



Smart Grids en México: Situación actual, retos y propuesta de implementación

Smart Grid in Mexico: Current situation, challenges and implementation

León-Trigo Luz Ileri

Tecnológico Nacional de México/IT Morelia
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Correo: ireri.leon@gmail.com

<http://orcid.org/0000-0002-4974-8293>

Reyes-Archundia Enrique

Tecnológico Nacional de México/IT Morelia
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Correo: ereyes@itmorelia.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0003-3374-0059>

Gutiérrez-Gnecchi José Antonio

Tecnológico Nacional de México/IT Morelia
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Correo: agnecchi@itmorelia.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0001-7898-604X>

Méndez-Patiño Arturo

Tecnológico Nacional de México/IT Morelia
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Correo: ampatino@itmorelia.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0001-7561-5673>

Chávez-Campos Gerardo Marx

Tecnológico Nacional de México/IT Morelia
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Correo: gmarx@itmorelia.edu.mx

<http://orcid.org/0000-0003-3945-9903>

Resumen

Una Red Eléctrica Inteligente o Smart Grid (SG) es una red eléctrica que integra, a través de una comunicación bidireccional, las acciones de proveedores de servicio y usuarios conectados a ella. En la actualidad uno de los retos que enfrenta la Red Eléctrica Mexicana debido al crecimiento poblacional e industrial es el incremento de la demanda energética, así como la introducción de generación distribuida basada en recursos renovables. El objetivo de este trabajo es presentar un panorama general del estado que guardan las redes inteligentes en México, así como la viabilidad de construir Micro Redes Eléctricas o Micro Grids (MGs), para proveer energía eléctrica a sectores de la sociedad no atendidos o para hacer más eficientes los servicios actuales. Para ello, se realiza un análisis de los alcances y las limitaciones del sector eléctrico en México y, a diferencia de otros trabajos, se presenta un caso de estudio en el que se compara el consumo real de energía eléctrica de un usuario residencial y la generación estimada por medio de paneles solares, con base en datos de irradiación proporcionados por la NASA. Utilizando las coordenadas geográficas del lugar bajo estudio se obtiene una radiación solar promedio de 5.58 kWh/m²/día, con la que se calcula el número de paneles solares necesarios para atender la demanda. El estudio comparativo está limitado a datos de 22 meses de consumo real. El resultado muestra una diferencia entre generación y consumo de 2 kWh, lo que valida la correcta estimación del estudio. En adición, se presenta un análisis de recuperación económica que justifica la instalación de Micro Redes aisladas, con medios de generación alternativos, para llevar la energía a lugares de difícil acceso con redes convencionales.

Descriptores: Red inteligente, micro red, medidor inteligente, fotovoltaica, energía renovable.

Abstract

A Smart Grid (SG) is an electrical network that uses a bidirectional communication to integrate the actions of service providers and users. Currently one of the challenges facing the Mexican grid due to population and industrial growth is the energy demand, as well as the introduction of distributed generation based on renewable resources. The objective of this paper is to present an overview of the state of Smart Grids in Mexico, as well as the feasibility of building Micro Grids (MGs), to provide electricity to sectors of society not served or to do more efficient current services. For this purpose, an analysis of the scope and limitations of the electricity sector in Mexico is made and, unlike other works, a case study is presented in which the actual demand of electric energy of a residential user and the generation estimated using solar panels is compared, based on irradiation data provided by NASA. By using the geographic coordinates of the place under study, average solar radiation of 5.58 kWh/m²/day is obtained, which calculates the number of solar panels needed to meet the user's demand. The comparative study is limited to 22 months of actual data. The result shows a difference between generation and consumption of 2 kWh, which validates the correct estimation of the study. Also, an analysis of economic recovery is presented that justifies the installation of isolated Micro Grids, with alternative generation sources, to take the energy to places of difficult access with conventional networks.

Keywords: Smart grid, micro grid, smart meter, photovoltaic, renewable energy.

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la demanda de energía eléctrica se ha incrementado debido principalmente al aumento poblacional y los consecuentes niveles crecientes en el consumo, sin embargo, la red eléctrica tradicional muestra signos de envejecimiento, por lo que resulta necesaria la aplicación de desarrollos tecnológicos orientados a la mejora de las condiciones de la red (Peralta y Amaya, 2013). Actualmente la mayoría de los procesos utilizados para la generación de energía, en particular la eléctrica, no son sustentables, puesto que su huella de carbono radica en las constantes emisiones de dióxido de carbono hacia la atmósfera, produciendo efectos indeseables en el calentamiento global.

La red eléctrica tradicional enfrenta grandes retos, como los picos de demanda, la incorporación de energías renovables, reducción de pérdidas de energía, mejora en

la calidad en el servicio y eficiencia energética, entre otros. En la Figura 1, se muestran los elementos básicos de una SG, en particular la generación distribuida con fuentes renovables 1a y el medidor inteligente 1b.

Las energías renovables juegan un papel relevante en la generación de energía y se incorporan como elemento básico de la Smart Grid (SG) o red eléctrica inteligente (Andersson *et al.*, 2013), la cual puede integrar a usuarios consumidores y generadores de energía con un flujo bidireccional de energía e información (Wissner, 2011; Giordano *et al.*, 2011; Han *et al.*, 2013).

Para lograr la evolución de la red tradicional a una SG se requiere el aumento de la generación descentralizada de energía, la cual se produce principalmente por las energías renovables (Wissner, 2011). No obstante, el uso de energías renovables puede ser incierto, aun cuando exista un gran potencial del recurso, debido a que, por naturaleza, su comportamiento es intermitente.

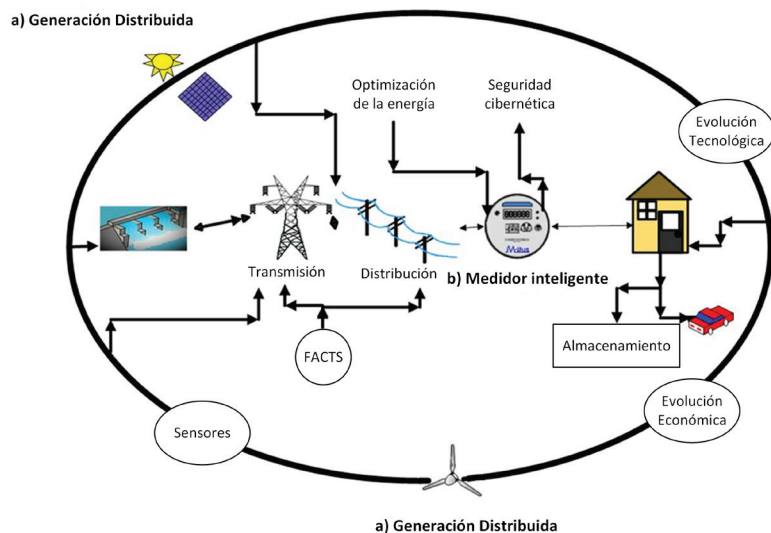


Figura 1. Red eléctrica con nivel de inteligencia y algunos elementos básicos: a) generación distribuida por fuentes de energía renovable, b) medidor inteligente

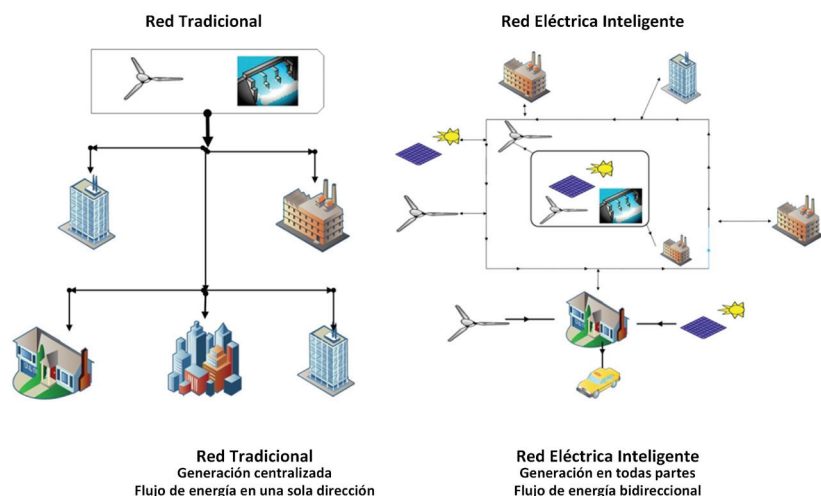


Figura 2. Transición de la red actual a una Smart Grid (Santacana *et al.*, 2010)

La generación descentralizada de energía, utiliza la infraestructura de la red tradicional eléctrica, sin embargo, su funcionamiento es diferente, debido a que la generación tiene diferentes orígenes. Por ello, aunque la infraestructura sea la misma, el tratamiento de los flujos de energía debe ser más completo, lo cual implica vías de comunicación bidireccionales que es una característica de una SG, Figura 2.

En México, desde que se introdujo la electricidad en 1879, la incorporación de nuevas tecnologías para la optimización de la generación y consumo de energía eléctrica ha sido muy limitada (Toledo *et al.*, 1994). Actualmente con los cambios al artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos en el marco de la reforma energética de 2014, se abre la oportunidad de implementar mejores tecnologías en la red tradicional. Por ello, se considera que este país está obligado a una renovación del sector eléctrico y su conversión a una SG.

Es necesario fortalecer la red eléctrica mexicana por medio de la implementación de nuevas tecnologías tales como esquemas de generación distribuida y las MGs, aprovechando que su privilegiada posición geográfica facilita el uso de fuentes de energías renovables, en particular, la fotovoltaica que tiene un gran potencial de explotación (Ovando *et al.*, 2013).

La generación distribuida junto con las MGs representa una alternativa de mejora para los procesos de producción, entrega de energía eléctrica y almacenamiento de pequeña escala. En adición, ayudan a equilibrar la red cuando se presentan los picos de demanda, que han ido incrementando con el aumento poblacional (Blumsack y Fernández, 2012).

En este trabajo de investigación se realiza un análisis de las limitaciones y condiciones favorables del sector eléctrico en México para incursionar en el desarrollo de SGs que permitan una adecuada generación de energía eléctrica por medio de fuentes renovables. En adición, se presenta un caso de estudio en el que, con base en un análisis de eficiencia energética, se justifica el uso de Micro Redes eléctricas (MGs, por sus siglas en inglés) para impulsar el desarrollo de energías renovables y proveer del servicio eléctrico a sectores no atendidos.

REDES INTELIGENTES EN MÉXICO

Un componente básico de la SG es el medidor inteligente o bidireccional, capaz de recibir información en tiempo real al cliente sobre su consumo, así como entregar información sobre consumo y condiciones de la red al proveedor de servicio eléctrico.

Los medidores inteligentes utilizan la infraestructura de medición avanzada (AMI), que permite una configu-

ración de medición remota, tarifas dinámicas, monitoreo de la calidad de la energía y control de cargas (Foro del Comité Nacional Mexicano de la IEC, 2013). Estos medidores pueden situarse en el mismo lugar que los medidores tradicionales para no modificar la infraestructura de la red eléctrica actual (Inga, 2012).

El desarrollo tecnológico de la red eléctrica en México ha comenzado con la instalación de medidores inteligentes (SM, por sus siglas en inglés), que proveen medios de monitoreo sobre consumo y posibilitan la habilitación o corte remoto del servicio (Programa Sectorial de Energía, 2013-2018). Los SM promueven la intervención del cliente en la red eléctrica y proporcionan a la red un nivel de inteligencia.

La CFE tiene la meta de instalar, para 2018, más de 2 millones de medidores inteligentes. A finales de 2016, se tenían instalados 772 mil medidores con infraestructura AMI (Secretaría de Energía, 2017).

En la Figura 3 se puede observar un esquema básico de red inteligente que incorpora energías renovables para generar autoconsumo en usuarios de servicio básico (Figura 3a), incluye un medidor inteligente (Figura 3b) el cual envía información a CFE (Figura 3c). En caso de que existan cargas críticas (aparatos médicos, servidores), se recomienda incluir un Sistema de Energía no Interrumpible (UPS) con regulador de carga y respaldo de baterías para un óptimo funcionamiento. El cliente tiene acceso a información referente a su consumo de energía eléctrica y la energía "almacenada" a su favor (CITCEA-UPC, 2013).

En México, de acuerdo con el presupuesto de egresos de la federación para la Estrategia de transición para promover el uso de Tecnologías y Combustibles más limpios, en el ramo de la energía, el monto de recursos destinados para el ejercicio 2017 para la Secretaría de Energía, la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía y el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias es de \$545,632,059.00 pesos (Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal, 2017).

La CFE considera, en el Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018, una inversión de 598,384 millones de pesos (mdp), dividida en 3 regiones (norte, centro y sur-sureste) y la destinada a proyectos de cobertura nacional. En la región norte se estima una inversión de 288,431mdp en 78 proyectos estratégicos (destacan la construcción de 15 centrales de ciclo combinado y 3 centrales de eoloelectricas); en la región centro se destinarán 87,982mdp en 28 proyectos de los que destacan la construcción de centrales de ciclo combinado en Guadalajara, San Luis Potosí, Valle de México, Aguascalientes y Morelos para garantizar el abasto

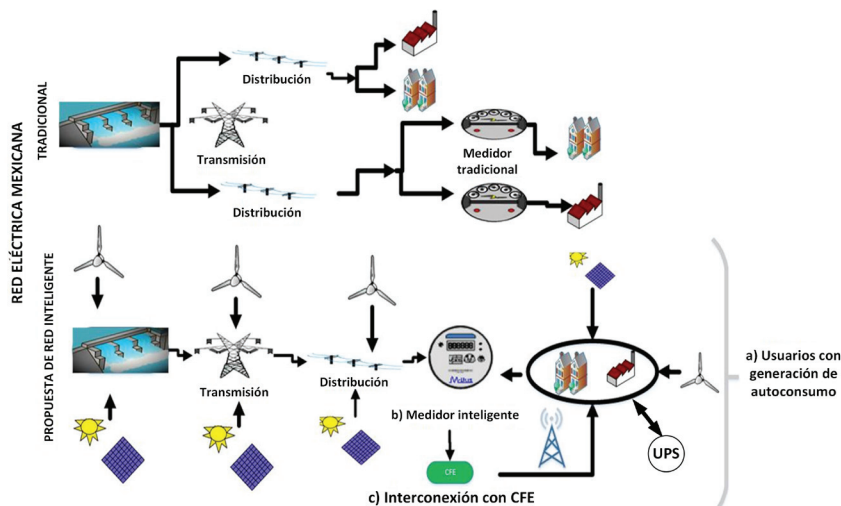


Figura 3. Red inteligente propuesta: a) usuarios con autoconsumo, b) medidor inteligente, c) interconexión a CFE

oportuno, con calidad y económico de la energía eléctrica que demanda la zona; en la región sur-sureste se estima una inversión de 110,000mdp en 23 proyectos estratégicos, destacando 6 centrales eléctricas eólicas en el estado de Oaxaca, las centrales hidroeléctricas de Nuevo Guerrero en el mismo estado, Paso de la Reina, Oaxaca, Chicoasén II y Tenosique, ambas en el estado de Chiapas; finalmente con carácter nacional se prevé una inversión de 111,971mdp en 9 proyectos estratégicos principalmente orientados a líneas de transmisión para transportar energía eléctrica en diferentes entidades federativas del país (Programa Nacional de Infraestructura, 2014).

ENERGÍAS RENOVABLES EN MÉXICO

México genera su electricidad principalmente por plantas hidroeléctricas y la quema de combustibles fósiles. El aprovechamiento de las energías renovables como la eólica y la solar, han tenido un gran auge a partir de la reforma energética, principalmente porque el país cuenta con un gran recurso eólico y solar. En energía solar, México presenta uno de los mejores niveles de incidencia solar a nivel mundial con una radiación solar promedio de 5 kWh/ m² (Ovando *et al.*, 2013).

El uso de fuentes de energía renovable en conjunto con las MGs, podría permitirle a nuestro país abastecer de energía eléctrica a zonas en donde la conexión a la red de distribución es muy difícil. La MG es una red local que puede funcionar de manera aislada, interconectada a la red o híbrida, alimentada por fuentes de energía renovables, con limitadas herramientas de control avanzado (Momoh y Smart, 2012).

En varios países se realiza el desarrollo de las MGs debido a que ofrece muchas ventajas, como una mejor

calidad de la energía y ser amigable con el medio ambiente (Hartono *et al.*, 2013). Las MGs pueden entregar o recibir energía, siempre que se cumplan ciertas restricciones y normas de calidad de potencia (Erol *et al.*, 2011). En la Figura 4 se puede observar una MG propuesta para que los usuarios domésticos y comerciales de CFE puedan implementar su fuente de generación eléctrica con base en energía fotovoltaica (Figura 4a).

La infraestructura de las casas en el país lo hacen un recurso viable y de fácil instalación. Este recurso requiere de inversores (Figura 4b), los cuales junto con el medidor inteligente (Figura 4c), permiten la interconexión a la red, permitiendo al usuario abastecerse de energía de la red de distribución eléctrica (Figura 4d) en días nublados.

En la Figura 5, se muestra un diagrama eléctrico simplificado de los componentes de la MG. En la sección 5 se realiza el dimensionamiento de sistema fotovoltaico propuesto para el presente estudio, el cual resulta en 6 paneles solares (Figura 5a). Con el propósito de concentrar las especificaciones de los componentes utilizados, se presenta un resumen de dichas especificaciones:

- Paneles fotovoltaicos.** Paneles solares marca Solar-tec modelo SP60 de 250W.
- Inversor.** Fronius Galvo 1.5-1, con potencia de entrada de 1.2kW a 2.4kW, corriente máxima de entrada de 13.4^a.
- Medidor bidireccional.** Medidor marca MIAL METERING SYSTEMS, modelo CP-16-12S.
- Red eléctrica.** Se considera conexión a la red eléctrica de CFE que entrega energía cuando el sistema fotovoltaico genera menor cantidad de energía de la requerida.

5. **Cargas mixtas.** Las cargas mixtas corresponden un comercio con un promedio de consumo bimensual de 348.36 kWh.

El recurso fotovoltaico en México tiene un gran potencial. Por ejemplo, si en México se aprovechara la radiación solar que recibe 1% del territorio del estado de Sonora, se podría abastecer de energía eléctrica a todo el país (Sánchez, 2014). Se plantea que, en 2018, el país cuente con una capacidad instalada de 613.6 MW en plantas fotovoltaicas con las que se producirán 1,343.6 GWh/año (Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, 2014).

En EUA se motivó la evolución de la red tradicional a una SG gracias al uso de fuentes de energía renovable por los usuarios. Se espera que en México, el uso de fuentes de energía renovables interconectadas a la red sea un impulsor para invertir en el desarrollo de la SG.

Después de la ley de abastecimiento de 1992 y debido a la necesidad de apoyo privado para el crecimiento de la generación distribuida, se aprueba en México la reforma energética (2014), la cual propone un nuevo marco normativo para regir la industria eléctrica, en el que las actividades derivadas de la misma, principalmente la generación y comercialización quedan abier-

tas a la participación de terceros, garantizando condiciones de libre competencia y concurrencia para todos los proveedores de servicios, buscando promover inversiones en energías limpias, mientras que los generadores mayoristas podrán vender su energía en el mercado eléctrico compitiendo con CFE (Explicación Ampliada de la Reforma Energética, 2014). Todo ello representa un mercado atractivo para la inversión y por ende obliga la evolución de la red tradicional a una SG.

Las centrales eléctricas con capacidad ≥ 0.5 MW y las centrales eléctricas de cualquier tamaño representadas por un generador en el mercado requerirán de un permiso otorgado por la CRE (Comisión Reguladora de Energía) para generar energía eléctrica. Los titulares de las centrales que no requieran y no obtengan un permiso se denominan generadores exentos, ya sean usuarios residenciales o comerciales (Gobierno Federal, 2014), para estos una MG interconectada a la red es una opción viable.

La ley para el aprovechamiento de las energías renovables y el financiamiento de la transición energética (LAERFTE), establece que, para el año 2024, la participación de las fuentes no fósiles en la generación de electricidad será de 35% Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, 2014), lo

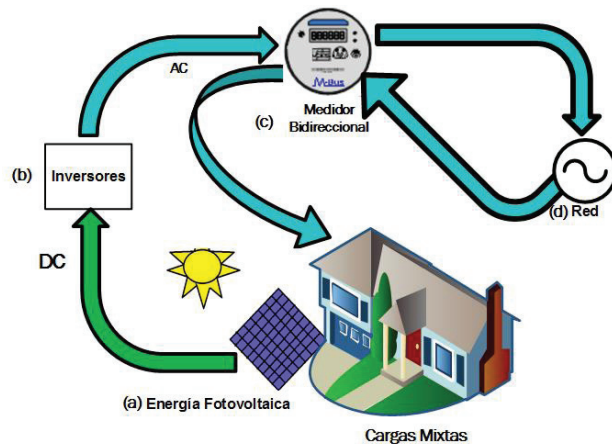


Figura 4. Micro red propuesta: a) energía fotovoltaica, b) Inversores, c) medidor inteligente, d) red eléctrica del proveedor de servicio

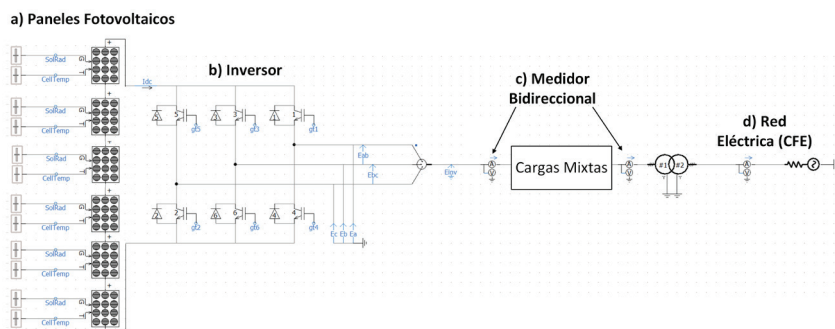


Figura 5. Diagrama eléctrico simplificado de la Micro red propuesta

cual implica una gran inversión a los proyectos de energías renovables en el país durante la próxima década.

LIMITACIONES PARA DESARROLLAR SG EN MÉXICO

A partir de la reforma energética en el país surge la necesidad de evolucionar la red tradicional mexicana a una SG. Esta evolución requiere de tiempo, inversión económica, desarrollo tecnológico y participación activa de los usuarios. Existen diversas limitaciones para el desarrollo de la SG en México:

- **Infraestructura de medición avanzada.** Es necesario contar con la infraestructura de medición avanzada en toda la red eléctrica, para ello la federación apenas ha hecho inversiones en proyectos pilotos de medidores inteligentes.
- **Subsidio gubernamental para la inversión en energías renovables.** No existe el apoyo gubernamental suficiente para el desarrollo de fuentes renovables de energía, aunado a ello el bajo poder adquisitivo de gran parte de la población. FIDE otorga fideicomisos para la instalación de fuentes de energías renovables para los usuarios de CFE, pero esta inversión no es viable para la mayoría de los usuarios de servicio básico.
- **Normas que regulen la instalación de fuentes de energía fotovoltaica.** En los últimos años se han instalado paneles solares a nivel industrial y doméstico, pero no existen normas que regulen estas instalaciones, ocasionando, entre otras cosas, la inyección de armónicos a la red que modifican la forma de onda de la tensión de salida y que pueden exceder el límite de Distorsión Armónica Total (THD, por sus siglas en inglés) recomendada en el estándar IEEE 519-2014 que va de 1.5% a 8% dependiendo del nivel de voltaje, lo cual hace necesaria la instalación de filtros para corregir el problema.
- **Dependencia tecnológica.** México no cuenta con el desarrollo de tecnología propia para el análisis de la viabilidad de la evolución de la red eléctrica a una SG, por lo cual el desarrollo de nuevos proyectos involucra una dependencia tecnológica con países desarrollados.
- **Concientización.** Los niveles de educación y cultura en el país, ocasionados por la falta de empleos y la pobreza dejan de lado la importancia del uso de fuentes de energías renovables, el compromiso ambiental, el ahorro y optimización de la energía, mostrando indiferencia sobre la necesidad de una SG en el país.
- **Experiencias internacionales.** México se basa en las experiencias internacionales en cuanto a reformas

energéticas y desarrollo de la SG, pero esta comparativa es ambigua, ya que no son países con las mismas condiciones y recursos.

FACTIBILIDAD DE INSTALACIÓN DE UNA MICRO GRID

La actual situación energética en el país y su necesidad de generación por medios renovables requiere de la interconexión de arreglos fotovoltaicos a la red. Como ejemplo de factibilidad de una MG basada en generación fotovoltaica, se presenta un estudio de consumo real, con el fin de comparar la cantidad de energía que se requiere para alimentar un comercio de la ciudad de Morelia y la energía que puede ser generada con paneles fotovoltaicos. El lugar propuesto para el estudio de la MG es llamado "Comercio Morelia", ubicado en 19.684° de latitud y -101.615° de longitud.

La Tabla 1 muestra los consumos del lugar elegido durante el periodo del 07 de febrero de 2013 al 08 de diciembre de 2014. El promedio de consumo bimensual durante el periodo evaluado es de 348.36 kWh con un importe de \$1,304.64. De acuerdo con la plataforma de *Energía Solar y Meteorología Superficial de la NASA*, la irradiación solar promedio del lugar fue de 5.58 kWh/m²/día. En la Tabla 2 se observa la irradiación solar promedio mensual del lugar (Stackhouse y Whitlock, 2008).

El número de paneles necesarios para generar la energía que cubra los consumos mostrados en la Tabla 1, puede calcularse dividiendo la energía total que debe generarse (E_T) entre la energía que genera un panel solar (E_p) (Pareja, 2010). La energía que genera un panel solar se obtiene al multiplicar la potencia pico que genera el panel solar (P_p) por las horas de irradiación solar en el lugar bajo estudio (HPS); este producto se ve afectado por un factor de pérdidas (P_g).

El cálculo del número de paneles solares (N_T) se basa en (Pareja, 2010), donde se plantea la generación por día. Dado que, en el presente estudio, el cálculo de energía total (E_T) se realiza con los datos de la Tabla 1, se considera la generación necesaria para un año, por lo que se adiciona el número de días (d) en los que el panel debe generar la energía. El cálculo de paneles solares se resume en la ecuación 1.

$$N_T = \frac{E_T}{E_p} = \frac{E_T}{HPS * P_p * d * P_g} \quad (1)$$

De acuerdo con la energía consumida en promedio durante un año por el usuario (2090.18 kW), la potencia de los paneles seleccionados (250W), número de días igual a 365, la irradiación promedio de la ubicación de "Co-

Tabla 1. Consumos del 07 de marzo de 2013 al 08 de diciembre de 2014 para “Comercio Morelia”

Facturación	Tipo	kWh	Importe
del 07/10/14 al 08/12/14	Normal	397	\$1,476.00
del 07/08/14 al 07/10/14	Normal	332	\$1,268.00
del 06/06/14 al 07/08/14	Normal	321	\$1,224.00
del 07/04/14 al 06/06/14	Normal	322	\$1,222.00
del 06/02/14 al 07/04/14	Normal	338	\$1,281.00
del 06/12/13 al 06/02/14	Normal	302	\$1,156.00
del 08/10/13 al 06/12/13	Normal	344	\$1,302.00
del 07/08/13 al 08/10/13	Normal	397	\$1,443.00
del 07/06/13 al 07/08/13	Normal	341	\$1,258.00
del 08/04/13 al 07/06/13	Normal	389	\$1,449.00
del 07/02/13 al 08/04/13	Normal	349	\$1,272.00
Promedio bimensual		348.36	\$1,302.64

Tabla 2. Radiación Solar para “Comercio Morelia”

Mes	Radiación Solar kWh/m ² /día (Stackhouse y Whitlock, 2008)
Enero	4.89
Febrero	5.86
Marzo	6.9
Abril	7.06
Mayo	6.64
Junio	5.61
Julio	5.3
Agosto	5.25
Septiembre	4.87
Octubre	4.91
Noviembre	5.03
Diciembre	4.68
Promedio anual	5.58

mercio Morelia” (5.58 kWh/m²/día) y considerando pérdidas del 30%, el número de paneles es:

$$N_T = \frac{2090.18 \text{ kWh}}{5.58 \frac{\text{h}}{\text{día}} * 0.250 \text{ kW} * 365 \text{ días} * 0.7} = 5.86 \text{ paneles}$$

El resultado indica que deberían utilizarse 5.86 paneles, por lo que se recomiendan 6 paneles. De esta manera, se estima que los paneles pueden proporcionar la energía necesaria. Nótese que las HPS se obtienen de la irradiación solar normalizando su valor a potencia por m², es decir, se divide entre 1kW/m²

La generación energética estimada en un mes (G) se obtiene a partir de la ecuación 2. Nótese que es similar al cálculo realizado en (1) para E_p , salvo que se calcula considerando la energía generada por el total de paneles solares (P_{paneles}).

$$G = HPS * P_{\text{paneles}} * d * P_G \quad (2)$$

El porcentaje de producción respecto del consumo (% P_{rd}), al ser una ganancia de energía, se calcula dividiendo la generación anual del usuario (G_{anual}) entre el Consumo anual del usuario (C_{anual}), véase ecuación 3.

$$\%P_{rd} = \frac{G_{\text{anual}}}{C_{\text{anual}}} * 100 \quad (3)$$

Por medio de la ecuación 2 y con base en los valores de irradiación solar mensuales (columna 3), mostrados en la Tabla 2, se obtiene la generación estimada para el lugar de estudio (Tabla 3, columna 5). Nótese que, en la segunda columna de la Tabla 3, se muestra el consumo real mensual de “Comercio Morelia”, el cual se obtuvo con base en los registros de consumo disponibles en el

lugar de estudio. Dado que los datos proporcionados son bimensuales (Tabla 1), se calcula el consumo promedio por mes. La diferencia anual entre generación estimada total y consumo real total es de 71.69 kW, que equivale a 5.97 kW mensuales.

El estudio para la alimentación energética del lugar considera la instalación de 6 paneles solares marca Solartec modelo SP60 de 250W, cuyas especificaciones se muestran en la Figura 6 (Figura 6a para una celda y Figura 6b para un módulo). La Figura 6c representa el arreglo fotovoltaico completo.

Se estima que este arreglo puede alimentar 103.5% del consumo anual del lugar, considerando pérdidas de instalación de 30%. El inversor utilizado fue el Fronius Galvo 1.5-1, debido a que trabaja con una potencia de entrada de 1.2kW a 2.4kW, así como una corriente máxima de entrada de 13.4A; la potencia de salida del arreglo fotovoltaico tiene un valor nominal de 1.5 kW.

En la Figura 7 se puede observar el probable comportamiento de la generación de los paneles solares, propuesto como ejemplo de implementación, comparado con las lecturas de CFE.

Con la implementación de los medidores inteligentes el usuario pagaría a CFE únicamente el resto del consumo anual, el cual estaría distribuido en cada facturación. Cuando la generación exceda el consumo en cierto periodo, este exceso se guarda y en los periodos

en los que el consumo sea mayor se tomaría en cuenta dicho exceso.

Debe notarse en la Figura 7 que los valores de generación fueron normalizados para facilitar su lectura y comparación entre valores consumidos reales y generados estimados.

Para determinar los tiempos en que la generación excede al consumo y se regresa energía a la red comercial, es necesaria la implementación de medidores inteligentes bidireccionales que sean capaces de monitorear constantemente los niveles de consumo. En este caso, la Micro Red alimenta totalmente a la zona bajo estudio. Por otro lado, cuando el consumo es mayor que la generación, el medidor inteligente debe conectarla nuevamente a la red comercial.

FACTURACIÓN POSTERIOR A LA INSTALACIÓN DE LOS PANELES SOLARES

En la Figura 8a se presenta un recibo de CFE correspondiente al periodo de diciembre-febrero de 2015, con un consumo de 267kWh, tarifa tipo 02 de 3 hilos, una facturación de \$1018.00 MN, un promedio diario de 4.23 kWh de consumo a un costo de \$16.15 MN. Esta facturación es previa a la instalación de paneles solares en "Comercio Morelia". A finales de enero de 2015 se instalaron 6 módulos en serie marca Solartec modelo S60MC-250 de 250 watts y un inversor Fronius Galvo

Tabla 3: Comparativa entre generación y consumo para "Comercio Morelia"

Mes	CFE	Sistema solar fotovoltaico		
	Consumo real [kWh]	Irradiación [kWh/m ² /día]	Días del mes	Generación estimada [kWh]
Enero	151	4.89	31	159.17
Febrero	171.75	5.86	28	172.28
Marzo	171.75	6.9	31	224.60
Abril	177.75	7.06	30	222.39
Mayo	177.75	6.64	31	216.13
Junio	165.50	5.61	30	176.72
Julio	165.50	5.3	31	172.52
Agosto	182.25	5.25	31	170.89
Septiembre	182.25	4.87	30	153.40
Octubre	185.25	4.91	31	159.82
Noviembre	185.25	5.03	30	158.44
Diciembre	151	4.68	31	152.33
Totales	2067	5.58 (promedio)		2138.69

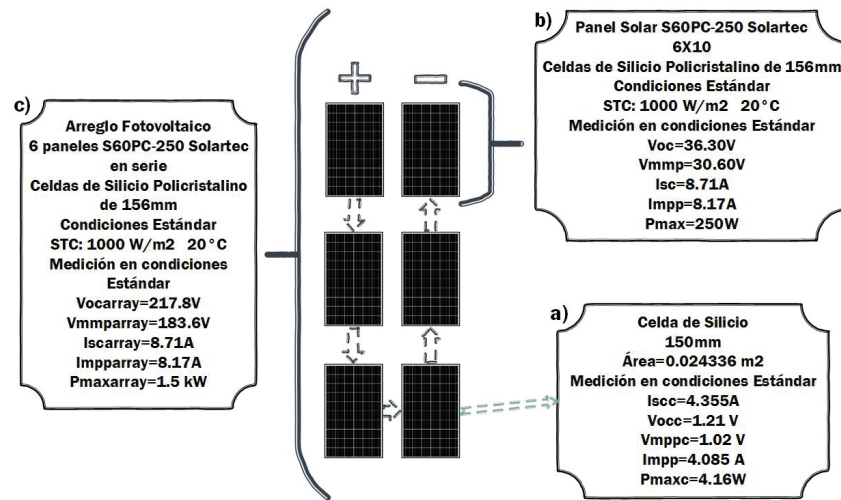


Figura 6: Panel Solartec S60PC-250 y Celda de Silicio de 156mm (Solartec, 2017)

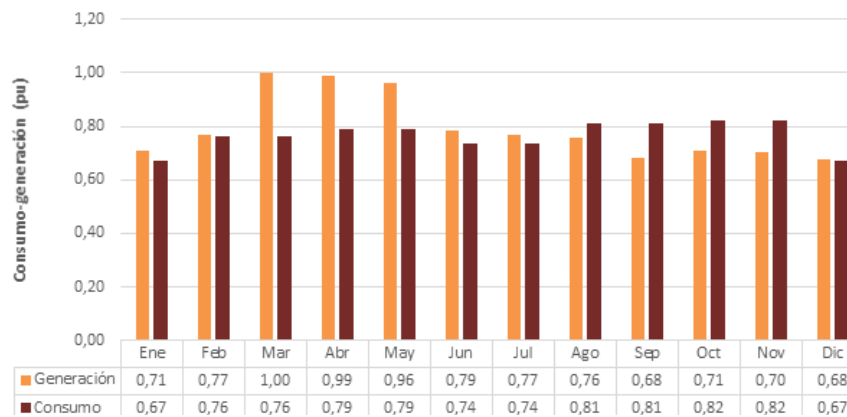


Figura 7. Comportamiento de generación estimada y consumo real mensual

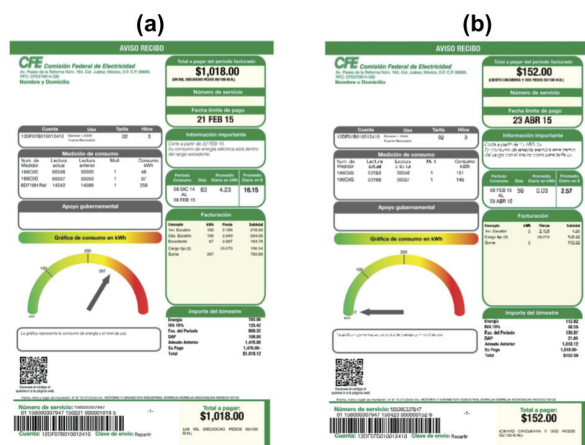


Figura 8. Recibo de CFE para "Comercio Morelia": a) sin el uso de módulos fotovoltaicos y b) después de instalar el arreglo fotovoltaico

1.5-1, dando como resultado la facturación mostrada en la Figura 8b, con un consumo de 2kWh, y un costo de \$152.00 MN.

En la Tabla 4 se muestra el detalle del consumo del periodo febrero-abril de 2015, que tuvo un promedio diario de 0.03kWh a un costo diario promedio de \$2.57

pesos. El costo por los 2 kWh fue de \$4.29 MN, el resto corresponde a cargos correspondientes a la tarifa tipo 2 de CFE, esta se aplica a todos los servicios que destinen energía en baja tensión a cualquier uso, con demanda hasta de 25 kWh. Las cuotas aplicables por el periodo son un cargo fijo de \$108.62 MN, \$2.04 para cada uno de

Tabla 4. Datos de facturación posterior a la instalación

Periodo	Promedio diario en kWh	Promedio diario en \$	Cargo Fijo de CFE	\$108.62
			Energía en el 1er escalón	\$4.29
			Energía	\$112.82
59 días	0.03	2.57	IVA	\$18.05
			DAP	\$21.60
			Total	\$152.59

Tabla 5. Recuperación económica

Recuperación Económica			
	Cantidad	Precio	Total
Inversor	1	\$24500.00	\$24500.00
Panel	6	\$4000.00	\$24000.00
	Total:		\$48500.00
Ahorro Anual		\$8100.00	
Retorno Simple		5.99 años	

Tabla 6. Comparativa de generación y consumos reales durante el periodo febrero 2015 - junio 2016

Periodo	9feb-9abr 2015	9abr-9jun 2015	9jun-9ago 2015	9ago-9oct 2015	9oct-9dic 2015	9dic 2015-9feb 2016	9feb-9abr 2016	9abr-9jun 2016
Generación Real [kWh]	149	125	145	212	230	249	242	232
Consumo Real [kWh]	151	166	194	272	264	242	256	236

los primeros 50kWh, \$2.466 por cada uno de los siguientes 50 kWh y \$2.716 por cada kWh adicional a los anteriores, así como \$18.05 de IVA y \$21.60 del derecho al alumbrado público (DAP).

RECUPERACIÓN ECONÓMICA

Los paneles solares S60PC-250 tienen un costo aproximado de \$4,000.00 MN (IVA incluido), el inversor Fronius Galvo tiene un costo aproximado de \$24,500.00 MN (IVA incluido), en la Tabla 5 se muestra que la recuperación económica se da en aproximadamente 6 años. Ello representa una buena inversión, ya que el tiempo de recuperación para que un sistema sea viable es de máximo 7 años, y la vida útil de los paneles solares y sus accesorios es generalmente de 20 años. Si se incluye el costo de la inversión para instalar el medidor inteligente que es de \$3,345.19 (de acuerdo con el presupuesto del proyecto para Infraestructura de Medición Avanzada del Programa de Redes Inteligentes de la SE-

NER (CITCEA_UPC, 2013)), el retorno simple se amplía a 6.4 años, el cual sigue siendo viable.

COMPORTAMIENTO REAL DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO INSTALADO

El comportamiento real del sistema fotovoltaico durante el periodo de febrero 2015- junio 2016 se muestra en la Tabla 6. El consumo acumulado durante el periodo fue de 1781 kWh, mientras que la generación acumulada fue de 1584 kWh, lo que representa una diferencia de 12.3 kWh mensuales.

En la Figura 9 se observa el comportamiento normalizado de la generación real del arreglo fotovoltaico instalado y el consumo real del usuario de acuerdo con los registros de CFE durante los meses febrero 2015-junio 2016. Puede observarse que la mayor diferencia se encuentra en el periodo agosto-octubre, que es de 0.22 pu, mientras que el promedio de diferencia entre consumo y generación es de 0.12 pu.

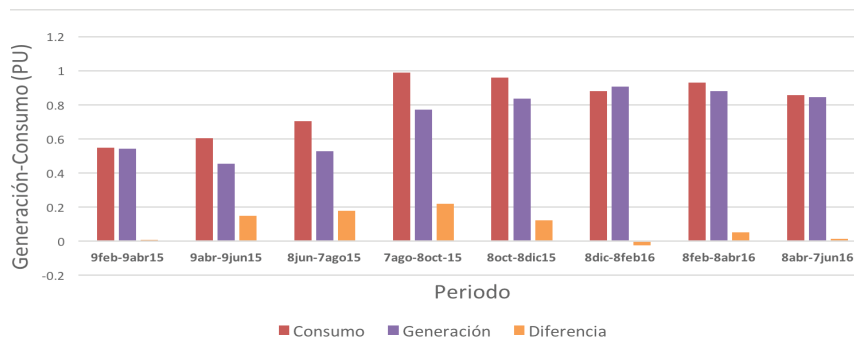


Figura 9. Comparativa entre consumo real y generación real

La menor diferencia entre consumo y generación reales se dio durante el primer bimestre posterior a la instalación de los paneles solares. La diferencia fue de 2kWh que equivale a 0.01 pu. Este valor evidencia que el dimensionamiento de los paneles solares fue acertado al permitir que la generación de voltaje sea cercana a la necesidad de consumo. En los periodos posteriores a la instalación de los paneles solares el consumo se incrementó respecto a la generación, esto se atribuye principalmente a que el negocio “Comercio Morelia”, estuvo en condiciones de instalar nuevas cargas, pero debe destacarse que la diferencia promedio de 12.3 kWh por periodo (6.14 kWh mensuales) justifican la instalación del sistema fotovoltaico.

CONCLUSIONES

En México, como en la mayoría de los países del mundo, existe la necesidad de invertir en la red eléctrica, que por años ha proveído a todos los usuarios, principalmente a los industriales, quienes representan el mayor consumo de energía eléctrica a nivel nacional. El país ha iniciado la transición de una red tradicional a una SG con el uso y promoción de las fuentes de energía renovables, de las cuales destaca la fotovoltaica, ya que el país cuenta con un potencial privilegiado de energía solar.

Por otro lado, el marco normativo que surge a partir de la reforma energética de 2014 convierte al país en un lugar atractivo para la inversión en el ámbito eléctrico.

El uso de fuentes de energía renovables dentro del concepto de Micro Redes (MG) aisladas es factible para llevar la energía a lugares de difícil acceso con redes convencionales o proporcionar medios de generación alternativos que permitan ahorros significativos a usuarios residenciales o microempresas.

Evolucionar la red tradicional actual a una Smart Grid (SG), es un proceso que requiere de fuertes inversiones económicas y tecnológicas principalmente, sin embargo, el uso de medidores bidireccionales, en el

concepto de MG, representa uno de los primeros pasos para incursionar en el concepto de SG.

El caso de estudio fue realizado con módulos fotovoltaicos comerciales en el país, sin embargo, existen módulos con mejores características, como mayor eficiencia y más años de vida útil, lo cual implica una mayor inversión.

REFERENCIAS

- Andersson, G., Dursun, K., Hauge, B., Bremdal, B., Nourbakhsh, G. (2013). Establishing sustainable and reliable smart grids, en IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS). IEEE Conference Publications, Aachen, Germany, IEEE, 138-143.
- Blumsack, S. y Fernandez, A. (2012). Ready or not, here comes the smart grid. *Energy*, 37(1): 61-68, enero.
- CITCEA – UPC (Universitat Politècnica de Catalunya). (2013). Smart Grids: Tecnologías prioritarias, Barcelona, España: FUNSEAM.
- Erol, M., Kantarci, B., Mouftah, H. (2011). Cost-Aware Smart Micro-grid Network design for a sustainable smart grid, en IEEE GLOBE-COM Workshops (GC Wkshps), (1er, Houston, TX, USA) IEEE Conference Publications, Houston, TX, USA, IEEE, 1178-1182.
- Explicación ampliada de la Reforma Energética, México, (2014). Recuperado el 21 de noviembre de 2016 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/10233/Explicacion_ampliada_de_la_Reforma_Energetica1.pdf
- Foro del Comité Nacional Mexicano de la IEC (2013). (1er, CDMX, México) Medidores inteligentes: Mapa de ruta de normas técnicas, CDMX, México, 2013.
- Giordano, V., Gangale, F., Fulli, G., Jiménez, M.S, Onyeji, I., Colta, A., Papaioannou, I., Mengolini, A., Alecu, C., Ojala, T. (2011). Smart Grid projects in Europe: lessons learned and current developments, Luxembourg, Publications Office of the European Union.
- Gobierno Federal, Decreto por el que se expide la Ley de la Industria Eléctrica y el Decreto de la nueva Ley de la CFE. México (2014). Recuperado el 14 de octubre de 2016 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5355986&fecha=11/08/2014

- Han, W., Mabey, M., Ahn, G.H. (2013). Simulation-based validation for smart grid environments, en International Conference on Information Reuse and Integration (IRI), (14o, San Francisco, CA, USA) IEEE Conference Publications, San Francisco, CA, USA, IEEE.
- Hartono, B., Budiyo, Y., Setiabudy, R. (2013). Review of micro-grid technology, en International Conference on QIR (Quality in Research), (1er, Yogyakarta, Indonesia) IEEE Conference Publications, Yogyakarta, Indonesia, IEEE, 127-132.
- Hoja de datos de panel solar S60PC de Solartec. México. Recuperado el 17 de agosto de 2017 de <http://solartec.mx/upload/S60PC.pdf>
- Inga, E. (2012). Redes de comunicación en Smart Grid, *INGENIUS Revista en Ciencia y Tecnología*, 7, 36-54. Recuperada el 19 de enero de 2017 de [http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8411/1/Redes de comunicación en smart grid.pdf](http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/8411/1/Redes%20de%20comunicaci%C3%B3n%20en%20smart%20grid.pdf)
- Momoh, J. (2012). *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*, 1ª ed. New Jersey, USA: Wiley.
- Ovando, J., Román, R., Martínez, M., Jiménez, E. (2013). Potencial aprovechamiento actual de las energías renovables en México. *Energías Renovables*, 18(4). Recuperado el 18 de enero de 2017 de http://www.anes.org/cms/contenido/docs/revista/RER_122018.pdf
- Pareja, M. (2010). *Energía solar fotovoltaica: Cálculo de una instalación aislada*. 2ª ed. Barcelona, España: Marcombo.
- Peralta A. y Amaya, F. (2013). Evolución de las redes eléctricas hacia smart grid en países de la región de Andina. *Educación en Ingeniería*, 8(15). Recuperado el 15 de febrero de 2017 de <https://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/285>
- Presupuesto de Egresos de la Federación para el Ejercicio Fiscal 2017. Diario Oficial de la Federación, México, 2016. Recuperado el 18 de enero de 2017 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5463184&fecha=30/11/2016
- Programa Sectorial de Energía 2013-2018. Diario Oficial de la Federación, México, 2013. Recuperado el 18 de enero de 2017 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5326587&fecha=13/12/2013
- Programa Nacional de Infraestructura 2014-2018. Diario Oficial de la Federación, México, 2014. Recuperado el 18 de enero de 2017 de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5342547&fecha=29/04/2014
- Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables, México, 2014. Recuperado el 11 de enero de 2017 de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/249/PEAER-2014.pdf>
- Sánchez, V. (2014). Sonora podría abastecer de energía a todo México con tecnología fotovoltaica, CONACyT Agencia Informativa, Conacyt. Recuperado el 18 de diciembre de 2016 de <http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/329-reportaje-con-la-radiacion-solar-que-recibe-el-1-de-sonora-se-podria-generar-energia-suficiente-para-todo-el-pais>
- Santacana, E., Rackliffe, G., Tang, L., Feng, X. (2010). Getting Smart. *IEEE Power and Energy Magazine*, 8(2): 41-48.
- Stackhouse, P., Jr, Whitlock, C.H. (2008). Surface meteorology and solar energy, Atmospheric Science Data Center, NASA, USA, 2008. Recuperado el 10 de octubre de 2016 de <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>
- Secretaría de Energía, Programa de Redes Eléctricas Inteligentes, CDMX, SENER (2017). Recuperado el 17 de agosto de 2017 de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/250609/2017_Programa_de_Red_Elctricas_Inteligentes.pdf
- Toledo, E., Melgoza, J. De la Garza, L., Laviada, E., Trujillo, M., Sánchez, V., Corral, R., Amezcua, H., Reyes, R., Rojo, G. (1994). *Historia de la industria eléctrica en México*. 1ª ed. México: Universidad Autónoma Metropolitana, pp. 15-305.
- Wissner, M. (2011). The Smart Grid-A saucerful of secrets? *Applied Energy*, 88(7): 2509-2518.