exhaustiva debería considerar inicialmente la sostenibilidad de recursos y el medio ambiente, pero también la seguridad de energía, el cambio climático, la eficiencia económica y el bienestar público, al igual que la innovación tecnológica y los esfuerzos de gestión [36]. Las seis dimensiones para la evaluación del camino tecnológico en energías alternativas son [36]:

- *Dimensión de seguridad de energía*: disponibilidad de recursos locales. La RES es mejor que los combustibles fósiles en este indicador; el carbón es mejor que el petróleo y el gas natural.
- *Dimensión de cambio climático*: emisiones de dióxido de carbono (CO₂).
- *Dimensión de la eficiencia económica*: costo del servicio de energía.
- *Dimensión de bienestar social*: impacto en el medio ambiente y en el bienestar público. Hay múltiples factores que influyen en este indicador, pero podría ser resumido como la aceptación del público.
- *Dimensión de la innovación tecnológica*: riesgos de la innovación en tecnología.
- *Dimensión de esfuerzo de la gestión*: coherencia con instituciones y políticas actuales. Por ejemplo, el ahorro de energía y reducción de emisiones convencionales han sido establecidas como máxima prioridad.

La energía generada en centrales hidráulicas o en plantas eléctricas y térmicas combinadas son más económicas que las obtenidas con las RES no convencionales. Estas últimas pueden tener un costo de producción de 0,08-0,10 USD/kWh aproximadamente. En la tabla 1 se muestra el costo de producción de energía con RES [37].

La energía generada en instalaciones PV y estaciones heliotérmicas es aún muy costosa. Sin embargo, estas tecnologías están desarrollándose rápidamente, y el costo de producción de energía eléctrica por esta vía está disminuyendo, además permiten mayor independencia de redes de distribución por parte del cliente [38].

Tabla 1. Costo nivelado de energía para diferentes fuentes de generación [37]

Tecnología	CAPEX (\$m/MW) USD			Factor de planta (%)			O&M Fijos	Costo nivelado de energía (LCOE) – Escenario Medio (\$/MWh) USD
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	(\$/MW) USD	
Nuclear	3.20	8.04	8.87	90	92	92	122,880	166
Gas natural (CHP)	1.29	1.57	2.00	75	80	85	55,250	60
Carbón	0.66	3.30	3.72	60	85	85	40,565	91
Gas natural (CCGT)	0.93	0.96	1.61	60	60	83	7,210	82
Hidroeléctrica (small)	1.40	3.07	3.69	23	50	80	24,242	77
Hidroeléctrica (large)	1.58	2.60	4.13	20	50	75	31,000	70
Biomasa (digestión anaeróbica)	1.05	4.07	4.93	58	90	90	-	140
Geotérmica (flash plant)	1.68	2.65	3.39	50	85	95	15,000	65
Gas (landfill)	1.43	1.98	3.12	62	90	90	90,000	68
Eólica (onshore)	0.93	1.81	2.63	15	32	45	25,000	82
Residuos Sólidos Municipales	3.66	5.05	6.45	80	80	80	245,000	111
Biomasa (incineración)	0.83	3.58	5.42	40	77	85	81,620	121
Fotovoltaica (tracking)	1.35	2.01	4.33	17	21	35	40,000	140
Geotérmica (binary plant)	3.91	4.58	6.91	50	80	95	15,000	97

Continúa...

Tecnología	CAPEX (\$m/MW) USD			Factor de planta (%)			O&M Fijos	Costo nivelado de energía (LCOE) – Escenario Medio (\$/MWh) USD
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	(\$/MW) USD	
Fotovoltaica (c-Si)	1.35	1.61	4.33	9	17	28	40,000	147
Biomasa (gasificación)	2.98	4.50	7.69	80	80	80	70,000	126
Fotovoltaica (<i>thin film</i>)	1.61	1.61	1.61	12	17	17	24,000	135
STEG (torre+heliostato)	5.85	8.52	8.52	28	61	61	60,000	220
Eólico (<i>offshore</i>)	2.28	5.26	6.89	30	41	46	130,000	224
Marina (<i>tidal</i>)	6.73	9.28	13.00	25	35	45	130,000	442
Marina (<i>wave</i>)	5.48	8.78	16.05	25	30	35	150,000	499

Energía solar y sistemas fotovoltaicos

Los generadores de *RES* son una tecnología promisoría para reducir el consumo de combustible y los *GEI* [39]. Las *RES* y la generación distribuida permitirán reducir los *GEI*, ya que se estima que el 25 % del efecto global de estas emisiones son causados por la actual generación de energía eléctrica. Por su parte, una de las motivaciones de crear una *SG* se debe a que entre 1970 y 2001 las pérdidas de energía se duplicaron [13], [40]. La integración de *RES* al sistema de red eléctrica implica retos en cuanto a la calidad del servicio de energía, confiabilidad y seguridad [13]. Reducir los *GEI* tiene un costo muy alto por parte de los países, que deben ser apoyadas con políticas de Estado [41].

Uno de los principales elementos en los sistemas *PV* son los paneles solares, que pueden ser conectados en serie o en paralelo para incrementar el voltaje o la corriente, respectivamente [42]. Austria, Alemania, Holanda, Francia, Inglaterra y España son los países que representan el 98 % de la instalación *PV* instalada en la Unión Europea. Experiencias y evaluaciones técnicas de las *utilities* en la gestión de generadores distribuidos, dentro de redes eléctricas en estos países, han considerado preocupaciones como [43]:

- La emisión de armónicos por los inversores en la penetración de la energía *PV*, que causan pérdidas por corrientes parásitas y sobrecalentamiento de equipos.

- La regulación de voltaje, debido a la debilidad de las redes con alta penetración de sistemas *PV*.
- La protección de las redes, por la falta de control directo sobre los generadores distribuidos, y compatibilidad electromagnética (EMC) para no afectar la calidad de la potencia.

Para la integración de fuentes de energías distribuidas se deben monitorear y tener algunas características, tales como: regulación de voltaje, regulación de frecuencia, distorsión armónica en el rango de operación de la carga, factor de potencia y potencia reactiva, adecuados aislamientos y tiempos de respuesta, entre otros. Algunos de los factores importantes para minimizar la demanda de energía son: almacenamiento de energía térmica solar para aplicaciones de calentamiento de agua y espacios físicos, uso de procesos de conversión eficiente para obtener alta calidad eléctrica, y uso apropiado de módulos *PV* integrados a los edificios [44], pero buscando autonomía respecto a los proveedores de energía [45]. Además, el rápido crecimiento de las aplicaciones de la energía solar y eólica, y su potencial inmerso para futuros usos en sistemas de energía eléctrica, exige evaluar cuantitativamente los beneficios de confiabilidad asociados con fuentes de energía no convencionales [46]. Sin embargo, la energía eólica y la energía solar tienen en común la incertidumbre de los recursos [47].

Almacenamiento de energía

Debido a que el costo de las baterías en un sistema *PV* es del 15-50 % de los proyectos, es necesario lograr proteger su vida útil al máximo. Para ello se han ideado métodos para controlar la carga y descarga de las mismas [48]. Por su parte, en [48] se plantea la conmutación automática entre la energía que provee el sistema *PV* y la red eléctrica municipal. Es decir, cuando la capacidad de los paneles solares y las baterías no son suficientes para abastecer la carga conectada, entonces se conmuta la generación de energía hacia la que suministra la red eléctrica que provee el municipio. Además de las conocidas baterías para el almacenamiento de energía *PV*, existen otros métodos de almacenamiento que mantienen la energía solar en forma de calor. Tal es el caso descrito en [49], donde el dispositivo empleado para el almacenamiento se construye bajo tierra. La idea de un almacenamiento estacional de la energía térmica se propuso en primer lugar en Estados

Unidos en 1960. A finales de 1970 los investigadores de los países del norte de Europa también comenzaron a investigar sistemas solares de almacenamiento estacional térmico [50]. Además, el tamaño de los sistemas de almacenamiento de energía (*ESS: Energy Storage System*) es de interés para SG. Las baterías y los supercapacitores son importantes componentes de los sistemas de almacenamiento de energía híbridos (*HESS*), en los que la batería tiene alta densidad de energía pero presenta baja densidad de potencia [51].

Celdas solares

El desarrollo de tecnologías de semiconductores de potencia resulta en una conversión más fácil entre AC y DC. Por lo tanto, el uso de la energía solar se acentúa cada vez más y se considera como un importante recurso de *energía*. Las celdas solares representan la unidad fundamental de conversión de energía de un sistema *PV*. La tecnología de celdas de silicio cristalino está bien establecida, tiene una vida útil de 20 años aproximadamente y su eficiencia es alrededor de 20%, pero su durabilidad debe ser prolongada y los costos de producción disminuidos para que sean económicamente viables [52], [53], [54].

Los paneles o celdas solares son muy sensibles respecto a la tensión suministrada y dependen de las condiciones meteorológicas y la cantidad de luz sobre el panel. Los reguladores MPPT (*Maximum Power Point Tracker*) permiten sacar la máxima potencia de los paneles solares. El MPPT puede incrementar la energía generada por los paneles solares hasta en un 30%. Los controladores de carga MPPT incluyen un algoritmo para compensación de la temperatura, que extiende la vida útil de las baterías [55]. Existen diversos algoritmos de MPPT, tales como: Perturbar y observar, y los basados en lógica difusa [51], redes neuronales artificiales, RCC (*Ripple Correlation Control*) y conductancia incremental (*INC*), entre otros. Estos algoritmos difieren en su complejidad, su velocidad de convergencia al punto de máxima potencia, los sensores utilizados, su costo y su efectividad, entre otros aspectos [56]. El costo de producción de electricidad por medio de celdas *PV* está alrededor de 0,25 USD/kWh, lo que equivale a 418 COP/kWh aproximadamente, mientras que el Costo Unitario (CU) de energía hidráulica en Colombia es de aproximadamente 370,81 COP/kWh para los clientes regulados [57].

El mayor problema ambiental es el uso de químicos tóxicos en la fabricación de paneles solares, que permanecen en el ambiente por muchos años. La disposición y reciclaje de celdas no operativas podría llegar a ser un problema mayor [53], lo cual genera una gran oportunidad para el desarrollo de otros tipos de celdas como las biológicas.

5. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR EN EL MUNDO

El mundo está moviéndose rápidamente para adoptar más pequeñas y locales fuentes de generación de energía. Los gobiernos en todo el mundo quieren acelerar esta transición de un modelo completamente centralizado a un modelo distribuido. Incluso, las políticas del mercado están buscando maximizar un número de variables simultáneas en la búsqueda de una buena política de *RE*. En Japón, Alemania, España y Estados Unidos la electricidad *PV* ha tenido un crecimiento importante: en promedio, 25 % para los últimos 25 años. Sin embargo, estos países no han logrado este despliegue de tecnología de una misma manera o dentro del mismo marco político. Por el contrario, otros países han intentado variar estas estrategias y no han logrado estimular un crecimiento similar. Más importante aun: las políticas que han llevado a un rápido crecimiento del mercado durante la última década en Europa han demostrado ser costosas e ineficaces para responder a las condiciones cambiantes del mercado [58]. La figura 2 muestra el crecimiento esperado al 2050 en el consumo de energía a nivel mundial [59]. La irradiación solar es altamente abundante, por eso la tecnología solar es considerada una de las promisorias para proveer cerca del 10% de electricidad al 2050. Se espera que entre el 50-80% la electricidad al 2050 provenga de *RES* [60].

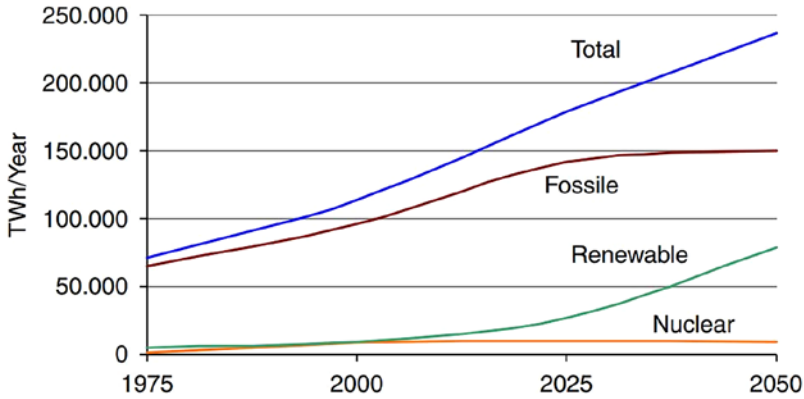


Figura 2. Proyección de consumo global de energía [59]

• *Estados Unidos*

De acuerdo con *BP Statistical Energy Survey* de 2010, la capacidad instalada mundial de energía solar fue de 22928,9 MW en 2009, un cambio del 46,9 % comparado con 2008 [61]. Mientras que la capacidad instalada en Estados Unidos se estableció en un récord de 1855 MW en 2011, más del doble que su anterior récord anual de 2010, cuando era de 887 MW, según la Asociación de Industrias de la Energía Solar (SEIA) [62].

Los principales problemas en la red eléctrica no son debidos principalmente a la falta de capacidad de generar electricidad. Si bien hay problemas que se deben principalmente a fallas en la entrega eficiente de la energía generada para los clientes finales. En la actualidad casi la mitad de la generación de energía en Estados Unidos viene de las plantas con carbón, seguidas por el gas natural y la energía nuclear. De hecho, el gran potencial encontrado con el *Shale Gas* prevé que será una de las fuentes de energía más prominentes de este país. La quema de carbón en las plantas de generación de energía ha sido la más popular por su bajo costo de producción y la abundancia del mismo, lo que conduce a precios bajos de electricidad, pero la producción de electricidad es responsable de aproximadamente el 35 % de todos los GEI en el país. Las centrales eléctricas de gas natural son una fuente de energía prometedora, ya que tienen un menor costo de capital y menor tiempo de construcción de plantas; por ello el aumento de inversión en ellas. Además,

limitaciones físicas y regulatorias han evitado que las *RES* sean la fuente primaria de generación [63].

- *Colombia*

La energía *PV* podrá suplir en un porcentaje aceptable la demanda actual de energía a nivel mundial, e incluso podrán crearse proyectos pilotos con paneles solares en Zonas No Interconectadas (ZNI), donde el costo de llevar el servicio de energía desde la red de distribución eléctrica nacional sea muy elevado. La energía *PV* es uno de los incentivos de la generación distribuida. Este tipo de esquemas de prestar servicio de energía puede no verse dentro de los esquemas del marco regulatorio tradicional de energía eléctrica en Colombia. Sin embargo, se vienen introduciendo proyectos de ley y normas nacionales que incentivan el uso de energía alternativa, tal es el caso del proyecto de ley 09 del Senado: “Por medio de la cual se promueve e incentiva el uso de paneles solares y paneles fotovoltaicos”, con el propósito de incentivar la construcción de viviendas en las que se implementen paneles solares y paneles *PV*, y con el que se autoriza al Gobierno para que determine el porcentaje del *IVA* (Impuesto al Valor Agregado) que se devolverá por la adquisición de paneles solares y/o *PV*, o por la adquisición de materiales para la fabricación de estos. En Colombia existen dos categorías de usuarios del servicio eléctrico. Uno de ellos son los clientes regulados, los cuales representan la mayoría de los clientes residenciales y tienen una tarifa plana por el consumo de energía. La otra categoría está integrado por los clientes no regulados, que generalmente son clientes con altos consumos de energía, principalmente las industrias que demandan más de 0,1 MW (o en energía de 55 MWh-mes en promedio durante los últimos 6 meses) y su tarifa no está regulada por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), sino que es acordada mediante un proceso de negociación entre el usuario y el comercializador [13], [64]. Por otra parte, el consumo de electricidad per cápita en Colombia es de 974 kWh/per cápita [65], muy superior a varios de los países africanos. Colombia, en general, tiene un buen potencial energético solar en todo el territorio, con un promedio diario multianual cercano a 4,5 kWh/m² (destacándose La Guajira, con un valor promedio de 6,0 kWh/m², y la Orinoquía, con un valor un poco menor), propicio para un adecuado aprovechamiento de dicha energía [66]. Sin embargo, varios instrumentos pueden obtener estos datos de radiación y la exactitud de los mismos impacta el desarro-

llo y utilización de la energía solar [67], [68]. Los resultados de radiación solar en Colombia muestran el potencial de esta tecnología, especialmente para ZNI. Sin embargo, entidades como la CREG deberán dictar las pautas y regulaciones necesarias, que faciliten el despliegue e implementación de la energía solar en Colombia. Con la Ley 1715 de mayo de 2014, Colombia ha dado un paso importante para la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional, y que pretende fomentar la inversión, el desarrollo de tecnologías limpias, y la gestión eficiente de la energía. (wsp.presidencia.gov.co)

- *China*

Luego del *Sixteenth Congress of the Chinese Communist Party* Beijing puso entre los ocho proyectos prioritarios las construcciones para energización rural, que da condiciones favorables para el desarrollo de industrias que tengan en su *core* la generación de productos y servicios solares [69]. El caso de China respecto a la radiación la posiciona como un país próspero en avances en energía solar. La cantidad anual de radiación es cerca de [3350-8400]W/m². Por su parte, la integración de energía solar a los edificios da una mirada futura de eco-ciudades y edificios verdes. Las aplicaciones de energía solar en edificios puede ser dividido en tres tipos: la tecnología de aceptación pasiva, que usualmente utiliza el diseño estructural para el uso de la energía solar para regular la temperatura dentro del edificio; la tecnología de colector solar, que usualmente emplea colectores para calentar el agua u otros medios de almacenamiento; tecnología de conversión de energía solar, que convierte la energía solar directamente a electricidad y provee iluminación a los edificios. Entre los problemas para la implementación de edificios verdes están: el poco entendimiento de la importancia del desarrollo de energía solar, poca inversión en la construcción de proyectos de energía solar y las dificultades tecnológicas por factores inherentes a la energía solar [33]. En China, el consumo de energía en edificios es el 26,7% del total, representado en su mayoría por el consumo de energía de aire acondicionado y calefacción en un 65%, seguido por alimentadores de agua caliente con 15% [70].

- *Resto del mundo*

Países como Malaysia están interesados en desplegar proyectos en RE, tal es el caso de la energía solar PV. En este país, las cantidades de uso de energía

residencial son superiores a los 14365 GWh, que fue el 19% del consumo total de electricidad en Malaysia Peninsular en 2006. La energía solar es abundante, gratis y limpia, y no genera ruido ni ningún tipo de polución. La producción de energía eléctrica a partir de energía solar en el mundo se ha incrementado notablemente; tal es el caso del aumento producido entre 1980 y 2004: de una producción de 10 MWp/año se pasó a 1200 MWp/año [71].

El caso de Líbano también es muy particular e interesante para el despliegue de tecnologías que permitan generar energía a partir de RES, ya que importa alrededor del 97 % de la energía en forma de combustibles fósiles, y presenta una radiación horizontal global promedio de 2200 kWh/m²/año. El sector residencial representa el 30 % del consumo total de energía, un valor interesante para el mercado de energía solar [72].

En [73] se presenta un análisis estadístico de hace más de dos décadas sobre la demanda energética de Chipre, que es dependiente del petróleo importado. Sin embargo, su posición geográfica le permite ser uno de los países en los que el potencial para la utilización de la energía solar es muy alto. Chipre es uno de los países que más cantidad de energía solar térmica tiene por habitante en el mundo (350 kW por cada 1000 habitantes), y más del 90 % de los edificios tienen captadores solares térmicos [74].

Cerca de 1,3 mil millones de personas no tienen acceso a la electricidad en el mundo. En India, una gran porción de la población aún depende del queroseno que el Estado distribuye y subsidia, además de velas, biomasa tradicional como madera, estiércol de vaca, entre otros, que están asociados con problemas de salud, pobreza, poco presupuesto del Estado y degradación del medio ambiente. Productos de energía solar, como los sistemas solares domésticos (SHS) y linternas solares, están ganando fuerza en ZNI [75].

El sector de energía en Uzbekistán está bien desarrollado y subyace en los abundantes recursos de petróleo, gas natural, carbón y uranio, que en general son suficientes para soportar el desarrollo sostenible de la economía en una perspectiva a medio plazo. En este país, la generación a partir de energía solar es promisoría, ya se tiene en promedio entre 2800-3100 horas de radicación solar y una intensidad solar promedio de 1000 W/m². Además la radiación solar anual acumulada por m² de superficie horizontal es 1,6 MW, equivalentes a la energía que puede ser recibida de la quema de 0,2 toneladas de madera [76].

El programa japonés *Sunshine* inicialmente proporcionó una subvención del 50 % sobre el costo de sistemas *PV* instalados. Los niveles de subvención fueron establecidos de modo que el coste neto de electricidad al cliente era competitivo respecto a opciones convencionales. La subvención fue para los módulos *PV* y el BOS (*Balance of System*). Los costes denominados BOS incluyen los costes de todos los componentes, excepto los módulos *PV*, la planificación, preparación de la obra, soportes de montaje, cableado eléctrico simple, inversores, conexión a la red y montaje. Los programas que soportan los costos iniciales de este tipo de tecnologías deben responder a las condiciones del mercado, particularmente los cambios en el precio del mercado de los componentes o sistemas, o de lo contrario las condiciones del mercado crean resultados perversos. Además, estos programas se deben planificar cuidadosamente para evitar los problemas causados por la transición de un entorno con subsidios a uno que no los tenga, como los traumatismos que se han presentado en España durante la crisis europea de los últimos años [58].

Nigeria considera que las fuentes de energía a partir de la hidráulica, el petróleo y el gas son altamente mecánicas y ambientalmente insostenibles. La energía solar es una de las once fuentes identificadas para la generación de energía eléctrica, además de la eólica, la geotérmica y nuclear [77].

6. RESULTADOS OBTENIDOS

La crisis energética mundial está llevando al mundo a que priorice, cada vez más, en la necesidad de buscar *RES*.

Sin embargo, es necesario empezar a tener un equilibrio entre la generación de energía, que actualmente es un gran contaminante, y la protección del medio ambiente. Por ello, *RES* como la energía solar, energía eólica, energía geotérmica y generación hidráulica, entre otras, son una gran apuesta del futuro para la sostenibilidad del medio ambiente y las sociedades, que permiten reducir los *GEI* y evitar el impacto negativo de la generación de energía por combustibles fósiles.

Además, las *RES* son uno de los frentes que aborda la *Smart Grid* y que varios países en el mundo están empezando a desplegar. Sin embargo, la seguridad, especialmente para las comunicaciones, es uno de los re-

querimientos más críticos que se requiere tener presente antes de que la *Smart Grid* esté operacionalmente lista para el mercado. Debido al tipo de información que se podría tener por cliente, se empieza a discutir el tema de privacidad y las amenazas que quedan latentes con esta nueva visión de las redes inteligentes.

Smart Grid se caracteriza por el flujo de información de datos eléctricos y de control para crear una automatizada y amplia red eléctrica distribuida, que permitirá: detectar pérdidas no técnicas; optimizar las redes y disminuir las pérdidas de energía; conectar/desconectar remotamente los clientes; limitar la potencia de suministro remotamente; incorporar generación distribuida, tales como *RES* a gran escala, que pueden entregar energía a la red y reducir el potencial impacto negativo sobre el medio ambiente; participación activa de los usuarios en el mercado de precios de energía; creación del perfil de carga de los usuarios; y autorrestablecer la red de energía antes fallos de la misma.

Se ha experimentado la necesidad mundial de migrar a una red inteligente, debido a factores como: el rápido crecimiento de la economía y requerimientos de la sociedad para construir una red de energía fuerte, confiable, eficiente y económica, como es el caso de China; la actual presión mundial sobre los recursos naturales y estado ambiental, que requiere de un buen uso de los recursos naturales y una red de energía amigable con el ambiente; y la necesidad de contar con una red de energía transparente, flexible e interactiva.

Los sistemas *PV* tienen el potencial de prever una porción significativa de energía eléctrica en países como Estados Unidos y Alemania, entre otros. Sin embargo, estos sistemas tienen inconvenientes como la intermitencia inherente de la energía solar, que plantea retos en términos de calidad de potencia y confiabilidad. De hecho, existe todavía mucha falencia en cuanto a la regulación respecto a la generación y comercialización de energía a partir de *RES*.

CONCLUSIONES

El consumo de energía eléctrica ha venido aumentando en los últimos años, pero la infraestructura de red está desactualizada y es incapaz de compensar el incremento de demanda y aceptar *RES* y reducir los *GEI*.

SG es una moderna infraestructura para mejorar la eficiencia, seguridad, confiabilidad, integración de fuentes de energías alternativas y renovables a través de tecnologías modernas automatizadas de control y de comunicaciones [78], [79]. Además, es la convergencia de datos e información junto con tecnologías de operación empleadas en las redes eléctricas, que permiten el desarrollo de nuevas aplicaciones sostenibles para los clientes y las *utilities*. Por otra parte, SG abre la oportunidad para que los competidores ofrezcan precios bajos como respuesta a la demanda, además de permitir e impulsar la generación de energía distribuida; respecto a lo cual todo parece indicar que las RES tendrán una alta acogida por los usuarios del sistema, debido a su poco o nulo impacto sobre el medio ambiente. Nuevas tecnologías en SG permiten una estructura de mercado competitivo, en el que las empresas minoristas de servicios se verían motivadas a ofrecer servicios de electricidad para consumidores heterogéneos. Esta competencia permite promover la fijación de precios e inversiones en SG. Sin embargo, la inversión que requiere SG es influenciado por factores inciertos del mercado, tales como el comportamiento de los miembros o agentes de la red y la volatilidad de precio [13].

La red de energía solar PV cambia radicalmente el perfil de carga de un cliente de una empresa que presta el servicio eléctrico, por lo que la integración a la red actual es un frente importante para SG. La adopción por parte de los clientes de esta tecnología plantea retos importantes a los operadores del sistema en el funcionamiento en estado transitorio y estable, debido a factores como cambios bruscos de voltaje y variaciones del clima en la generación, entre otros [80], que están fuertemente correlacionadas con las zonas geográficas.

REFERENCIAS

- [1] M. Austin, "Battery and energy trends and the driving forces behind them", in *IEEE Technology Time Machine Symposium on Technologies Beyond 2020 (TTM)*, Hong Kong, 2011.
- [2] W. Jian, "Optimal control of solar energy combined with MPPT and battery charging", in *IEEE Sixth International Conference on Electrical Machines and Systems*, Beijing, 2003.
- [3] L. Chang *et al.*, "A solar battery charger with improved energy utilization", in *IEEE Conference on Electrical and Computer Engineering*, Halifax, 1994, pp. 105-108.

- [4] J. Nelson, *The physics of solar cells*. U. Imperial College, Ed. IC, 2003.
- [5] M. Glavin and W. Hurley, "Battery management system for solar energy applications", *IEEE Power Engineering*, vol. 1, pp. 79-83, 2006.
- [6] K. Gutzeit, "Batteries for telecommunications systems powered by solar energy", in *IEEE Conference International Telecommunications Energy (INTELEC)*, Toronto, 1986, pp. 73-76.
- [7] K. Hirachi *et al.*, "Utility-interactive multi-functional bidirectional converter for solar photovoltaic power conditioner with energy storage batteries", *IEEE Industrial Electronics, Control, and Instrumentation*, vol. 3, pp. 1693-1698, 1996.
- [8] B. Camara and H. Gualous, "DC/DC converter design for super capacitor and battery power management in hybrid vehicle applications polynomial control strategy", *IEEE Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 587-597, 2010.
- [9] D. Qinghui and J. Chen, "Improving the efficiency of solar photovoltaic power generation in several important ways", in *International Technology and Innovation Conference*, Xian, 2009, pp. 1-3.
- [10] P. Paradissis and G. Schmitz, "A solar power system for a microwave terminal site", in *IEEE Third International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*, London, 1981, pp. 161-166.
- [11] P. Thomas, "Theoretical limits of photovoltaic solar energy conversion", in *World Climate & Energy Event*, vol. 2, pp. 61-66, 2002.
- [12] G. Shafiullah *et al.*, "Prospects of solar energy in Australia", in *International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, 2010, pp. 350-353.
- [13] L. Berrío and C. Zuluaga, "Concepts, standards and communication technologies in smart grid", in *IEEE 4th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, pp. 1-6, 2012.
- [14] H. Houet *et al.*, "A Brief Analysis on Differences of Risk Assessment between SG and Traditional Power Grid", in *International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling*, Sanya, 2011, pp.188-191.
- [15] W. Mendoza and S. Fuji, "Smart Grids Tecnología y Tendencias: Integración con Sistemas SCADA/EMS/DMS", in *13th Encuentro Regional Iberoamericano*, Cigré, 2009.
- [16] S. Gubanski, "Smart Grids and high voltage engineering", *Elektrotechnik & Informationstechnik - Springer*, n° 129, pp. 186-191, 2012.
- [17] M. Guarracino, A. Irpino, N. Radziukyniene, and R. Verde, "Supervised classification of distributed data streams for smart grids", *Energy Systems*, n° 3, pp. 95-108, 2012.

- [18] Y. Yan, Y. Qian, and H. Sharif, "A Secure Data Aggregation and Dispatch Scheme for Home Area Networks in Smart Grid", in *IEEE Global Telecommunications Conference*, Houston, 2011, pp. 1-6.
- [19] V. Aravinthan *et al.*, "Wireless AMI application and security for controlled home area networks", in *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, San Diego, 2011, pp. 1-8.
- [20] Z. Fadlullah *et al.*, "A survey of game theoretic approaches in Smart Grid", in *International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2011, pp. 1-4.
- [21] Q. Zhang, Y. Sun, and Z. Cui, "Application and analysis of ZigBee technology for Smart Grid", in *International Conference on Computer and Information Application*, Tianjin, 2010, pp. 171-174.
- [22] B. Saint, "Rural distribution system planning using Smart Grid Technologies", in *IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Fort Collins, 2009, pp. B3-8.
- [23] B. Vaidya, D. Makrakis, and H. Mouftah, "Secure communication mechanism for ubiquitous Smart grid infrastructure", *The Journal of Supercomputing - Springer*, 2011.
- [24] H. Slootweg, "Smart Grids - the future or fantasy?", in *Smart Metering - Making It Happen (IET)*. London, 2009, pp. 1-19.
- [25] S. Bossart and J. Bean, "Metrics and benefits analysis and challenges for Smart Grid field projects", *IEEE Energytech*, pp. 1-5, 2011.
- [26] Z. Ruihua, D. Yumei, and L. Yuhong, "New challenges to power system planning and operation of smart grid development in China", in *International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, Hangzhou, 2010, pp. 1-8.
- [27] G. Pagani and M. Aiello, "Service Orientation and the Smart Grid state and trends", *Service Oriented Computing and Applications (SOCA) - Springer*, n° 6, pp. 267-282, 2012.
- [28] H. Chao, "Competitive electricity markets with consumer subscription service in a smart grid", *Journal of Regulatory Economics - Springer*, n° 46, pp. 155-180, 2012.
- [29] MINETUR, "Smart Grids y la Evolución de la Red Eléctrica", *Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones*, pp. 1-82, 2011.
- [30] A. Krutina, "AMR/AMI - Automatic Meter Reading & Advanced Metering Infrastructure", *Intensive Programme: Renewable Energy Sources*, 2010, pp. 118-121.
- [31] A. Paetz, E. Dütschke, and W. Fichtner, "Smart Homes as a Means to Sustainable Energy Consumption: A Study of Consumer Perceptions", *Journal of Consumer Policy - Springer*, n° 35, pp. 23-41, 2012.

- [32] U. Jagstaidt *et al.*, "Smart Metering Information Management", *Business & Information Systems Engineering*, n° 5, pp. 323-326, 2011.
- [33] W. Zhao and Y. Ma, "Research on solar energy technologies for the ecological architecture," in *6th International Forum on Strategic Technology (IFOST)*, Harbin, 2011, vol.1, pp. 452-455.
- [34] COCME, "Trilema para la Sostenibilidad Energética Visión - WEC", in *Jornada Técnica COCME*, Bogotá, D.C., 2012.
- [35] CLIMASCOPIO, "Colombia, séptima en energía verde entre países de la región", *Energías Limpias y Construcciones Sostenibles - Mundo Eléctrico*, n° 88, pp. 34-35, 2012.
- [36] L. Ma *et al.*, "Alternative energy development strategies for China towards 2030", *Frontiers of Energy and Power Engineering in China - Springer*, vol. 3, n° 1, pp. 2-10, 2009.
- [37] J. Salvatore *et al.*, "H1 2014 Levelised cost of Electricity update (LCOE)", *Bloomberg New Energy Finance*, pp. 3-5, 2014.
- [38] V. Shuiskii *et al.*, "The Global Markets of Renewable Energy Sources and the National Interests of Russia", *Studies on Russian Economic Development - Springer*, n° 3, pp. 318-327, 2010.
- [39] H. Kanchev *et al.*, "Energy Management and Operational Planning of a Microgrid With a PV-Based Active Generator for Smart Grid Applications", *IEEE Industrial Electronics*, vol. 58, pp. 4583-4592, 2011.
- [40] M. Hashmi *et al.*, "Survey of smart grid concepts, architectures, and technological demonstrations worldwide," in *IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies*, Medellín, 2011, pp. 1-7.
- [41] D. Hall, "Social Cost of CO₂ Abatement from Energy Efficiency and Solar Power in the United States", *Environmental and Resource Economics*, n° 2, pp. 491-512, 1992.
- [42] M. Ahmed and M. Sulaiman, "Design and proper sizing of solar energy schemes for electricity production in Malaysia", in *Proc. IEEE Power Engineering Conference (PECon)*, pp. 268- 271, 2003.
- [43] M. Arif *et al.*, "Impacts of storage and solar photovoltaic on the distribution network", in *22nd Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*, Bali, 2012, pp. 1-6.
- [44] S. M. Tennakoon *et al.*, "Solar energy for development of a cost-effective building energy system", in *Proc. IEEE International Conference on Power System Technology (PowerCon)*, vol. 1, pp. 55-59, 2000.
- [45] M. Aristizábal, "Recurso energético en Colombia, consumos y su futuro", *Energías Limpias y Construcciones Sostenibles - Mundo Eléctrico*, n°. 88, pp. 48-50, 2012.

- [46] R. Billinton and Bagen, "Reliability Considerations in the Utilization of Wind Energy, Solar Energy and Energy Storage in Electric Power Systems", in *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Stockholm, 2006, pp. 1-6.
- [47] R. Li *et al.*, "Design of wind-solar and pumped-storage hybrid power supply system", in *International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, 2010, vol. 5, pp. 402-405.
- [48] Y. Lee, E. Liu, and H. Huang, "A small scale solar power generation, distribution, storage, MPPT and completed system design method", in *International Conference on Communications, Circuits and Systems (ICCCAS)*, Chengdu, 2010, pp. 597-600.
- [49] Y. Zhao *et al.*, "Development of Solar Energy Underground Seasonal Storage Device and Its Parameters Measuring System", in *IEEE Conference on Information Engineering*, Beidaihe, 2010, pp. 231-234.
- [50] Q. Qi *et al.*, "A simulation study on solar energy seasonal storage by phase change material", in *IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET)*, Singapore, 2008, pp.106-109.
- [51] M. Sheng Wei and C. LaiJun, "Research focuses and advance technologies of smart grid in recent years", *Chinese Science Bulletin – Springer*, vol. 57, n° 22, pp. 2879-2886, 2012.
- [52] C. Hua and C. Shen, "Comparative study of peak power tracking techniques for solar storage system", in *Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, 1998, vol. 2, pp. 679-685.
- [53] D. Pimentel, "Chapter 1 - Renewable and Solar Energy Technologies: Energy and Environmental Issues", *Biofuels, Solar and Wind as Renewable Energy Systems – Springer*, pp. 1-17, 2008.
- [54] REMEL, "Best Research Solar Cell Efficiencies", *National Renewable Energy Laboratory*, 2010.
- [55] M. Gasulla, M. Penella, and O. López, "Método de seguimiento del punto de máxima potencia de paneles solares", *PCT - Universitat Politècnica de Catalunya*, 2012.
- [56] L. Ruiz *et al.*, "Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar", *Revista de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación*, vol. 8, n° 1, 2010, pp. 17-23
- [57] EPM, *Tarifas y Costo de Energía Eléctrica - Mercado Regulado*. Available: http://www.epm.com.co/site/clientes_usuarios/Clientesyusuarios/Hogaresypersonas/Energ%C3%ADa/Tarifas.aspx. June, 2013.

- [58] T. Bradford, "Towards market-responsive policy design for distributed renewable energy", *European View - Springer*, n° 8, pp. 117-124, 2009.
- [59] Deutsche Sheel AG, citado por W. Hoffmann, "PV solar electricity industry: Market growth and perspective", *14th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, vol. 90, n^{os}18-19, pp. 3285-3311, 2006.
- [60] K. H. Solangi *et al.*, "Development of solar energy and present policies in Malaysia", in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, Kuala Lumpur, 2011, pp. 115-120.
- [61] H. Fayaz *et al.*, "Solar energy policy: Malaysia vs. developed countries," in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, Kuala Lumpur, 2011, pp. 374-378.
- [62] INFORMADOR, "Estados Unidos duplicó su capacidad de generar energía solar", *Tecnología*, March 2012. Available: <http://www.informador.com.mx/tecnologia/>
- [63] B. Cook *et al.*, "The smart meter and a smarter consumer: quantifying the benefits of smart meter implementation in the United States", *Chemistry Central Journal - Springer*, n° 6, pp. 1-16, 2012.
- [64] R. Castellanos and P. Millán, "Design of a wireless communications network for advanced metering infrastructure in a utility in Colombia", in *Colombian Communications Conference*, Cali, 2012, pp. 1-6.
- [65] Colinvertaciones, "Retos y Perspectivas del Sector Eléctrico en Colombia", in *Colombia Genera*, Cartagena, 2012.
- [66] UPME, "Atlas de Radiación Solar de Colombia". Bogotá, D. C.: Unidad de Planeación Minero Energética, 2012.
- [67] W. Zghal, G. Kantchev, and H. Kchaou, "Determination of the exploitable solar energy for electricity generation using the photovoltaic systems", in *Renewable First International Conference on Energies and Vehicular Technology (REVET)*, Hammamet, 2012, pp. 43-48.
- [68] M. Zhao, Z. Liu, and M. Yu, "Data acquisition and analyzing of solar energy resource", in *IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA)*, Harbin, 2010, pp. 2205-2208.
- [69] L. Xin, B. Dan, and Z. Zhao-xia, "The study of service model on Beijing rural solar energy products", in *International Conference on Management Science and Engineering*, Moscow, 2009, pp. 759-765.
- [70] Y. Liu, G. Zhou, and J. Ma, "Feasibility analysis for a large scale solar energy heating in central region of China", in *5th Conference on Industrial Electronics and Applications*, Taichung, 2010, pp. 874-877.

- [71] M. Hossain *et al.*, "Global solar energy use and social viability in Malaysia", in *IEEE First Conference on Clean Energy and Technology (CET)*, Kuala Lumpur, 2011, pp. 187-192.
- [72] T. Salem, "Prospects for solar thermal energy use in residential buildings in Lebanon", in *International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA)*, Zouk Mosbeh, 2009, pp. 309-314.
- [73] J. Michaelides and P. Votsis, "Energy analysis and solar energy development in Cyprus", *Computing & Control Engineering Journal*, vol. 2, n° 5, pp. 211-215, 1991.
- [74] CIEMAT, "La energía solar térmica en el mundo", *Portal de Energías Renovables*, 2008.
- [75] S. Jolly, R. Raven, and H. Romijn, "Upscaling of business model experiments in off-grid PV solar energy in India", *Socio-technological transitions – Springer*, n° 7, pp. 199-212, 2012.
- [76] S. Lutpullaev and Kh. Zainutdinova, "On the Marketing of Solar Energy in Uzbekistan", *Applied Solar Energy – Renewable Energy Sources*, vol. 47, n° 1, pp. 79-81, 2011.
- [77] A. Soneye and A. Daramola, "Sustainable energy in Nigeria: An assessment of solar utilization in Ibadan", in *First Conference on Clean Energy and Technology*, Kuala Lumpur, 2011, pp. 305-310.
- [78] L. Yuexin *et al.*, "Investment-benefit analysis and evaluation model of the smart grid", in *China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Nanjing, 2010, pp. 1-5.
- [79] C. Cecati *et al.*, "Smart Operation of Wind Turbines and Diesel Generators According to Economic Criteria", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 58, n° 10, pp. 4514-4525, 2011.
- [80] C.A. Hill *et al.*, "Battery Energy Storage for Enabling Integration of Distributed Solar Power Generation", *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, n° 2, pp. 850-857, 2012.