

## **Técnicas de optimización utilizadas en la ubicación y el dimensionamiento de los generadores distribuidos conectada a la red**

### **Optimization techniques used in the location and sizing of grid-connected distributed generators**

---

**Para citar este trabajo:**

Bravo, V., y Martínez, A., (2024). Técnicas de optimización utilizadas en la ubicación y el dimensionamiento de los generadores distribuidos conectada a la red. *Reincisol*, 3(5), pp. 1774-1798.  
[https://doi.org/10.59282/reincisol.V3\(5\)1774-1798](https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(5)1774-1798)

---

#### **Autores:**

##### **Víctor Bolívar Bravo-Vera**

Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí.  
Ciudad: Portoviejo, País: Ecuador  
Correo Institucional: [vbravo1575@utm.edu.ec](mailto:vbravo1575@utm.edu.ec)  
Orcid <https://orcid.org/0009-0001-4283-9969>

##### **Alejandro Javier Martínez-Peralta**

Facultad de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí.  
Ciudad: Portoviejo, País: Ecuador  
Correo Institucional: [amartinez8875@utm.edu.ec](mailto:amartinez8875@utm.edu.ec)  
Orcid <https://orcid.org/0000-0003-1176-5001>

**RECIBIDO:** 26 mayo 2024

**ACEPTADO:** 22 Junio 2024

**PUBLICADO** 3 julio 2024

## Resumen

Los generadores distribuidos (GD) han sido objeto de gran atención en los últimos tiempos debido a su impacto positivo en el sistema de distribución. El diseño óptimo de un sistema de distribución con recursos de generación distribuida no sólo se centra en el dimensionamiento de los generadores distribuidos, sino que además da la debida importancia a la ubicación de los generadores. La ubicación óptima de la GD mejora el rendimiento del sistema de distribución y ofrece una solución rentable, lo que da una nueva dimensión a la planificación del sistema de distribución. Los efectos positivos de la ubicación óptima de los generadores distribuidos se reflejan en la mejora de la fiabilidad del sistema de distribución, la reducción de los costes de interrupción de los clientes, la disminución de las pérdidas y la mejora del perfil de tensión, así como de la calidad de la energía en el terminal del consumidor. Con el fin de permitir a las compañías eléctricas obtener los máximos beneficios, el problema de la colocación requiere técnicas de optimización de última generación capaces de manejar múltiples objetivos simultáneamente con el fin de presentar la mejor solución factible. Este artículo proporciona una visión general de varias metodologías que se han adoptado para determinar la ubicación óptima del generador distribuido en el sistema de distribución con el fin de minimizar las pérdidas.

**Palabras clave:** Generación, técnicas heurísticas y metaheurísticas, optimización multiobjetivo, fiabilidad.

### Abstract

Distributed generators (DG) have received a lot of attention in recent times due to their positive impact on the distribution system. The optimal design of a distribution system with distributed generation resources not only focuses on the sizing of the distributed generators, but also gives due importance to the location of the generators. Optimal DG placement improves distribution system performance and offers a cost-effective solution, giving a new dimension to distribution system planning. The positive effects of the optimal location of distributed generators are reflected in the improvement of the reliability of the distribution system, the reduction of customer interruption costs, the reduction of losses and the improvement of the voltage profile, as well as of the quality of the energy at the consumer terminal. In order to enable power companies to realize maximum benefits, the placement problem requires state-of-the-art optimization techniques capable of handling multiple objectives simultaneously in order to present the best feasible solution. This article provide an overview of various methodologies that have been adopted to determine the optimal location of the distributed generator in the distribution system in order to minimize losses.

**Keywords:** Generation, Heuristic and Meta heuristic techniques, Multi objective optimization, Reliability.

## INTRODUCCIÓN

La generación distribuida (GD) se ve como una solución al aumento del consumo, cuyas características energéticas de las fuentes de alimentación conectadas, son de pequeñas fuentes de energía (de unos 10 MW o menos). El sistema de distribución está ubicado en el lugar más cercano a la carga para la que está diseñado, además considera los mejores puntos a los que puedes conectarte y la potencia máxima que puede generar energía, la misma que pueda soportar la red de distribución sin afectar las operaciones normales sistema.

En el entorno actual de desregulación, todo indica que desempeñará un papel importante en un futuro próximo. El principal objetivo del sistema eléctrico ha sido garantizar un suministro fiable y económico de energía eléctrica a sus consumidores (Prakash & Khatod, 2016).

Actúa como nexo de unión entre la zona de suministro de energía a granel y los clientes individuales con un flujo de energía unidireccional. Los estudios demuestran que alrededor del 70% de las pérdidas totales de energía del sistema eléctrico se producen en el lado de la distribución. Las pequeñas fuentes de generación de energía conectadas directamente a la red o casi cerca del consumidor final se denominan "recursos energéticos distribuidos (DER)" o "GD". La GD es un atractivo sustituto de la generación centralizada de energía. Las unidades de GD incluyen fuentes de energía renovables y no renovables (Keane et al., 2017).

Los generadores distribuidos GD ofrecen muchas ventajas en el rendimiento del sistema de distribución. Dentro de esas ventajas técnicas tenemos; reducción de las pérdidas en la línea, mejora del perfil de tensión, mejora de la calidad de la energía, mejora de la fiabilidad y seguridad del sistema.

De la misma forma presenta beneficios económicos como; inversiones aplazadas para mejorar las instalaciones, reducción de los costes de operación y mantenimiento de algunas tecnologías de GD, aumento de la productividad, reducción de los costes sanitarios debido a la mejora del medio ambiente, reducción de los costes de combustible debido al aumento de la eficiencia global, reducción de los requisitos de reserva y de los costes asociados, menores costes de explotación gracias a la reducción de las puntas de consumo.

De igual manera un eje importante son los beneficios medioambientales, los cuales coadyuvan a la reducción de las emisiones contaminantes y al fomento de la generación basada en energías renovables.

No obstante, las GD también pueden afectar de forma negativa o beneficiosa, en función de su tamaño y ubicación.

Con la reestructuración y las tarifas basadas en el rendimiento, es fundamental que las empresas de servicios públicos minimicen el impacto negativo de la GD y aumenten al máximo su impacto positivo (Gustavo López, 2019).

La integración de los recursos energéticos renovables (RER) basados en el sistema de distribución tiene ventajas medioambientales como ecológicos (sin emisiones), de libre disponibilidad, abundantes en la naturaleza, etc. (Pesaran H.A et al., 2017). Los sistemas de GD más utilizados en el sector residencial son la tecnología solar fotovoltaica, las pequeñas turbinas eólicas, las pilas de combustible, las ER alimentadas con gas natural y los generadores de reserva de emergencia alimentados normalmente con gasóleo o gasolina. Sin embargo, los sectores comercial e industrial utilizan sistemas de cogeneración, paneles solares fotovoltaicos, energía eólica, energía hidroeléctrica, incineración de biomasa, combustión de pilas de combustible con biomasa o gas natural, motores de combustión alternativos y generadores de reserva alimentados con gasóleo (Onlam et al., 2019).

La integración de unidades de GD no garantizará la fiabilidad y estabilidad del sistema si se colocan en lugares no óptimos y con tamaños diferentes. En lugar de mejorar la fiabilidad y mantener la estabilidad del sistema, afectará al perfil de tensión y aumentará las pérdidas del sistema.

El objetivo de este trabajo es presentar algunas técnicas de optimización utilizadas en la ubicación y el dimensionamiento de los generadores distribuidos conectada a la red, de una amplia selección de investigaciones sobre técnicas analíticas, clásicas (no heurísticas), metaheurísticas, híbridas y otras técnicas variadas para la asignación y el dimensionamiento de GD, junto con la función objetivo, los sistemas de prueba, las ventajas y las desventajas.

### **Generación distribuida**

Si bien el concepto de GD no es nuevo, hoy en día resulta más interesante por sus innumerables ventajas frente a los generadores centrales. La denominación que se da para la GD varía en todo el mundo. En cuanto a su definición y tamaño, no hay uniformidad: en los distintos países recibe diferentes nombres, como generación dispersa, generación empotrada, generación descentralizada, etc.

Varios investigadores la definen a su manera: "La GD es una fuente de energía eléctrica conectada directamente a la red de distribución o al contador del cliente". Sin embargo, el Consejo Internacional de Grandes Redes (CIGRE) define la GD como "todas las unidades de generación con una capacidad máxima de entre unos pocos kW y 100 MW, que normalmente están conectadas a la red de distribución y que no están proyectadas ni gestionadas de forma centralizada" (Mohan & Albert, 2017).

Unidades de generación de electricidad que se conectan directamente a la red de distribución local, en lugar de conectarse a la red de transporte.

La generación de energía eléctrica de la GD en los distintos niveles según la capacidad de generación se muestra en la Tabla 1.

Actualmente, un número bastante reducido de tecnologías de GD se encuentran todavía en fase de investigación y desarrollo. Las principales tecnologías de GD con sus capacidades de generación de energía eléctrica, ventajas y desventajas se muestran en la Tabla 2 (Suyono et al., 2019).

Tabla 1. Generación de GD a diversos niveles

<b>Nº</b>	<b>Clase</b>	<b>Tamaño</b>
1	Microgeneración distribuida	1W o 5 kW
2	Pequeña generación distribuida	5 kW o 5 MW
3	Generación distribuida media	5 MW o 50 MW
4	Gran generación distribuida	50 MW o 300 MW

Tabla 2. Principales tecnologías de GD y sus ventajas y desventajas

No.	Tecnologías GD	Rangos de generación de energía eléctrica	Méritos	Deméritos
1	Tecnología solar Energía solar fotovoltaica (SPV) Planta solar térmica Solar térmica (sistema Lutz)	200 W – 3000 kW 1 MW – 80 MW 10 – 10 MW	Más fácil y limpio. Sin costes de mantenimiento Sin combustible. Respetuoso con el medio ambiente.	Requieren grandes colectores solares. Los sistemas solares térmicos son peligrosos para la salud. Necesitan un banco de baterías para el almacenamiento. Los módulos fotovoltaicos son un problema de gestión.
2	Gasificación integrada Turbina de gas combinada	30 kW – 3000 kW	Mejora de la eficiencia del sistema Menos emisiones Mayor fiabilidad	El coste inicial es muy elevado. Calor no utilizado disipado en la atmósfera. Más mantenimiento. Coste inicial muy elevado.
3	Micro Turbina	30 kW - 1 MW	Mejora de la eficiencia del sistema. Menos emisiones Mayor fiabilidad.	Menos emisiones. El coste inicial es mayor.
4	Motor de combustión interna (IC)	5 kW–10 MW	Respuesta rápida. Sin inversión.	La emisión es mayor. Requiere más mantenimiento.
5	Pequeñas centrales hidroeléctricas  Micro hidráulica	5 kW – 100 MW  1 kW – 1 MW	Fuente de energía libre y renovable. Menor coste de instalación Ecológico.  Pequeño tamaño, ligero. Sin emisiones. Menos ruido.	La generación depende del agua. Afectada en época de crecidas. La demanda de carga no puede satisfacerse. El coste inicial es superior. Coste más elevado. Baja temperatura de trabajo. Menor eficiencia. Mayor coste inicial.
6	Aerogenerador	200W – 3MW	El coste de generación es muy bajo. Sin efectos adversos para el medio ambiente.	Los aerogeneradores son peligrosos. Contaminación acústica. La velocidad del viento afecta a la producción.

				La producción de energía variable depende en gran medida de la velocidad del viento.
7	Energía de la biomasa	100 kW – 20 MW	<p>Sin combustible. Ahorro de uso del suelo. Fuente de energía renovable. Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Reducir la dependencia del combustible convencional.</p>	<p>La combustión de biomasa produce contaminación atmosférica. Limitación de las fuentes. El mantenimiento es caro. Erosión del suelo.</p>

### **La importancia del dimensionamiento y la ubicación óptimos de la GD**

La instalación y el dimensionamiento de las unidades de GD en la red de distribución es fundamental y constituye todo un desafío, ya que una ubicación óptima y estratégica de la GD reduce las pérdidas del sistema, mejora el perfil de tensión del sistema, la capacidad de carga, la fiabilidad, la estabilidad, la seguridad energética, la regulación de la tensión, el margen de estabilidad de la tensión, la calidad de la energía, la caída y el aumento de la tensión, el factor de potencia del sistema, etc. Por otra parte, también se ha observado un flujo de potencia bidireccional (Ansari et al., 2019).

Las unidades de GD pueden permitir el retraso de la ampliación de la red para hacer frente al crecimiento de la carga. Mientras que la ubicación aleatoria o no estratégica de la GD crea muchos problemas, todas las ventajas mencionadas anteriormente se verán perjudicadas. Además, el sistema de protección de la red se ve afectado por el flujo de potencia bidireccional, ya que los sistemas están diseñados para un flujo de potencia unidireccional, esto puede llevar a aumentar las pérdidas del sistema. Por consiguiente, Es esencial que la ubicación y el dimensionamiento de las unidades de GD en el sistema de distribución sean óptimos y apropiados para maximizar sus beneficios tanto para las empresas de servicios públicos como para los consumidores (Uikey & Kori, 2021).

### **Objetivos del problema**

Se presenta el procedimiento general y los pasos necesarios para el dimensionamiento y la ubicación óptimos de las unidades de GD en la red de



distribución. Seguidamente, se organiza el grupo de parámetros asociados de forma lógica para formar la función objetivo con las restricciones adecuadas (Abdmouleh, Gastli, Ben-Brahim, et al., 2017).

Se define el objetivo del problema, que puede ser de objetivo único o multiobjetivo (las funciones de objetivo único son las que minimizan las pérdidas de potencia del sistema, la mejora del perfil de tensión del sistema, la minimización de costes, la mejora de la fiabilidad del sistema, etc. y la función multiobjetivo sería la combinación de dos o más funciones de objetivo único) considerando los parámetros adecuados y constituyendo la función objetivo, que puede ser la siguiente (Liu et al., 2019).

### **Función objetivo**

Inicialmente, hay que decidir si la función objetivo debe minimizarse o maximizarse. Posteriormente, tras formular la función objetivo teniendo en cuenta todos los parámetros asociados a ella (Quintero-Duran et al., 2017). Se optimiza la función objetivo:

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + \dots x_n = \sum_{k=1}^n X_k \quad (1)$$

*Pérdidas de potencia del sistema:* las pérdidas del sistema pueden determinarse como:

$$x_1 = X (P_L) = P_L \quad (2)$$

donde  $P_L$  son las pérdidas de todo el sistema, ajustando el  $P_L$  tomando factor de ponderación por lo que el  $x_1$  final será:

$$x_1 = \beta_j \frac{P_L^{afterGD}}{P_L^{beforeGD}} \quad (3)$$

donde  $\beta$  es el factor de ponderación y 'j' es el número de bus, donde se va a instalar la GD.

*Factor de perfil de tensión:* el perfil de tensión depende de la tensión del bus. se puede escribir como tensión después de la colocación de la GD y tensión antes de la colocación de la GD como 1,0 p.u. Por lo tanto:

$$x_2 = \mu_j (V_{bus,j}^{afterGD})^2 \quad (4)$$

*Factor de corriente de cortocircuito:* este parámetro está relacionado con la seguridad y puede definirse como:

$$SCL_j = \frac{i_{SCL_j}^{afterGD} - i_{SCL_j}^{beforeGD}}{i_{SCL_j}^{afterGD}} \quad (5)$$

*Factor de dimensionamiento (capacidad):* los recursos de GD se pueden extraer de la forma más eficiente, para lograr este objetivo, el dimensionamiento se debe realizar a la perfección o, de lo contrario, el sobredimensionamiento de la GD puede provocar un flujo de potencia inverso (Rajalakshmi & Durairaj, 2021). Si la GD se coloca en el bus " $j^{th}$ " de capacidad "CP" :

$$x_4 = \sum_{j=1}^N \lambda_j \frac{PC_j}{S_{base}} \quad (6)$$

Por tanto, la función objetivo final será:

$$y = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 \quad (7)$$

### Restricciones

Las restricciones son parámetros extremadamente importantes. La función objetivo debe satisfacer todas las restricciones dadas. Si no se satisfacen todas las restricciones y se produce algún desajuste, el dimensionamiento y la colocación obtenidos en consecuencia no podrían servir al propósito y podrían dar lugar a un funcionamiento incorrecto del sistema. Las principales restricciones utilizadas son las siguientes (Lakshmi et al., 2021):

*Restricción de tensión de barras:* la tensión de las barras debe variar dentro de los límites prescritos:

$$V_{Min} < V_{bus,j}^{afterGD} > V_{MAX} \quad (8)$$

En este caso se permite una tolerancia del  $\pm 5\%$  de la tensión del bus, es decir,  $V_{Min}$  llega hasta (0,95 pu) y  $V_{MAX}$  hasta (1,05 p.u).

*Restricción de corriente de cortocircuito:* el nivel de corriente de cortocircuito de cortocircuito debe estar dentro de los límites permitidos. peligroso, este factor actúa como protección del sistema (Ogunsina et al., 2021).

$i_{SCL_j}^{afterGD} < \text{Nivel de corriente de cortocircuito dispositivos de protección instalados.}$

*Dimensionamiento de la GD (capacidad):* la suma de la potencia activa generada por las unidades de GD instaladas no debe superar la demanda de carga total del sistema (Gil-González et al., 2020).

$$\sum_{j=1}^{No.of GD} CP_j \leq P_{LOAD} \quad (9)$$

Esta limitación impide el flujo bidireccional de energía.

*Restricciones del factor de potencia:* el factor de potencia de la DG que se va a instalar debe variar dentro de un rango especificado, las empresas de servicios públicos también están interesadas en operar en factores de potencia superiores, este factor se considera principalmente en el momento del dimensionamiento (Zakaria et al., 2020).

$$\leq pf_{GD,j} \leq 1 \quad j = 1,2,\dots,\dots No.of GD \quad (10)$$

*Factor de ponderación:* los factores de ponderación deben seleccionarse de forma que la suma de todos los factores ponderados sea igual a 1, por ejemplo

$$\beta + \mu + \eta + \lambda = 1 \quad (11)$$

### Índices requeridos

Los índices ocupan un lugar importante en la estimación de la eficiencia del sistema. Los índices introducidos aquí ofrecen información sobre la desviación de los parámetros. Además, pueden detectar si los parámetros se encuentran en un rango tolerable o no (Abdmouleh, Gastli, Ben-brahim, et al., 2017).

Índice de pérdidas de potencia: mediante este índice, se puede calcular la magnitud de la diferencia de pérdidas de potencia activa y reactiva debida a la colocación de unidades de GD como:

$$PL_I = \left(1 - \frac{Re\{LossesafterGD\}}{Re\{LossesbeforeGD\}}\right) \times 100\% \quad \dots \dots (12)$$

$$QL_I = \left(1 - \frac{Im\{LossesafterGD\}}{Im\{LossesbeforeGD\}}\right) \times 100\%$$

$PL_I$  y  $QL_I$  son los porcentajes de fluctuación de las pérdidas de potencia activa y reactiva, respectivamente (Hernández, 2017).

*Índice de mejora del perfil de tensión:* calcula la desviación de la tensión después de la ubicación de las unidades de GD en la red de distribución (Daniel Hernández, 2013).

$$VP_{II} = \gamma \cdot \left(\frac{VP_{afterGD}}{VP_{beforeGD}} - 1\right) \times 100\% \quad (13)$$

donde  $VP_{beforeGD}$  de G sería y

$$\gamma = \begin{cases} 1 & (0.95 < V_k < 1.05) \\ 0 & (V_k < 0.95 \text{ or } V_k > 1.05) \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (14)$$

A mayor valor de  $VP_{II}$ , mayor mejora del perfil de tensión

*Índice de nivel de corriente de cortocircuito:* este índice puede evaluarse como

$$I_{SCL} = \rho \cdot \left(\frac{I_{SCL}^{afterGD}}{I_{SCL}^{beforeGD}} - 1\right) \times 100\% \quad (15)$$

donde  $I_{SCL}$  índice de nivel de corriente de cortocircuito y

$$I_{SCL} = \sum_{k=1}^N I_{SCL}^k \quad (16)$$

diagnosticar si el nivel de corriente de cortocircuito es superior a la magnitud admisible de los disyuntores ( $CB_S$ ) o no, se debe decidir mediante  $\rho$ , y  $\rho$  se puede definir como (Sambaiah, 2018).

$$\rho = \begin{cases} 1 & (I^k < I_{switch}^k) \\ 0 & (I^k > I_{switch}^k) \end{cases} \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (17)$$

Suponiendo que el nivel de corriente de cortocircuito de cada bus se encuentre dentro del rango permitido por los disyuntores,  $\rho$  entonces sería 1, de lo contrario 0.

*Nivel de penetración:* El nivel de penetración de las unidades de GD en el sistema puede estimarse a partir de la penetración media de las unidades de GD (Ansari et al., 2019).

$$\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^m x_{4i} P_{DG_{ij}} \leq r \cdot \sum_{j=1}^N P_{Dj} \quad (18)$$

donde N es el número total de autobuses, m es el número total de unidades de GD que se van a colocar,  $x_4$  es el factor de capacidad  $P_{DG_{ij}}$  potencia nominal de la  $t^{th}$  unidad de GD y "r" es el nivel máximo de penetración con o fracción de la carga pico y  $P_{Dj}$  carga activa pico en el autobús "j".

Las ventajas de este proceso son que la desviación del modus operandi explicado anteriormente puede provocar pérdidas no deseadas en el sistema, reducir el perfil de tensión, disminuir la fiabilidad del sistema, reducir la eficiencia y el rendimiento general del sistema, etc. (Keane et al., 2017).

### **Métodos para dimensionar y ubicar de forma óptima la GD en el sistema de distribución**

Para maximizar los beneficios de la GD, es necesario abordar el dimensionamiento y la ubicación adecuados de la GD en el sistema de distribución. El resultado es una reducción de las pérdidas del sistema, de los costes, de la inversión de las empresas de distribución, una mejora del perfil de tensión del sistema, de la fiabilidad del sistema y de la estabilidad de la tensión, etc. Los investigadores han adoptado los siguientes métodos para cumplir los objetivos de forma adecuada (Abdmouleh, Gastli, Ben-brahim, et al., 2017).

Las principales técnicas y métodos utilizados para dimensionar y ubicar la GD pueden clasificarse como se detalla a continuación:

- Técnicas analíticas
- Técnicas heurísticas
- Técnicas metaheurísticas

### **Técnicas analíticas**

Las técnicas analíticas representan el sistema mediante un modelo matemático y lo evalúan utilizando una solución numérica directa. Las técnicas analíticas ofrecen la ventaja de un tiempo de cálculo corto. Sin embargo, cuando el problema se vuelve complejo, las suposiciones utilizadas para simplificarlo pueden anular la precisión de la solución (Wang & Nehrir, 2004). Han presentado un enfoque analítico para determinar la ubicación óptima para colocar la GD tanto en sistemas radiales como en red para minimizar las pérdidas de potencia sujetas a restricciones de tensión. El enfoque propuesto no es un algoritmo iterativo como los programas de flujo de potencia (Prakash & Khatod, 2016).

Por lo tanto, no hay problemas de convergencia y los resultados pueden obtenerse muy rápidamente. Sin embargo, el autor no ha tenido en cuenta el impacto del dimensionamiento de la GD.

Autores como Gözel et al., (2005), han considerado también el impacto del dimensionamiento de la GD en la minimización de las pérdidas. De la misma manera Bhowmik et al., (2003) han desarrollado ecuaciones de forma cerrada para determinar los niveles de penetración permitidos de los recursos de generación distribuida sujetos a la no violación de los límites armónicos según la norma IEEE. La técnica analítica desarrollada es adecuada para muchos alimentadores de distribución radiales típicos con patrones de carga uniformes, linealmente crecientes o linealmente decrecientes.

### **Técnicas heurísticas**

Una heurística es un algoritmo que busca soluciones óptimas o casi óptimas a un problema sin preocuparse de si se puede demostrar que la solución es correcta. Los métodos heurísticos sacrifican aspectos como la precisión, la calidad y la exactitud en favor del esfuerzo computacional (eficiencia espacial y temporal). La heurística es determinista por naturaleza, de acuerdo a Griffin et al., (2000) han propuesto un enfoque heurístico iterativo simple para la colocación de GD con el

objetivo de minimizar las pérdidas utilizando el coeficiente de pérdida B. Autores como El-Khattam et al., (2004) han empleado la técnica iterativa para minimizar las inversiones y los costes de explotación. La ventaja del enfoque heurístico es su simplicidad. Son fáciles de aplicar en comparación con los enfoques analíticos. Sin embargo, el inconveniente es que no siempre garantiza la mejor solución.

### **Técnicas metaheurísticas**

Una metaheurística consiste en un proceso de generación iterativo que puede actuar como guía para que sus heurísticas subordinadas encuentren eficientemente las soluciones óptimas o casi óptimas del problema de optimización (Ansari et al., 2019). Existe muy poca diferencia entre las heurísticas y las metaheurísticas. La metaheurística se puede considerar un marco algorítmico general que se puede aplicar a diferentes problemas de optimización con relativamente pocas modificaciones en la heurística para adaptarla a un problema específico. La metaheurística pretende ampliar las capacidades de la heurística combinando uno o más métodos heurísticos (denominados procedimientos) mediante una estrategia de nivel superior (Keane et al., 2017).

Algunos de los algoritmos que adoptan un enfoque metaheurístico son la búsqueda Tabú, el recocido simulado, la optimización por colonia de hormigas, la optimización por enjambre de partículas, etc.

### **Tabú Search**

La búsqueda Tabú es un procedimiento metaheurístico para resolver problemas de optimización diseñado para guiar a otros métodos a escapar de la trampa de los mínimos locales. El método Tabú Search se emplea para encontrar soluciones óptimas y casi óptimas para una amplia gama de problemas clásicos y prácticos. Desde la programación a las telecomunicaciones, pasando por el reconocimiento de caracteres o las redes neuronales. Para evitar caer en un mínimo local, utiliza una memoria para poder recordar movimientos y soluciones ya explotados. Además, utiliza funciones de memoria para permitir estrategias de búsqueda como intensificar y diversificar (las explicaré en breve) (Quintero-Duran et al., 2017).

Se puede utilizar la búsqueda Tabú para orientar otros procesos que utilizan un conjunto de movimientos para transformar una solución en otra y proporciona una guía para medir el atractivo de estos movimientos. Un ejemplo de movimiento es

cambiar entre dos tareas, cambiar el valor de una variable (incrementar, minimizar) (Favuzza et al., 2007).

### **Optimización por enjambre de partículas**

La optimización por enjambre de partículas (PSO) forma parte de los algoritmos bioinspirados y es sencilla para buscar una solución óptima en el espacio de soluciones. Su característica diferencial con respecto a otros algoritmos de optimización es que sólo necesita la función objetivo y no depende del gradiente ni de ninguna forma diferencial del objetivo. También tiene muy pocos hiperparámetros (Arévalo Cordero, 2021).

Por lo general, cualquier pájaro tiene una zona de observación limitada. Sin embargo, tener más de un pájaro permite que todos los pájaros de un enjambre conozcan el área más amplia de una función de aptitud.

Modelemos matemáticamente los principios mencionados para que el enjambre encuentre los mínimos globales de una función de aptitud (Martínez & Albuérne, 2022).

### **Modelo matemático**

- En la optimización por enjambre de partículas, cada partícula tiene asociada una posición, una velocidad y un valor de aptitud.
- Cada partícula mantiene un registro de la posición de la partícula con mejor valor de fitness.
- Se mantiene un registro de la mejor posición global de fitness y del mejor valor global de fitness.

### **Optimización de colonias de hormigas**

Existen problemas de optimización muy importantes tanto en el ámbito científico como en el industrial. Entre los ejemplos reales de estos problemas de optimización se encuentran la programación de horarios, la programación de la distribución del tiempo de enfermería, la programación de trenes, la planificación de la capacidad, los problemas del viajante de comercio, los problemas de rutas de vehículos, los problemas de programación de grupos de tiendas, la optimización de carteras, etc. Por este motivo se han desarrollado muchos algoritmos de optimización.

La optimización de colonias de hormigas es una técnica probabilística para encontrar caminos óptimos. En ciencias de la computación y la investigación, el



algoritmo de optimización de colonia de hormigas se utiliza para resolver diferentes problemas computacionales (Muthubalaji et al., 2018).

Las hormigas construyen las soluciones de la siguiente manera; Cada hormiga parte de una ciudad elegida al azar (vértice del grafo de construcción). A continuación, en cada paso de construcción, se desplaza a lo largo de las aristas del grafo. Cada hormiga guarda una memoria de su camino y, en los pasos siguientes, elige entre las aristas que no conducen a vértices que ya ha recorrido. Una hormiga ha construido una solución cuando ha visitado todos los vértices del grafo (Suyono et al., 2019).

En cada paso de construcción, una hormiga elige probabilísticamente la arista a seguir entre las que conducen a vértices aún no visitados. Esta regla probabilística está sesgada por los valores de feromona y la información heurística: cuanto mayor sea el valor de feromona y heurístico asociado a una arista, mayor será la probabilidad de que una hormiga elija esa arista concreta. Una vez que todas las hormigas han completado su recorrido, se actualiza la feromona de las aristas. Inicialmente, cada uno de los valores de feromona se reduce en un porcentaje determinado (Uikey & Kori, 2021).

### **Recocido simulado (Simulated Annealing)**

El algoritmo de optimización de templado simulado puede considerarse una versión modificada del escalado estocástico (Suyono et al., 2019).

El método estocástico de escalada en pendiente mantiene una única solución candidata y da pasos de un tamaño aleatorio pero restringido a partir de la solución candidata en el espacio de búsqueda. Si el nuevo punto es mejor que el actual, éste se sustituye por aquél. Este proceso continúa durante un número fijo de iteraciones.

El recocido simulado ejecuta la búsqueda del mismo modo. La principal diferencia es que a veces se aceptan nuevos puntos que no son tan buenos como el punto actual (puntos peores).

Un punto peor se acepta de forma probabilística, donde la probabilidad de aceptar una solución peor que la solución actual es una función de la temperatura de la búsqueda y de cuánto peor es la solución que la solución actual (Quintero-Duran et al., 2017).

### **Implementar el templado simulado**

Hay un conjunto de pasos que se realizan para el recocido simulado. Estos pasos pueden resumirse como sigue:

- El templado simulado crea un punto de prueba aleatorio. El algoritmo selecciona la distancia entre el punto actual y el punto de prueba utilizando una distribución de probabilidad. La escala de dicha distribución es la temperatura. Con la función de templado de prueba, se establece la distancia de la distribución de puntos. Para mantener intactos los límites, el punto de prueba se desplaza gradualmente (Onlam et al., 2019).
- La fórmula de recocido simulado determina si el nuevo punto es mejor que el anterior o no. Si el nuevo punto es mejor, se convierte en el siguiente punto, mientras que, si el nuevo punto es peor, aún puede aceptarse en función de la función de aceptación del templado simulado (Sheidaei et al., 2008).
- Un algoritmo sistemático baja gradualmente la temperatura seleccionando el mejor punto generado en el proceso (Ansari et al., 2019).
- Para bajar los valores, los parámetros de recocido se ajustan subiendo y bajando las temperaturas. Los parámetros de recocido simulado se basan en los valores de los gradientes probables de cada dimensión objetivo (Candelo Becerra et al., 2017).
- El recocido simulado finaliza cuando alcanza el mínimo más bajo o cualquiera de los criterios de parada específicos (Pesaran H.A et al., 2017).

### **Algoritmo genético**

Los algoritmos genéticos (GA) son algoritmos de búsqueda heurística adaptativa que pertenecen a la mayor parte de los algoritmos evolutivos. Los algoritmos genéticos se basan en las ideas de la selección natural y la genética. Se trata de una explotación inteligente de la búsqueda aleatoria proporcionada con datos históricos para dirigir la búsqueda a la región de mejor rendimiento en el espacio de soluciones. Se utilizan comúnmente para generar soluciones de alta calidad para problemas de optimización y problemas de búsqueda (Liu et al., 2019).

Los algoritmos genéticos simulan el proceso de selección natural, lo que significa que aquellas especies que pueden adaptarse a los cambios de su entorno pueden sobrevivir, reproducirse y pasar a la siguiente generación. En palabras sencillas,

simulan la "supervivencia del más apto" entre individuos de generaciones consecutivas para resolver un problema.

Cada generación consta de una población de individuos y cada individuo representa un punto en el espacio de búsqueda y de posibles soluciones. Cada individuo se representa como una cadena de caracteres enteros flotantes o binarios. Esta cadena es análoga al cromosoma (Zakaria et al., 2020).

### **Fundamento de los algoritmos genéticos**

Los algoritmos genéticos se basan en una analogía con la estructura genética y el comportamiento de los cromosomas en la población. A continuación, se exponen los fundamentos de los AG basados en esta analogía (Machava et al., 2022):

1. Los individuos de la población compiten por los recursos y se aparean.
2. Los individuos que tienen éxito (los más aptos) se aparean para crear más descendencia que los demás.
3. Los genes de los progenitores "más aptos" se propagan a lo largo de la generación, es decir, a veces los progenitores crean descendencia que es mejor que cualquiera de ellos. Así, cada generación sucesiva se adapta mejor a su entorno (Quintero-Duran et al., 2017).

### **Enfoques varios**

El enfoque clásico de segundo orden ha sido utilizado por Rau & Wan, (1994), donde se identifica las ubicaciones óptimas de los recursos distribuidos en una red para minimizar las pérdidas, las cargas de línea y los requisitos de potencia reactiva. Las propiedades de convergencia del algoritmo propuesto se han examinado con un sistema de prueba de seis buses. Los autores informan de que el método de gradiente reducido no convergió para inyecciones nodales pequeñas. Los métodos de segundo orden con la transformación de variables propuesta produjeron rápidamente la convergencia al mínimo global. Otros enfoques que se han utilizado para resolver el problema de ubicación y dimensionamiento de la generación distribuida son el método de punto interior doble primal y la programación lineal (Muñoz-Delgado et al., 2019).

## CONCLUSIONES

Este artículo ha presentado una descripción crítica de varias técnicas empleadas para solucionar el problema de la ubicación y el dimensionamiento de la generación distribuida con respecto a varios objetivos.

Una comparación resumida de varias técnicas se han presentados varios estudios que revelaron que, al tratar problemas de optimización combinatoria multiobjetivo con varios óptimos locales, existe la posibilidad de quedar atrapado en uno de ellos. Es necesario llegar a un compromiso entre precisión, fiabilidad y tiempo de cálculo.

Sobre la base de esta revisión, se concluye que las técnicas analíticas pueden no ser adecuadas para problemas complejos, y que los enfoques metaheurísticos y heurísticos ofrecen una solución más factible y simplificada. No obstante, esto puede suponer un compromiso en la calidad de la solución y en el tiempo de cálculo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdmouleh, Z., Gastli, A., Ben-brahim, L., Haouari, M., & Al-emadi, A. (2017). Review of Optimization Techniques Applied for the Integration of Distributed Generation from Renewable Energy Sources. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>
- Abdmouleh, Z., Gastli, A., Ben-Brahim, L., Haouari, M., & Al-Emadi, N. A. (2017). Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, 113, 266–280. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>
- Alejandro Martínez, J. P., & Yolanda Albuérne, E. L. (2022). Techniques for the optimal location of distributed generation in electric power distribution networks. 8, 503–520.
- Ansari, M. M., Guo, C., Shaikh, M. S., Ali Jatoi, M., Yang, C., & Zhang, J. (2019). A review of technical methods for distributed systems with distributed generation (DG). 2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies, ICoMET 2019, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2019.8673475>

- Arévalo Cordero, W. P. (2021). Optimización en dimensionamiento y control energético de sistemas híbridos de energías renovables en Ecuador. 122.
- Bhowmik, A., Maitra, A., Halpin, S. M., & Schatz, J. E. (2003). Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18(2), 619–624. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.810494>
- Candelo Becerra, J. E., Hernández Riaño, H. E., & Santander Mercado, A. R. (2017). A hybrid bat-inspired algorithm with harmony search to locate distributed generation. *Espacios*, 38(57).
- Daniel Hernández, F. J. (2013). Algoritmo Metaheurístico Basado En Sistemas De Hormigas Para La Administración De Energía En Microredes Industriales. May, 106.
- El-Khattam, W., Bhattacharya, K., Hegazy, Y., & Salama, M. M. A. (2004). Optimal investment planning for distributed generation in a competitive electricity market. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3), 1674–1684. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.831699>
- Favuzza, S., Graditi, G., Ippolito, M. G., & Sanseverino, E. R. (2007). Optimal electrical distribution systems reinforcement planning using gas micro turbines by dynamic ant colony search algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(2), 580–587. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.894861>
- Gil-González, W., Montoya, O. D., Grisales-Noreña, L. F., Ramírez Vanegas, C. A., & Molina Cabrera, A. (2020). Hybrid Optimization Strategy for Optimal Location and Sizing of DG in Distribution Networks. *Tecnura*, 24(66), 47–61. <https://doi.org/10.14483/22487638.16606>
- Gözel, T., Hocaoglu, M. H., Eminoglu, U., & Balikci, A. (2005). Optimal placement and sizing of distributed generation on radial feeder with different static load models. *2005 International Conference on Future Power Systems*, 2005, 1–6. <https://doi.org/10.1109/fps.2005.204319>
- Griffin, T., Tomsovic, K., Secret, D., & Law, A. (2000). Placement of dispersed generations systems for reduced losses. *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000-January(c), 1–9.

- Gustavo López, C. (2019). Metodología general para la planeación y optimización de las redes de distribución considerando la generación distribuida.
- Helman Hernández, E. R. (2017). Optimización multiobjetivo aplicada a la ubicación y dimensionamiento de generación distribuida renovable en sistemas de distribución, considerando aspectos ambientales y sociales. Universidad del Norte División de Ingeniería.
- Keane, A., Ochoa, L. F., Member, S., Borges, C. L. T., Ault, G. W., Alarcon-rodriguez, A., Currie, R., Pilo, F., Dent, C., & Harrison, G. P. (2017). State - of - the - Art Techniques and Challenges Ahead for Distributed Generation Planning and. 1–10.
- Lakshmi, G. V. N., Jayalaxmi, A., & Veeramsetty, V. (2021). Optimal Placement of Distribution Generation in Radial Distribution System Using Hybrid Genetic Dragonfly Algorithm. *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s40866-021-00107-w>
- Liu, W., Luo, F., Liu, Y., & Ding, W. (2019). Optimal siting and sizing of distributed generation based on improved nondominated sorting genetic algorithm II. *Processes*, 7(12). <https://doi.org/10.3390/PR7120955>
- Machava, A. S., Kaberere, K. K., & Vilanculo, G. A. (2022). A Method for Optimal Distributed Generation Allocation Considering Load Demand Uncertainties. *International Journal of Electrical and Electronic Engineering and Telecommunications*, 11(3), 210–217. <https://doi.org/10.18178/ijeetc.11.3.210-217>
- Mohan, V. J., & Albert, T. A. D. (2017). Optimal sizing and sitting of distributed generation using Particle Swarm Optimization Guided Genetic Algorithm. *Advances in Computational Sciences and Technology*, 10(5), 709–720.
- Muñoz-Delgado, G., Contreras, J., & Arroyo, J. M. (2019). Distribution System Expansion Planning Considering Non-Utility-Owned DG and an Independent Distribution System Operator. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34(4), 2588–2597. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2897869>
- Muthubalaji, S., Anand, R., & Karuppiyah, N. (2018). An integrated optimization approach to locate the D-STATCOM in power distribution system to reduce

- the power loss and total cost. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 6(2), 283–294. <https://doi.org/10.21533/pen.v6i2.268>
- Ogunsina, A. A., Petinrin, M. O., Petinrin, O. O., Offorredo, E. N., Petinrin, J. O., & Asaolu, G. O. (2021). Optimal distributed generation location and sizing for loss minimization and voltage profile optimization using ant colony algorithm. *SN Applied Sciences*, 3(2). <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04226-y>
- Onlam, A., Yodphet, D., Chatthaworn, R., Surawanitkun, C., Siritaratiwat, A., & Khunkitti, P. (2019). Power loss minimization and voltage stability improvement in electrical distribution system via network reconfiguration and distributed generation placement using novel adaptive shuffled frogs leaping algorithm. *Energies*, 12(3), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en12030553>
- Pesaran H.A, M., Huy, P. D., & Ramachandaramurthy, V. K. (2017). A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75(October), 293–312. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.071>
- Prakash, P., & Khatod, D. K. (2016). Optimal sizing and siting techniques for distributed generation in distribution systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 111–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.099>
- Quintero-Duran, M., Candelo, J. E., & Sousa, V. (2017). Recent trends of the most used metaheuristic techniques for distribution network reconfiguration. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 10(5), 159–173. <https://doi.org/10.25103/jestr.105.20>
- Rajalakshmi, J., & Durairaj, S. (2021). Application of multi-objective optimization algorithm for siting and sizing of distributed generations in distribution networks. *Journal of Combinatorial Optimization*, 41(2), 267–289. <https://doi.org/10.1007/s10878-020-00681-2>
- Rau, N. S., & Wan, Y. H. (1994). Optimum Location of Resources in Distributed Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(4), 2014–2020. <https://doi.org/10.1109/59.331463>

- Sambaiah, K. S. (2018). A review on optimal allocation and sizing techniques for DG in distribution systems. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(3), 1236–1256.
- Sheidaei, F., Shadkam, M., & Zarei, M. (2008). Optimal distributed generation allocation in distribution systems employing ant colony to reduce losses. *Proceedings of the Universities Power Engineering Conference*.  
<https://doi.org/10.1109/UPEC.2008.4651548>
- Suyono, H., Hasanah, R. N., Mudjirahardjo, P., Fauzan Edy Purnomo, M., Uliyani, S., Musirin, I., & Awaln, L. J. (2019). Enhancement of the power system distribution reliability using ant colony optimization and simulated annealing methods. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 17(2), 877–885.  
<https://doi.org/10.11591/ijeecs.v17.i2.pp877-885>
- Uikey, P., & Kori, A. (2021). In *Distribution System Minimum Loss Reconfiguration using Ant Colony Optimization Algorithm*. *Proceedings of the 6th International Conference on Communication and Electronics Systems, ICCES 2021*, 7(4), 1196–1199.  
<https://doi.org/10.1109/ICCES51350.2021.9488929>
- Wang, C., & Nehrir, M. H. (2004). Analytical approaches for optimal placement of distributed generation sources in power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(4), 2068–2076.  
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.836189>
- Zakaria, Y. Y., Swief, R. A., El-Amary, N. H., & Ibrahim, A. M. (2020). Optimal Distributed Generation Allocation and Sizing Using Genetic and Ant Colony Algorithms. *Journal of Physics: Conference Series*, 1447(1).  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1447/1/012023>

### **Conflicto de intereses**

El autor indica que esta investigación no tiene conflicto de intereses y, por tanto, acepta las normativas de la publicación en esta revista.



Con certificación de:

