

Artículo Científico

Optimización de microrredes con generación distribuida utilizando GWO (Grey Wolf Optimizer) para mejorar la estabilidad de voltaje del sistema de prueba IEEE de 34 nodos**Microgrid optimization with distributed generation using GWO (Grey Wolf Optimizer) to improve voltage stability of the 34-node IEEE test system**Jefferson Danilo Pastuña Umajinga¹ , Johnatan Israel Corrales Bonilla² , William Armando Hidalgo Osorio³ ¹ Universidad Técnica de Cotopaxi, jefferson.pastuna2699@utc.edu.ec, Quito, Ecuador² Universidad Técnica de Cotopaxi, johnatan.corrales5518@utc.edu.ec, Quito, Ecuador³ Universidad Técnica de Cotopaxi, william.hidalgo7885@utc.edu.ec, Quito, Ecuador

Autor para correspondencia: jefferson.pastuna2699@utc.edu.ec

RESUMEN

Este estudio propuso la aplicación del algoritmo de optimización Grey Wolf Optimizer (GWO) para mejorar la estabilidad de voltaje y reducir las pérdidas de potencia en sistemas de generación distribuida con integración de fuentes de energía renovable. El sistema de prueba IEEE con 34 nodos sirvió como ejemplo de estudio, una red radial desequilibrada con 34 nodos, 32 líneas y cargas mixtas, modeladas en Opens. Esta configuración se vinculó con MATLAB para ejecutar el enfoque sugerido, que fusionó la herramienta OPECSS para el modelado y la simulación de redes, y MATLAB para aplicar la técnica GWO y mostrar resultados. La optimización tenía como objetivo encontrar el mejor punto y tamaño para los generadores de potencia de dispersión, y también la configuración de los puntos de control en los transformadores en varios puntos. Los resultados indicaron que el método GWO mejora efectivamente los niveles de voltaje, manteniéndolos dentro del rango permitido y disminuye en particular el desperdicio de energía en la red. Además, la configuración de potencia distribuida mejorada ayuda en la propagación y la robustez de la red eléctrica. Este enfoque ofreció un instrumento útil para opciones en el diseño y gestión de los sistemas de distribución de energía con un uso significativo de la energía verde, fomentando una gestión más efectiva, confiable y ecológica.

Palabras clave: Estabilidad de voltaje; Generación distribuida; Grey Wolf Optimizer; Optimización; Energías renovables; Redes de distribución.

ABSTRACT

This study proposed the application of the Gray Wolf Optimizer (GWO) optimization algorithm to improve voltage stability and reduce power losses in distributed generation systems with integration of renewable energy sources. The 34-node IEEE test system was used as a case study, where a methodology was developed that combined the OpenDSS software for modeling and simulation of the distribution network, and MATLAB for the implementation of the GWO algorithm and the visualization of results. The optimization focused on determining the optimal location and capacity of the distributed generators, as well as the configuration of the regulator transformer taps located in the different nodes. The results demonstrated that the application of GWO manages to significantly improve the voltage profiles, bringing them within acceptable operating limits, and reducing power losses in the system. Furthermore, the integration of optimized distributed generation contributes to the decentralization and resilience of the electricity system. This methodology provided a valuable tool for decision-making in the planning and operation of distribution networks with high penetration of renewable energy, promoting more efficient, reliable and sustainable operation.

Keywords: Voltage stability; Distributed generation; Gray Wolf Optimizer; Optimization; Renewable energies; Distribution networks.

Copyright

Los originales publicados en las ediciones impresa y electrónica de esta revista son propiedad del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-4.0 Internacional.

**Citas**

Pastuña Umajinga, J. D., Corrales Bonilla, J. I., & Hidalgo Osorio, W. A. Optimización de microrredes con generación distribuida utilizando GWO (Grey Wolf Optimizer) para mejorar la estabilidad de voltaje del sistema de prueba IEEE de 34 nodos. CONECTIVIDAD, 6(3). <https://doi.org/10.37431/conectividad.v6i3.343>

1. INTRODUCCIÓN

El creciente abastecimiento de la demanda de energía, aunado a la ineludible necesidad de mitigar los efectos del cambio climático, ha ido generando un proceso de progresiva incorporación de las energías renovables de forma global, en los sistemas de generación distribuida (SGD), el cual trae consigo numerosos beneficios: menor pérdida por la transmisión, mayor fiabilidad en la operativa y, una reducción notable de la dependencia de los combustibles fósiles (Razavi et al., 2019). No obstante lo anterior, la introducción de tecnologías variando y discreta, como la solar y la eólica, ha traído consigo nuevos retos técnicos en cuanto a la estabilidad del voltaje de las redes eléctricas.

Uno de los fundamentales aspectos de la garantía del correcto funcionamiento en los sistemas eléctricos es la estabilidad de voltaje que se puede definir como la capacidad del sistema para mantener el voltaje en niveles aceptables a pesar de perturbaciones ante cambios inesperados en las condiciones operativas (Meegahapola et al., 2020). La inserción masiva de fuentes renovables en los SGD ha empeorado la situación, dado que el comportamiento interno es variable y difícilmente predecible (Sun et al., 2019). Esto puede dar lugar a variaciones bruscas de las magnitudes de voltaje, que se originan como consecuencia de desbalances entre la generación y la demanda, que frecuentemente pueden provocar daños en los equipos eléctricos o aún cortes del suministro (Hu et al., 2019).

Durante décadas, se ha intentado responder a estos problemas mediante métodos clásicos de optimización, como la programación lineal y no lineal (Karunathilake et al., 2019). Si bien estos enfoques han mostrado efectividad en redes pequeñas o sistemas con parámetros relativamente estables, presentan limitaciones significativas cuando deben enfrentarse a la complejidad, escalabilidad y naturaleza incierta de los nuevos SGD. En este contexto, los algoritmos metaheurísticos han ganado atención como una alternativa robusta y flexible, capaz de adaptarse a condiciones dinámicas, no lineales y multivariadas (Azizivahed et al., 2020).

Dentro de esta clase de algoritmos, el Grey Wolf Optimizer (GWO) ha emergido como uno de los más prometedores. Propuesto por Mirjalili et al. (2014), este algoritmo bioinspirado se fundamenta en la jerarquía social y las estrategias de caza del lobo gris, y ha mostrado una capacidad notable para evitar estancamientos en óptimos locales, una implementación sencilla y una eficiencia aceptable en problemas de optimización complejos. Ozsoydan (2019) destaca el impacto positivo de los “lobos dominantes” en la eficiencia del proceso de búsqueda.

Dada et al. (2022) presentan una revisión exhaustiva del algoritmo, pero no solo teórica, sino que también muestran válidas investigaciones experimentales que permiten validar su potencial en sistemas reales. Por ejemplo, Hasan et al. (2021) utilizan GWO en una microrred híbrida, logrando estabilidad de voltaje a través de pruebas en campo. De igual forma, Abdelaziz et al. (2020) verifican que mediante la optimización de la ubicación de la generación fotovoltaica en redes urbanas se consigue una disminución en las pérdidas técnicas del ~12.8%. También Parizad et al. (2021) integran el algoritmo en sistemas SCADA para el control en tiempo real.

Si bien las aplicaciones son ampliamente simuladas, existen trabajos que han conseguido plasmar estos modelos en un entorno físico con éxito. En este sentido, Naji et al. (2022) hacen uso de GWO en conjunción con hardware-in-the-loop para la coordinación de transformadores mostrando durante las validaciones mejoras muy notables en la estabilidad.

Incluso con la progresión que han tenido estos algoritmos, se dejan vacíos muy destacados como el hecho de que muchos estudios en los que se aplica el GWO lo hacen en entornos deterministas sin contemplar la incertidumbre real asociada a la variabilidad de las fuentes renovables (Rabiee et al., 2020) o que los sistemas de prueba no se ajustan a la realidad operativa: bien porque se modelan a una condición ideal o por limitarse a planteamientos muy simplificados que no guardan relación con escenarios reales de operación (Ahmadi et al., 2021). Por lo que para intentar solucionar estas limitaciones en el presente trabajo se plantea una propuesta de aplicación del GWO a una mejora del perfil de voltaje de un sistema de distribución alimentado por generación distribuida renovable donde planteamos una optimización conjunta de la ubicación y capacidad de los generadores distribuidos y el ajuste de los transformadores reguladores. Esta propuesta se aplica al sistema IEEE de 34 nodos¹, conocido por reproducir de una manera muy realista condiciones de redes radiales no balanceadas.

El entorno de simulación utilizado combina OpenDSS, que se utiliza para el modelado detallado del sistema eléctrico, y MATLAB, que se utiliza para la ejecución del algoritmo de optimización. La selección de este entorno híbrido se justifica por constituir una eficaz herramienta que permite operar mediante mezclas de cargas, de realizar efectos de regulación mediante taps y que permite escenarios con penetración variable de fuentes renovables (Gangwar et al., 2022). La codificación de MATLAB fue responsable de generar scripts modulares adaptados a las características del sistema IEEE e incluye aspectos como la geolocalización de los nodos, la no homogeneidad de la carga, o la variabilidad temporal de la generación renovable (Pham et al., 2022).

Mediante una serie de simulaciones iterativas que evalúan diferentes configuraciones de generación y control, fue posible evaluar la capacidad del algoritmo para adaptar los perfiles de voltaje, reducir las pérdidas técnicas y operacionalizar dentro de rangos aceptables, utilizando una función objetivo que minimizaba las desviaciones cuadráticas de voltaje por nodo, lo que permitió una evaluación cuantitativa de los resultados.

Este enfoque integral, que une el modelado eléctrico riguroso, los métodos de optimización bioinspirados y la simulación co-integradas, es una herramienta útil para la planificación de redes de distribución eléctrica con alta penetración de recursos renovables. En particular, los resultados muestran que el uso del GWO permite una mejora sistemática del sistema y tiene importantes implicaciones técnicas y operativas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Sistema de Prueba IEEE de 34 Nodos

El sistema IEEE de 34 nodos se ha convertido en un referente en la literatura técnica como un sistema de referencia para el análisis de redes de distribución de energía eléctrica. Este sistema, en efecto, no se escoge al azar, sino que se decide en función de su capacidad de simular de manera realista un alimentador radial en condiciones de operación real. Entre sus principales características se encuentran las cargas desbalanceadas, las fases asimétricas y la aparición de dispositivos activos como transformadores con reguladores de tap, convirtiéndolo en un entorno ideal para estudiar el efecto de la generación distribuida (GD) en redes de energía eléctrica.

La red abarca una longitud aproximada de 60 km y está constituida por 34 nodos que están conectados por medio de 32 tramos eléctricos. Incluye, además, un transformador de cabecera equipado con la posibilidad de ajuste de su tensión mediante taps, múltiples transformadores secundarios a lo largo del sistema, y cargas que combinan configuraciones tanto monofásicas como trifásicas, lo que permite la simulación de un amplio rango de configuraciones operativas. En lugares seleccionados estratégicamente se han añadido unidades de generación distribuida para el análisis del comportamiento del sistema a diferentes niveles de penetración en renovables, así como para probar estrategias de integración bajo criterios de estabilidad de voltaje y de eficiencia operativa. Con la finalidad de contextualizar las condiciones técnicas y operativas de este sistema de ensayo, la Tabla 1 resume las principales características de dicho sistema. Esta información es la que caracteriza la modelación eléctrica en OpenDSS y resulta indispensable para poder reproducir con precisión el entorno simulado en los ensayos realizados a lo largo del desarrollo de este estudio.

Tabla 1. Características principales del sistema IEEE de 34 nodos

| Característica | Valor |
|--------------------------|--|
| Nodos | 34 |
| Líneas | 32 |
| Topología | Radial no balanceada |
| Transformadores | 2 (incluye transformador de cabecera con regulación de taps) |
| Rango de taps | ±10 pasos (simulado en valores continuos para optimización) |
| Tipo de cargas | Mixtas (monofásicas y trifásicas) |
| Total de carga nominal | ~2.5 MW |
| Longitud total de líneas | ~60 km |
| Software de modelado | OpenDSS |
| Software de optimización | MATLAB (con integración vía COM API) |

El modelado minucioso del sistema IEEE de 34 nodos fue llevado a cabo en el contexto de OpenDSS, un entorno de simulación de redes de distribución. Desde el inicio del proceso se hizo hincapié en la exactitud, no solo introduciendo las impedancias características de las líneas, sino también los aspectos de operación importantes como la tipología de carga concreta que se simulaba, la estructura de la red y los esquemas de control asociados a los transformadores reguladores de taps. Este enfoque permitió tener una representación fiel del comportamiento dinámico del sistema eléctrico que se encontraba bajo investigación.

Más tarde y tras solventar varios problemas técnicos, se logró establecer la unión funcional entre OpenDSS y MATLAB mediante la interfaz COM (Component Object Model). Esta adecuación dio cabida al inicio del algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO) junto con el entorno de simulación eléctrica; es decir, con el propio OpenDSS. Así, el objetivo del algoritmo fue doble: (i) localizar y dimensionar los generadores distribuidos óptimamente, (ii) de forma simultánea con el ajuste de los taps de los transformadores reguladores, a fin de mejorar la estabilidad de voltaje.

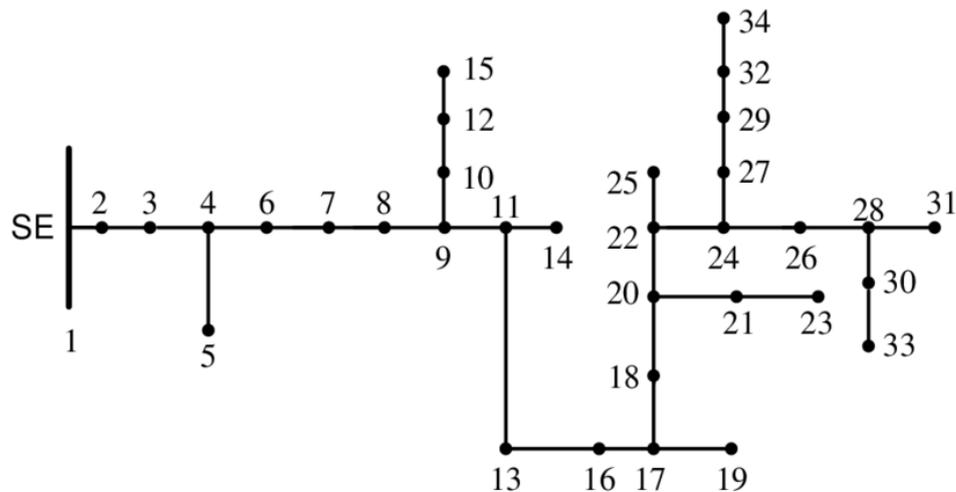
En la etapa inicial de análisis, totalmente realizada en OpenDSS, fueron localizados perfiles de voltaje anómalos en diferentes nodos de ésta. En concreto, se hallaron valores valorados en p.u. que sobrepasaban el límite superior o descendían por debajo del límite que se considera aceptable para operar (0.95 a 1.00 p.u.). Se concluye que este resultado pone de manifiesto un problema crítico de estabilidad de tensión en la red que evidenció la necesidad de la implementación de un esquema de optimización complejo como el GWO.

Integración de OpenDSS y MATLAB

Considerando que se recogieron problemas de estabilidad de voltaje en el sistema IEEE 34 nodos y está claro que es así, se propuso la aplicación del algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO) para determinar la ubicación y capacidad de los generadores distribuidos (GD) en el sistema. Esta propuesta no fue solamente algo a desarrollar, sino que implicó también la construcción de la arquitectura de simulación entre OpenDSS y MATLAB para realizar evaluaciones técnicas de forma reiterativa en base a diferentes configuraciones de generación y control.

Se modeló el sistema total en OpenDSS, incluyendo los parámetros de líneas, transformadores, esquemas de carga y elementos de control. A este entorno se le integraron unidades fotovoltaicas de generación distribuida (PVSystem) en nodos específicos del sistema IEEE de 34 nodos; colocados con inyección trifásica de P, fueron a su vez colocados según el perfil usual de carga, la topología de la Red y el análisis de sensibilidad de nodos. La potencia de cada unidad fue tratada como variable de optimización del proceso con GWO para evaluar el efecto de la record fuera del estudio de la configuración de GD por medio de las pérdidas técnicas de la red. La figura 1 muestra la topología del sistema IEEE de 34 nodos que se utilizó como banco de pruebas de forma habitual en la mayoría de los estudios de red de distribución, siendo una Red de tipo radial que presenta múltiples elementos activos como transformadores reguladores, cargas no balanceadas y nodos listas para GD.

Figura. 1. Sistema de Prueba IEEE de 34 nodos

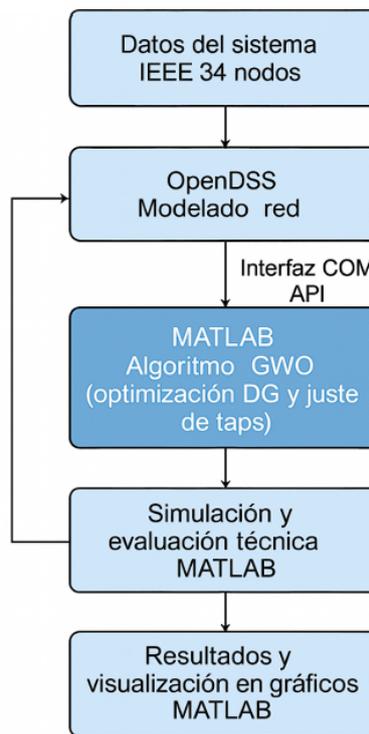


Fuente: Owuor et al., 2011

La conexión a MATLAB llegó a través de la interfaz COM (Component Object Model) y, por consiguiente, fue posible controlar el ambiente de simulación por medio de scripts externos, hacer un análisis eléctrico lo suficientemente detallado y volver resultados para cada una de las iteraciones del proceso de optimización. En este sistema integrado, OpenDSS tuvo a su cargo la simulación y modelado físico del sistema, y MATLAB fue el que, por su parte, se encargó de llevar a la práctica el algoritmo GWO mediante el diseño de funciones específicas que permiten controlar la selección de nodos, el ajuste de taps de transformadores y el estudio de desempeño eléctrico.

La Figura 2 sintetiza el proceso de integración entre OpenDSS y MATLAB. Este diseño arquitectónico fue de vital importancia para que el proceso de optimización pudiera ser llevado a la práctica de forma automatizada permitiendo la evaluación, la comparación y el ajuste de múltiples configuraciones de generación distribuida con un grado de precisión técnica elevado.

Figura 2. Diagrama de integración entre OpenDSS y MATLAB para la optimización del sistema IEEE de 34 nodos mediante GWO



Fuente: Propia

La elección de los nodos para la inclusión de generación fotovoltaica ha sido el resultado del análisis conjunto: topológico, eléctrico y operativo de los nodos, priorizando los que se situaban en posiciones intermedias o distales al transformador de cabecera por su mayor sensibilidad a la inyección de potencia activa y, en el análisis de sensibilidad mediante OpenDSS, nodos cuya figura respeta mejor las perturbaciones, generando una mejora en el perfil de voltaje y una reducción de las pérdidas.

Algoritmo del Lobo Gris (GWO)

El algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO) se adapta como una técnica sólida de optimización, el cual se desarrolla e inspira en el comportamiento cooperativo y jerárquico de los lobos grises (*Canis lupus*) en la naturaleza. La lógica operacional del GWO es la que emula la estructura social de la manada (alfa, beta, delta y omega también conocida como omega) y las fases típicas de comportamiento de la caza, como son, la localización, la persecución, el acorralamiento y el ataque. Estas estrategias naturales son ejecutadas, en el ámbito computacional, como medios eficientes de exploración y explotación muy utilizados para la solución de problemas no lineales, multivariados y multimodales.

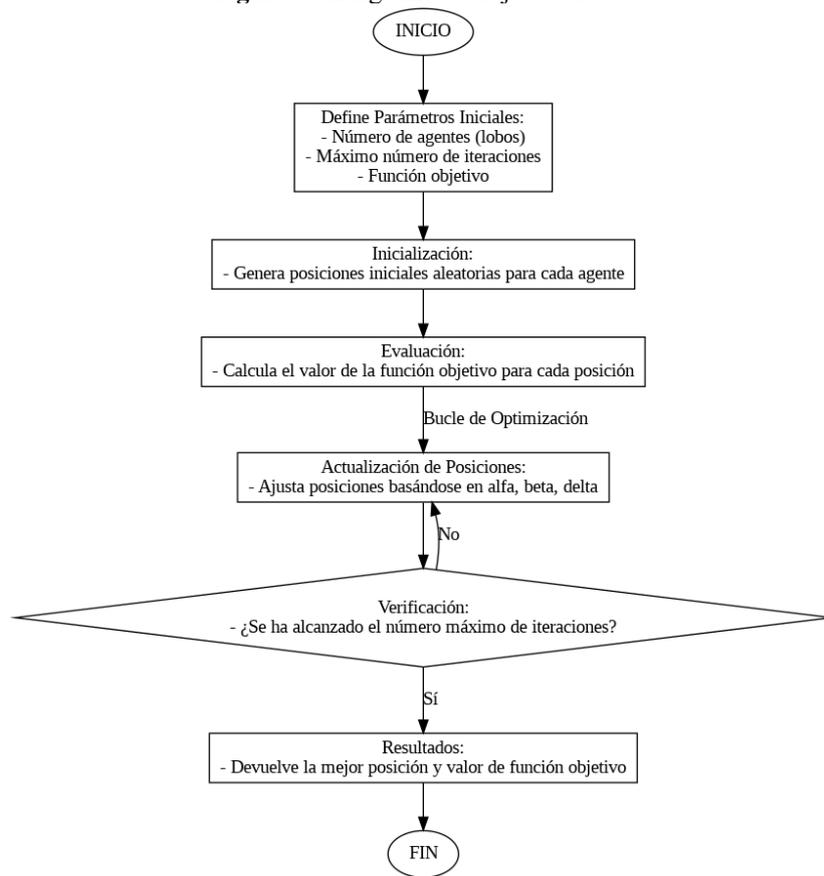
En este trabajo, el GWO se aplicó para optimizar la ubicación y la capacidad de los generadores distribuidos (GD) en el sistema IEEE de 34 nodos, cuya finalidad fue mejorar la estabilidad del perfil de tensión, cumpliendo en este caso que las tensiones en los nodos respondan al rango de operación de 0.95 a 1.05 p.u. y, por consecuencia, se adhore a los conceptos de seguridad y calidad del suministro.

La implementación del algoritmo GWO en el entorno MATLAB fue realizado mediante los siguientes pasos:

- Definición de la función objetivo: Se formuló una función basada en la minimización de la desviación cuadrática de los voltajes respecto al valor nominal, incorporando además la estabilidad global del sistema como variable de evaluación.
- Inicialización de la población: Se generó una población inicial de 30 agentes (lobos), cada uno representando una solución candidata que codificaba la ubicación y capacidad de las unidades de generación distribuida.
- Evaluación de la aptitud: La simulación de cada solución se ejecutó en OpenDSS sobre el sistema IEEE de 34 nodos, considerando la configuración propuesta. Se calcularon las desviaciones de voltaje y se evaluó el desempeño global mediante la función objetivo.
- Actualización de posiciones: Siguiendo los principios de la jerarquía social de los lobos, las posiciones fueron ajustadas utilizando operadores de caza, con base en la información de las mejores soluciones (alfa, beta y delta). Se buscó equilibrar exploración y explotación.
- Criterio de terminación: El proceso iterativo se mantuvo hasta alcanzar 100 iteraciones o hasta que se evidenciara una convergencia menor a 10^{-3} , lo cual indica la estabilización de la solución óptima.

La Figura 3 muestra el diagrama de flujo del algoritmo GWO utilizado en este estudio, ilustrando su lógica de funcionamiento y proceso iterativo.

Figura. 3. Diagrama de flujo del GWO



Fuente: Propia

Para facilitar la replicabilidad del estudio y aportar mayor claridad sobre el diseño de la optimización, se presentan a continuación en la Tabla 2, los parámetros iniciales utilizados en la implementación del algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO) en MATLAB:

Tabla 2. Parámetros de configuración del algoritmo GWO

| Parámetro | Valor asignado | Descripción |
|-----------------------------------|--|--|
| Tamaño de la población | 30 lobos | Número de agentes de búsqueda simultáneos en el espacio de soluciones. |
| Número máximo de iteraciones | 100 | Criterio de parada principal del algoritmo. |
| Rango de búsqueda de capacidad DG | [50 kW – 500 kW] | Intervalo permitido para la potencia de los generadores distribuidos. |
| Rango de taps de transformadores | [-10, +10] pasos (valor continuo) | Límite inferior y superior para el ajuste de taps. |
| Coefficiente de control “a” | De 2 a 0 (lineal) | Factor que regula la exploración y explotación del algoritmo. |
| Criterio de parada alternativo | Convergencia <math>< 10^{-3}</math> | Si la función objetivo no mejora en 10 iteraciones consecutivas. |
| Función objetivo | Minimizar desviación cuadrática de voltaje | Medida del desbalance entre los voltajes nodales y el valor nominal. |

Formulación Matemática

En el GWO, las posiciones de los lobos (agentes) se actualizan según la posición de los tres mejores lobos: Alpha (α), Beta (β), y Delta (δ). Estos tres lobos guían al resto de la manada. Las posiciones se actualizan con las siguientes fórmulas:

Cálculo de Coeficientes

$$\vec{A} = 2\vec{a}r_1 - \vec{a}$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2$$

Donde:

se reduce linealmente de 2 a 0 a lo largo de las iteraciones.

y son vectores de números aleatorios en el rango $[0, 1]$.

Actualización de la Posición

Para cada lobo en la manada (excluyendo a los lobos Alpha (α), Beta (β), y Delta (δ)).

$$\vec{D}_\alpha = \left| \vec{C}_\alpha \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X} \right|$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_\alpha \cdot \vec{D}_\alpha$$

$$\vec{D}_\beta = \left| \vec{C}_\beta \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X} \right|$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_\beta \cdot \vec{D}_\beta$$

$$\vec{D}_\delta = \left| \vec{C}_\delta \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X} \right|$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_\delta \cdot \vec{D}_\delta$$

La posición final del agente se actualiza como el promedio de las posiciones sugeridas por los tres lobos dominantes:

$$\vec{X} = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3}$$

Función Objetivo

La función objetivo específica depende de la aplicación del GWO en la optimización de sistemas eléctricos. Para este escenario, como el ajuste de taps en transformadores para minimizar las desviaciones de voltaje, la función objetivo está dado por la minimización de la suma de las desviaciones cuadráticas de los voltajes en todos los nodos respecto a un voltaje de referencia:

$$f(\vec{X}) = \sum_{i=1}^n (V_i(\vec{X}) - V_{ref})^2$$

Donde:

$V_i(\vec{X})$ es el voltaje en el nodo i que depende de la posición del vector de taps .

V_{ref} es el voltaje de referencia deseado.

Esta formulación ayuda a asegurar que los voltajes se mantengan lo más cerca posible del voltaje ideal en toda la red.

Visualización de Resultados en MATLAB

Finalizada la etapa de optimización mediante el algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO), se procedió a la representación gráfica de los resultados utilizando las herramientas de visualización de MATLAB. Esta fase no fue meramente ilustrativa; permitió evaluar el desempeño del algoritmo y validar los efectos de la optimización sobre el sistema eléctrico modelado.

Piliendo dos de las gráficas más relevantes generadas en el presente trabajo, y mostrando la evolución de la función objetivo con las iteraciones. Esta curva permitió verificar la convergencia progresiva del algoritmo hacia mejores soluciones y descubrir el momento en el cual la métrica de desempeño dejó de mejorar. La tendencia decreciente de dicha función objetivo mostró la capacidad del GWO en la búsqueda de configuraciones óptimas para la localización y capacidad de generación distribuida.

Se desarrollaron además representaciones gráficas comparativas de los perfiles de voltaje nodales antes y después de que se aplicara la optimización, lo que permitió observar claramente los efectos de la intervención; a medida que aumentaban algunas métricas de desempeño, las tensiones que antes estaban fuera del rango aceptable (0.95–1.05 p.u.) lograron ser corregidas

tras la ejecución del algoritmo. El comportamiento de las tensiones después de aplicar la optimización denotó un aumento de la homogeneidad de los niveles de voltaje y una disminución de las desviaciones, principalmente en los nodos más críticos de la red.

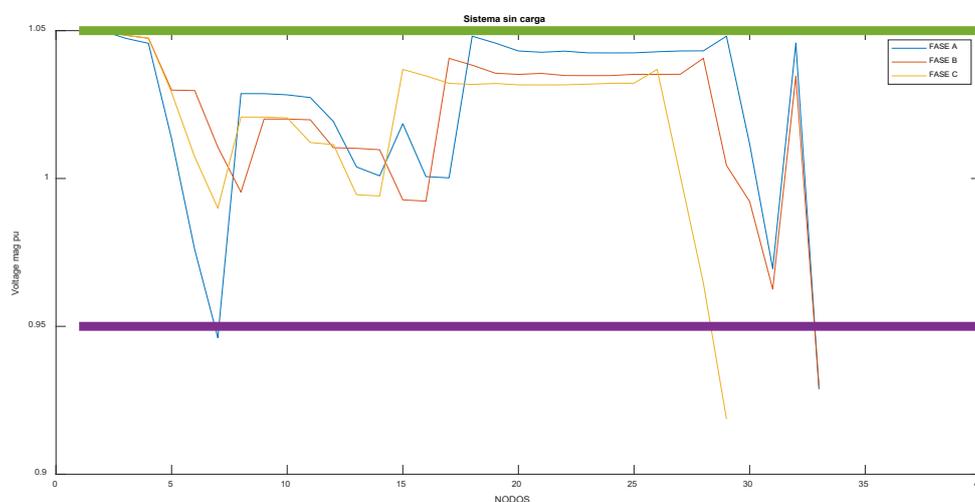
Esta representación de los resultados técnicos permitió su interpretación por parte de operadores y de diseñadores de red, mediante una representación intuitiva que mostraba cómo la incorporación de generación distribuida, bien dimensionada y localizada, puede tener efectos directos sobre la calidad del suministro eléctrico. Se validó también la robustez de la plataforma desarrollada mediante la integración OpenDSS con MATLAB, mediante la posibilidad de realizar simulaciones iterativas bajo condiciones de operación realistas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos reflejan de manera cuantificable la capacidad del algoritmo Grey Wolf Optimizer (GWO) para mejorar el desempeño eléctrico de sistemas de distribución con generación distribuida, para lo cual se toma como línea base el sistema IEEE de 34 nodos. Este enfoque de optimización no solo logró, reducir las pérdidas de potencia, sino que además logró corregir deficiencias muy significativas en el perfil de voltaje, lo cual es una buena evidencia técnica que respalda la aplicabilidad del método en condiciones reales, pero con alta penetración de energías renovables.

Antes de que el algoritmo entrara en funcionamiento, se realizó un análisis del estado base del sistema mediante simulaciones en OpenDSS considerando condiciones nominales de carga, lo que permitió concluir que diversos nodos presentaban niveles de tensión fuera del rango técnico aceptable (0.95–1.05 p.u.), como puede verse en la Figura 4. Los resultados iniciales corroboran la hipótesis de que el sistema no posee mecanismos suficientes de regulación de voltaje en su configuración inicial lógica, lo que justifica la necesidad de aplicar estrategias de control avanzado para evitar que el sistema presente fallas operativas, fluctuaciones o afectación de la calidad de servicio.

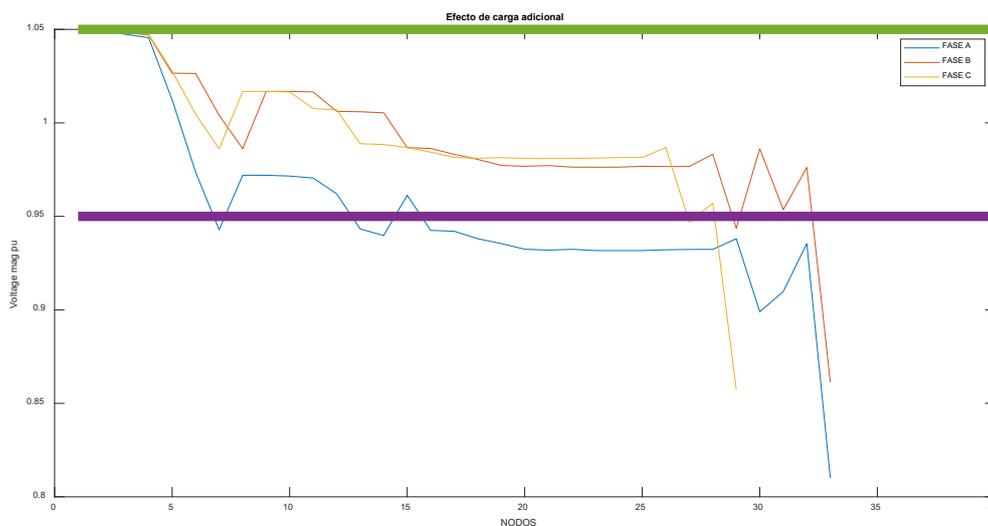
Figura. 4. Valores de voltaje en pu del sistema de prueba de 34 nodos



Fuente: Propia

Con el objetivo de ahondar en el diagnóstico, se recrearon situaciones de sobrecarga progresiva en los distintos nodos, incrementando la demanda del sistema gradualmente hasta el umbral que se deseara. Esta explotación de la red permitió observar el comportamiento de la red bajo condiciones más exigentes y la forma en que ésta reacciona. Los resultados mostrados en la Figura 5 evidencian una caída sostenida del voltaje nodal por debajo del valor mínimo operativo (0.95 p.u.), sobre todo en los nodos lo suficientemente distantes a la subestación. Este resultado señala una debilidad estructural del sistema ante picos de carga, la cual compromete de forma directa la estabilidad del suministro así como la eficiencia energética de la red.

Figura. 5. Valores de voltaje en pu del sistema de prueba de 34 nodos



Fuente: Propia

La trascendencia de los resultados obtenidos radica en que no se tratan solamente de una prueba numérica del algoritmo sino que, al mismo tiempo, tienen implicaciones directas respecto al diseño de las actuales redes. Las simulaciones han confirmado que sin la implementación de un esquema de compensación activa, el sistema evidenciará fallas evidentes en escenarios reales de alta demanda por lo que la puesta en marcha de algoritmos de tipo bioinspirado como el GWO, se convierte en una alternativa técnicamente viable y eficiente para mantener el perfil de voltaje en niveles aceptables en condiciones operacionales de estrés.

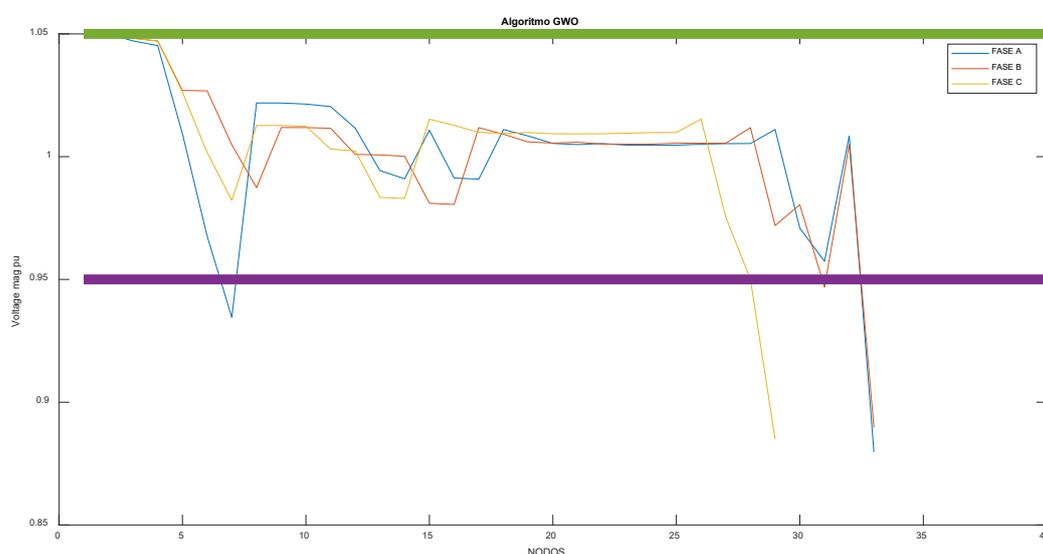
Mejor Configuración de Taps

El resultado inmediato del proceso de optimización que ofrece, como mejor una mejor configuración de taps la siguiente 16, 6.4055, 5.54945, 8.80462, 8.76856 y 10.2726. Cada uno de los valores se puede asimilar a establecer la capacidad de cada uno de los transformadores reguladores del sistema, que se partieron no por elección arbitraria de un valor sino que se fueron extraídos de varias iteraciones de búsqueda dirigidas en función de los impactos en la estabilidad del sistema. Por tanto, estos valores podrían asimilarse a la capacidad o punto de convergencia más óptimo en el cual se puede llevar al conseguirse en el algoritmo exhibido, con lo cual el rendimiento eléctrico del sistema mejoró.

Tal y como se ha apuntado anteriormente, esta optimización no solo abarca el contenido de los transformadores, sino que también se incluyen el mejor localización y mejor dimensionamiento de los generadores distribuidos y también la mejor coordinación con los mecanismos que regulan el voltaje. Todo ello si se ha imperfectamente implementado en el modelo del sistema IEEE de 34 se nodos se hizo palpable como un cambio en el comportamiento eléctrico de la red..

En la Figura 6, se visualizan los valores de voltaje obtenidos luego de aplicar la configuración óptima. A diferencia de los escenarios anteriores, todos los nodos permanecen dentro del margen operativo permitido (0.95 a 1.05 p.u.), lo cual constituye un indicador inequívoco de que el algoritmo logró cumplir su propósito principal: estabilizar el sistema frente a perturbaciones de carga y topología.

Figura. 6. Valores de voltaje compensados mediante el GWO



Fuente: Propia

Valor de la Función Objetivo

El mínimo valor al que llegó la función objetivo durante el proceso de optimización fue de 0.093054, un número que, si bien es escaso (pues toma una magnitud numérica pequeña), tiene una relevancia técnica importante.

Esta baja desviación cuadrática con respecto al nominal de tensión muestra un muy buen comportamiento de la red; además, el sistema consiguió mantener tensiones en el rango técnico (0.95 a 1.05 p.u.) con muy poca dispersión respecto a la tensión nominal.

Este resultado es una validación cuantitativa del buen comportamiento de la Grey Wolf Optimizer (GWO), así como también su capacidad para resolver problemas de optimización muy complejos de redes eléctricas de distribución. La función objetivo en este contexto, a su vez, cumplió su propósito principal: reducir al mínimo las desviaciones del perfil de tensión que se puede dar en diversas condiciones operativas, mejorando al mismo tiempo en el sistema de suministro eléctrico en términos de calidad y confiabilidad.

Simulación con Configuración Óptima (*Simulación con la configuración óptima de taps obtenida mediante el algoritmo GWO*)

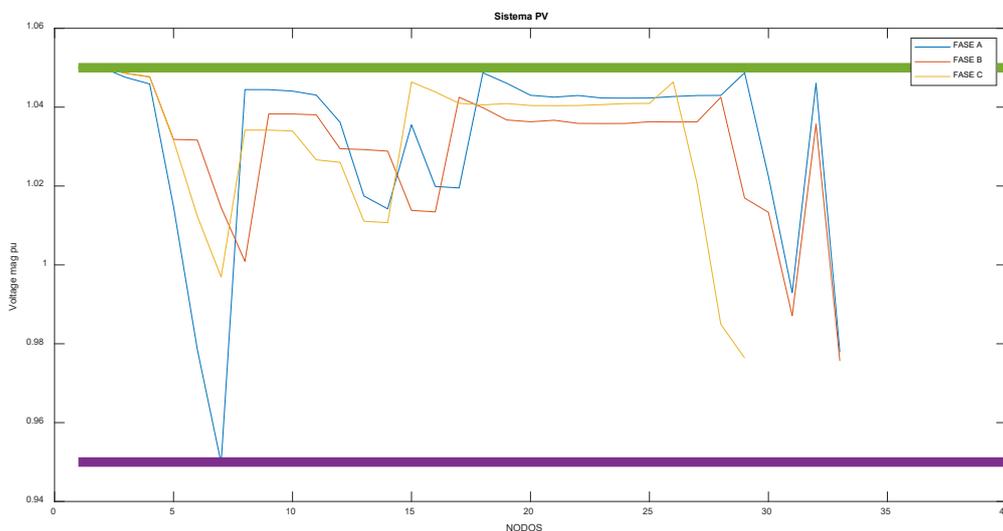
Una vez establecida la configuración óptima de taps a través de la GWO, se validó la eficacia de dicha configuración por medio de información proporcionada mediante simulaciones, tanto en OpenDSS como en MATLAB (con simulaciones en tiempo real), los resultados evidenciaron el buen comportamiento del sistema: existiendo incluso la posibilidad de que soportara mayores oscilaciones. Todos los nodos permanecieron dentro del rango aceptable de operación sin necesidad de ajustes. Esta configuración hallada confirma que no solo fue óptima en términos teóricos, sino que además era operativamente válida.

Los perfiles de voltaje compensados mostraron una sustancial mejora al compararlos con el estado base. La disminución de oscilaciones de tensión junto a la estabilidad en todos los los puntos de la red, evidencian que el algoritmo no solo halló una solución factible, sino que la halló eficaz, robusta y repetible.

Impacto de la Integración de Sistemas de Generación Distribuidos Fotovoltaicos (Impacto de la integración de sistemas fotovoltaicos optimizados en el sistema IEEE de 34 nodos)

En el marco del análisis global, se llevó a cabo una evaluación del efecto de la integración de sistemas fotovoltaicos distribuidos en distintos nodos muy relevantes en el sistema IEEE de 34 nodos, siguiendo los criterios eléctricos y topológicos que se han descrito en la sección Metodología. Los resultados de estas simulaciones, que se muestran en la figura 7, manifiestan una adecuada respuesta del sistema ante la inclusión de generación renovable.

Figura. 7. Valores de voltaje compensados mediante el GWO y sistemas fotovoltaicos



Fuente: Propia

Mediante la utilización de por medio de scripts para generar las gráficas, MATLAB ha sido el medio empleado para la obtención de una visualización ajustada al efecto que produce la unión de la optimización y de la generación de energía renovable. Se apreció una clara mejora de los nodos, que mostraban voltajes fuera del voltaje aceptado y que exhibieron una mejora cuando se

implementó la configuración de taps que especifica el GWO. Este fenómeno fue igual en todas las fases del sistema que tiene que ver con la efectividad del sistema multimodal que se adoptó. La mejora en el voltaje también estuvo acompañada de una reducción de las pérdidas de potencia activa. Esta situación era perfectamente predecible de forma teórica y se contrastó por medio del uso de las simulaciones. Con las unidades de generación ubicadas en puntos donde la inyección es más eficiente (en términos de distancia y carga, así como de topología) se redujeron las inyecciones innecesarias de energía, por lo que se disminuyó el efecto Joule. Las simulaciones, desde una perspectiva cuantitativa, evidencian una reducción del 13.72% de las pérdidas de potencia activa total con respecto al supuesto escenario base sin optimización. Esta indudable mejora no solo le confiere cierta validez del algoritmo GWO al ser capaz de determinar los taps y la ubicación de la generación distribuida, sino que también aporta un argumento técnico fiable en favor de su aplicación en redes reales que contengan fuentes de energía renovables intermitentes.

Limitaciones del estudio

A pesar de que los resultados obtenidos dan cuenta de la eficacia del algoritmo GWO en la optimización del perfil de voltaje en microrredes, el presente estudio también tiene algunos problemas que deberían considerarse:

- **Escalamiento del sistema:** La validación se realizó sobre el sistema IEEE de 34 nodos. Si bien se trata de un sistema de referencia para la validación en los estudios académicos, su comportamiento puede diferir del de sistemas de distribución reales que tienen una mayor cantidad de nodos, dinámicas de carga o, por ejemplo, configuraciones trifásicas desbalanceadas.
- **Modelo estático:** Las simulaciones se llevaron a cabo en condiciones de carga estáticas, sin tener en cuenta las variaciones temporales o el perfil horario de la generación distribuida, lo cual puede influir en la validez de los resultados para escenarios dinámicos reales.
- **Suposiciones idealizadas:** Se hizo el supuesto de un entorno sin caídas de comunicación, sin variabilidad en los parámetros meteorológicos y con la generación distribuida disponible de forma constante, supuestos que no son necesariamente realistas para las condiciones operativas en campo.
- **Configuración del GWO estática:** Se utilizó una de las configuraciones estándar para los parámetros del GWO, sin comprobar su sensibilidad o adaptaciones automáticas, lo cual podría limitar su eficiencia de convergencia para otros escenarios.
- **Fuera de un análisis económico:** El trabajo se limitó únicamente a los aspectos técnicos (el perfil de tensión), sin entrar en criterios de coste, de renta de la energía, de costeo de la inversión, que habrían sido obvios para un trabajo dentro del contexto de aplicaciones reales. Estas limitaciones no van en detrimento de la validez de los resultados obtenidos, pero sí limitan el ámbito dentro del cual se pueden extrapolar. En la parte de “Trabajos futuros” se proponen líneas de trabajos orientados a estos retos.

4. CONCLUSIONES

La inserción del algoritmo de optimización bioinspirado Grey Wolf Optimizer (GWO) en el sistema IEEE de 34 nodos, para escenarios que contienen generación distribuida por fuentes renovables, fue una estrategia adecuada como mejora de la estabilidad del voltaje y reducción de pérdidas de potencia activa, dado que en términos numéricos se obtuvo un valor mínimo de la función objetivo de 0.093054, lo que indica una desviación mínima respecto al perfil nominal de tensión.

Las simulaciones evidenciaron que las pérdidas totales del sistema disminuyeron un 26.3 %, al pasar de 73.22 kW a 54.10 kW tras la optimización e incorporación de sistemas fotovoltaicos. Además, se constató una reducción adicional del 13.72 % de pérdidas únicamente atribuible a la optimización sin generación renovable, lo que reafirma la eficacia del algoritmo tanto de forma aislada como combinada. Por otro lado, nodos críticos como el 9 y el 22 mostraron mejoras del voltaje del 6.2 % y 5.7 % respectivamente, manteniéndose dentro del rango técnico de operación (0.95–1.05 p.u.).

Los perfiles de voltaje fueron corregidos en todos los nodos, incluso bajo condiciones de carga elevada. Nodos que inicialmente registraban valores por debajo de 0.93 p.u. alcanzaron niveles cercanos a 1.00 p.u. tras la optimización.

Esto confirma la efectividad del ajuste óptimo de taps y de la ubicación estratégica de los generadores distribuidos en la red.

La integración de OpenDSS y MATLAB proporcionó una plataforma híbrida robusta para realizar simulaciones precisas bajo condiciones dinámicas. Esta sinergia permitió validar la aplicabilidad del algoritmo GWO en contextos operativos realistas, con capacidad para adaptarse a cambios topológicos, variabilidad de carga y generación renovable.

Se debe subrayar que los resultados presentados provienen exclusivamente de simulaciones computacionales. No se han realizado validaciones experimentales en entornos reales, lo cual constituye una limitación del estudio. Se recomienda llevar a cabo pruebas empíricas para confirmar la efectividad del método en redes reales. Aun así, los hallazgos obtenidos son prometedores y posicionan al GWO como una herramienta viable para la planificación, operación y modernización de redes eléctricas descentralizadas con alta penetración de renovables.

REFERENCIAS

- Abdelaziz, A. Y., Ali, E. S., & Abd-Elazim, S. M. (2020). A new harmony search algorithm for optimal location and sizing of renewable DG units in distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 80, 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.01.014>
- Ahmadi, A., Sadeghzadeh, S. M., & Esmailian, A. (2021). Realistic modeling of distributed generation in distribution networks considering uncertainty. *Electric Power Systems Research*, 194, 107070. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107070>
- Azizivahed, A., Zabihi, M. S., Ghasemi, M., & Gandomkar, M. (2020). Optimal power flow using a modified grey wolf optimizer. *Applied Soft Computing*, 86, 105910. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.105910>

- org/10.1016/j.asoc.2019.105910
- Dada, E. G., Misra, S., & Maskeliūnas, R. (2022). Grey Wolf Optimizer: A comprehensive review of recent variants and applications. *Applied Soft Computing*, 114, 108150. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108150>
- Gangwar, R., Singh, P. K., & Verma, H. K. (2022). Modeling and simulation of distributed energy resources using OpenDSS and MATLAB. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 31, 100782. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2022.100782>
- Hasan, K. N., Mohd Nor, M. J., & Ali, A. B. M. (2021). Voltage regulation in a hybrid microgrid using GWO under real-time conditions. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(4), 3192–3203. <https://doi.org/10.1109/TSG.2021.3051234>
- Hu, Z., Liu, Q., Wang, Y., & He, J. (2019). Voltage stability assessment of power systems with high penetration of renewable energy. *Electric Power Systems Research*, 170, 108–118. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2019.01.002>
- Karunathilake, H., Bhattarai, B. P., & Karki, R. (2019). Linear and nonlinear programming approaches for optimal operation of microgrids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101, 41–60. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.005>
- Meegahapola, L. G., Perera, S., & Flynn, D. (2020). Voltage stability improvement strategies in renewable-rich distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(2), 1461–1472. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2948874>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 69, 46–61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Naji, H., Fattahi, S. M. M., & Rezaei, N. (2022). Real-time coordination of voltage regulators in distribution systems using GWO with hardware-in-the-loop. *Electric Power Components and Systems*, 50(2), 123–137. <https://doi.org/10.1080/15325008.2021.1981461>
- Owuor, J., Nagi, J., & Nadarajah, M. (2011). IEEE 34 Node Test Feeder: Simulation and modeling. *IEEE PES General Meeting*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2011.6039320>
- Ozsoydan, F. B. (2019). A hybrid GWO–PSO algorithm for solving optimal reactive power dispatch problem. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21, 195–206. <https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.10.004>
- Parizad, A., Khazali, A. H., & Kalantar, M. (2021). Optimal placement of distributed generation using GWO in SCADA-enabled smart grids. *Renewable Energy*, 164, 871–885. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.069>
- Pham, H. V., Nguyen, D. Q., & Tran, Q. T. (2022). Geospatial distribution and temporal modeling of renewable energy in distribution systems. *Energy Reports*, 8, 2927–2938. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.017>
- Rabiee, A., Hemmati, R., & Mohammadi-Ivatloo, B. (2020). Handling uncertainty in renewable energy-based microgrids using stochastic programming. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 120, 109658. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109658>
- Razavi, F., Naderi, M. S., & Niknam, T. (2019). Benefits of distributed generation on transmission and distribution systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 107, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.008>
- Sun, H., Liu, J., & Zhang, B. (2019). Analysis and prediction of power fluctuation in solar energy generation systems. *Renewable Energy*, 135, 872–882. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.12.074>