

Integración de la generación distribuida a la red eléctrica. Análisis en estado estable

Antonio José Ramón Martínez Rangel, Manuel Reta Hernández, Francisco Bañuelos Ruedas

Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica.
Av. López Velarde 801, Col. Centro, Zacatecas, Zac., México, 98000.
mtzr2008@gmail.com

2016 Published by *DIFU*_{100ci@} <http://difu100cia.uaz.edu.mx>

Resumen

La generación de energía eléctrica a partir de fuentes de generación distribuida (GD) ha ido incrementando su utilización de manera gradual las últimas décadas. Dentro de los sistemas eléctricos, la integración de fuentes de generación distribuida requiere de una atención especial, debido a la propia naturaleza de las energía renovables. Idealmente, la GD interconectada a la red eléctrica centralizada no debe ocasionar ningún problema, por lo que es necesario que siempre se mantengan los niveles de estabilidad en la red. El documento presenta el análisis en estado estable de una posible micro red conectada a la red eléctrica del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas; el objetivo es verificar el estado de operación de la micro red interactuando con la red principal del campus, y de los diferentes componentes de la red principal (líneas de distribución, transformadores y buses).

Palabras clave: Análisis en estado estable, Flujos de potencia, Generación distribuida, Micro red.

1. Introducción

Desde 1990 ha habido un especial interés en conectar fuentes de generación distribuida (GD) a las redes de distribución [1]. Esto implica entender la operación y el control de las diferentes plantas de generación. Usualmente es requerido un estudio para evaluar el rendimiento del sistema eléctrico con las nuevas fuentes de generación, bajo condiciones normales y anormales de operación. El rendimiento de la red junto con las fuentes de GD es estudiado con programas computacionales.

El objetivo principal de un sistema eléctrico es satisfacer la demanda de los consumidores; esto representa un gran reto para el sistema en la parte de diseño y en la parte operacional. En un sistema tan complejo se toman en cuenta algunas políticas operacionales que garanticen la estabilidad del sistema; por ejemplo, la magnitud de los voltajes en los nodos y la frecuencia del sistema deben mantenerse dentro de los límites establecidos, las formas de onda de corriente y voltaje deben mantener su forma sinusoidal, las líneas de transmisión y distribución deben operar bajo los límites térmicos y de estabilidad, y las interrupciones deben ser

mínimas. Además, los generadores debe satisfacer la demanda y las pérdidas, y operar dentro de los límites especificados de potencia activa y reactiva.

El estudio de flujos de potencia en los sistemas eléctricos permite determinar las condiciones de operación del sistema en estado estable, cuyo estado es determinado al encontrar los flujos de potencia activa y reactiva, la magnitud de voltaje y su ángulo de voltaje en todos los buses para ciertas condiciones de carga. Si el análisis arroja que las magnitudes de los voltajes están fuera de límites en uno o más puntos de la red se toman las medidas necesarias para regular el voltaje. Similarmen- te, si el análisis muestra que los flujos de una línea de transmisión están fuera de la capacidad de carga, se toman acciones de control para corregir el desbalance. Los estudios de flujos de potencia también permiten analizar las posibles expansiones futuras de la red [2].

2. Estado del arte

El problema de flujos de potencia reside en determi- nar el estado estable de los voltajes complejos de todos los buses de la red, además de calcular los flujos de potencia activa y reactiva de las líneas de transmisión y transformadores. El sistema eléctrico es representado por un conjunto de ecuaciones no lineales cuya solución numérica es encontrada mediante técnicas iterativas [3].

El problema de flujos de potencia parte del diagrama unifilar del sistema, de donde se pueden obtener los datos de entrada para la solución. Los datos de entrada consisten en obtener parámetros en los buses, líneas de transmisión y transformadores. Para cada bus del sistema hay cuatro variables asociadas, magnitud de voltaje V_k , ángulo de fase δ_k , potencia real neta P_k y la potencia reactiva suministrada al bus Q_k . En cada bus, dos de esas variables son especificadas como datos de entrada, y los otros dos datos son calculados por el programa de flujos de potencia. La figura 1 muestra un bus con las cuatro variables mencionadas.

Por conveniencia, la potencia entregada al bus k es separada en términos de potencia generada y potencia de carga como se indica en las Ec. (1) y (2).

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (2)$$

Para la selección de las variables de bus se debe analizar y entender la categorización de cada bus, de acuerdo con los tres tipos de buses o barras existentes [3]-[4].

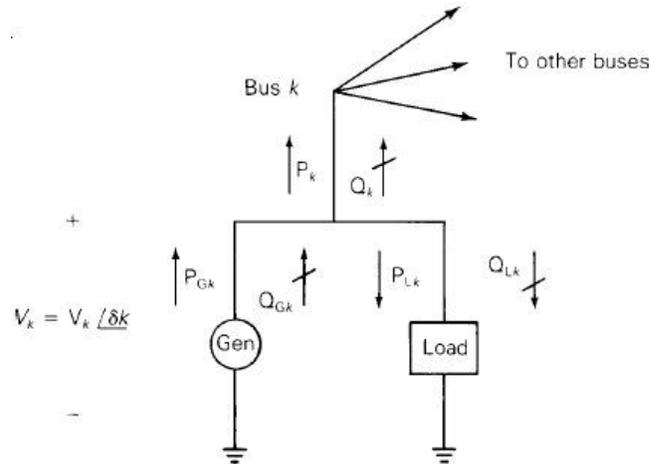


Figura 1. Bus de variables V_k , δ_k , P_k y Q_k

Bus slack o Bus de compensación. El bus slack es refe- renciado como un bus en el cual se conocen los valores conocidos de V_k y δ_k , típicamente $1\angle 0^\circ$ en por unidad, y los valores de P_k y Q_k son calculados.

Bus de carga (PQ). Los valores de P_k y Q_k son cono- cidos y los valores V_k y δ_k son calculados. Estos nodos no cuentan con generadores conectados.

Bus de voltaje controlado (PV). P_k y V_k son los datos conocidos del bus y los valores de potencia reactiva y ángulo de fase son calculados (Q_k y δ_k).

Las líneas de transmisión se representan por su circui- to π equivalente monofásico, con sus valores relevantes de impedancia serie y admitancia en derivación, los bus- es a los que la línea es conectada y el valor máximo de potencia reactiva [4]-[5].

El estudio de flujos de potencia comienza con la cons- trucción de la matriz de admitancias " Y_{bus} ", la cual se construye a partir de los datos de admitancia de los elementos del sistema, y tiene como parámetros en la diagonal principal, los elementos Y_{kk} que corresponden a la suma de admitancias conectadas al bus k , mientras que en los elementos fuera de la diagonal son elemen- tos Y_{km} [3].

La evaluación del estado estable de un sistema de po- tencia se enfoca en escribir las ecuaciones de cada bus de la red para mostrar la relación entre las potencias de generación P_G , la carga o demanda P_L , y las poten- cias intercambiadas (P_{calc}) a través de los elementos de transmisión conectados a los buses, donde la suma de las potencias debe de ser cero. Este enfoque permi- te llegar a la definición del error (ΔP_k), definido como

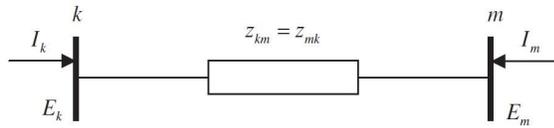


Figura 2. Impedancia equivalente

el valor programado ($P_{k,prog}$) menos el valor calculado ($P_{k,calc}$) [2]-[5] como se indica en las Ec. (3) y (4).

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_{k,prog} - P_{k,calc} \\ &= P_{Gk} - P_{Lk} - P_{k,calc} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q &= Q_{k,prog} - Q_{k,calc} \\ &= Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_{k,calc} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Para el desarrollo de las ecuaciones de flujo de potencia es necesario encontrar la relación entre las corrientes inyectadas y los voltajes de los buses. La figura 2 muestra dicho valor de corriente compleja del bus, denotada por I_k , expresada en términos del voltaje complejo de buses, E_k y E_m (Ec. (5) y (6)).

$$I_k = \frac{1}{Z_{km}}(E_k - E_m) = Y_{km}(E_k - E_m) \quad (5)$$

$$I_m = \frac{1}{Z_{mk}}(E_m - E_k) = Y_{mk}(E_m - E_k) \quad (6)$$

La potencia aparente compleja inyectada al bus k (Ec. (7)) consiste en las componentes de la potencia activa y reactiva y puede ser expresada en función del voltaje de nodo y la corriente inyectada al bus.

$$S_k = P_k + jQ_k = E_k I_k^* = E_k(Y_{kk}E_k + Y_{km}E_m)^* \quad (7)$$

Un sistema de potencia que consiste en más de dos buses y elementos de transmisión, se puede expresar en términos más generales en cuanto a los flujos netos de potencia inyectados al bus analizado (potencia activa y reactiva). Esto llama a las Ec. (3) y (4) a ser expresadas en términos más generales; con los flujos netos de potencia inyectados al bus k expresados como la suma del flujo de potencias de cada uno de los elementos de transmisión conectados a dicho bus. La figura 3 muestra los balances de potencia, activa y reactiva.

Las ecuaciones (3) y (4) son reescritas como se indica en las Ec. (8) y (9):

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - \sum_{i=1}^n P_{k,calc}^i = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - \sum_{i=1}^n Q_{k,calc}^i = 0 \quad (9)$$

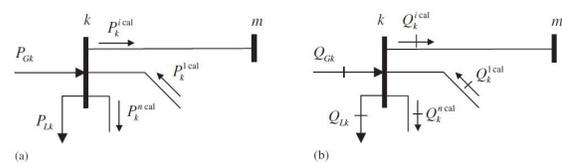


Figura 3. Balance de potencias en el bus k : (a) potencia activa, (b) potencia reactiva.

La potencia compleja que fluye a través de los elementos de transmisión se puede calcular a partir de los parámetros que interactúan entre dos nodos, como las admitancias, susceptancias, conductancias y voltajes. Los modelos correspondientes a la potencia activa y reactiva se muestran en las Ec. (10) y (11)

$$P_{k,calc} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (10)$$

$$Q_{k,calc} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (11)$$

donde: V es el voltaje, G es la conductancia, B es la susceptancia y θ es el ángulo de fase.

2.1. Método de Newton-Raphson

El estudio de flujos de potencia es analizado comúnmente por el método Newton-Raphson, caracterizado por ser un método de rápida convergencia [2]. La base del método es la expansión de la serie de Taylor para una función de dos o más variables, para resolver el problema de flujos de potencia [5]. El método resuelve un conjunto de ecuaciones no lineales (Ec. (12)).

$$F(X) = \begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots) = 0 \\ f_2(x_1, x_2, \dots) = 0 \\ \vdots \\ f_N(x_1, x_2, \dots) = 0 \end{cases} \quad (12)$$

donde F es el conjunto de n ecuaciones no lineales y X es el vector de n variables de estado desconocidas.

El método consiste en determinar el vector de variables de estado X mediante la expansión de la serie de Taylor de $F(X)$ sobre una estimación inicial de $X(0)$ (Ec. (13)).

$$F(X) = F(X^{(0)}) + J(X^{(0)})(X - X^{(0)}) + \text{términos de orden mayor} \quad (13)$$

donde $J(X^{(0)})$ es una matriz de derivadas parciales de primer orden de $F(X)$ con respecto a X , evaluado en $X = X(0)$.

La Ec. (13) en forma expandida es expresada en (14).

$$\begin{bmatrix} f_1(X^{(1)}) \\ f_1(X^{(1)}) \\ \vdots \\ f_n(X^{(1)}) \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} f_1(X^{(0)}) \\ f_1(X^{(0)}) \\ \vdots \\ f_m(X^{(0)}) \end{bmatrix} + \left. \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \right|_{X=X^{(0)}} \begin{bmatrix} X_1^{(1)} - X_1^{(0)} \\ X_2^{(1)} - X_2^{(0)} \\ \vdots \\ X_n^{(1)} - X_n^{(0)} \end{bmatrix} \quad (14)$$

donde $X^{(1)}$ representa al valor de las variables de estado calculadas después de la primera iteración.

La forma generalizada de la expresión anterior para el caso de la iteración (i) es expresada en Ec. (15).

$$F(X^{(0)}) \approx F(X^{(i-1)}) + J(X^{(i-1)})(X^{(i)} - X^{(i-1)}) \quad (15)$$

donde $i = 1, 2 \dots$. Además, si se asume que $X(i)$ está suficientemente cercano a la solución X^* , entonces $F(X^{(i)}) \approx F(X^*) = 0$.

Por tanto, la expresión se convierte en la Ec. (16), al resolver para $X^{(i)}$:

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} - J^{-1}(X^{(i-1)})F(X^{(i-1)}) \quad (16)$$

La solución iterativa puede ser expresada como una función del vector de corrección. Por tanto, la Ec. (17) se reescribe como se expresa en la Ec. (18), y las estimaciones iniciales se actualizan con la Ec. (19).

$$\Delta X^{(i)} = X^{(i)} - X^{(i-1)} \quad (17)$$

$$\Delta X^{(i)} = -J^{-1}(X^{(i-1)})F(X^{(i-1)}) \quad (18)$$

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} + \Delta X^{(i)} \quad (19)$$

Los cálculos se repiten tantas veces como sea necesario usando la mayoría de los datos que se tengan disponibles de X , hasta que el error ΔX esté dentro de la tolerancia prescrita (usualmente es un valor de $1e^{-12}$) [3].

3. Caso de estudio

El caso de estudio analiza una posible micro red conectada a la red eléctrica principal del Campus Siglo XX de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Las micro redes son sistemas eléctricos limitados por fuentes de GD en una área determinada. Usualmente, esta clase de sistemas incluye fuentes de generación renovables y tradicionales, un sistema de cargas o demanda y opcionalmente almacenamiento [6]-[7]. Además, presentan una alternativa para la generación de energía limpia y sustentable, y los beneficios son diversos. La GD permite generar energía cerca de la carga, y puede ser conectada en un amplio rango de niveles de voltaje, desde 120/240 V a 230 kV [8]. Los beneficios de una micro red para el usuario implican el incremento en la confiabilidad, aumento en la calidad de la energía, reducción de las interrupciones, uso eficiente y menor costo de la energía. Para el operador de la red centralizada representan la reducción de pérdidas en líneas de transmisión y distribución, abasto en zonas remotas, liberación de capacidad del sistema, mayor control de la energía, mayor regulación de voltaje, disminución en la inversión y reducción de fallas en el sistema [9]. Además, el uso de fuentes de energía renovable son de fácil adaptación a las condiciones del sitio y contribuyen a la disminución de gases contaminantes.

La micro red propuesta está conformada por tres fuentes de GD, un sistema solar fotovoltaico (SFV), celdas de combustible (CC) y una microturbina. Las fuentes de GD suministran el 80% de la demanda total, y el resto es tomado de la red de Comisión Federal de Electricidad (CFE).

El análisis se realizó con NEPLAN® para encontrar el comportamiento de la micro red conectada a la red eléctrica principal del campus. La figura 4 muestra el diagrama unifilar de la red eléctrica principal del campus cuyos datos de líneas de distribución, parámetros nodales y datos de los transformadores se detallan en [10].

Actualmente, las instalaciones del campus tienen una demanda de 1,153,320 kWh/año, con una carga total instalada es de 2,340.3 kW. La red eléctrica consta de la acometida de CFE, 17 buses, 9 líneas de distribución subterráneas, 8 transformadores y 8 cargas.

3.1. Resultados

La simulación de la red eléctrica principal con los módulos de GD conectados a la red son analizados en este apartado. El SFV se conectó al nodo 11, en el que está conectada la carga más grande. Los generadores

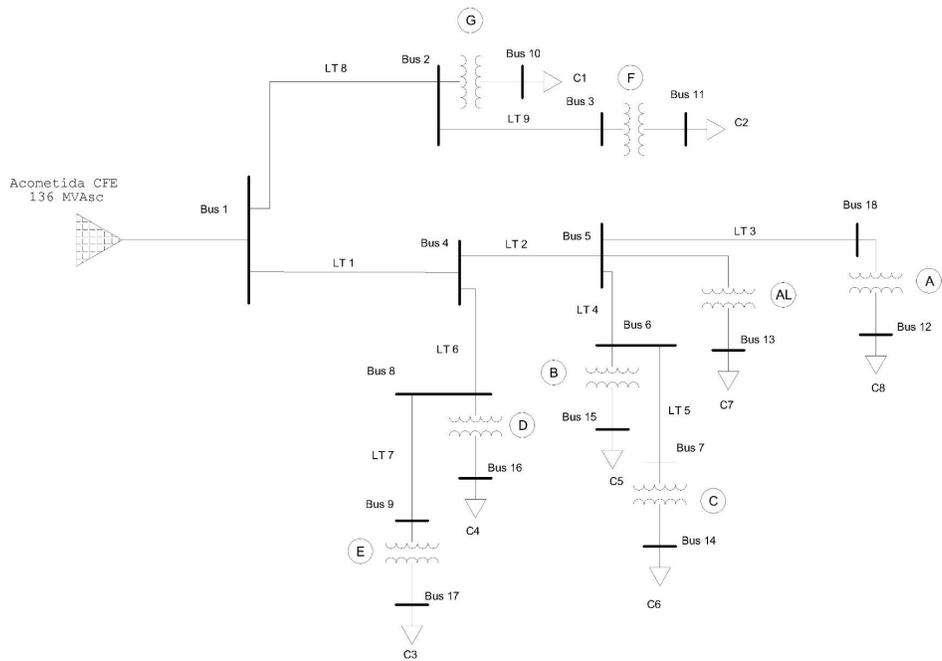


Figura 4. Diagrama unifilar de la red eléctrica del campus.

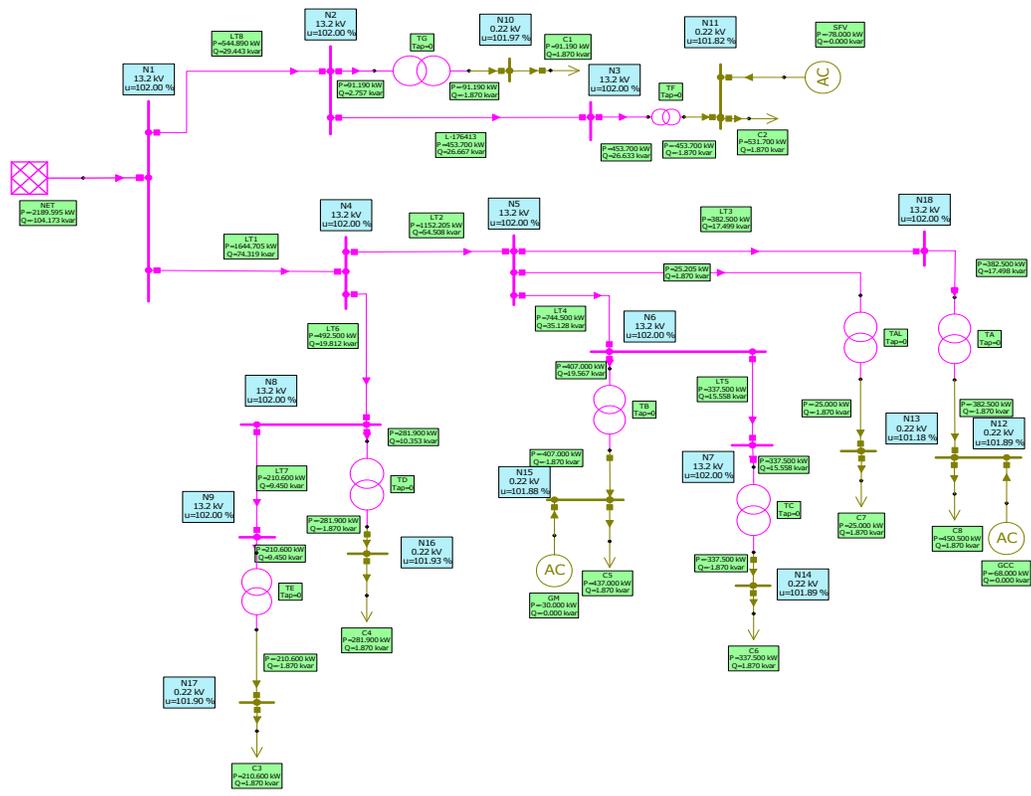


Figura 5. Resultados de flujos de potencia con GD.

de celdas de combustible y microturbina se conectan a los nodos 12 y 15 respectivamente.

Los resultados con GD conectada muestran al nodo slack (acometida de CFE) que aporta 2,189.5 kW y 104.2 kVar. El SFV aporta 78 kW, el sistema de celdas de combustible aportan 68 kW y la microturbina aporta 30 kW. La generación total de potencia activa en la red es de 2,365.5 kW. Los niveles de penetración de cada fuente de generación son: SFV 3.29 %, celdas de combustible 2.87 % y microturbina 1.27 %. Las pérdidas totales en la red fueron de 205 W. La figura 5 muestra los resultados de flujos de potencia con GD conectada a la red.

4. Conclusiones

De los resultados del análisis en estado estable en el escenario de carga y generación máxima, se observa que la micro red presenta un buen comportamiento. Los sistemas de GD conectados a la red principal de distribución operan sin problemas, el sistema es seguro, la regulación de voltaje está dentro de los límites permitidos y las líneas de transmisión y transformadores no tienen problemas de sobrecarga. Para expansiones futuras de la red, el sistema existente sería capaz de agregar nuevas fuentes de GD a la micro red e incrementar la carga sin ningún problema, aunque para asegurarse de tal propósito se realizaría un nuevo estudio de flujos de potencia.

Desde el punto de vista técnico para este caso, la integración de las fuentes de GD es conveniente por los beneficios adquiridos. De esta manera el usuario tendrá el control de sus generadores, decidirá cuando comprar energía a CFE y cuando venderle, así como determinar los tiempos de mantenimiento de la micro red.

Referencias

- [1] N. Jenkins, J.B. Ekanayake and G. Strbac, *Distributed Generation*, London, UK: The institution of Engineering and Technology, pp. 1-20, 2010.
- [2] E. Acha, C.R. Fuerte-Esquivel, H. Abriz-Perez, C. Angeles-Camacho, "Conventional Power Flow," in *FACTS Modelling and Simulation in Power Networks*, WILEY, England, pp. 93-150, 2004.
- [3] J. D. Glover, M.S. sarma and T.J. Overbye, "Power Flows," in *Power Systems Analysis & Design*, CENGAGE Learning, pp. 295-366, 2012.
- [4] E. J. Jiménez Tenorio, "Incorporación de modelos WECS a un programa de flujos dinámicos de potencia," Tesis Maestría, UNAM, México, D.F., 2013.
- [5] J. J. Grainger, W.D. Stevenson Jr, "Soluciones de flujos de potencia," in *Análisis de sistemas de potencia*, McGraw-Hill, México, 1996.

- [6] M. Soshinskaya, W.H.J. Crijns-Graus, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, barriers and success factors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 40, pp. 659-672, Ago. 2014.
- [7] Siemens AC, "Microgrids white paper," Siemens AC, Munich, Germany, 2011.
- [8] A. Rodríguez, "La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional," *Taller sobre Generación Distribuida*, CREG, 2009.
- [9] C. E. Lang, "Generación distribuida, energía de calidad," [Online]. *CONUEE*, 2013. http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/generacion_distribuida_1?page=1. Consulta: 18 de mayo del 2016.
- [10] A. J. R. Martínez-Rangel, "Análisis y diseño de una micro red para el Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas," Tesis de Maestría, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, a presentarse en noviembre de 2016.