

Tendencias en el Manejo Inteligente de Energía en Micro Redes Trends in smart energy management in microgrids

I. A. Díaz-Díaz ^{a,*}, O. A. Domínguez-Ramírez ^b

^aDivisión de Matemáticas Aplicadas, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, 78216, San Luis Potosí, S.L.P., México.

^bÁrea Académica de Computación y Electrónica, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Hidalgo, México.

Resumen

El continuo crecimiento de aplicaciones con sensores, transmisión inalámbrica, comunicación de redes y tecnologías de cómputo ha permitido a los sistemas convencionales de generación y transmisión de energía evolucionar a redes inteligentes. Lo anterior ha ocasionado el aumento de la cantidad de datos acumulados en el sector energético. La integración de las energías renovables, e.g., fotovoltaica y eólica, los sistemas de almacenamiento de energía y los vehículos eléctricos en el sistema de distribución ha generado el concepto de micro redes. Por lo tanto, es necesario establecer estrategias de manejo de energía. En este artículo se presentan las tendencias propuestas para el manejo inteligente de la energía. De manera general se describe una micro red, se discuten los problemas y las tendencias para controlarlas. Además, se presenta un estudio sobre el manejo inteligente de la energía basado en big data.

Palabras Clave:

Big data, manejo de energía, micro redes, red inteligente.

Abstract

The continuous growth of applications with sensors, wireless transmission, network communication and computing technologies has allowed conventional power generation and transmission systems to evolve into smart grids. This has caused the increase in the amount of data accumulated in the energy sector. The integration of renewable energies, e.g., photovoltaic and wind, energy storage systems and electric vehicles in the distribution system has generated the concept of microgrid. Therefore, it is necessary to establish energy management strategies. This paper presents the proposed trends for intelligent energy management. In general, a micro network is described, problems and trends to control them are discussed. In addition, a study on intelligent energy management based on big data is presented.

Keywords:

Big data, energy management, microgrids, smart grid.

1. Introducción

Las fuentes de energía convencionales basadas en el petróleo, el carbón y el gas natural han demostrado ser propulsores del progreso económico. La generación de tecnologías basadas en combustibles fósiles ha sido la selección más común para suministrar energía a la red eléctrica. Lo anterior se debe a la escalabilidad, los costos de inversión competitivos y la operación flexible que presentan este tipo de combustibles. Sin embargo, los combustibles fósiles son no renovables y se han ido agotando conforme la demanda de energía ha aumentado (Oli-

vares et al., 2014). Desafortunadamente, las emisiones de bióxido de carbono debidas a la combustión de combustibles fósiles para la producción de energía y otras actividades antropogénicas impactan negativamente en la sociedad, el medio ambiente y el planeta. La degradación ambiental tiene implicaciones directas en la salud pública y en los efectos resultantes del cambio climático. Incidencias, como el aumento de inundaciones, la pérdida, cada vez mayor, de la biodiversidad y la variabilidad extrema en los patrones meteorológicos han aumentado en los últimos años. Debido a lo anterior y como alternativa para mitigar el cambio climático, se ha alentado intensivamente la

*Autor para correspondencia: irwin.diaz@ipicyt.edu.mx

Correo electrónico: irwin.diaz@ipicyt.edu.mx (Irwin Allen Díaz Díaz), omar@uaeh.edu.mx (Omar Arturo Domínguez Ramírez)

Fecha de recepción: 08/10/2019 Fecha de aceptación: 11/11/2019 Fecha de publicación: 05/07/2020

DOI: 10.29057/icbi.v8i15.5040



investigación sobre fuentes de energía renovable.

Las fuentes de energía renovable se reponen continuamente por la naturaleza. La energía renovable no incluye los recursos energéticos derivados de combustibles fósiles, productos de desecho de fuentes fósiles o de fuentes inorgánicas. La Ley de la Industria Eléctrica (DOF 11-08-2014) menciona: las energías limpias son aquellas fuentes de energía y procesos de generación de electricidad cuyas emisiones o residuos, cuando los haya, no rebasen los umbrales establecidos en las disposiciones reglamentarias que para tal efecto se expidan. Entre las energías limpias se consideran: el viento, la radiación solar, la energía generada por el aprovechamiento del hidrógeno mediante su combustión o su uso en celdas de combustible, por mencionar algunas.

El crecimiento continuo de la generación de energía renovable podría llevar a un futuro energético sostenible con menores emisiones de gases de efecto invernadero. Una tendencia reciente que destaca este crecimiento es la instalación de fuentes generadoras de energía solar y eólica para reemplazar a largo plazo la generación de energía convencional a partir de centrales de carbón y combustibles fósiles (Ma et al., 2015). La Fig. 1 ilustra la capacidad de las fuentes de energía renovable para proporcionar más de 3000 veces las necesidades energéticas globales actuales (Ellabban et al., 2014). Como se puede apreciar en la Fig. 1, la energía solar y eólica son las fuentes con mayor potencial para proveer las necesidades energéticas actuales.

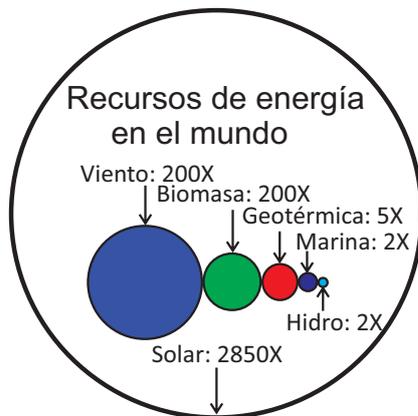


Figura 1: Recursos energéticos en el mundo, x = veces las necesidades energéticas globales actuales (Ellabban et al., 2014).

La energía eólica y la solar difieren de la mayoría de los generadores térmicos porque tienen una producción de energía variable e incierta, determinada por las condiciones climáticas locales. Los generadores convencionales, como las plantas de carbón y gas, se consideran despachables porque pueden cambiar fácilmente la potencia de salida (aumentar o disminuir) para cumplir con los cambios en la carga. Conforme aumenta la incorporación de las fuentes de energía renovable en el sistema de generación de energía, se requiere una mayor flexibilidad de la red para adaptarse a los cambios en la generación de energía. En particular, la energía fotovoltaica tiene un desafío natural asociado con su ciclo diurno porque no produce energía durante la noche. Esto hace que la potencia de salida entre los generadores fotovoltaicos individuales esté correlacionada, con grandes cantidades de energía en ventanas de tiempo relativa-

mente pequeñas. Esto puede llevar a rampas de carga neta más grandes que las que se podrían tener durante la noche (Kroposki et al., 2017).

En el mundo, las políticas se están modificando para promover el uso de las tecnologías de energía verde, incluyendo tarifas de alimentación, estándares de cartera renovable, certificados verdes negociables, créditos de impuestos a la inversión y subsidios de capital, entre otros. El Reino Unido tenía estimado generar con fuentes de energía renovable el 15 % de su consumo para el 2015/16. Alemania busca para el 2030 generar el 50 % de su consumo energético mediante energías renovables. El estado de California, uno de los más contaminados en los Estados Unidos de América, tiene como objetivo para la carga minorista generar el 33 % de la energía mediante fuentes de energía renovable para el 2020 (Hernandez-Aramburo et al., 2005). En la provincia de Ontario, en Canadá, se otorgan contratos a largo plazo a las fuentes de energía renovable con tarifas de alimentación predefinidas para reducir el riesgo a los inversionistas, y progresivamente eliminar la dependencia de los generadores de carbón existentes. En el caso de México, la generación de energía con fuentes limpias es de aproximadamente el 25 % (40,499.01 GWh) de la energía requerida en el país (Secretaría de Energía, 2018). Las tecnologías que mayor crecimiento presentaron fueron la fotovoltaica, la eólica y la cogeneración eficiente, contribuyendo a que la capacidad instalada por fuentes limpias se incrementara 11.84 % (2,550.41 MW) y la generación en 21.71 % con respecto al primer semestre del 2017. La Fig. 2 muestra la distribución de la generación de energía al cierre del primer semestre de 2018 en México.

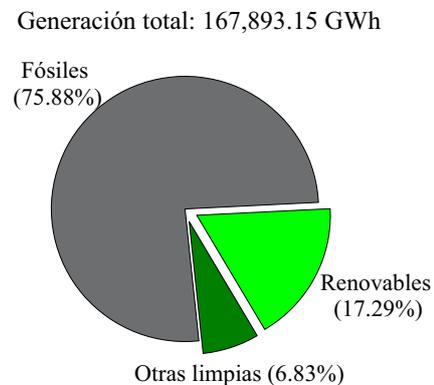


Figura 2: Generación de energía en México de acuerdo al tipo de fuente. Otras energías limpias son: la nuclear, la cogeneración eficiente, los frenos regenerativos y el licor negro (Secretaría de Energía, 2018).

A manera de sobreponerse a los desafíos de integrar las fuentes de energía renovable con el sistema de distribución eléctrico surge el concepto de micro red. Sin embargo, es necesario garantizar el funcionamiento confiable, seguro y económico de las micro redes, ya sea en modo interconectado a la red o independiente.

2. Micro red

El concepto de micro red fue propuesto por (Lasseter, 2002), la idea es proponer una solución para la integración de unidades de pequeña escala de generación local conectadas a la red a nivel de distribución, denominadas fuentes de energía

distribuida (DER por sus siglas en inglés). Las DER pueden incluir la generación de energía renovable y no renovable, sistemas de almacenamiento de energía (SAE), inversores, vehículos eléctricos y otras cargas controladas. También, las DER incluyen nuevas tecnologías como medidores inteligentes y servicios de datos. El concepto de micro red asume un grupo de cargas y micro recursos que funcionan como un sistema único controlable para proporcionar energía y calor a un área local. Este concepto proporciona un nuevo paradigma para definir el funcionamiento de la generación distribuida. Desde la red de distribución, una micro red puede considerarse como una celda controlada del sistema de energía. Por ejemplo, esta celda podría controlarse como una única carga despachable, capaz de responder en segundos para satisfacer las necesidades del sistema de transmisión. Del lado del cliente, una micro red puede diseñarse para satisfacer sus necesidades especiales, tales como: mejorar la confiabilidad local, reducir las pérdidas del alimentador, soportar voltajes locales, proporcionar una mayor eficiencia mediante el uso de calor residual, corregir la caída de voltaje o proporcionar funciones de suministro de energía ininterrumpible, por mencionar algunos (Lasseter, 2002). En resumen, una micro red se puede describir como un grupo de cargas, unidades de generación distribuida (GD) y un SAE operado en coordinación para suministrar electricidad de manera confiable, conectado al sistema de distribución de energía en un único punto de conexión (PC), el punto de acoplamiento común (PCC por sus siglas en inglés). Una micro red puede tener una configuración arbitraria como se muestra en la Fig. 3. Las micro redes que no tienen un PCC se denominan micro redes aisladas. Este es el caso de sitios remotos, e.g., comunidades o sitios industriales, en los que no es posible una interconexión con la red eléctrica debido a limitaciones técnicas y/o económicas; por lo tanto, las micro redes aisladas funcionan permanentemente en modo autónomo.

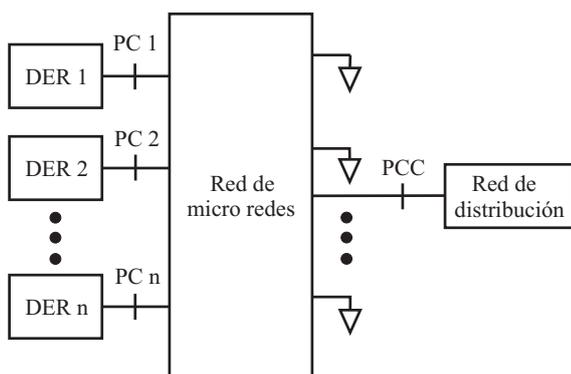


Figura 3: Diagrama esquemático de una micro red conformada por múltiples recursos energéticos distribuidos.

La integración de las fuentes de energía renovable con la red de distribución eléctrica ha hecho que los sistemas convencionales de potencia evolucionen a redes inteligentes (smart grids, del inglés), donde micro redes (microgrids, del inglés) podrían dominar el sistema de distribución con la integración de las fuentes de energía renovable y los sistemas de almacenamiento de energía a la red eléctrica. Las redes inteligentes se están desarrollando como sistemas de energía de próxima generación, abarcando micro redes interconectadas, especialmente

a nivel de distribución donde se utilizan cada vez más la generación distribuida. Estas tecnologías se pueden clasificar en generación de energía a partir de recursos de energía renovable como: eólica, fotovoltaica, micro hidroeléctrica, biomasa, geotérmica, olas oceánicas y las tecnologías de generación de energía alternativa limpia como: las celdas de combustible y microturbinas; así como las tecnologías tradicionales basadas en máquinas rotativas, como los generadores diésel. Debido a la limpieza y tecnología simple de estas fuentes, combinadas con la creciente demanda de energía eléctrica y la naturaleza agotable de los combustibles fósiles, la generación distribuida basada en energías renovables y energías alternativas desempeña un papel importante en las micro redes (Nejabatkhah and Li, 2015).

3. Control y requerimientos de protección

En general, la integración de las micro redes y las DER presentan retos de operación a ser considerados en el diseño del control y los sistemas de protección para no afectar a la red de distribución.

Dentro de los retos más importantes en la protección y el control de la micro red se tienen:

- Flujo de energía bidireccional.* En un inicio, la red eléctrica sólo suministraba energía al consumidor, con la integración de las unidades de generación distribuida (UGD) existe un flujo de energía reversible que puede ocasionar complicaciones en la coordinación de protecciones, patrones indeseables de potencia, fallas en la distribución y el control del voltaje.
- Problemas de estabilidad.* Pueden producirse oscilaciones locales debido a la interacción de los sistemas de control de las UGD. Además, se requiere un análisis de estabilidad ante transitorios para garantizar una transición sin interrupciones entre los modos de operación de la micro red, isla o interconectada a la red.
- Modelado.* En el modelado tradicional de sistemas de potencia convencionales, a nivel de transmisión se asume la prevalencia de condiciones de balance, principalmente líneas de transmisión inductivas y cargas de potencia constante. Sin embargo, no necesariamente es válido para las micro redes ocasionando una revisión de los modelos matemáticos.
- Baja inercia.* A diferencia de los grandes sistemas de energía, donde un gran número de generadores síncronos aseguran una inercia relativamente grande, las micro redes pueden presentar baja inercia, especialmente si hay una proporción significativa de UGD con una interfaz de electrónica de potencia. La baja inercia en el sistema puede conducir a desviaciones de frecuencia severas en la operación independiente si no se implementa un mecanismo de control adecuado.
- Incertidumbre.* La operación confiable y económica de las micro redes depende de la coordinación con las diferentes DER. Las micro redes interconectadas presentan un reto mayor debido al equilibrio crítico entre la demanda y la oferta. Típicamente, las tasas de falla de componentes más altas requieren resolver un problema fuertemente acoplado en un horizonte extendido, considerando

la incertidumbre de parámetros, tales como el perfil de carga y el pronóstico del tiempo.

El control diseñado debe cubrir los retos mencionados. Las características deseables a cubrir por el sistema de control son:

- Salida de control.* Los voltajes y las corrientes de salida de las distintas unidades de DER deben seguir los valores de referencia y garantizar el correcto amortiguamiento de las oscilaciones.
- Balance de potencia.* Las unidades de DER de la micro red deben ser capaces de adaptarse a desequilibrios repentinos de potencia activa, manteniendo las desviaciones de frecuencia y voltaje dentro de rangos establecidos en el estándar IEEE 1547 (IEEE, 2018).
- Manejo del lado de la demanda.* Cuando aplique, se deben diseñar mecanismos adecuados del manejo del lado de la carga para incorporar la capacidad de controlar una parte de la carga.
- Despacho económico.* Un despacho apropiado de unidades de DER que participan en la operación de una micro red puede reducir significativamente los costos operativos o aumentar las ganancias.
- Transición entre los modos de operación.* Las micro redes deben ser capaces de trabajar tanto en modo de interconexión a la red como en modo isla, así como presentar una transición suave entre ambos modos.

Otros desafíos son: la disponibilidad de las mediciones, la comunicación y las instalaciones computacionales de alta velocidad. Por esta razón, se debe intentar reducir la necesidad de comunicaciones y cómputo de alta velocidad en tareas críticas.

3.1. Variables a controlar

El voltaje, la frecuencia, así como la potencia activa y reactiva son las principales variables usadas para controlar la operación de una micro red. En el modo de operación de interconexión con la red, la frecuencia de la micro red y el voltaje en el PCC están determinados predominantemente por la red de distribución. El control de la micro red permite ajustar la potencia activa y reactiva generada por las unidades DER y la demanda de carga (Hamzeh et al., 2013). La inyección de potencia reactiva por una unidad DER se puede utilizar para corregir el factor de potencia, el suministro de potencia reactiva o el control de voltaje en el punto de conexión correspondiente. El modo de operación independiente, isla, es más desafiante que el de interconexión a la red, porque el equilibrio crítico de la oferta y la demanda requiere la implementación de mecanismos precisos de reparto de carga para equilibrar desajustes repentinos de potencia activa (Han et al., 2016). El voltaje y la frecuencia de la micro red deben ser controlados por diferentes unidades DER. El equilibrio de potencia está asegurado directamente por los controladores locales que utilizan mediciones locales o por un controlador central que comunica los puntos de ajuste apropiados a los controladores locales de diferentes unidades DER y cargas controlables. El objetivo principal de dicho mecanismo es asegurar que todas las unidades contribuyan al suministro de la carga de una manera predeterminada. Un desajuste de un minuto en la amplitud, el ángulo de fase o la frecuencia del voltaje de salida de cualquier unidad en el grupo puede producir

una corriente relativamente alta o un corto circuito (Willmann et al., 2007), (Issa et al., 2018).

3.2. Tipos de unidades de DER

Las micro redes se caracterizan por contar con un solo punto de interconexión con la red eléctrica. En la Fig. 4 se muestran los componentes que pueden conformar una micro red puramente eléctrica. La interfaz de conexión (IC) con el PCC se puede realizar utilizando interruptores electromecánicos o de estado sólido, incluso convertidores back-to-back (CA/CD/CA) (Lu et al., 2014). La conexión de fuentes de energía tales como: paneles fotovoltaicos, celdas de combustible a hidrógeno y sistemas de almacenamiento de energía (baterías y supercondensadores) requieren el uso de un inversor, convertidor de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA). Los generadores de velocidad variable, como las turbinas eólicas que utilizan máquinas síncronas y las microturbinas de alta velocidad requieren el uso de convertidores de potencia de CA/CA, e.g., convertidores matriciales, para igualar la frecuencia y el voltaje constantes de la micro red (Karaman et al., 2014). Las cargas dentro de la micro red se pueden controlar utilizando un interruptor o una interfaz electrónica de alimentación de CA/CA más sofisticada para permitir un control más flexible.

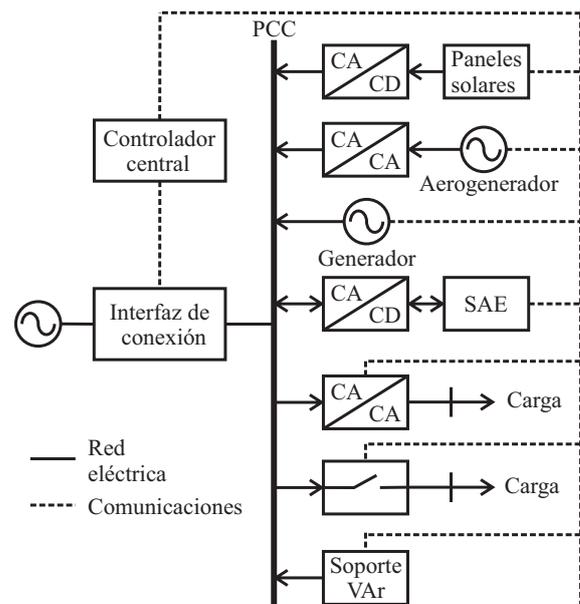


Figura 4: Componentes de una micro red.

También, las unidades DER se pueden clasificar en función de su capacidad de entregar energía. Las unidades despachables, e.g., los generadores diésel se pueden controlar completamente. Generalmente, las unidades DER basadas en fuentes de energía renovables son intermitentes y su producción no es controlable.

3.3. Sistemas de almacenamiento de energía

El almacenamiento permite la integración a gran escala de las fuentes intermitentes de energía renovable. Una unidad de almacenamiento de energía puede funcionar de forma parecida a la inercia de un generador síncrono absorbiendo desbalances temporales entre la generación de energía y la demanda.

A pesar de sus beneficios, el almacenamiento de energía no ha sido utilizado por completo. Entre los factores limitantes se encuentra, además del costo, la falta de estrategias apropiadas de control y manejo de energía. Se deben investigar y desarrollar metodologías de control para distintas tecnologías de almacenamiento de energía, tales como: baterías, aire comprimido, volantes de inercia, sistemas de energía térmica y tecnologías de vehículo a la red (Burke, 2007).

El almacenamiento de energía tiene aplicaciones para mejorar la capacidad de transmisión y de la calidad de la energía eléctrica, la operación en modo isla de las micro redes, los sistemas de distribución activa y las tecnologías de vehículos eléctricos. Además, puede mejorar la estabilidad dinámica y transitoria, el soporte de voltaje y la regulación de frecuencia. Por ejemplo, el almacenamiento de energía puede eliminar o retrasar la expansión de la infraestructura de transmisión o la capacidad de generación. El almacenamiento se puede combinar con unidades de DER no despachables, como la energía eólica y solar, para convertirlas en unidades despachables. Del lado de los consumidores, el almacenamiento puede emplearse para atenuar los picos, almacenando la energía generada localmente hasta que se requiera.

4. Categoría de control en una micro red

Respecto a la arquitectura del control del sistema de potencia se pueden identificar dos enfoques: centralizado y descentralizado. En el primero, el control se basa en los datos recopilados por un controlador central dedicado a realizar los cálculos requeridos y determinar las acciones de control para todas las unidades en un solo punto. Se requiere una amplia comunicación entre el controlador central y las unidades controladas. En el segundo, cada unidad está controlada por su controlador local, solamente recibe información local, desconociendo las variables de todo el sistema y las acciones de otros controladores.

Se puede lograr un compromiso entre esquemas de control totalmente centralizados y descentralizados mediante un esquema de control jerárquico que consta de tres niveles de control: primario, secundario y terciario (Olivares et al., 2014), ver Fig. 5. Los niveles de control difieren en su velocidad de respuesta y el marco de tiempo en el que operan, así como en los requisitos de infraestructura, e.g., requisitos de comunicación.

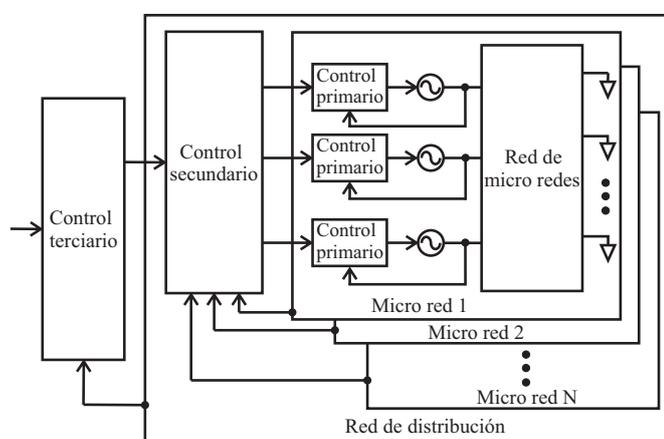


Figura 5: Niveles de control jerárquico: control primario, control secundario y control terciario (Olivares et al., 2014).

4.1. Control primario

También, conocido como control local o interno, presenta la respuesta más rápida. Este control se basa exclusivamente en las mediciones locales, no requiere comunicación. En él se realiza la detección de modo isla, el control de salida y de potencia compartida (equilibrio) (Dasgupta et al., 2012). Como interfaz entre las fuentes de CD y la red eléctrica de CA se usan inversores alimentados en voltaje (Timbus et al., 2009). El intercambio de energía se realiza mediante el uso de controladores de caída de voltaje de potencia activa y voltaje de potencia reactiva que emulan las características de caída de los generadores síncronos (Chandorkar et al., 1993).

Aunque se ha llevado a cabo una amplia investigación sobre el desarrollo de estrategias de control primario para micro redes, todavía existen muchas cosas por hacer. Respecto a mejoras, por mencionar algunas, se puede mejorar: la solidez de las incertidumbres topológicas y paramétricas, la respuesta transitoria de los controladores, la escalabilidad de los esquemas de control y las capacidades de manejo de fallas. Además, es necesario considerar los desbalances y armónicos, incorporar la dinámica del lado CD en el diseño del control, obviar la necesidad de una infraestructura de comunicación compleja, así como desarrollar esquemas de control que funcionen tanto para los modos de operación de interconexión con la red o isla de la micro red y proporcionen una transición suave.

4.2. Control secundario

También llamado sistema de manejo de energía (SME) de la micro red, es responsable de la operación confiable, segura y económica de las micro redes trabajando en modo isla o interconexión a la red eléctrica. Representa un reto controlar micro redes aisladas con fuentes de energía altamente variables. El objetivo del SME consiste en encontrar el compromiso de unidad óptimo (o casi óptimo) y el envío de las unidades DER disponibles, de modo que se logren ciertos objetivos seleccionados. También, las desviaciones permanentes de voltaje y frecuencia producidas por la acción del control primario son restauradas por el control secundario. Para determinar el despacho y el compromiso de unidad de la micro red, se identifican tres opciones principales: *i*) optimización en tiempo real, *ii*) sistemas expertos y *iii*) control jerárquico descentralizado. El control secundario es el encargado del manejo de la energía de la micro red. Algunas propuestas de control se enfocan en la optimización económica de la micro red cuando sea posible. En el trabajo realizado por (Dimeas and Hatzargyriou, 2005) se busca una operación óptima mediante la implementación de un entorno de mercado utilizando un sistema multiagente (MAS, por sus siglas en inglés), en donde las unidades DER individuales están controladas por agentes locales que intercambian información con un controlador central para determinar sus ofertas de compra y venta.

Dentro de las variables o parámetros de la entrada de control se tiene la predicción de la salida de potencia de los generadores no despachables o de la carga local para los siguientes N períodos consecutivos, estado de carga del SAE, límites operacionales de generadores despachables y del SAE, restricciones de fiabilidad de la micro red, estado de interconexión con la red y previsión de los precios de energía de la red.

4.3. Control terciario

Este control es responsable de coordinar la operación de múltiples micro redes que interactúan entre sí en el sistema y comunica las necesidades o requisitos de la red de distribución, e.g., soporte de voltaje, regulación de frecuencia, por mencionar algunos. Este nivel de control generalmente opera en el orden de varios minutos, proporciona señales a los controles de nivel secundario en las micro redes y a otros subsistemas que conforman la red de distribución (Moayedi and Davoudi, 2016). El control terciario puede considerarse parte de la red de distribución y no de la micro red en sí. Por lo tanto, este nivel de control no se discute en este artículo.

5. Big data de energía y manejo inteligente de la energía

En general, un sistema inteligente de energía está conformado por sensores distribuidos en el sistema de energía y por dispositivos inteligentes conectados a internet. En el caso de la red inteligente, la principal fuente de datos es la infraestructura avanzada de medición compuesta por los medidores inteligentes y otras terminales de medición instaladas en casas, negocios, comercios, por mencionar algunos, del usuario final. Al igual que el medidor de energía de la Comisión Federal de Electricidad, los medidores inteligentes colectan información cada 15 minutos. Las lecturas de la medición producen una cantidad masiva de datos. La Tabla ?? muestra el crecimiento exponencial del volumen de datos conforme se reduce la frecuencia de adquisición considerando un millón de medidores inteligentes.

A manera de ejemplo, en la Fig. 6 se muestra el comparativo del volumen de datos adquiridos anualmente con medidores analógicos y de un pequeño número de medidores digitales respecto a la cantidad de datos adquiridos en la actualidad con medidores inteligentes. Como se puede apreciar, la mayor cantidad de datos se obtienen del sector residencial. En (Bialek, 2014) se resumen los cuatro tipos de fuentes de big data en servicios públicos: *i*) medidores inteligentes, *ii*) datos de distribución automatizada (equipo de red), *iii*) datos de terceros (conjuntos de datos fuera de la red) y *iv*) datos de gestión de activos (firmware para todos dispositivos inteligentes y sistemas operativos asociados).

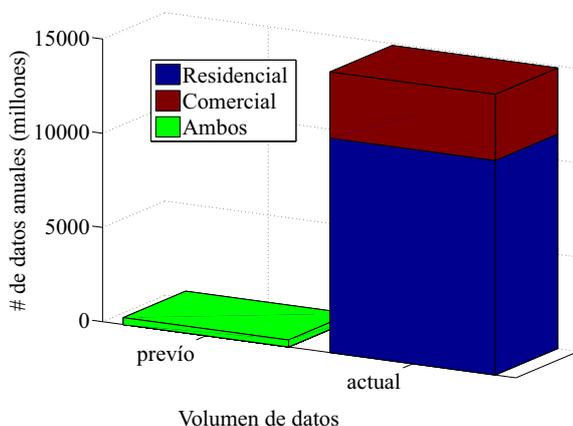


Figura 6: Cantidad de datos de uso eléctrico anual de clientes de San Diego Gas and Electric (Bialek, 2014).

Con la integración de las fuentes de energía renovable, los datos meteorológicos, tales como el ángulo de incidencia de radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura juegan un papel importante en el manejo inteligente de la energía. Se estima que los datos meteorológicos algún día se convertirán en la plataforma de infraestructura de próxima generación de servicios y aplicaciones de ahorro de energía, así como en la actualidad los mapas y datos de ubicación forman la plataforma básica para muchos servicios.

Además, los datos del sistema de información geográfica pueden ser un factor importante del big data de energía pudiendo soportar estrategias de manejo de energía inteligentes. Por ejemplo, en un ambiente de red inteligente, los datos del sistema de información geográfica se pueden usar para relacionar las redes eléctricas con locaciones geográficas.

Por último, la integración de una base de datos es un aspecto crucial para el análisis del big data de energía (Jiang et al., 2016).

5.1. Características del big data de energía

Las tecnologías de big data describen una nueva generación de tecnologías y arquitecturas, están diseñadas para extraer económicamente valor de volúmenes muy grandes de una amplia variedad de datos, al permitir la captura, el descubrimiento y/o el análisis a alta velocidad. Ejemplos de la anterior son las redes sociales, los circuitos cerrados de televisión, en donde se analizan los datos almacenados para detectar preferencias o patrones de comportamiento. El big data de energía debe contar con cuatro principales características, denominadas 4V, i.e., volumen, velocidad, variedad y valor (Zhou et al., 2016).

Volumen. Los dispositivos de medición inteligente y los sensores en los sistemas inteligentes de energía presentan retos debido a la cantidad masiva de datos, no solo de almacenamiento sino de análisis y procesamiento.

Velocidad. En los sistemas de energía inteligente, la velocidad de recopilación y del procesamiento de datos varía en intervalos de tiempo desde menos de un segundo hasta 5 o 15 minutos.

Variedad. Se refiere al complejo incremento de datos. El big data de energía es una mezcla de datos estructurados, semiestructurados y desestructurados. Con el incremento de los medios de comunicación para tomar decisiones, el big data de energía será más variado.

Valor. Se requiere extraer conocimiento valioso para dar soporte a la toma efectiva y eficiente de decisiones. En el big data se debe poner más atención a los datos en general que a las muestras.

Además de las características de las 4V, también existen otras características denominadas 3E, por sus siglas en inglés, energía, intercambio y empatía. **Energía** (dato como energía), se puede lograr el ahorro de energía analizando el big data. **Intercambio** (dato como intercambio), se requiere intercambiar e integrar el big data de un sistema de energía con el big data de otras fuentes para comprender mejor su valor. **Empatía** (dato como empatía), se pueden proveer mejores servicios de energía, los usuarios estarán más satisfechos y la satisfacción del consumidor mejorará si se analiza el big data de energía. Lo anterior se ilustra en la Fig. 7.



Figura 7: Características del big data de energía.

5.2. Manejo inteligente de la energía basado en datos

En (Zhou et al., 2016) se propone un modelo de proceso de gestión inteligente de energía basada en big data. El proceso está conformado por:

- 1) Recolección, transmisión y almacenamiento de datos.
- 2) Limpieza y preprocesamiento de datos.
- 3) Integración de datos y selección de características.
- 4) Minería de datos y descubrimiento de conocimiento.
- 5) Representación, visualización y aplicación.
- 6) Toma inteligente de decisiones e interacción en tiempo real.
- 7) Manejo inteligente de la energía.

En el caso de la red inteligente, el proceso de soporte de decisión del big data consta de cuatro etapas.

- 1) Generación de energía. Aquí se realiza la planificación y optimización de los generadores, el despacho económico de la carga, se mejora la eficiencia de la generación de la energía, así como la planeación y el manejo de las fuentes de energía renovable.
- 2) Transmisión de energía. En esta etapa se realiza la planificación de la red eléctrica, la identificación de las pérdidas en la red, la detección de fallas o interrupciones y la restauración del suministro de energía, así como el manejo de activos.
- 3) Distribución y transformación de energía. En esta parte se realiza la detección en tiempo real, la optimización del voltaje, el monitoreo del estado del transformador, la detección de fallas, detección de interrupciones y restauración del suministro de energía, así como el manejo de activos.
- 4) Manejo del lado de la demanda. Por último, en esta etapa se obtiene la respuesta de la demanda, la predicción de la carga, la clasificación de la carga y la segmentación del mercado, el precio dinámico, la interacción en tiempo real y el ahorro de energía, la protección de ingresos y la detección de robos, por mencionar algunos.

6. Estatus de la investigación del desarrollo del big data para el manejo inteligente de la energía

Principalmente, en un ambiente de red inteligente se han reportado estudios del análisis del big data de energía para el soporte de toma de decisiones y control inteligente en cuatro aspectos: *i)* manejo de la generación de energía, *ii)* manejo de micro redes y energía renovable, *iii)* manejo de activos y operaciones colaborativas y *iv)* manejo del lado de la demanda.

La producción eficiente de energía se puede mejorar y los costos de producción se pueden reducir significativamente si

se toma ventaja de la gran cantidad de datos colectados y se aplican técnicas de análisis de big data. La energía renovable solar y eólica son los dos tipos más prometedores de energía limpia. Sin embargo, su capacidad de entregar energía depende de las condiciones meteorológicas. La predicción de la energía generada podría ser más precisa si se analizan los datos meteorológicos. La eficiencia de la gestión de activos y la operación colaborativa se puede mejorar usando el análisis del big data de energía. Además, se pueden integrar los datos de producción, operación, comercialización y gestión. El intercambio de datos se puede lograr a través de la generación, la transmisión, la transformación, la distribución y el consumo de energía. Al coordinar el manejo de la producción, la operación, el mantenimiento y las ventas de electricidad, se puede optimizar la asignación de recursos y mejorar la eficiencia de producción y la tasa de utilización de recursos. Combinando la cantidad de datos colectados de los sensores de la infraestructura del sistema de energía con el análisis avanzado de big data y técnicas de visualización se puede cambiar la manera tradicional de operación y mantenimiento del sistema de energía.

El manejo de la energía del lado de la demanda es una de las aplicaciones más extensas en el big data analítico, varía desde la segmentación del cliente hasta la tarifa dinámica (Zhou and Yang, 2015). La predicción de la carga es un área de investigación importante en la red inteligente (Hahn et al., 2009). La predicción de la demanda futura de la carga requiere de los datos históricos de la carga, datos meteorológicos y factores sociales, entre otros. Dependiendo del propósito, la predicción de la carga se puede dividir en corto, mediano y largo plazo. En (Chen et al., 2010) se propone un modelo y método basado en una red neuronal wavelet para predecir la carga del día siguiente usando la carga del día presente. La clasificación de la carga es un proceso de partición de diferentes perfiles de carga en grupos usando distintos métodos de grupos (le Zhou et al., 2013). Los patrones del consumo de energía de diferentes usuarios de energía se pueden identificar con la clasificación de la carga que puede dar soporte al desarrollo competitivo de estrategias de marketing, así como ofrecer servicios de energía personalizada. Además, al mismo tiempo puede ayudar a los consumidores a desarrollar planes de ahorro de energía. El precio dinámico o precio en tiempo real puede ayudar al comportamiento del consumo de energía del usuario y a mejorar la factibilidad del sistema de energía mediante diferentes estrategias de precio. En (Oldewurtel et al., 2010), se propone un método para reducir la demanda pico de electricidad en un edificio con control de clima. El método usa el precio de la electricidad en tiempo real y aplica un control predictivo por modelo (MPC por sus siglas en inglés). El estudio propone un esquema de tiempo variable, considerando una tarifa eléctrica por hora para el consumidor final. La tarifa se diseña para reflejar los costos marginales de la provisión de electricidad, basada en los precios del mercado y en los niveles de carga de la red eléctrica, que es directamente incorporado en una función de costo MPC. Dado que la tarifa de electricidad sólo está disponible por un período de tiempo limitado en el futuro, se utilizan máquinas de vectores de soporte de mínimos cuadrados para el pronóstico del precio de la tarifa de electricidad y, por lo tanto, se proporcionan al controlador MPC los costos estimados necesarios que varían en el tiempo para todo el horizonte de predicción. En el contexto dado, el precio por

hora proporciona un incentivo económico para que un controlador de edificio reaccione de manera sensible con respecto a los altos precios de la electricidad en el mercado y la alta carga de la red, respectivamente. Dentro del régimen tarifario propuesto, se recompensa el comportamiento amigable con la red. El estudio demuestra que la demanda máxima de electricidad de los edificios se puede reducir significativamente.

7. Desarrollo industrial del big data para el manejo inteligente de la energía

En años recientes, empresas relacionadas con las tecnologías de la información tales como: IBM, SAS, Oracle, Teradata, EMC y SAP; así como empresas relacionadas con la red eléctrica como: General Electric, Siemens/eMeter, ABB/Ventyx, Schneider Electric/Telvent, Toshiba/Landis+Gyr comenzaron a proveer a sus productos y servicios para usar el big data de energía y el manejo inteligente de energía en las empresas y los consumidores (MediaGT, 2013).

Además de las empresas mencionadas, nuevas compañías están emergiendo, ofreciendo productos y servicios de manejo de energía inteligente basados en big data. La mayoría de estas compañías se fundaron alrededor de 2009, cuando se acaba de proponer el concepto de “big data”. Esto demuestra aún más que la investigación y el desarrollo industrial del manejo inteligente de la energía basada en big data se reforzaron mutuamente. En (Zhou et al., 2016) se mencionan 16 compañías, el año de creación, una breve introducción de la compañía, así como los productos y servicios que ofrecen de big data. A grandes rasgos, los productos más comunes proporcionados por estas compañías son el cómputo en la nube, el análisis del big data y las tecnologías de detección basadas en dispositivos inteligentes de hardware, software, plataformas y sistemas. Principalmente, los servicios y las soluciones ofrecidas se enfocan en el monitoreo y la predicción en tiempo real, la respuesta a la demanda, el compromiso del usuario, la optimización de la eficiencia energética, la notificación y los reportes del consumo de energía, y el marketing dirigido. El big data es reciente, hace falta madurar la tecnología para el manejo inteligente de la energía usando el big data.

8. Comentarios finales

En este artículo se presentaron las tendencias para el manejo inteligente de la energía. Como se comentó a lo largo del documento, las micro redes surgen debido a la necesidad de integrar las fuentes de energía renovable con la red de distribución eléctrica y como un paso a la realización de una red inteligente. El SAE es la clave para la integración de las fuentes de energía renovables intermitentes, e.g., eólica y fotovoltaica, presentando desafíos importantes para el sistema de control para gestionar adecuadamente este recurso.

Además, es necesario comprobar físicamente la eficacia y la confiabilidad de las técnicas de control propuestas en micro redes reales. Es necesario buscar información respecto a los elementos que interactúan en un sistema de distribución e identificar los posibles puntos de mejora respecto a los esquemas propuestos en la literatura.

Por otro lado, el análisis del big data de energía es importante para el manejo de la red inteligente, desde la generación de la energía hasta el manejo de ella del lado de demanda. En el futuro, es necesario realizar distintos cambios para explotar el potencial del big data de energía y lograr los objetivos del manejo inteligente de la energía. Dentro de los cambios a hacer se tienen:

- 1) Infraestructura de tecnologías de la información. Respecto a los datos, la infraestructura requiere mejorar la capacidad de almacenamiento, intercambio, procesamiento, visualización e interacción, así como la velocidad de transmisión de la red.
- 2) Colección y manejo de datos. El manejo inteligente de energía basada en big data requiere estrategias completas de manejo de datos, así como procedimientos de organización y control. La alta calidad, la estandarización y el formato uniforme son los requisitos indispensables para aplicaciones basadas en el big data de energía.
- 3) Integración e intercambio de datos. En la actualidad, las compañías de energía utilizan diferentes formatos para definir el dato, el manejo y el almacenamiento, así como los modelos, por lo que es necesario estandarizar para evitar redundancia de datos. Además, se requieren crear iniciativas para la integración y el intercambio del big data de energía.
- 4) Procesamiento y análisis de datos. El procesamiento efectivo y eficiente, así como las técnicas de análisis del big data son premisas importantes para respaldar las decisiones tomadas para el manejo inteligente de la energía. Se requieren diferentes elementos de modelado y ajustes de parámetros en múltiples escalas, los múltiples modelos establecidos y los resultados de simulación obtenidos se deben interpretar adecuadamente para respaldar las diversas decisiones.
- 5) Seguridad y privacidad. Es necesario mejorar los mecanismos de seguridad y privacidad en la infraestructura de tecnologías de la información para proteger la privacidad del consumidor.
- 6) Profesionistas de analítica de big data y el manejo inteligente de la energía. Debido a la novedad del tema hacen falta profesionistas en estas áreas. Por lo tanto, es necesario crear programas y cursos enfocados para entrenar a las futuras generaciones para aplicar el big data de energía al manejo inteligente de la energía.

Referencias

- Bialek, T., 2014. Data management and analytics for utilities. URL: <https://www.ieee-pes.org/presentations/>
- Burke, A. F., April 2007. Batteries and ultracapacitors for electric, hybrid, and fuel cell vehicles. *Proceedings of the IEEE* 95 (4), 806–820. DOI: 10.1109/JPR0C.2007.892490
- Chandorkar, M. C., Divan, D. M., Adapa, R., Jan 1993. Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* 29 (1), 136–143. DOI: 10.1109/28.195899
- Chen, Y., Luh, P. B., Guan, C., Zhao, Y., Michel, L. D., Coolbeth, M. A., Friedland, P. B., Rourke, S. J., Feb 2010. Short-term load forecasting: Similar day-based wavelet neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems* 25 (1), 322–330. DOI: 10.1109/TPWRS.2009.2030426

- Dasgupta, S., Mohan, S. N., Sahoo, S. K., Panda, S. K., Aug 2012. A plug and play operational approach for implementation of an autonomous-micro-grid system. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 8 (3), 615–629.
DOI: 10.1109/TII.2012.2193893
- Dimeas, A. L., Hatzigiorgiou, N. D., Aug 2005. Operation of a multiagent system for microgrid control. *IEEE Transactions on Power Systems* 20 (3), 1447–1455.
DOI: 10.1109/TPWRS.2005.852060
- Ellabban, O., Abu-Rub, H., Blaabjerg, F., 2014. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39, 748 – 764.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005656>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.113>
- Hahn, H., Meyer-Nieberg, S., Pickl, S., 2009. Electric load forecasting methods: Tools for decision making. *European Journal of Operational Research* 199 (3), 902 – 907.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709002094>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.01.062>
- Hamzeh, M., Mokhtari, H., Karimi, H., Winter 2013. A decentralized self-adjusting control strategy for reactive power management in an islanded multi-bus mv microgrid. *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering* 36 (1), 18–25.
DOI: 10.1109/CJECE.2013.6544468
- Han, H., Hou, X., Yang, J., Wu, J., Su, M., Guerrero, J. M., Jan 2016. Review of power sharing control strategies for islanding operation of ac microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid* 7 (1), 200–215.
DOI: 10.1109/TSG.2015.2434849
- Hernandez-Aramburo, C. A., Green, T. C., Mugniot, N., May 2005. Fuel consumption minimization of a microgrid. *IEEE Transactions on Industry Applications* 41 (3), 673–681.
DOI: 10.1109/TIA.2005.847277
- IEEE, April 2018. IEEE standard for interconnection and interoperability of distributed energy resources with associated electric power systems interfaces. *IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003)*, 1–138.
DOI: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112
- Issa, W. R., Khateb, A. H. E., Abusara, M. A., Mallick, T. K., June 2018. Control strategy for uninterrupted microgrid mode transfer during unintentional islanding scenarios. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 65 (6), 4831–4839.
DOI: 10.1109/TIE.2017.2772199
- Jiang, H., Wang, K., Wang, Y., Gao, M., Zhang, Y., 2016. Energy big data: A survey. *IEEE Access* 4, 3844–3861.
DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2580581
- Karaman, E., Farasat, M., Trzynadlowski, A. M., Dec 2014. Indirect matrix converters as generator-grid interfaces for wind energy systems. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 2 (4), 776–783.
DOI: 10.1109/JESTPE.2014.2329920
- Kroposki, B., Johnson, B., Zhang, Y., Gevorgian, V., Denholm, P., Hodge, B., Hannegan, B., March 2017. Achieving a 100 % renewable grid: Operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy. *IEEE Power and Energy Magazine* 15 (2), 61–73.
DOI: 10.1109/MPE.2016.2637122
- Lasseter, R. H., Jan 2002. Microgrids. In: 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309). Vol. 1. pp. 305–308 vol.1.
DOI: 10.1109/PESW.2002.985003
- le Zhou, K., lin Yang, S., Shen, C., 2013. A review of electric load classification in smart grid environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24, 103 – 110.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113001822>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.03.023>
- Lu, X., Guerrero, J. M., Sun, K., Vasquez, J. C., Teodorescu, R., Huang, L., March 2014. Hierarchical control of parallel ac-dc converter interfaces for hybrid microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid* 5 (2), 683–692.
DOI: 10.1109/TSG.2013.2272327
- Ma, Z., Pesaran, A., Gevorgian, V., Gwinner, D., Kramer, W., Sep. 2015. Energy storage, renewable power generation, and the grid: Nrel capabilities help to develop and test energy-storage technologies. *IEEE Electrification Magazine* 3 (3), 30–40.
DOI: 10.1109/MELE.2015.2447972
- MediaGT, 2013. Big data on the smart grid: 2013 in review and 2014 outlook.
URL: <http://www.greentechmedia.com/articles/read/Big-Datas-5-Big-Steps-to-Smart-Grid-Growth-in-2014>
- Moayedi, S., Davoudi, A., Feb 2016. Distributed tertiary control of dc microgrid clusters. *IEEE Transactions on Power Electronics* 31 (2), 1717–1733.
DOI: 10.1109/TPEL.2015.2424672
- Nejabatkhah, F., Li, Y. W., Dec 2015. Overview of power management strategies of hybrid ac/dc microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics* 30 (12), 7072–7089.
DOI: 10.1109/TPEL.2014.2384999
- Oldewurtel, F., Ulbig, A., Parisio, A., Andersson, G., Morari, M., Dec 2010. Reducing peak electricity demand in building climate control using real-time pricing and model predictive control. In: 49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC). pp. 1927–1932.
DOI: 10.1109/CDC.2010.5717458
- Olivares, D. E., Mehrizi-Sani, A., Etemadi, A. H., Cañizares, C. A., Iravani, R., Kazerani, M., Hajimiragha, A. H., Gomis-Bellmunt, O., Saadifard, M., Palma-Behnke, R., Jiménez-Estévez, G. A., Hatzigiorgiou, N. D., July 2014. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid* 5 (4), 1905–1919.
DOI: 10.1109/TSG.2013.2295514
- Secretaría de Energía, 2018. Reporte de avance de energías limpias primer semestre 2018.
- Timbus, A., Liserre, M., Teodorescu, R., Rodriguez, P., Blaabjerg, F., March 2009. Evaluation of current controllers for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Power Electronics* 24 (3), 654–664.
DOI: 10.1109/TPEL.2009.2012527
- Willmann, G., Coutinho, D. F., Pereira, L. F. A., Libano, F. B., June 2007. Multiple-loop h-infinity control design for uninterruptible power supplies. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 54 (3), 1591–1602.
DOI: 10.1109/TIE.2007.894721
- Zhou, K., Fu, C., Yang, S., 2016. Big data driven smart energy management: From big data to big insights. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, 215 – 225.
- Zhou, K., Yang, S., 2015. Demand side management in china: The context of china's power industry reform. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47, 954 – 965.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115001896>
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.036>