

Optimization models for power systems in the evolution to smart grids: A review

Josimar Tello-Maita ^a & Agustín Marulanda-Guerra ^b

^a Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela. jtello@fing.luz.edu.ve

^b Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia. agustin.marulanda@escuelaing.edu.co

Received: March 16th, de 2017. Received in revised form: July 5th, 2017. Accepted: July 13th, 2017

Abstract

The present paper aims to describe the optimization models recently applied to the design and operation of power systems in the road to the formation of smart grids and to identify the trends, challenges and possible gaps existing in this field of study. The models described allow performing optimization of the design and operation of power systems considering aspects as renewable energies and its related variability, distributed generation and micro grids, demand-site management and energy storage systems. Conclusions point out that several of the models recently formulated need to be validated with real data and large-scale systems tests. Moreover, demand-site management and micro grids are aspects that lack of the development of complete optimal power flow models. Finally, the accurate forecasting of stochastic variables is necessary to accomplish a better adaptation of models to real behavior of the power system.

Keywords: optimization; renewable energies; smart grids; optimal power flow.

Modelos de optimización para sistemas de potencia en la evolución hacia redes inteligentes: Una revisión

Resumen

El presente artículo describe los modelos de optimización recientemente aplicados al diseño y operación de los sistemas de potencia hacia la conformación de las redes inteligentes e identifica las tendencias, barreras y posibles brechas en esta área. Se describen modelos para optimizar el diseño y la operación de los sistemas de potencia considerando las energías renovables, la generación distribuida, las micro redes, la gestión de la demanda y los sistemas de almacenamiento de energía. Se concluyó que es necesario validar muchos de los modelos que se han formulado recientemente para la optimización de la operación mediante pruebas con datos reales y a gran escala. Además, la gestión de la demanda y las micro redes son aspectos en los cuales se requieren desarrollar modelos para el flujo óptimo de potencia. Finalmente, es necesario predecir con mayor precisión las variables estocásticas para que estos modelos se adapten al comportamiento real del sistema.

Palabras clave: optimización; energías renovables; redes inteligentes; flujo óptimo de potencia.

1. Introducción

Los sistemas de potencia se encuentran en constante desarrollo, el progreso de las ciudades impulsa el avance de los sistemas de suministro eléctrico. Son evidentes los grandes cambios que se observan en los sistemas de potencia actuales con respecto a décadas anteriores. Estos cambios apuntan a aumentar la eficiencia de los sistemas, disminuir el

impacto ambiental ocasionado por la generación de energía eléctrica y garantizar la sostenibilidad a lo largo del tiempo.

Se ha planteado que una vía para el desarrollo sostenible de los sistemas de potencia es la conformación de redes inteligentes (*Smart grids*). Las redes inteligentes son la integración de la infraestructura eléctrica y de comunicaciones con tecnologías avanzadas de automatización e información de procesos [1].

How to cite: Tello-Maita, J. and Marulanda-Guerra A., Modelos de optimización para sistemas de potencia en la evolución hacia redes inteligentes: Una revisión. DYNA, 84(202), pp. 102-111, September, 2017.

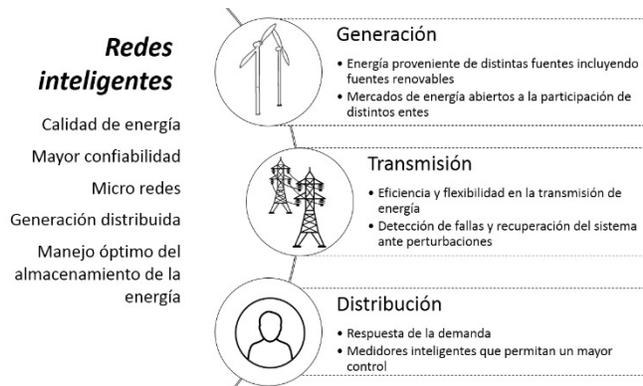


Figura 1. Características deseables de las redes inteligentes en general y por cada etapa del sistema de potencia.
Fuente: Elaborado por los autores.

El concepto de red inteligente es amplio, y su extensión depende de las necesidades del sistema, este término se ha venido definiendo como una modernización del sistema de suministro de energía, para monitorizar, proteger y optimizar automáticamente la operación de los elementos interconectados [2,3]. De acuerdo con el *Electric Power Research Institute (EPRI)*, algunos de los beneficios que se espera obtener de la implementación de redes inteligentes son: Mayor confiabilidad y calidad de energía; seguridad y robustez ante eventos riesgosos; eficiencia energética; reducción de efectos ambientales; beneficios financieros [2].

En la Fig. 1 se muestra un resumen de las características deseables de las redes inteligentes, entre estas se buscan mayor eficiencia, mayor control y confiabilidad en el sistema de suministro eléctrico, tomando en cuenta las características de la red. Los requisitos de las redes inteligentes también aportan una mayor complejidad al sistema de suministro de energía, lo cual genera una serie de retos a ser atendidos [1,4]. Una manera de asegurar que la implantación de las redes inteligentes sea realmente ventajosa para el suministro eléctrico y su sostenibilidad, es aplicar técnicas de optimización para minimizar o maximizar ciertos factores deseados. Por ejemplo, en la planificación, la optimización permite aprovechar al máximo los recursos económicos and ambientales disponibles. Además, la optimización aplicada a la operación ayuda a garantizar condiciones de seguridad técnica durante el funcionamiento del sistema.

Las técnicas de optimización se han aplicado a los sistemas de potencia desde mediados de la década de 1960 [5]; y han venido ocupando un papel importante en la planificación y en la operación de estos. Estas técnicas se han empleado para distintos tipos de problemas como: reducción del costo en el diseño de las instalaciones, minimización de costos en la operación de plantas de generación, minimización de emisiones en las plantas termoeléctricas, minimización de pérdidas en la operación, minimización de costos en el diseño de líneas de transmisión, entre otros.

Para resolver cada problema de optimización es necesario el planteamiento de un modelo que permita aplicar las técnicas más apropiadas. Un modelo de optimización es una representación matemática de un sistema en la cual existe un conjunto de variables de decisión que deben

minimizar/maximizar una función objetivo, sujeta a unas restricciones [6,7]. En vista de la evolución de los sistemas de potencia, los modelos aplicados para la optimización deben integrar los cambios que se van realizando en la estructura de estos sistemas, de manera que se puedan aplicar y sus resultados sean representativos de la realidad.

En este sentido, en el presente trabajo inicialmente se describen algunos aspectos que se han considerado en las investigaciones más recientes relacionadas con las redes inteligentes y la nueva complejidad de los sistemas de potencia. Luego, se describen los modelos de optimización aplicados al diseño y la operación de los sistemas de potencia en el camino hacia la conformación de las redes inteligentes. Igualmente, se identifican las tendencias, las barreras y las posibles brechas que pueden existir en este ámbito de estudio.

2. Características y tendencias actuales de los sistemas de potencia

En la actualidad, para la reducción del impacto ambiental y la sostenibilidad a lo largo del tiempo, se han implementado formas de generación basadas en fuentes renovables como la energía eólica, la energía solar y la energía hidráulica. La capacidad instalada a nivel mundial de estas fuentes de energía ha llegado a 1849 GW para el año 2015, con un aumento del 8,7% con respecto al año 2014, incluyendo la generación hidroeléctrica [8].

En la transmisión de energía eléctrica, se ha buscado mayor flexibilidad y eficiencia, sobre todo en largas distancias con el uso de líneas de transmisión en corriente directa (*HVDC: High voltage direct current transmission*). Este tipo de sistemas puede aportar ventajas como control del flujo de potencia, reducción de los costos y puede permitir la interconexión de sistemas asíncronos [9].

En el ámbito de la distribución de energía, la generación distribuida y las micro redes son tendencias que se están implementando en la actualidad y que se visualizan como alternativas para reducir las pérdidas que existen en la transmisión de grandes bloques de energía a largas distancias. Entre las estrategias a nivel de distribución, la demanda activa o respuesta de la demanda, es otra manera que se está implementado para controlar el flujo de energía en los sistemas de potencia, se trata de que los consumidores puedan conocer su consumo eléctrico y tomar decisiones que ayuden a mejorar la operación del sistema [10]. Sin embargo, estas tecnologías se han aplicado principalmente en los países desarrollados y es un campo abierto de investigación para que sean de uso generalizado en el futuro.

2.1. Energías renovables

Uno de los avances más importantes en los sistemas de potencia ha sido el aprovechamiento de nuevas fuentes de energía, sobre todo aquellas que tienen un menor impacto ambiental. La generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables está creciendo de forma acelerada, de hecho, durante el año 2015 a nivel mundial la capacidad instalada en GW de energías renovables ha superado lo instalado en generación térmica, unos 147GW renovables en comparación a 38GW térmicos [8]. De tal manera que la

tendencia mundial es hacia el crecimiento de las energías renovables. En años recientes esta progresión ha sido evidente.

Dentro de las fuentes de energía renovables, la energía hídrica es la que tiene mayor capacidad instalada en el mundo, seguida por la energía eólica y la energía solar (Fig. 2). Sin embargo, la capacidad instalada en energía solar fotovoltaica está creciendo rápidamente, de igual manera la energía eólica presenta una tasa de crecimiento mayor a la hidroeléctrica. Como se muestra en la Fig. 3, el crecimiento de las fuentes de energía eólica y solar fotovoltaica ha sido sostenido en los últimos cinco años, estas tasas de crecimiento indican que en los próximos años se incrementará la penetración de las fuentes de energía renovables. De tal manera que se puede afirmar que los sistemas eléctricos en la actualidad y hacia el futuro están caracterizados por un incremento constante en la adición de nuevas fuentes de energía con un énfasis particular en las energías renovables.

2.2. Impacto de la variabilidad de la generación

La existencia de energías renovables como la energía solar y la energía eólica, implica que existe una dependencia de las condiciones climáticas para la generación de energía eléctrica. La naturaleza del clima es variable, y si bien existen técnicas para predecir su comportamiento, siempre existen factores de incertidumbre. Los fenómenos

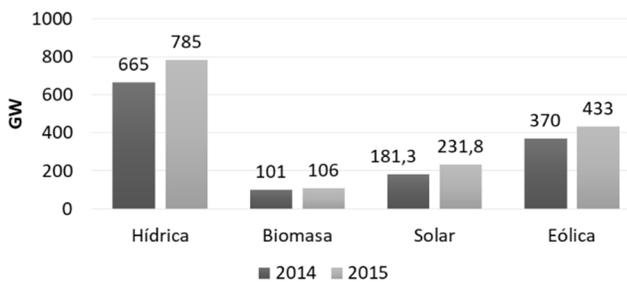


Figura 2. Capacidad instalada en GW de energías renovables en los años 2014 y 2015.

Fuente: REN21, 2016.

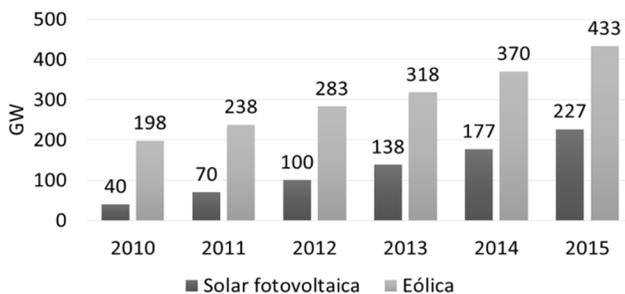


Figura 3. Crecimiento histórico de la capacidad instalada en GW de energía solar fotovoltaica y energía eólica en los últimos cinco años.

Fuente: REN21, 2016.

ambientales pueden afectar gravemente el funcionamiento de los sistemas de potencia, por ello se ha generado interés en el estudio de estos sistemas frente a cambios en las condiciones ambientales que puedan afectar la generación [11].

Por su variabilidad, la alta penetración de energía eólica y energía solar puede afectar el diseño, el funcionamiento y la planificación de los sistemas de potencia. Se han realizado investigaciones para verificar el impacto de este tipo de generación en el sistema de potencia. Los resultados han mostrado que a medida que la generación eólica supera el 20% de la demanda, se pueden presentar inconvenientes con el control de la frecuencia, estabilidad y el balance de potencia, de tal manera que para mantener la confiabilidad y la flexibilidad del sistema se hace necesario aumentar las reservas de potencia en el sistema [13,14].

Holttinen y col. proponen que la integración en grandes bloques de energía puede ayudar a mantener el balance de potencia y la confiabilidad del sistema mediante intercambios internacionales [12]. Sin embargo, esto debe redundar en un fortalecimiento del sistema de transmisión para poder trasladar mayores bloques de energía y una mayor monitorización ante posibles eventos.

Por otro lado, la conexión de energía fotovoltaica a las redes trae efectos, tanto en estado estable como en estado transitorio. El impacto de la integración de energía fotovoltaica depende del nivel de penetración que puede tener en términos de la demanda total del sistema, así como también la topología de la conexión y el tipo de instalación; que puede variar desde residencial hasta plantas fotovoltaicas a gran escala. Según Eftekharnejad y col. a partir de niveles de penetración de un 20% con respecto a la generación total se observan desviaciones principalmente en el perfil de tensiones del sistema [13].

2.3. Generación distribuida

Una de las tendencias en el suministro de la energía eléctrica es la generación distribuida, en general, se trata de proveer fuentes de potencia activa conectadas directamente a la red de distribución o en el punto de medición del usuario [14,15]. Este concepto también se conoce como generación descentralizada o embebida. Actualmente, se están empleando sistemas de generación distribuida mediante distintas tecnologías como generación térmica, energías renovables, celdas de combustible, entre otras. La mayoría de estas tecnologías necesitan de la electrónica de potencia para inyectar la potencia a la red de una manera eficiente y confiable, además de garantizar la calidad de la energía suministrada.

En comparación con los sistemas de potencia tradicionales centralizados, los sistemas basados en generación distribuida pueden reducir ampliamente las pérdidas en los alimentadores y las inversiones en redes de transmisión y distribución [16]. Estos sistemas permiten un soporte mutuo con la red macro, un mayor uso de los equipos y recursos disponibles y un suministro confiable con una mayor calidad, por lo tanto se puede aumentar la eficiencia y la seguridad de la red.

2.4. Sistemas de transmisión en corriente alterna flexibles

Los sistemas de transmisión flexibles en corriente alterna (FACTS: Flexible AC Transmission Systems) son

dispositivos de electrónica de potencia que al ser instalados en una red de energía eléctrica permiten regular el flujo de potencia y mantener la estabilidad del sistema [17]. Ellos proveen la impedancia deseada, potencia activa y potencia reactiva con el objetivo de mantener la estabilidad en todos los buses; incrementar los límites de carga y disminuir las pérdidas de potencia activa y reactiva del sistema de potencia.

Los dispositivos FACTS son usados actualmente debido a las prestaciones previamente mencionadas, y se busca ampliar su aplicación para poder ejercer un mayor control sobre los intercambios de energía que ayuden a mantener el balance de potencia y la estabilidad en la red ante posibles variaciones de la generación o de la carga.

2.5. Transmisión en corriente directa

En épocas recientes ha existido una tendencia hacia la transmisión en corriente directa (*HVDC: High voltage direct current transmission*) debido a las ventajas que se han evidenciado sobre las líneas AC. Entre las ventajas están la reducción de las pérdidas debido a que en los sistemas HVDC no circula potencia reactiva; además, la capacidad de transmisión en HVDC es mayor debido a que no existe el efecto piel y el uso de menos conductores implica un menor costo y un menor peso, en grandes distancias. Adicionalmente, hoy en día la eficiencia y capacidad de control de los convertidores AC-DC y DC-AC han mejorado con respecto a épocas anteriores [18].

Gracias a las ventajas que se han mencionado, los sistemas HVDC están siendo empleados para la conexión de las plantas eólicas costa afuera [19], dado que se reducen los inconvenientes de la transmisión AC por cable subacuático. También, se está empleando este tipo de líneas de transmisión para conexiones internacionales y entre redes de características diferentes en cuanto a frecuencia y niveles de tensión, puesto que los convertidores AC-DC con tecnología actual permiten controlar la frecuencia del sistema y adecuar el nivel de tensión para el intercambio de energía [18].

Inicialmente la tecnología HVDC estaba basada en tiristores, pero se ha desarrollado tecnología basada en transistores, lo cual permite obtener casi todas las mejoras de los controladores FACTS individuales, esto es, transferencia de grandes bloques de potencia, entregar o absorber una cierta cantidad de potencia reactiva necesaria para mantener la tensión, controlar rápidamente emergencias para evitar niveles muy altos de corrientes de falla, entre otras [9].

2.6. Almacenamiento de energía

Un sistema de almacenamiento de energía tiene la capacidad de cargarse y descargarse de manera flexible para acumular excedentes de energía y suministrarlos cuando sea oportuno [20]. Los desarrollos recientes en las tecnologías de la electrónica de potencia han hecho que la aplicación de las técnicas de almacenamiento de energía sea una solución viable para los sistemas de potencia modernos.

Entre las tecnologías que se emplean como sistemas de almacenamiento de energía se encuentran: los sistemas de bombeo hidráulicos y de aire comprimido, las baterías, los

bancos de condensadores, los volantes de inercia, el almacenamiento superconductor de energía magnética y los sistemas de almacenamiento híbridos [21]. Recientemente, los sistemas de almacenamiento híbridos han tomado auge ya que permiten integrar las bondades de distintas tecnologías en un mismo sistema.

Estos sistemas pueden aplicarse para solucionar distintos inconvenientes en los sistemas de potencia actuales. Por ejemplo, pueden ser empleados para balancear la red mediante servicios auxiliares, seguimiento y nivelación de carga. Además, puede suplir el incremento de la reserva para manejar la incertidumbre de la generación eólica, lo cual puede ayudar a mejorar la eficiencia en la operación del sistema, mejorar la absorción de potencia, disminuir el costo del combustible y reducir las emisiones de CO₂ [22].

2.7. Gestión de la demanda

En la evolución de los sistemas de potencia hacia redes inteligentes, se ha concluido que los consumidores tienen un papel muy importante y que pueden contribuir a mejorar el desempeño de la red. La gestión de la demanda consiste en emplear incentivos para lograr adecuar los patrones de consumo para mejorar el funcionamiento de la red de potencia [23].

Los beneficios de la gestión de la demanda son técnicos, económicos y ambientales. En el ámbito técnico se puede incrementar la seguridad y la confiabilidad de la red, ya que el tiempo de respuesta de la demanda es mucho menor que el de las grandes plantas de generación. En el ámbito económico se puede lograr la reducción de los picos de demanda, evitando inversiones adicionales. y en el aspecto ambiental, se pueden reducir las emisiones de gases contaminantes al evitar los picos de demanda que generalmente son cubiertos con generación térmica [24], [25].

Los programas de respuesta de la demanda son estrategias que se pueden aplicar para lograr modificar el consumo del usuario final, bien sea por cambios en el precio de la energía o por incentivos para reducir el consumo. Los programas de respuesta de la demanda pueden ser con participación directa del usuario o mediante mercados de electricidad u organismos encargados de la respuesta de demanda [26]. En todo caso, con el uso de las comunicaciones digitales y los medidores inteligentes de energía, la respuesta de la demanda se convierte en un mecanismo de control rápido en la red.

2.8. Micro redes

Una micro red es un sistema de potencia independiente que comprende generación distribuida, carga, almacenamiento de energía, y dispositivos de control, en la cual la generación distribuida y el sistema de almacenamiento están directamente conectados al usuario en paralelo [16]. Este tipo de sistema se ha venido estudiando desde comienzos de la década del 2000 y se plantea como un medio efectivo para convertir la red de distribución en una red activa, lo cual ayudará a la integración en gran escala de la generación distribuida y en la transición de la red de potencia tradicional a las redes de potencia inteligentes; la idea es convertir las redes de distribución de energía en sistemas que permitan la gestión más eficiente de la demanda

y la generación. Una de las ventajas de las micro redes es que pueden funcionar de forma aislada, lo cual permite suministrar energía eléctrica a zonas alejadas.

3. Modelos de optimización

La evolución de los sistemas de potencia implica una serie de ventajas. Entre las ventajas se encuentra una mayor flexibilidad, confiabilidad y control en el manejo de la energía. Por otra parte, esto implica una mayor complejidad del sistema y grandes inversiones en tecnología actualizada. Esto deja un campo abierto para los problemas de optimización, bien sea para lograr diseños apropiados y cada vez más eficientes, para tomar decisiones en dilemas de costo/beneficio o para lograr una operación económica, confiable, sostenible y segura.

3.1. Optimización de sistemas con energías renovables y el impacto de la variabilidad de los recursos

Previamente se han realizado varias revisiones sobre optimización aplicada a sistemas híbridos [27-30]. Tomando en cuenta los modelos, métodos y programas que se han empleado, uno de los principales aspectos a los que se les ha aplicado

optimización es al diseño de sistemas híbridos. Los modelos de optimización del diseño de los sistemas híbridos se han concentrado en el dimensionamiento, combinaciones y localización de los componentes, tomando como principales restricciones los costos y la confiabilidad del sistema. Para poder evaluar los costos del diseño y su confiabilidad, se han empleado algunos índices que se muestran en la Tabla 1.

Las fuentes de energía renovable con mayor crecimiento han sido foco de mayor número de investigaciones en optimización. De acuerdo con esto, el principal punto de enfoque han sido los sistemas con generación eólica y fotovoltaica. Los aspectos de dimensionamiento y localización de estos tipos de energía han sido ampliamente abordados [31-34] desde la reducción de costos, emisiones y aumento de la confiabilidad.

Entre los recientes avances en los modelos de optimización para el diseño de sistemas con energías renovables, Rodrigues, Bauer y Bosman revisaron los modelos disponibles para el diseño de parques eólicos costa afuera y realizaron una propuesta de un modelo de optimización multiobjetivo para la localización de turbinas eólicas dentro de una cuadrícula prediseñada [35]. Aún es necesario realizar distintas pruebas y comparaciones a este algoritmo.

Tabla 1.

Índices para evaluar diseños de sistemas de potencia con energías renovables.

| Índice | Descripción | Referencias |
|--|---|-------------|
| Índices para la evaluación de costos | | |
| Costo Neto Presente (NPC: <i>Net present cost</i>) | Refleja el costo de la energía de un sistema particular e incluye el costo inicial de todos los componentes del sistema, el costo de cualquier reemplazo de componentes en el tiempo de vida del sistema y el costo del mantenimiento. | [30] |
| Costo total anualizado (TAC: <i>Total annualized cost</i>) | Representa el costo por año del capital más el costo anual del mantenimiento y reparaciones de la instalación. Se puede calcular dividiendo el costo neto presente sobre el factor de anualidad de valor presente. | [27] |
| Costo del ciclo de vida (LCC: <i>Life cycle cost</i>) | Es la suma de todos los costos recurrentes y no recurrentes que tienen lugar durante el ciclo de vida de un sistema. Incluye precio de compra, instalación, costos operativos, mantenimiento y valor residual al final de su vida útil. | [29,30] |
| Costo de la energía (COE/LCE: <i>Levelized cost of energy</i>) | Refleja el costo de la energía como una relación entre el costo anualizado del sistema sobre la energía total entregada. | [27,29,30] |
| Índices para la evaluación de la confiabilidad | | |
| Probabilidad de pérdida del suministro (LPSP: <i>Loss of power supply probability</i>) | Es la relación entre los déficit de potencia suministrada sobre la demanda eléctrica en un cierto periodo de tiempo. | [27,29,30], |
| Probabilidad de pérdida de carga (LLP: <i>Load loss probability</i>) | Se define como el periodo de falla sobre el tiempo de trabajo total del sistema. | [30] |
| Carga insatisfecha (UL: <i>Unmet load</i>) | Es la carga que no puede ser servida sobre el tiempo total de un periodo. | [29,30] |
| Nivel de desempeño del sistema (SPL: <i>System performance level</i>) | Se define como la probabilidad de carga insatisfecha. | [27,30] |
| Horas de carga perdida (LOLH: <i>Loss of load hours</i>) | Es la suma de la expectativa de pérdida en horas en un periodo determinado (Generalmente un año), se cuantifica el tiempo en el que el sistema no puede suministrar suficiente potencia para suplir la carga excluyendo los efectos del mantenimiento y daños en componentes. | [30] |
| Riesgo de pérdida de carga (LOLR: <i>Loss of load risk</i>) | Se define como la probabilidad de que se genere una falla en el sistema para cubrir la demanda eléctrica diaria debido a deficiencias en las fuentes de energía renovable. | [30] |
| Nivel de autonomía (LA: <i>Level of autonomy</i>) | Trata con dos parámetros: el número total de horas en las que ocurre la pérdida de carga y el número total de horas de operación. Si la autonomía aumenta, el sistema será más confiable, pero a la vez el costo incrementa. | [30] |
| Otros índices | | |
| Flujo de emisiones de carbono | Indica el nivel de emisiones de carbono desde un punto de vista espacial, se relaciona con la cantidad de energía generada o consumida a partir de fuentes térmicas. | [36] |
| Déficit esperado (CVaR: <i>Conditional value-at-risk</i>) | Es una medida del riesgo de la inversión, representa el valor esperado de los escenarios que se encuentran debajo de un cierto porcentaje de déficit. | [31,37] |

Fuente: Elaborado por los autores.

El enfoque de modelar el diseño de los sistemas híbridos como un problema de optimización multiobjetivo tiene sentido a manera de lograr compromisos entre los distintos índices que dan cuenta de la bondad de los sistemas. Este enfoque ya se había empleado para el diseño de sistemas híbridos [38,39] y se ha implementado en programas comerciales [28].

Otros problemas de optimización que se plantean tienen relación con la operación del sistema. Estos se han especificado con funciones objetivo que van desde la minimización de costos hasta la reducción de pérdidas, con restricciones sobre las variables de estado del sistema. Uno de los puntos de interés en la optimización de los sistemas con energías renovables como la solar o la eólica es la variabilidad de dichos recursos. En este sentido, se han realizado propuestas para el manejo de la variabilidad introducida por las fuentes de energía renovable.

Martínez y Anderson propusieron una formulación del compromiso de unidades con restricciones de seguridad para manejar alta penetración de generación variable debida a fuentes renovables. El modelo se formula como un problema de optimización probabilística (*chance-constrained optimization*), el cual permite tomar en cuenta la incertidumbre en la generación y en la carga [40]. Por su parte, Taghavi y col. plantearon un despacho de potencia reactiva probabilístico tomando en cuenta la variabilidad de las fuentes de energía y otros elementos del sistema como FACTS y HVDC. El modelo se formuló como un problema de optimización con lógica difusa lineal y se aplicó estimación puntal discreta para la solución. Se demostró que este modelo se puede emplear con menor carga computacional en comparación con otros métodos probabilísticos como el método de Monte Carlo [41]. Sin embargo, ambas propuestas aún necesitan ser probadas con sistemas a mayor escala y datos reales.

Summers y col. proponen un modelo estocástico para flujo óptimo de potencia (FOP) multiperiodo, que minimiza los costos operativos sujetos a varias restricciones. En este trabajo se analizaron dos nuevos enfoques para el FOP con variables estocásticas: (a) el enfoque déficit esperado y (b) el enfoque robusto en términos de la distribución (*Distributionally robust*), ambos paradigmas de optimización bajo incertidumbre. Mediante ejemplos numéricos simples se demostró que estos enfoques permiten tomar decisiones de compromiso entre costo y riesgo y que el segundo otorga una mayor eficiencia computacional [37]. No obstante, se recomienda estudiar más detalladamente los beneficios de este tipo de optimización y el desarrollo de algoritmos de optimización distribuida para su aplicación a sistemas en gran escala.

Como se ha mencionado, uno de los ámbitos que no se ha cubierto en las investigaciones relacionadas con optimización de sistemas con energías renovables es la adecuación y la aplicación de los modelos planteados a redes en gran escala. Se puede afirmar que los modelos presentados se encuentran aún en fase de pruebas y se hace necesario realizar pruebas con datos reales.

3.2. Modelos para el diseño y operación de la generación distribuida y las micro redes

Actualmente existe un creciente interés por el desarrollo y mejoramiento de los programas y algoritmos para la optimización del diseño de sistemas de generación distribuida. Estas técnicas deben cubrir los principales detalles de diseño, evaluar el riesgo considerando la

incertidumbre y tener alta precisión en la búsqueda de la solución.

En relación a la planificación de la generación distribuida, la localización adecuada de las unidades juega un papel crucial en el mejoramiento del desempeño del sistema; por lo tanto la localización óptima de la generación distribuida en los sistemas de potencia ha sido un punto de interés en las investigaciones actuales. Adicionalmente, la generación distribuida de fuentes renovables trae consigo variabilidad e incertidumbre. En este sentido, Atwa y El-Saadany propusieron una técnica probabilística para la localización de generación eólica distribuida formulada como un problema de optimización lineal entera mixta, el cual mostró resultados más precisos que otros métodos basados en factores de capacidad [42].

Abdelaziz y col. diseñaron un algoritmo para modelar generación distribuida basada en fuentes renovables para la planificación de redes desbalanceadas. Lograron integrar modelos probabilísticos de la carga, la generación eólica y la generación fotovoltaica, y determinar la localización óptima de la generación en el sistema de distribución. Con esto, se obtuvo una reducción considerable de las pérdidas anuales debidas a la integración de la generación distribuida [32].

Otros trabajos como el de Peng y col. también se han enfocado en la localización óptima de la generación distribuida mediante métodos estadísticos. Sin embargo, el modelo empleado en esta investigación se diferencia por tomar en cuenta la minimización de las emisiones contaminantes en conjunto con los costos y las pérdidas [43].

Por otra parte, Shahzad y col. introdujeron el concepto de factor de concentración de carga (*LCF: Load concentration factor*) para la optimización de la localización de la generación distribuida, el método propuesto simplifica los cálculos necesarios para minimizar las pérdidas y adecuar el perfil de tensiones [44]. El factor de concentración de carga indica la cantidad de carga conectada en un cierto punto del sistema de potencia.

Theo y col. revisaron recientemente las técnicas de planificación y optimización para generación distribuida y resaltaron los principales aspectos a mejorar en este ámbito [45]. Entre ellos:

1. Evaluación de los recursos renovables: emplear técnicas modernas para predicción de los datos meteorológicos puede mejorar la confiabilidad de los diseños.
2. Modelos de la generación: actualmente son muy específicos, por lo que se necesita generalizarlos y desarrollar modelos para nuevas tecnologías.
3. Modelo de la carga: particularmente en el ámbito industrial se recomienda indagar sobre los impactos de distintos tipos de procesos en la demanda eléctrica.
4. Modelo del almacenamiento de energía: se requiere desarrollar modelos detallados de los sistemas de almacenamiento de acuerdo a la tecnología actual.

Por otro lado, existe la necesidad de mejorar el despacho de la generación distribuida de manera que la operación del sistema sea lo más eficiente posible. En este ámbito, se han desarrollado modelos de despacho de generación distribuida que toman en consideración criterios técnicos y económicos para optimizar la operación de la red, entre ellos el desarrollado por Ansarian y col. [46], el cual se basa en una

función multiobjetivo difusa para optimizar de forma simultánea costos, confiabilidad, pérdidas y perfil de tensiones.

La generación distribuida y las micro redes se encuentran ampliamente relacionadas. Se puede decir que las micro redes son una evolución natural de la generación distribuida. De hecho, el primer concepto introducido por Lasseter y col. las define como una solución para aprovechar la potencialidad de la generación distribuida integrándolas a las cargas, donde el conjunto de cargas y microgeneradores opera como un sólo sistema suministrando potencia y calor [47]. De acuerdo con la revisión realizada por Fathima y Palanisamy las investigaciones con respecto a la optimización de sistemas de generación híbridos y micro redes han apuntado principalmente los aspectos económicos y ambientales, aunque también son importantes las restricciones que garantizan la calidad de la energía y la estabilidad del sistema para la interconexión con la red [27].

El diseño de micro redes aisladas se ha formulado como problema de optimización, el cual permite obtener los tamaños apropiados de los componentes minimizando los costos y restringiendo la LPSP [48]. Recientemente, se han realizado distintas formulaciones para el problema del dimensionamiento de las micro redes tomando en cuenta la generación híbrida y el almacenamiento de energía [49-51]. De acuerdo con Gamarra y col. [52] el análisis de sensibilidad se ha revelado como un paso crítico en la planificación de micro redes para desarrollar un diseño robusto en términos de factibilidad económica.

En términos del control de la operación del sistema, uno de los problemas más importantes es decidir el modo de operación de la micro red, es decir, operar conectada a la red principal u operar en modo isla. En el caso de micro redes aisladas, se han realizado formulaciones de despacho de potencia activa y reactiva, y flujo óptimo de potencia considerando la integración entre fuentes de energía convencionales y fuentes renovables [53-56].

Por otra parte, se ha considerado la operación de micro redes conectadas a sistema de potencia macro. En este sentido, se ha modelado la red de potencia como un “sistema de sistemas” mediante una estrategia de control que incorpora recursos de energía distribuidos, dispositivos de almacenamiento y cargas; se emplea una función objetivo para minimizar los intercambios de potencia entre las micro redes y garantizar el funcionamiento dentro de límites técnicos [57]. Sin embargo, este enfoque es preliminar y aun es necesario formular un modelo detallado de flujo óptimo de potencia para la red con micro redes en funcionamiento.

3.3. Flexibilización de los sistemas de transmisión

Como se ha mencionado, la evolución de los sistemas de potencia hacia redes inteligentes implica una mayor flexibilidad y control en la transmisión de energía eléctrica; los FACTS y la transmisión en HVDC permiten aportar estas características a los sistemas de potencia.

Una de las características en común de los FACTS y las

líneas de transmisión en HVDC es que dependen de dispositivos de electrónica de potencia, por lo tanto, uno de los puntos de interés ha sido integrar estos dispositivos a modelos de optimización de la operación, como el despacho de potencia o el flujo óptimo de potencia. En tal sentido, se han formulado varias investigaciones [58,59].

Recientemente, Vanitha y col. propusieron un método que considera varias funciones objetivo para el problema de flujo óptimo de potencia incorporando dispositivos FACTS como lo son los compensadores estáticos síncronos (STATCOM: Static synchronous compensator). Demostraron la aplicación del algoritmo de evolución diferencial y de la programación aditiva difusa con pesos para la evaluación de múltiples objetivos, como una solución óptima holística al sistema [17].

Varios autores han tratado de integrar la transmisión en HVDC en la formulación del problema de flujo óptimo de potencia mediante distintos modelos [19,55,60,61]. Principalmente se han utilizado modelos basados en métodos heurísticos y en inteligencia artificial para lidiar con la complejidad matemática de los modelos de dispositivos de electrónica de potencia.

Una de las aplicaciones de la transmisión HVDC es la conexión de plantas eólicas costa afuera. Khrajah y El-Amin propusieron un modelo de planificación de grandes plantas eólicas costa afuera conectadas mediante un sistema de transmisión en HVDC con múltiples terminales. Sin embargo, esta propuesta necesita ser implementada en casos reales para su validación completa [62].

Por otra parte, se ha buscado optimizar la localización y el ajuste de los dispositivos FACTS en la red de transmisión, para lograr mejorar el desempeño del sistema de transmisión. De tal manera que se han formulado distintos modelos para optimizar la localización de los FACTS [63-68].

3.4. Gestión de la demanda óptima

Vardakas y col. [69] revisaron los programas de respuesta de la demanda, los métodos de tarifado y algoritmos de optimización. Esta investigación obtuvo algunas conclusiones importantes para la optimización de la gestión de la demanda:

1. Los esquemas de respuesta de la demanda tienden a tener un mayor éxito mientras la participación de los usuarios finales es mayor, por lo tanto estos esquemas deben ser atractivos y apropiados al tipo de usuario.
2. Para optimizar la gestión de la demanda es esencial la predicción precisa de la demanda en tiempo real, para lo cual se han aplicado algoritmos basados en lógica difusa, teoría de juegos y redes neuronales, pero es un campo que todavía tiene mucho por explorar.
3. Otro pilar fundamental para lograr la gestión de la demanda es la disponibilidad de datos precisos del sistema en tiempo real, es por ello que las tecnologías para la monitorización del sistema serán decisivas en la evolución hacia las redes inteligentes.

Tabla 2.

Clasificación de publicaciones revisadas entre los años 2010 y 2016 de acuerdo a las características de los sistemas actuales y el tipo de problema de optimización que busca resolver.

| Tipo de problema | Aspecto a optimizar | Características hacia la conformación de redes inteligentes | | | |
|------------------------|--|---|--------------------------------------|--|---------------------------|
| | | Energías Renovables y su variabilidad | Generación Distribuida y Micro Redes | Flexibilización del sistema de transmisión | Almacenamiento de energía |
| Problemas de diseño | Costos | [31,38,39,62] | [62] | - | [38] |
| | Confiabilidad | [31,38,39,62] | [62] | - | [38] |
| | Localización y dimensión | [31-33,35,42] | [32,33,42,43], [44,48,49,51] | [63-68] | [50,71] |
| Problemas de operación | Compromiso de Unidades | [72,73] | - | - | - |
| | Despacho de potencia activa y reactiva | [41,59,74] | [46,51,54] | [41] | [54] |
| | Flujo Óptimo de potencia | [19,37,55,75], [76] | [53,57] | [17,19,55,60,77] | [57] |

Fuente: Elaborado por los autores.

De acuerdo con Wang y col. la flexibilización de la demanda del sistema implica que pueden existir problemas de calidad de energía, como fluctuaciones en las tensiones del sistema, por lo tanto se recomienda la aplicación del flujo óptimo de potencia en AC y en tiempo real para garantizar la apropiada operación del sistema [70]. Sin embargo, es necesario proponer modelos para integrar las estrategias de gestión de la demanda en los algoritmos de flujo óptimo de potencia.

4. Conclusiones y perspectivas futuras

A nivel mundial se han realizado muchos esfuerzos para el desarrollo de sistemas de energía eléctrica seguros, económicos y sostenibles. Para ello numerosos modelos de optimización se han desarrollado, cambiando la concepción de los sistemas de potencia modernos. La Tabla 2 muestra una clasificación de las publicaciones revisadas de acuerdo a las características de los sistemas de potencia actuales y el problema de optimización abordado.

Las nuevas tendencias en modelos de optimización apuntan a tomar en cuenta funciones multiobjetivo que permiten hacer compromisos entre distintos índices de desempeño como el costo de la energía y la probabilidad de pérdida. También, se han venido incorporando variables estocásticas que permiten modelar el comportamiento del sistema más cercano a la realidad, con fuentes y demanda que pueden variar de un momento a otro.

Luego de revisar los trabajos más recientes en el ámbito de la optimización de sistemas de potencia se evidencia que existen muchas investigaciones por realizar para lograr el cambio hacia las redes inteligentes. En este sentido, se plantean los siguientes puntos de interés como posibles investigaciones futuras:

Validación de algoritmos para la optimización de la operación de energías renovables que tomen en cuenta los efectos de la variabilidad de estas fuentes. Se revisaron varios modelos que realizan este tipo de optimización, pero en casi todos los casos no han sido validados con sistemas reales a gran escala.

1. Predicción exacta de los recursos renovables y la demanda eléctrica. Con la variabilidad introducida por las fuentes renovables y la gestión de la demanda se hace necesario contar con una predicción precisa de estos valores a futuro para ajustar apropiadamente el sistema y reducir pérdidas y costos mientras es posible aumentar la

confiabilidad del sistema.

2. Formular algoritmos de flujo óptimo de potencia que puedan modelar la respuesta de la demanda y poder predecir los beneficios de los programas de gestión de la demanda antes de ser ejecutados.
3. Modelar las micro redes para el flujo óptimo de potencia considerando su conexión al sistema de potencia. A pesar de que se han hecho algunas investigaciones al respecto, estas se encuentran en estadios iniciales y se necesita este tipo de modelos.

Se visualiza como uno de los grandes retos el poder obtener modelos más aproximados a la realidad de las redes inteligentes ya que se prevé que en un futuro cercano la complejidad de la red aumentará. La incorporación de sistemas de comunicación entre las compañías de gestión de la energía y los usuarios finales es necesaria, pero esto puede acarrear otro tipo de vulnerabilidades en la red, como ciberataques o fallos en los sistemas electrónicos, que deben ser evaluadas.

Finalmente, se recomienda hacer una revisión exhaustiva de los métodos de optimización aplicados en la actualidad, dado que es un área de investigación que permitirá dar solución a los modelos que se plantean considerando las características de las redes inteligentes.

Referencias

- [1] Borlase, S., Smart grids: Infrastructure, technology, and solutions. CRC Press, 2016.
- [2] Electric Power Research Institute (EPRI), Report to NIST on the smart grid interoperability standards roadmap, EPRI, Contract No. SB1341-09-CN-0031-Deliverable, pp. 1-167, 2009.
- [3] National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 1108 NIST Framework and roadmap for smart grid interoperability standards, 2010.
- [4] Pappu, V., Carvalho, M. and Pardalos, P.M., Optimization and security challenges in smart power grids. Springer, 2013.
- [5] Momoh, J.A., Electric power system applications of optimization, 53, 2001.
- [6] Calafiore, G.C. and Ghaoui, LE., Optimization models. Cambridge University Press, 2014.
- [7] Sánchez, P. et al., Modelos matemáticos de optimización, Madrid, 2010.
- [8] Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), Renewables 2016: Global status report. 2016.
- [9] Arrillaga, J., Watson, N. and Liu, Y., Flexible power transmission the HVDC Options. John Wiley & Sons, Ltd, 2007.

- [10] European Technology Platform on Smartgrids, Consolidated view of the european platform on smartgrids, 2015.
- [11] U.S. Department of Energy, 2014 Smart grid system report(August. 2014).
- [12] Holttinen, H., Meibom, P. and Orths, A., Impacts of large amounts of wind power on design and operation of power systems, results of IEA collaboration, *Wind Energy*, 14(2), pp. 179-192, 2011. DOI: 10.1109/TPWRS.2010.2070848
- [13] Eftekharijrad, S., Vittal, V., Heydt, G.T., Keel, B. and Loehr, J., Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems, *Power Syst. IEEE Trans.*, 28(2), pp. 893-901, 2013. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2216294
- [14] Mahmoud, M.S. and AL-Sunni, F.M., Control and optimization of distributed generation systems, 2015.
- [15] Ackermann, T., Andersson, G. and Söder, L., Distributed generation: A definition, *Electr. Power Syst. Res.*, 57(3), pp. 195-204, 2001. DOI: 10.1016/S0378-7796(01)00101-8
- [16] Li, R. and Zhou, F., *Microgrid technology and engineering application*. Elsevier Science & Technology Books, 2015.
- [17] Vanitha, R., Baskaran, J. and Sudhakaran, M., Multi Objective Optimal Power Flow with STATCOM using DE in WAFGP, *Indian J. Sci. Technol.*, 8(2), pp. 191-198, 2015. DOI: 10.17485/ijst/2015/v8i1/56654
- [18] Kim, C.K., Sood, V.K., Jang, G.S., Lim, S.J. and Lee, S.J., *HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems*. Wiley, 2009.
- [19] Carrizosa, M.J.J., Navas, F.D., Damm, G. and Lamnabhi-Lagarrigue, F.F., Optimal power flow in multi-terminal HVDC grids with offshore wind farms and storage devices, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 65, pp. 291-298, 2015. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.10.016
- [20] Kondoh, J. et al., Electrical energy storage systems for energy networks, *Energy Convers. Manag.*, 41(17), pp. 1863-1874, 2000.
- [21] Luo, X., Wang, J., Dooner, M. and Clarke, J., Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, *Appl. Energy*, 137, pp. 511-536, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081
- [22] Zhao, H., Wu, Q., Hu, S., Xu, H., Rasmussen, C.N. and Nygaard, C., Review of energy storage system for wind power integration support, *Appl. Energy*, 137, pp. 545-553, DOI: 2014. 10.1016/j.apenergy.2014.04.103
- [23] Losi, A., Mancarella, P. and Vicino, A., *Integration of demand response into the electricity chain: Challenges, opportunities and smart grid solutions*. Wiley, 2015.
- [24] U.S. Department of Energy, *Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them*, 2009.
- [25] Cappers, P., Goldman, C. and Kathan, D., *Demand response in U.S. electricity markets: Empirical Evidence*, Berkeley, U.S.A., 2009.
- [26] Siano, P., *Demand response and smart grids - A survey*, *renew. Sustain. Energy Rev.*, 30, pp. 461-478, 2014.
- [27] Fathima, A.H. and Palanisamy, K., Optimization in microgrids with hybrid energy systems - A review, *renew. Sustain. Energy Rev.*, 45, pp. 431-446, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.059
- [28] Sinha, S. and Chandel, S.S., Review of software tools for hybrid renewable energy systems, *renew. Sustain. Energy Rev.*, 32, pp. 192-205, 2014. DOI: 10.1016/j.rser.2014.01.035
- [29] Bhandari, B., Lee, K.-T., Lee, G.-Y., Cho, Y.-M. and Ahn, S.-H., Optimization of hybrid renewable energy systems: A review, *Int. J. Precis. Eng. Manuf. Technol.*, 2(1), pp. 99-112, 2015.
- [30] Sinha, S. and Chandel, S.S., Review of recent trends in optimization techniques for solar photovoltaic-wind based hybrid energy systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 50, pp. 755-769, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.05.040
- [31] Camargo, L.A.S., Ramos, D.S., Guarnier, E., Ishida, S. and Matsudo, E., Alternative generation sources portfolio: Optimal resource allocation and risk analysis supported by genetics algorithms, *IEEE Lat. Am. Trans.*, 14(7), pp. 3232-3241, 2016.
- [32] Abdelaziz, A.Y., Hegazy, Y.G., El-Khattam, W. and Othman, M.M., Optimal allocation of stochastically dependent renewable energy based distributed generators in unbalanced distribution networks, *Electr. Power Syst. Res.*, 119, pp. 34-44, 2015. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.09.005
- [33] Wang, J. and Yang, F., Optimal capacity allocation of standalone wind/solar/battery hybrid power system based on improved particle swarm optimisation algorithm, *IET Renew. Power Gener.*, 7(5), pp. 443-448, 2013.
- [34] Zhou, W., Lou, C., Li, Z., Lu, L. and Yang, H., Current status of research on optimum sizing of stand-alone hybrid solar-wind power generation systems, *Appl. Energy*, 87(2), pp. 380-389, 2010.
- [35] Rodrigues, S., Bauer, P. and Bosman, P.A.N., Multi-objective optimization of wind farm layouts - Complexity, constraint handling and scalability, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 65, pp. 587-609, 2016.
- [36] Yang, J., Feng, X., Tang, Y., Yan, J., He, H. and Luo, C., A power system optimal dispatch strategy considering the flow of carbon emissions and large consumers, *Energies*, 8(9), pp. 9087-9106, 2015. DOI: 10.3390/en8099087
- [37] Summers, T., Warrington, J., Morari, M. and Lygeros, J., Stochastic optimal power flow based on conditional value at risk and distributional robustness, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 72, pp. 116-125, 2015. DOI: 10.1016/j.ijepes.2015.02.024
- [38] Duflo-López, R. and Bernal-Agustín, J.L., Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems, *Renew. Energy*, 33(12), pp. 2559-2572, 2008.
- [39] Ould-Bilal, B., Sambou, V., Ndiaye, P.A., Kébé, C.M.F. and Ndongo, M., Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP), *Renew. Energy*, 35(10), pp. 2388-2390, DOI: 2010. 10.1016/j.renene.2010.03.004
- [40] Martínez, G., Anderson, L.C., Anderson, L. and Martínez, G., Toward a scalable chance-constrained formulation for unit commitment to manage high penetration of variable generation, en 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing, Allerton 2014, pp. 723-730, 2014.
- [41] Taghavi, R., Reza, A. and Samet, H., Stochastic reactive power dispatch in hybrid power system with intermittent wind power generation, 89, 2015.
- [42] Atwa, Y.M. and El-Saadany, E.F., Probabilistic approach for optimal allocate on of wind-based distributed generation in distribution systems, *IET Renew. Power Gener.*, 5(1), pp. 79-88, 2011. DOI: 10.1049/iet-rpg.2009.0011
- [43] Peng, X., Lin, L., Zheng, W. and Liu, Y., Crisscross optimization algorithm and monte carlo simulation for solving optimal distributed generation allocation problem, *Energies*, 8(12), pp. 13641-13659, 2015.
- [44] Shahzad, M., Ahmad, I., Gawlik, W. and Palensky, P., Load concentration factor based analytical method for optimal placement of multiple distribution generators for loss minimization and voltage profile improvement, *Energies*, 9(4), 2016.
- [45] Theo, W.L., Lim, J.S., Ho, W.S., Hashim, H. and Lee, C.T., Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 67, pp. 531-573, 2017. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.063
- [46] Ansarian, M., Sadeghzadeh, S.M. and Fotuhi-firuzabad, M., Optimum generation dispatching of distributed resources in smart grids, 2014.
- [47] Lasseter R., et al., *The CERTS MicroGrid Concept*, 2002.
- [48] Bhuiyan, F.A., Yazdani, A. and Primak, S.L., Optimal sizing approach for islanded microgrids, *IET Renew. Power Gener.*, 9(2), pp. 166-175, 2015.
- [49] Ma, Y., Ji, J. and Tang, X., Triple-objective optimal sizing based on dynamic strategy for an islanded hybrid energy microgrid, *Int. J. Green Energy*, November, 2016.
- [50] Fossati, J.P., Galarza, A., Martín-Villate, A. and Fontán, L., A method for optimal sizing energy storage systems for microgrids, *Renew. Energy*, 77, pp. 539-549, 2015.
- [51] Ghiani, E., Vertuccio, C. and Pilo, F., Optimal sizing and management of a smart Microgrid for prevailing self-consumption, 2015 IEEE Eindhoven Power Tech. pp. 1-6, 2015. DOI: 10.1109/PTC.2015.7232554
- [52] Gamarra, C. and Guerrero, J.M., Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review, *renew. Sustain. Energy Rev.*, 48, pp. 413-424, 2015.

- [53] Sanseverino, E.R., Di Silvestre, M.L., Badalamenti, R., Nguyen, N.Q., Guerrero, J.M. and Meng, L., Optimal power flow in islanded microgrids using a simple distributed algorithm, *Energies*, 8(10), pp. 11493-11514, 2015.
- [54] Zhao, B., Zhang, X., Chen, J., Wang, C. and Guo, L., Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 4(4), pp. 934-943, 2013. DOI: 10.1109/TSSTE.2013.2248400
- [55] Rabiee, A. and Soroudi, A., Multi-period OPF model of power systems with HVDC connected intermittent wind power generation, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 29(1), pp. 336-344, 2014. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2259600
- [56] Kekatos, V., Wang, G., Conejo, A.J. and Giannakis, G.B., Stochastic reactive power management in microgrids with renewables, *IEEE Trans. Power Syst.*, 30(6), pp. 3386-3395, 2015. DOI: 10.1109/TPWRS.2014.2369452
- [57] Ouammi, A., Dagdougui, H. and Sacile, R., Optimal control of power flows and energy local storages in a network of microgrids modeled as a system of systems, pp. 1-11, 2014.
- [58] Panda, A. and Tripathy, M., Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm, *Energy*, 93, pp. 816-827, 2015.
- [59] Taghavi, R., Seifi, A.R. and Pourahmadi-nakhli, M., Fuzzy reactive power optimization in hybrid power systems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 42(1), pp. 375-383, 2012. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.04.002.
- [60] Aragüés, M., Egea, A., Galceran-Arellano, S. and Gomis-Bellmunt, O., Optimal power flow tool for mixed high voltage alternating current and high-voltage direct current systems for grid integration of large wind power plants, *IET Renew. Power Gener.*, 9(8), p. 876, 2015.
- [61] Aragüés-Peñalba, M., Beerten, J., Rimez, J., Van Hertem, D. and Gomis-bellmunt, O., Optimal power flow tool for hybrid AC/DC systems, in 11th IET Int. Conf. AC DC Power Transm., 2015.
- [62] Khraijah, M.M., Member, S., Arabia, S., Member, L. and Arabia, S., Optimization planning for large - scale offshore wind farms using multi - terminal HVDC transmission system, smart grid, pp. 1-4, 2015.
- [63] Rezaee-Jordehi, A., Brainstorm optimisation algorithm (BSOA): An efficient algorithm for finding optimal location and setting of FACTS devices in electric power systems, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 69, pp. 48-57, 2015. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.12.083.
- [64] Lashkar-Ara, A., Kazemi, A. and Nabavi-Niaki, S.A., Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning, *IEEE Trans. Power Deliv.*, 27(2), pp. 481-490, 2012.
- [65] Ravi, K. and Rajaram, M., Optimal location of FACTS devices using Improved Particle Swarm Optimization, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 49(1), pp. 333-338, 2013.
- [66] Manganuril, Y., Optimal location of TCSC using sensitivity and stability indices for reduction in losses and improving the Voltage profile, pp. 1-4, 2016.
- [67] Taleb, M., Miecee, A.S., Miecee, A.A. and Azma, M.A., Optimal allocation of TCSC using adaptive cuckoo search algorithm, pp. 7-11, 2016.
- [68] Singh, S.N. and David, A.K., Optimal location of FACTS devices for congestion management., *Electr. Power Syst. Res.*, 58(2), pp. 71-79, 2001. DOI: 10.1016/S0378-7796(01)00087-6.
- [69] Vardakas, J.S., Zorba, N. and Verikoukis, C.V., A survey on demand response programs in smart grids: Pricing methods and optimization algorithms., *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 17(1), pp. 152-178, 2015. DOI: 10.1109/COMST.2014.2341586
- [70] Wang, Q., Zhang, C., Ding, Y., Xydis, G., Wang, J. and Østergaard, J., Review of real-time electricity markets for integrating distributed energy resources and demand response, *Appl. Energy*, 138, pp. 695-706, 2015. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.10.048.
- [71] Pandzic, H., Wang, Y., Qiu, T., Dvorkin, Y. and Kirschen, D.S., Near-optimal method for siting and sizing of distributed storage in a transmission network, *IEEE Trans. Power Syst.*, 30(5), pp. 2288-2300, 2015.
- [72] Murillo-Sánchez, C.E., Zimmerman, R., Anderson, L. and Thomas, R.J., Secure planning and operations of systems with stochastic sources, energy storage and active demand, *IEEE Trans. Smart Grid*, 4(4), pp. 2220-2229, 2013.
- [73] Papavasiliou, A., Oren, S.S. and Rountree, B., Applying high performance computing to transmission-constrained stochastic unit commitment for renewable energy integration, pp. 1-12, 2014. DOI: 1109/TPWRS.2014.2341354.
- [74] Sáiz-Marín, E., Lobato, E. and Egido, I., Optimal voltage control by wind farms using data mining techniques, *IET Renew. Power Gener.* April, pp. 141-150, 2013. DOI: 10.1049/iet-rpg.2013.0025.
- [75] Panda, A. and Tripathy, M., Security constrained optimal power flow solution of wind-thermal generation system using modified bacteria foraging algorithm, *Energy*, 93, pp. 816-827, 2015. DOI: 10.1016/j.energy.2015.09.083
- [76] Saunders, C.S., Point estimate method addressing correlated wind power for probabilistic optimal power flow, *IEEE Trans. Power Syst.*, 29(3), pp. 1045-1054, 2014.
- [77] Kaur, M., Newton's method approach for security constrained OPF using TCSC, en 1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, 2016. DOI: 10.1109/ICPEICES.2016.7853437

J. Tello-Maita, se tituló como Ing. Electricista en la Universidad del Zulia, Venezuela en 2009 con distinción Summa Cum Laude. En el año 2010 ingresa como Becaria Académica en esta institución y en ella obtiene el título de MSc. Scientiarum en Matemática Aplicada. A partir de 2012 se desempeña como docente e investigadora. Su principal línea de investigación es optimización de sistemas de potencia, también participa en proyectos de investigación sobre energías alternativas y eficiencia energética. Actualmente cursa el programa de doctorado en Ingeniería en la Universidad del Zulia, Venezuela. ORCID: 0000-0001-6895-794X

A. Marulanda-Guerra, obtuvo su grado de Ing. Electricista en 1994, por la Universidad del Zulia, Venezuela. Dr. en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Sevilla, España (2004). Se ha desempeñado como profesor e investigador en sistema de potencia en la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad del Zulia y actualmente es miembro del Grupo de investigación Modelado Estratégico en Energía y Potencia de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Sus principales áreas de interés son: optimización de sistemas de potencia, energías alternativas, redes inteligentes y micro redes. ORCID: 0000-0001-6739-2641