

ESTADO DEL ARTE DEL DISEÑO OPTIMIZADO DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Miramón Juárez Eduardo, Mina Antonio Jesús Darío, Claudio Sánchez Abraham, Jiménez Grajales Humberto Raúl

Tecnológico Nacional de México / Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica
Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C.P. 62490. Cuernavaca, Morelos.
Teléfono: 7773627770
e-mail: eduardo.miramón19ee@cenidet.edu.mx

RESUMEN.

Actualmente, los sistemas de generación distribuida (GD) o generadores distribuidos (GD's) son una alternativa viable contra la generación centralizada. No obstante, enfrentan nuevos retos, más allá de solo inyectar potencia activa, especialmente por su alta penetración en la red eléctrica. Entre otros, estos requerimientos están relacionados con aspectos de calidad de la energía y proveer funciones de soporte a la red. Así, el diseño de estos nuevos GD's no solo debe tomar en cuenta estos requerimientos adicionales, sino también aspectos implícitos al mismo GD como: eficiencia, volumen, costo y mejora de su respuesta dinámica. Es decir, el diseño de un GD se debe abordar como un problema de optimización que puede incluso ser multi-objetivo.

Este trabajo revisa algunas propuestas actuales, sobre el diseño de GD's basadas en optimización, las cuales hacen uso de métodos metaheurísticos para encontrar soluciones exactas o aproximadas, a una amplia variedad de esos nuevos requerimientos.

Palabras Clave: Generación distribuida, diseño optimizado, funciones objetivo, algoritmo de optimización.

ABSTRACT.

Nowadays, distributed generators (DG) have been presented as a viable alternative against centralized generation. Nevertheless, they face new challenges, beyond of the single function of active power injection, especially due to their high penetration into the utility grid. Among others, these requirements are related with power quality and the need of providing grid support functions. Then, the design of these new DGs not only must take into account these additional requirements, but also implicit aspects in a DG like: efficiency, volume, cost, improvement of its dynamic response. In this sense, the design of a DG must be addressed as an optimization problem that can be even multi-objective.

This article review some of the actual proposals about the design of DGs with an optimization approach, which make use of metaheuristic methods in order to find the exact or approximated solution to a wide variety of these new requirements.

Keywords: Distributed generation, optimized design, objective functions, optimization algorithm.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen dos clases de sistemas eléctricos: centralizado y de generación distribuida. Desde el punto de vista energético, los GD's son una tendencia para el suministro eléctrico y las cargas locales, explícitamente por su capacidad

de inyección de energía a la red de distribución. Debido a sus características, estos sistemas alivian la demanda en la red eléctrica principal ante condiciones atmosféricas adversas y altos picos de demanda.

A pesar de estas ventajas, la integración de la GD puede generar efectos negativos en el sistema eléctrico, ya que su implementación modifica el modo de operación de la red. Tradicionalmente, la red de distribución era pasiva, radial y el flujo de potencia unidireccional, lo cual la hacía menos susceptible a problemas de estabilidad. Con la introducción de la GD, entraron en escena factores como la intermitencia de la generación, cambios en la capacidad de cortocircuito, flujo de potencia bidireccional, desbalance de fases, desequilibrios entre la demanda y la generación, entre otros. Adicionalmente, debido a las tecnologías usadas en la generación, los valores de impedancia de red y el ya conocido efecto de las cargas no lineales, se tienen altos contenidos armónicos. Por estas razones, la penetración de la GD puede comprometer la calidad de la energía, la estabilidad y seguridad de la red [1,2].

Ante este contexto, una manera de asegurar que la implantación de los sistemas de GD sea realmente ventajosa para el suministro eléctrico y su sostenibilidad es, proveyéndoles funciones adicionales o de soporte, por ejemplo, para la regulación de voltaje y/o de frecuencia y el manejo de potencia reactiva. Adicionalmente, se debe buscar que estos GD's inyecten corrientes con bajos niveles de contenido armónico e incluso que puedan compensar componentes armónicas externas. Desde luego, sin perder de vista que cada GD sea altamente eficiente, económico y con alta densidad de potencia.

Por lo tanto, un GD se tiene que concebir como un sistema multifuncional, cuyo diseño se tiene que abordar como un problema de optimización, no solo en términos de desempeño, sino que, además, debe satisfacer los requerimientos normativos, como lo muestra el estándar IEEE 1547-2018 [3]. Así pues, algunas de las funciones objetivo que se pueden contemplar en el diseño, de manera simple o múltiple son: costo, eficiencia o pérdidas, volumen, atenuación armónica, confiabilidad, esfuerzos de control, entre otros. La idea de un diseño optimizado es lograr que un GD que aproveche al

máximo los recursos energéticos, que sea económico, tenga una alta disponibilidad y que garantice condiciones seguras durante su interacción con la red eléctrica.

En este documento se abordan algunos enfoques, métodos empleados por diversos autores en la última década a los problemas de optimización. Se parte con una definición de GD y una descripción de los subsistemas eléctricos que lo conforman. En la sección 3 se muestra un contexto general del planteamiento del problema de optimización en la GD, así como el estado del arte sobre los enfoques propuestos por diversos autores, haciendo énfasis en el tipo de funciones objetivo, el conjunto de restricciones que lo limitan y las técnicas de optimización más empleadas. Por último, en la sección 4 se muestran las conclusiones a este documento, resumiendo los problemas de optimización abordados, así como las ventajas y/o desventajas.

2. GENERACION DISTRIBUIDA

2.1. Definición

En [4] se proponen algunas definiciones para la GD atendiendo a una serie de aspectos, como lo son: propósito de la GD, ubicación, capacidad o tamaño de la instalación, área de servicio, tecnología de generación, impacto medioambiental, modo de operación, propiedad y penetración de la GD. Por ejemplo, en México la comisión reguladora de energía (CRE) define la GD como aquella generación de tamaño reducido (menor a 0.5 MW) e interconectada a nivel de subestación [5]. Aunque el concepto de GD no cuenta con una definición generalizada, finalmente todas convergen en tres características principales: conexión cercana a la carga, generación a pequeña, mediana y gran escala, y la posibilidad de estar o no conectada a la red de distribución.

2.2. Estructura general de un sistema de GD

La Figura 1 representa dos sistemas de GD conectados a la red. En general, están compuestos por la fuente primaria de energía, un convertidor de entrada que regula la energía proveniente de esta fuente, un bus de CD, un convertidor CD-CA (inversor) y un filtro de salida. Generalmente, el sistema se encuentra conectado a la red en el punto de conexión común (PCC) a través de un transformador que lo aísla y protege contra sobrecargas.

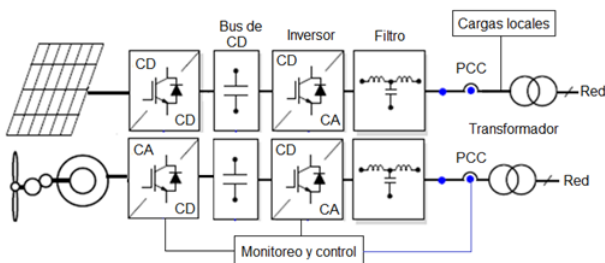


Figura 1. Esquema básico de un sistema de GD

Entre los componentes de un GD, la parte asociada con la electrónica de potencia es fundamental, especialmente el inversor en conjunto con el filtro, ya que son el medio de interface entre la fuente primaria de energía y el usuario o red eléctrica. La Figura 2 muestra una clasificación de diversas topologías de inversores [6].



Figura 2. Clasificación de los inversores

Por su parte, la etapa de filtrado se encarga de remover todas las componentes armónicas de alta frecuencia resultantes de la conmutación de los transistores en el inversor, durante la modulación de ancho de pulso (PWM). El tipo de filtro mayormente usado en inversores para GD's es el pasivo, y está conformado por combinaciones serie o paralelo de resistencias, inductores y capacitores. Entre los más comunes se encuentran el tipo: L, LC y LCL; estos últimos son los más utilizados ya que tienen una mayor razón de atenuación y mejor respuesta dinámica, aunque generalmente requieren del uso de resistencias de amortiguamiento para evitar problemas de resonancia [7].

Algunas de las tareas que llevan a cabo los inversores en conjunto con el filtro, a través de esquemas de control son: el control del voltaje y frecuencia, por ejemplo, en la etapa de sincronización/interconexión a red, o el control de la potencia activa que se inyecta a la red una vez interconectados. Desde luego, también deben satisfacer aspectos de calidad de la energía inyectada, lograr alta eficiencia en la conversión de energía y en varios casos, ser capaces de detectar condiciones anormales, como la isla.

3. OPTIMIZACION EN EL DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACION DISTRIBUIDA.

En un problema de optimización se debe modelar matemáticamente las condiciones operativas que se desean mejorar, para luego implementar una técnica de solución. Las funciones objetivo, en conjunto con las restricciones que se deben satisfacer, forman el modelo matemático del problema. Una función objetivo es un criterio expresado en términos de las variables que definen el comportamiento del sistema (variables de optimización) [8]. Esta función puede ser maximizada o minimizada según las necesidades del problema, ya que puede ser de tipo técnica o económica.

Las funciones objetivo pueden ser simples o múltiples. En el caso de las múltiples, estas se pueden tratar de manera independiente o sintetizadas en una función objetivo global en donde cada función objetivo puede o no ser ponderada de manera distinta. Por su parte, cuando se tratan de manera independiente, las técnicas de optimización entregan un conjunto de soluciones óptimas, conocido como frente óptimo de Pareto [9]. Para la selección de alguna solución se debe contar con alguna revisión previa del problema propuesto o emplear una técnica de toma de decisiones.

En el contexto de los GD's algunas funciones objetivo que se suelen definir son: ubicación y dimensionamiento óptimo de la GD en un sistema eléctrico, pérdidas de energía, costos de inversión, variaciones en los perfiles de tensión, capacidad de generación, la relación costo/beneficio, atenuación armónica, etc. [10]. En cuanto a las restricciones, estas tienen que ser evaluadas para cada posible solución. En los GD's, como restricciones se pueden encontrar: balances de potencia activa y reactiva, límites de voltajes, límites de potencia inyectada por la GD y límites de contenido armónico [11]. Se destaca que, si alguna solución no cumple todo el conjunto de restricciones, esta puede ser descartada o penalizada dentro de la función objetivo.

En general, el uso de técnicas de optimización aplicadas en sistemas de GD es muy amplio, abordándose problemas como: la influencia o el impacto de la GD sobre el sistema eléctrico; la ubicación y dimensionamiento de estos sistemas o a la reducción de costo [12]; no obstante, en este documento se abordan solo artículos basados en la optimización en el diseño de los subsistemas de electrónica de potencia, el filtro y eventualmente, de los controladores; todo ello con énfasis en mejorar el desempeño y la calidad de la energía suministrada por los sistemas de GD.

En 2009, Wei Sun et al. [13] compara un diseño tradicional y un diseño optimizado para un filtro LCL. Se eligen los parámetros de este filtro utilizando un algoritmo genético (GA) y la técnica de optimización por enjambre de partículas (PSO).

Se utilizó la tasa de atenuación armónica que se define en la ecuación (1) como la función objetivo.

$$Max(f) = \left| \frac{i_g(h_{sw})}{i_i(h_{sw})} \right| = \frac{1}{|1+r(1-L_i C_f \omega_{sw}^2)|} \quad (1)$$

Esta función establece la relación entre los armónicos de corriente del lado de red y del lado del convertidor a la frecuencia de conmutación; y es función de los valores de r , L_i y C_f . Las restricciones consideradas son:

- a) La potencia reactiva absorbida por el capacitor C_f debe ser inferior al 5% de la capacitancia base C_b , que a su vez está relacionada con la potencia activa nominal suministrada por el inversor.

$$C_f \leq 0.05 C_b \quad (2)$$

- b) La inductancia total L_T debe ser inferior al 10 % de la inductancia base L_b (para asegurar estabilidad y bajas pérdidas de conmutación), es decir,

$$L_i + L_g = L_T \leq 0.1 L_b \quad (3)$$

- c) Para evitar resonancias, la frecuencia de resonancia f_{res} del circuito LCL debe satisfacer (4), donde f_g es la frecuencia de red y f_{sw} la frecuencia de conmutación.

$$10f_g \leq f_{res} \leq 0.5f_{sw} \quad (4)$$

En 2010, Guohong Zeng et al. [14] presenta un método de diseño optimizado para un filtro LCL en un inversor conectado a red. El método se basa en el análisis de las componentes de voltaje y corriente de salida del convertidor y las relaciones inherentes entre los parámetros del filtro. La función objetivo es la capacidad total del filtro (S_T) dada en (5)

$$S_T = 3\omega_1 L_T I^2_i + 3\omega_1 C_f U^2_{p1} \quad (5)$$

donde ω_1 es la frecuencia fundamental de red, U_{p1} e I_i son los valores rms del voltaje y corriente fase a fase, y C_f es el valor del capacitor del filtro. La ecuación (6) muestra la relación de inductancias

$$L_g = r L_i \quad (6)$$

S_T indirectamente influye en el costo y volumen del filtro, por lo que se investiga la influencia de la relación de atenuación (β) y la relación de las inductancias (r); así, la optimización se plantea como las diferenciales parciales de S_T con respecto a β y r .

En 2013, Reza Toorani et al. [15] presenta un sistema de GD conectado a la red utilizando un filtro LC y una estrategia de

control PQ optimizada con GA. El objetivo es minimizar el error en estado estable y el sobretiro provocado por la estrategia de control. Para este fin las ganancias del controlador proporcional integral (PI) son las variables de optimización. La función objetivo es presentada a continuación.

$$OF = C_1 \times OF_1 + C_2 \times OF_2 \quad (7)$$

OF_1 relaciona los errores en estado estable de las potencias de salida. Por lo que,

$$OF_1 = |err(P_{out} - P_{ref}) + err(Q_{out} - Q_{ref})| \quad (8)$$

OF_2 relaciona los sobretiros de las potencias de salida.

$$OF_2 = Overshoot(P_{out}) + Overshoot(Q_{out}) \quad (9)$$

Para probar la efectividad de la optimización se proponen dos eventos, en el primero se variaban las potencias de referencia y en el segundo el valor de las cargas. El valor de la constante C_1 y C_2 decide qué evento es más importante desde el punto de vista del diseño de control, y qué criterios en un evento particular deben enfatizarse. Las simulaciones validan la efectividad del algoritmo de optimización y el rendimiento del controlador.

En 2014, Li Ning et al. [16] propone un diseño para un filtro LCL de un inversor trifasico. La frecuencia de resonancia es optimizada para lograr un buen efecto de filtrado y reducir la pérdida de potencia por la resistencia de amortiguamiento R_d . Para la optimización de R_d se utiliza la relación de atenuación armónica y la frecuencia de conmutación como valores de referencia. Se utilizaron restricciones para la inductancia total L_T , el inductor de lado del inversor L_i y el capacitor del filtro C_f . El método propuesto fue verificado en simulación y logró obtener un valor de R_d óptimo con una buena supresión del pico de resonancia y menores pérdidas.

En 2015, Xiangwu Yan et al. [17] establece tres funciones objetivo para obtener una "alta calidad" y "bajo costo" en un filtro LCL con amortiguación activa utilizando un algoritmo basado en NSGA-II. En ese sentido, las funciones objetivo están relacionadas a la atenuación armónica (FO1), la amplitud de la función de transferencia entre el voltaje de entrada y la corriente de salida (FO2), y la relación entre las inductancias del filtro (FO3). Las restricciones utilizan un rango de valores definido para el inductor de lado del convertidor, la inductancia total, el capacitor y el factor de amortiguamiento. Para verificar el método propuesto, se simula el inversor conectado a la red con el filtro LCL diseñado bajo un método tradicional y con el método propuesto. Con este último, se observa una atenuación armónica más baja y por lo tanto una disminución en la THD con inductores más pequeños y, por lo tanto, de menor costo.

En 2015, M. A. Djema et al. [18] presenta el análisis y control de un inversor fuente de voltaje de dos niveles modulado por ancho de pulso vectorial (SVPWM) y con un control de potencia directo (DPC). Para mejorar la calidad de la energía mediante la reducción de la distorsión armónica, también se describe un diseño de filtro LCL usando GA y PSO. El artículo establece la función objetivo dada en (10), donde Har es la atenuación armónica que se obtiene a partir de las ecuaciones (11-14).

$$obj_{fun} = w * Har + (1 - w) * L_T + Penalty \quad (10)$$

$$Har = \frac{Z_{LC}^2}{|w_{sw}^2 - w_{res}^2|} \quad (11)$$

$$Z_{LC}^2 = \frac{1}{(L_g C_f)} \quad (12)$$

$$w_{res}^2 = \frac{L_T Z_{LC}^2}{L} \quad (13)$$

$$L_T = L + L_g \quad (14)$$

Al desarrollar (10), la función objetivo resulta en la ecuación (1) previamente abordada por Wei Sun [14]; sin embargo, en esta ocasión se agrega un factor de ponderación "w". Se utilizan las restricciones (2-4) para la formulación del problema de optimización y en este caso se agrega una penalidad cuando la restricción (4) no cae en el rango de establecido de valores para la frecuencia de resonancia. Finalmente, los resultados de simulación muestran que el algoritmo PSO es más efectivo que GA debido a que se obtiene una mayor atenuación armónica y una menor THD.

En 2016, Zhiding Wu et al. [19] presenta un diseño optimizado para un filtro LCL con amortiguación pasiva en un inversor trifasico modulado con ancho de pulso senoidal (SPWM). Se utiliza GA para resolver el problema de optimización multiobjetivo relacionado con el rendimiento de atenuación armónica y el rizo de salida del filtro LCL, que para el autor refleja la calidad de energía provista por el inversor. La FO1 relacionada con la atenuación armónica es,

$$\min \sum_{n=h1}^{har} \propto n |I_{gh}/I_{ih}(\omega_n, L_2, C_f, R_c)| \quad (15)$$

En la función objetivo se evalúa la sumatoria de los armónicos en una función de transferencia que establece una relación entre la corriente de lado de red y la corriente del lado de convertidor $\left(\frac{I_{gh}}{I_{ih}}\right)$ con los valores que se muestran dentro del paréntesis, donde $\omega_n = 2\pi f_g$. R_c corresponde a la resistencia de amortiguamiento, C_f al capacitor y L_2 al inductor del lado de red. Por otro lado, la FO2 relacionada a la minimización del rizo de corriente es,

$$\min \Delta i = \frac{V_{CD}}{4f_s L_i} \quad (16)$$

Donde V_{CD} es el voltaje en el bus de CD, f_s es la frecuencia de conmutación y L_i el inductor del lado del convertidor. Las restricciones abordadas son las mostradas anteriormente en (2-4). En este trabajo se presenta un frente de Pareto con una gama de resultados óptimos. Para validar la efectividad del diseño, se realiza una simulación de comparación entre el método propuesto y un método convencional de diseño paso a paso. Los resultados muestran la efectividad del diseño optimizado al presentar una reducción de los armónicos y un bajo rizo de salida.

A continuación, se muestran algunos trabajos que abordan la optimización en la GD utilizando índices de desempeño que cuantifican el comportamiento de los lazos de control basados en la señal de error $e(t)$, la cual es la diferencia entre el valor deseado de la variable controlada y su valor real. De estos, el más utilizado por sus características y efectividad es:

Integral del tiempo por el error absoluto

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (17)$$

En 2013, Waleed Al-Saedi et al. [20] presenta una estrategia de control de potencia óptimo para un inversor de un sistema de GD modulado con SPWM. La estrategia de optimización se basada en el método de autoajuste en tiempo real de las ganancias del controlador PI utilizando un algoritmo PSO. El objetivo general es mejorar la calidad de la energía suministrada por este sistema en su interconexión con la red eléctrica. La regulación de voltaje y frecuencia, la respuesta dinámica, la respuesta de estado estable y la distorsión armónica son los principales parámetros de rendimiento considerados. El esquema de control comprende un lazo de control de corriente interno y un lazo de control de potencia externo basado en el marco de referencia dq y reguladores PI convencionales. El controlador de potencia está diseñado bajo el modo control de potencia voltaje-frecuencia (Vf) que se aplica cuando la unidad de GD se encuentra bajo condiciones de cambio de carga. La función objetivo del controlador se basa en ITAE (17), que se calcula utilizando la regla 1/3 de Simpson. Los resultados de la simulación muestran que el controlador propuesto proporcionó una excelente respuesta para satisfacer los requisitos de calidad de energía y la respuesta de control esperada.

En 2018, Mohamed Amine Djema [21] presenta el análisis y el control de un inversor trifásico modulado con SVPWM y utilizando un control DPC. El control propuesto se basa en la variación de los errores instantáneos de potencia activa y reactiva en el marco de referencias dq y la optimización del controlador proporcional integral derivativo (PID) mediante el índice de

desempeño ITAE. Para mejorar la calidad de la energía se propone una función objetivo para optimizar los parámetros del filtro LCL (10) utilizando las restricciones (2-4) en el problema propuesto. Se utiliza un algoritmo de objetivos múltiples llamado "Gray Wolf" para resolver el problema de optimización.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo a la revisión mostrada en el presente documento, algunos enfoques de optimización sugieren el uso de funciones objetivo para el diseño del filtro y los parámetros de control de un sistema de GD. Por la parte del filtro, se busca mejorar la calidad de la energía provista hacia la red, minimizando el contenido armónico, el rizo de corriente y las pérdidas de potencia; en algunos casos, los autores consideraron también factores como el volumen y costo. Para el diseño óptimo del filtro se utilizaron funciones objetivo simples y múltiples, estas últimas presentan un mayor alcance y mejores resultados al considerar de forma integral varios parámetros del sistema de GD. Por otro lado, considerar una función objetivo simple implica una menor complejidad de diseño y menores requerimientos de software, permitiéndoles realizar una comparación de efectividad entre dos o más técnicas de optimización. Dentro de estas técnicas, se presentó el uso de GA y algunas otras basadas en el comportamiento social de la naturaleza (PSO, GWO, etc.). Respecto a los parámetros de control, los trabajos presentados buscan minimizar el error en estado estable de la potencia activa y reactiva de referencia, minimizar el sobretiro provocado por la estrategia de control y obtener los parámetros óptimos en tiempo real de los controladores PI o PID utilizados. Para lograrlo, se valieron de índices de desempeño como el ITAE y funciones múltiples que contemplaban los parámetros del filtro y del controlador en conjunto. De manera general, se demostró que los diseños optimizados en comparación con los métodos tradicionales, satisfacen los requerimientos de diseño, soporte y de calidad de energía esperados.

Finalmente, algunas tendencias en el diseño optimizado abordadas por algunos autores indican el uso de funciones auxiliares de soporte a red como lo son: compensación de voltaje y frecuencia, disposiciones de monitoreo, mitigación de armónicos presentes en la red y aumentar el factor de potencia; en conjunto con el diseño óptimo del filtro y los parámetros del controlador, utilizando algoritmos de optimización. El objetivo principal es lograr un sistema integrado y optimizado que cumpla con los aspectos normativos para su interconexión con la red, con la mayor eficiencia energética, y de menor volumen y costo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo del Fondo Sectorial-CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética, proyecto PE-

A-17 del CEMIE-Redes; y de los Proyectos de Investigación Científica/TecNM, proyecto 8335.20-P

REFERENCIAS

- [1] Shengchuan Zhao, Yuanlong Liu, Wensheng Li and Shuguang Song, "Impacts of grid-connected photovoltaic generation on distribution networks," CICED 2010 Proceedings, Nanjing, 2010, pp. 1-4.
- [2] V. Khadkikar, R. K. Varma, R. Seethapathy, A. Chandra and H. Zeineldin, "Impact of distributed generation penetration on grid current harmonics considering non-linear loads," *2012 3rd IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Aalborg, 2012, pp. 608-614.
- [3] IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces," in IEEE Std 1547-2018 (Revision of IEEE Std 1547-2003) , vol., no., pp.1-138, 6 April 2018, doi: 10.1109/IEEESTD.2018.8332112.
- [4] T. Ackermann, "Distributed generation: a definition," vol. 57, pp. 195–204, 2001.
- [5] Comisión reguladora de energía, "Resolución Núm. RES/142/2017," 2018.
- [6] N. Torres, "Análisis armónico de técnicas de modulación aplicadas a un convertidor multinivel trifásico", Tesis de maestría, CENIDET, junio de 2016.
- [7] R. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, and C. Leth, "A Review of Passive Power Filters for Three- Phase Grid Connected Voltage-Source Converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 54–69, 2016.
- [8] R. A. Gallego et al. *Técnicas metaheurísticas de optimización* (2da. Ed.). Pereira, Colombia: Universidad Tecnológica de Pereira, 2008.
- [9] R. Beres, X. Wang, M. Liserre, F. Blaabjerg, and C. Leth, "A Review of Passive Power Filters for Three- Phase Grid Connected Voltage-Source Converters," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 4, no. 1, pp. 54–69, 2016.
- [10] P. S. Georgilakis y N. D. Hatziargyriou, "Optimal Distributed Generation Placement in Power Distribution Networks: Models, Methods, and Future Research," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, pp. 3420-3428.
- [11] S. S. Rao. *Engineering Optimization: Theory and Practice* (4ta. Ed.). Hoboken, NJ. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [12] K. Mahmoud et al., "Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems for Loss Minimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 31, pp. 960-969, 2016.
- [13] Tello-Maita, Josimar & Marulanda, Agustin. (2017). Optimization models for power systems in the evolution to smart grids: A review. *Dyna* (Medellin, Colombia). Pag. 102-111.
- [14] Wei Sun, Zhe Chen and Xiaojie Wu, "Intelligent optimize design of LCL filter for three-phase voltage-source PWM rectifier," 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference, Wuhan, 2009, pp. 970-974, doi: 10.1109/IPEMC.2009.5157524.
- [15] G. Zeng, T. W. Rasmussen and R. Teodorescu, "A novel optimized LCL-filter designing method for grid connected converter," The 2nd International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems, Hefei, 2010, pp. 802-805, doi: 10.1109/PEDG.2010.5545882.
- [16] R. Toorani, M. Ahmadi, A. Radmehr and M. Ahmadi, "Optimal design of distributed generation in grid-connected mode of operation using genetic algorithm," 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Mashhad, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/IranianCEE.2013.6599559.
- [17] N. Li, Y. Wang, R. Niu, W. Guo, W. Lei and Z. Wang, "A novel LCL filter parameter design method basing on resonant frequency optimization of three-level NPC grid connected inverter," 2014 International Power Electronics Conference (IPEC- Hiroshima 2014 - ECCE ASIA), Hiroshima, 2014, pp. 160-165, doi: 10.1109/IPEC.2014.6869574.
- [18] X. Yan, J. Tang, W. Zhang and Y. Zhang, "Multi-objective optimization design for active damping LCL grid-connected filter," *International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015)*, Beijing, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1049/cp.2015.0385.
- [19] M. A. Djema, M. Boudour and A. A. Ladjici, "Direct power control modeling with optimized LCL filter for grid integrated renewables," 2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT), Tlemcen, 2015, pp. 1-6, doi: 10.1109/CEIT.2015.7233179.
- [20] Z. Wu, M. Aldeen and S. Saha, "A novel optimisation method for the design of LCL filters for three-phase grid-tied inverters," 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), Melbourne, VIC, 2016, pp. 214-220, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2016.7796388.
- [21] Al-Saedi, Waleed & Lachowicz, S. & Habibi, Daryoush & Bass, Octavian. (2013). Voltage and frequency regulation based DG unit in an autonomous microgrid operation using Particle Swarm Optimization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 53. 742–751. 10.1016/j.ijepes.2013.06.002.

- [22] M. A. Djema, M. Boudour, K. Agbossou, A. Cardenas and M. L. Doumbia, "Optimized PID for Direct Power Control with an improved LCL filter design using GWO for Three-Phase Inverters," 2018 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), Algiers, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CISTEM.2018.8613611.