



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE QUITO**  
**CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: PABLO ESTEBAN LANDA TOAPANTA  
TUTOR: JORGE PAÚL MUÑOZ PILCO

Quito -Ecuador  
2025

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Pablo Esteban Landa Toapanta con documento de identificación N° 1724751357 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 28 de marzo del año 2025

Atentamente,



-----  
Pablo Esteban Landa Toapanta  
1724751357

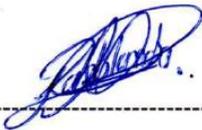
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Pablo Esteban Landa Toapanta con documento de identificación No. 1724751357, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico “Dimensionamiento óptimo de generación solar fotovoltaica en redes de distribución para minimizar las pérdidas anuales de energía y el índice de desviación de voltaje considerando un algoritmo híbrido basado en ramificación y acotamiento”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de marzo del año 2025

Atentamente,



Pablo Esteban Landa Toapanta

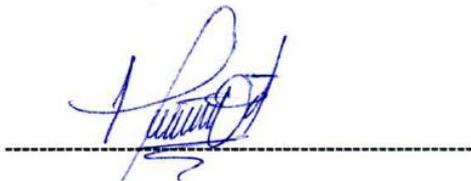
1724751357

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Jorge Paúl Muñoz Pilco con documento de identificación N°1719006189, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO**, realizado por Pablo Esteban Landa Toapanta con documento de identificación N°1724751357 , obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 28 de marzo del año 2025

Atentamente,



Ing. Jorge Paúl Muñoz Pilco, MSc  
1719006189

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico .....	4
2.1	Sistemas de distribución eléctrica .....	4
	Sistema de distribución radial.....	4
	Sistema de distribución en anillo.....	4
2.2	Red de distribución eléctrica 33 barras.....	5
2.3	Dimensión y ubicación óptima de sistemas de distribución.....	5
2.4	Generación distribuida de energía renovable.....	5
2.5	Paneles solares fotovoltaicos.....	6
2.6	Pérdidas en el sistema de distribución eléctrica.....	6
	<i>Pérdidas anuales de energía.....</i>	<i>6</i>
2.7	Desviación de voltaje.....	7
2.8	Algoritmos Híbridos.....	7
2.9	Algoritmo de ramificación y acotamiento.....	7
3	Formulación del problema.....	7
3.1	Modelado matemático.....	8
	3.1.1 Función objetivo.....	9
3.2	Flujos de potencia ramificación y acotamiento.....	10
3.3	Casos de estudio.....	10
4	Análisis de resultados.....	10
4.1.1	Dimensionamiento y ubicación óptima de generación distribuida solar fotovoltaica. ...	11
4.1.2	Mejora de los perfiles de voltaje en la red de 33 barras.....	12
4.1.3	Desviación de voltaje total.....	12
4.1.4	Desviación de voltaje en año 1.....	13
4.1.5	Desviación de voltaje en año 2.....	14
4.1.6	Desviación de voltaje en año 3.....	14
4.1.7	Desviación de voltaje en año 4.....	15
4.1.8	Desviación de voltaje en año 5.....	15
4.2	Minimización de las pérdidas anuales de energía.....	15
	4.2.1 Reducción de las pérdidas anuales de energía.....	16
	4.2.2 Reducción de las pérdidas anuales de energía año 1,2,3,4,5.....	16
5	Conclusiones.....	17
6	Trabajos futuros.....	18
7	Referencias.....	18
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	21
7.2	Resumen de Indicadores.....	25
8	Anexos.....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Algoritmo de ramificación y acotamiento en sistemas de distribución. ....	3
Figura 2. Sistema de distribución radial. ....	4
Figura 3. Sistema de distribución en anillo. ....	5
Figura 4. Sistema radial de 33 barras de la IEEE. ....	5
Figura 5. Perfiles de voltaje en condiciones iniciales. ....	10
Figura 6. Perfil de voltaje p.u Con DG en cada barra ....	12
Figura 7. Desviación del voltaje y perfil de voltaje total. ....	13
Figura 8. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 1. ....	14
Figura 9. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 2. ....	14
Figura 10. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 3. ....	14
Figura 11. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 4. ....	15
Figura 12. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 5. ....	15
Figura 13. Pérdidas anuales de energía en (Kw/días). ....	16
Figura 14. Pérdidas anuales de energía año 1,2,3,4,5. ....	17

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de irradiación en la ciudad de Quito-Ecuador ....	8
Tabla 2. Pseudocódigo Algoritmo de ramificación y acotamiento ....	10
Tabla 3. Potencia de cada planta fotovoltaica ....	11
Tabla 4. Ubicación de las plantas fotovoltaicas en el sistema de distribución. ....	11
Tabla 5. Perfiles de voltaje antes y después de GD ....	12

# DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.

## Resumen

El presente documento está enfocado en la ubicación y el dimensionamiento óptimo de generación distribuida considerando la energía solar fotovoltaica en sistemas de distribución radial. Con el objetivo principal de minimizar las pérdidas anuales de energía y el índice de desviación de voltaje de manera porcentual. Se implementa un sistema de prueba radial IEEE de 33 barras para ser analizado por el algoritmo híbrido de ramificación y acotamiento en el software Matlab considerando diferentes restricciones. Entre los beneficios obtenidos, destaca la reducción significativa de las pérdidas anuales de energía, lo cual se traduce en menores costos operativos y una mayor sostenibilidad del sistema. Asimismo, la disminución del índice de desviación de voltaje contribuye a mantener los niveles de voltaje dentro de rangos aceptables, favoreciendo la calidad del suministro eléctrico. Los resultados obtenidos se validaron minimizando así las pérdidas anuales de energía y la desviación de voltaje para conseguir una mejora tanto en la confiabilidad como en la calidad de la energía eléctrica.

**Palabras Clave:** Desviación de voltaje, Energía Solar Fotovoltaica, Generación Distribuida, Pérdidas anuales de energía, Sistemas de distribución.

## Abstract

This paper is focused on the optimal location and sizing of distributed generation considering solar photovoltaic energy in radial distribution systems. The main objective is to minimize annual energy losses and the voltage deviation index in a percentage manner. A 33-bus IEEE radial test system is implemented to be analyzed by the hybrid branching and bounding algorithm in Matlab software considering different restrictions.

Among the benefits obtained, the significant reduction of annual energy losses stands out, which translates into lower operating costs and greater sustainability of the system. Likewise, the decrease in the voltage deviation index contributes to maintaining voltage levels within acceptable ranges, favoring the quality of the electrical supply. The results obtained were validated, thus minimizing annual energy losses and voltage deviation to achieve an improvement in both the reliability and quality of electrical energy.

**Keywords:** Annual energy losses, Distribution systems, Distributed generation, Photovoltaic solar energy, Voltage deviation.

# 1 Introducción

La demanda energética en el sistema distribución aumenta gradualmente con el paso de los años, razón por la cual existen pérdidas en el transporte de electricidad que suministran los diferentes elementos que intervienen dentro del sistema, para conseguir una mejor sostenibilidad y confiabilidad de la red se realiza un análisis de estudio para dimensionar y ubicar generación distribuida en este caso generación solar fotovoltaica [1].

La generación solar fotovoltaica es una energía renovable que se genera mediante procesos de energía limpia debido al efecto fotovoltaico, es decir que se produce por la presencia de materiales semiconductores que producen la energía eléctrica conjunto con células solares, mediante la utilización de energía renovable se puede considerar un estudio de reducción de pérdidas de sistema de distribución y una mejora en la desviación de voltaje [1].

La generación distribuida en este caso la fotovoltaica se presenta como una opción viable, es decir como una necesidad para la sostenibilidad a largo plazo, por ende, existen diferentes autores que mencionan lo siguiente.

En [1] los resultados muestran la ubicación, el tamaño y el factor de potencia operativa del GD, se consideran muy importantes para identificar la ubicación, mediante una alienación adecuada se puede reducir significativamente las pérdidas como las emisiones de carbono, también mejora la salida de voltaje, la confiabilidad y la resiliencia del sistema de distribución de 33 barras de la IEEE.

En [2] debido a que los sistemas de distribución no están diseñados para incluir generación distribuida fotovoltaica (PVDG), es importante que los operadores y las empresas de servicios públicos identifiquen los problemas técnicos

relacionados con los niveles de instalación fotovoltaica. En este caso, se analiza el impacto para integrar PVDG en una empresa de servicios públicos brasileña durante un período de simulación de un año en el que se cambia la ubicación del sistema fotovoltaico según el método de Monte Carlo.

El propósito de la investigación que señala en [3] es proporcionar a los ingenieros de sistemas de energía solar un modelo superior basado en redes neuronales artificiales (RNA). Se puede considerar que la arquitectura tiene un impacto significativo en la convergencia de las redes neuronales.

Los resultados obtenidos afirman la precisión del modelo propuesto, por consiguiente, puede predecir la producción de energía solar por hora en ausencia de valores reales, esto permite a los ingenieros eléctricos utilizar este modelo predictivo para diseñar, monitorear e integrar sistemas de energía solar en redes eléctricas.

En [4] se presenta un método matemático y práctico para modelar las incertidumbres de la radiación solar que se pueden obtener mediante datos reales de acuerdo a la orientación y localidad donde se encuentre el método de análisis para ingresar energía fotovoltaica y de esta manera se puede determinar los niveles de radiación. El mercado eléctrico influye directamente en los procesos de generación distribuida, en el ámbito de conseguir un análisis de factibilidad en presupuestos que se puedan incluir dentro de los regímenes especiales dictados por cada ley energética.

En el artículo [5] se obtiene que la localización de estas plantas de generación distribuida (GD) se aborda como un problema de optimización en la red utilizando el índice de sensibilidad en las pérdidas y el índice de desviación de voltaje. En función de las distintas tecnologías utilizadas para las unidades de GD, se incluye 3 casos, el más objetivo donde se inyecta potencia activa y reactiva

real ya que puede ofrecer mejores resultados obteniendo el mejoramiento de los perfiles de voltajes y mitigando las pérdidas de energía.

Los autores en [6] determinan que la posición, la capacidad y tipo de la generación distribuida (GD) son muy importantes en mitigación de pérdidas de energía eléctrica. La determinación de la ubicación, el tipo y la dimensión de las plantas que se encargan de la generación distribuida en dicha red muestra un importante potencial de ahorro de energía, considerando tanto los costos de inversión como los de mantenimiento y operación.

El artículo [7] presenta una técnica de optimización efectiva para abordar problemas de distribución de integración (DER) en sistemas de la vida real. La técnica ofrece propiedades superiores que permiten encontrar la mejor solución en problemas complejos de optimización, es decir que se puede demostrar su capacidad para la búsqueda de la solución más óptima, de esta manera puede ser utilizado para el análisis de otros métodos de optimización como el caso del método de optimización basado en la enseñanza y aprendizaje (TLBO).

Se presenta en [8] una metodología eficiente que combina algoritmos genéticos para mejorar la estabilidad del voltaje y la desviación en un sistema de distribución radial equilibrado. La metodología identifica ubicaciones óptimas para colocar

capacitores en dos etapas, utilizando algoritmos genéticos y redes neuronales artificiales para calcular los tamaños óptimos de los condensadores, el objetivo es mantener la estabilidad del voltaje con desviación mínima en condiciones de carga dinámica.

En este artículo se realiza una investigación de los sistemas de distribución eléctrica (SDE), que son generados en mayoría por energías no renovables, que a través de los años van desapareciendo para implementar nuevas energías limpias que existen en el sector eléctrico, de esta forma se realiza un estudio y análisis para implementar una generación solar fotovoltaica en los SDE con irradiación que puede ser considerado en rangos de 0 a  $1000 \text{ w/m}^2$  ocupando como ejemplo el sistema radial (SR) de 33 barras de la IEEE, mediante el uso de algoritmos híbridos que ayudan a minimizar las pérdidas anuales de energía y la desviación de voltaje en dicho sistema SDE.

Las siguientes secciones ofrecen una descripción teórica de conceptos importantes relacionados con los algoritmos híbridos para la GD solar fotovoltaica, los SDE y su optimización, en su contexto se detalla las técnicas de análisis como la ubicación óptima en redes de distribución mostrando resultados favorables para el sistema.



**Figura 1.** Algoritmo de ramificación y acotamiento en sistemas de distribución.

## 2 Marco teórico

La implementación de energías renovables es un proceso que ayuda a los sistemas de distribución a tener una mejor confiabilidad en sus equipos y suministros de energía que ayudan al medio ambiente por la presencia de efectos invernaderos. Se puede decir que la inserción de las fuentes especialmente en las redes de distribución, se está convirtiendo en un desafío en términos de confiabilidad y seguridad operativa. Los cambios aleatorios de carga afectan en gran medida la calidad de la energía [9].

### 2.1 Sistemas de distribución eléctrica

El sistema de distribución es operado y regulado mediante empresas reguladoras que se encargan del transporte de electricidad hacia el usuario final con el objetivo de minimizar costos y pérdidas que afectan la red. Estos sistemas están diseñados para una distribución de electricidad eficiente, segura y confiable, que deben cumplir con los requisitos del cliente, como la alta confiabilidad, bajas pérdidas de energía, distribución de voltaje aceptable y el uso de generadores descentralizados (GD) [10].

#### *Sistema de distribución radial.*

Generalmente la distribución de energía convencionales presenta una estructura de alimentación radial que consideran una fuente de alimentación que suministra energía a un conjunto de alimentadores por debajo de la fuente de alimentación. Esta estructura es deseable debido a su sistema de protección simple y económico [11].

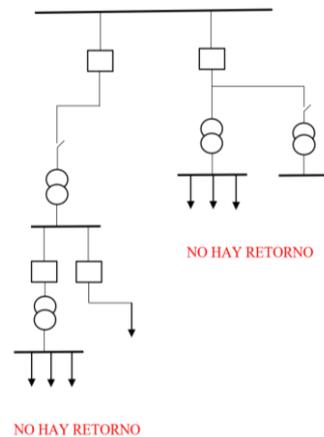


Figura 2. Sistema de distribución radial.

#### *Sistema de distribución en anillo.*

Los sistemas para distribuir energía en anillo proporcionan una reducción en líneas paralelas y resistencias en la caída de voltaje para mejorar su desviación. Reduciendo las mitigaciones en el sistema, la fórmula de pérdida de energía relacionada con el cuadrado de la corriente reduce la intensidad en la rama y a su vez las pérdidas totales de energía. Se puede considerar que para un mayor factor de confiabilidad se considera el abastecimiento de energía del sistema de distribución eléctrica en anillo a través de múltiples barras, en caso de presentarse una falla se interrumpe un número limitado de cargas en poco tiempo, como resultado, se logra aumentar el coeficiente de confiabilidad.

Para reconfigurar la red de distribución se debe tomar en cuenta la vida útil de los seccionadores y disyuntores que se encuentran presentes en una subestación que es la encargada de la distribución de la energía hacia las empresas reguladoras para su transporte en líneas radiales o en anillo [10].

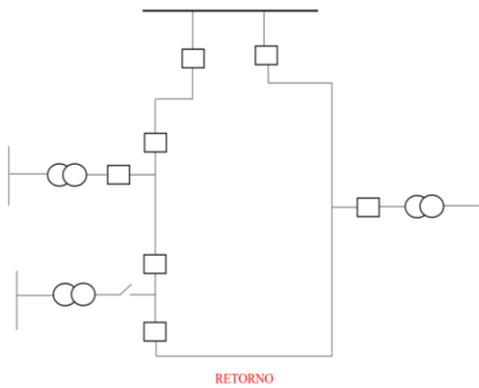


Figura 3. Sistema de distribución en anillo.

## 2.2 Red de distribución eléctrica 33 barras.

Esta red de 33 barras de la IEEE es un estándar de SDE radial utilizado para diferentes estudios. Consta de 33 nodos y 32 líneas, representando puntos de conexión y conductores respectivamente, está diseñado para operar típicamente a 12.66 kV con un nodo de cargas asociadas. Este sistema se emplea en investigaciones y simulaciones para análisis de flujo de carga, pérdidas de potencia y confiabilidad, siendo esencial en la educación y desarrollo de algoritmos de optimización en redes de distribución.

Para realizar un mejor análisis en la desviación del voltaje en este sistema se tomó en cuenta el perfil de voltaje antes sin inyección de GD con estos datos de los voltajes en p.u, se procede a realizar los cálculos para obtener la desviación de voltaje del sistema.

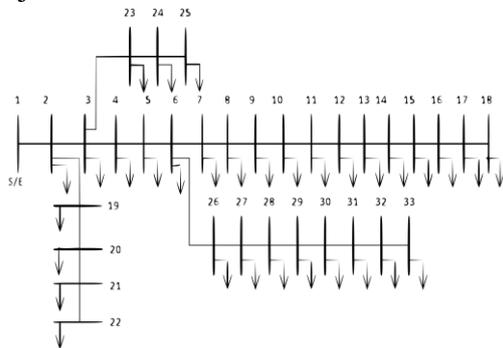


Figura 4. Sistema radial de 33 barras de la IEEE.

## 2.3 Dimensión y ubicación óptima de sistemas de distribución.

El dimensionamiento óptimo es un proceso complejo que requiere el uso de modelos matemáticos avanzados, simulaciones y herramientas de análisis de sistemas eléctricos, así como un conocimiento profundo de las tecnologías de producción y acumulación de energía, dinamizando el despacho de energía y los principios de ingeniería eléctrica. El objetivo es crear un sistema de distribución de electricidad duradero, eficiente y sostenible que se adapte a las necesidades energéticas cambiantes y a la evolución del mundo energético [12].

Encontrar adecuadamente la GD en redes de distribución es el principal enfoque para renovar la condición de la energía y el equilibrio del voltaje. Un sistema de distribución puede verse afectado por una planta de generación distribuida en términos de niveles de voltaje, calidad de energía, estabilidad de voltaje y fiabilidad del sistema [13].

## 2.4 Generación distribuida de energía renovable.

Una forma de proporcionar energía limpia y accesible a lugares remotos alejados de la red eléctrica es la generación distribuida de energía renovable. Los dispositivos de corriente continua pueden proporcionar energía solar fotovoltaica mediante la implementación de paneles fotovoltaicos que mediante su dimensionamiento del inversor se puede obtener resultados favorables en el sistema de distribución. [14].

La generación distribuida renovable es una alternativa a la producción de electricidad en muchos países, esto permite que los sistemas eléctricos reciban energía eléctrica de origen renovable, que proviene de los hogares cuando el consumo en el sistema eléctrico del país se da en horas pico. También se presenta como una oportunidad de ahorro para muchos hogares y empresas, porque se consigue

combinando tecnologías limpias, reduciendo los costos del consumo eléctrico, aumentando la capacidad de producción [15].

## **2.5 Paneles solares fotovoltaicos.**

Los paneles fotovoltaicos transforman directamente la energía primaria que en este caso es la luz del sol en energía eléctrica. Se utilizan materiales que pueden absorber fotones y liberar electrones, como por ejemplo presentan células solares que son necesarias para producir corriente continua a partir de la energía solar [16].

Existen diversos materiales que se encargan de la fabricación de los paneles fotovoltaicos en este caso el más empleado para la construcción de las celdas solares es el silicio. Un panel fotovoltaico puede considerarse como una conexión en sistemas on grid, off grid y sistemas híbridos que es uno de los más requeridos en el mercado con la finalidad de entregar la energía no consumida a la red de distribución [16].

Existen celdas mono cristalinas que se encuentran presentes en los paneles fotovoltaicos, cuya función principal es la conversión de la energía eléctrica con una eficiencia que supera el 22% siendo capaces de recibir gran cantidad de luz para su posterior transporte. [17].

El gran esfuerzo por obtener silicio multicristalino para producir celdas solares de rendimientos suficientemente altos, es uno de los obstáculos en la actualidad debido a que el material semiconductor representa una parte significativa del costo de la celda que después de someter este material a tratamientos específicos para activar las zonas de alta recombinación y prolongar su tiempo de vida se convierte en un elemento que tiene una eficiencia muy alta para la conversión de energía solar [18].

Existen otros materiales para la construcción de las celdas solares que pueden ser: celdas solares de perovskita y

celdas solares de CdTe (Telurio de Cadmio) [19], [20].

## **2.6 Pérdidas en el sistema de distribución eléctrica.**

Existen varias causas que generan las disipaciones de energía y no hay un solo método para mejorar la eficiencia. Las pérdidas estratégicas y no estratégicas son los dos tipos de disipación de energía que ocurren en transmisión y distribución eléctrica [21].

Existen dos tipos de mitigaciones en el sistema de distribución que pueden ser representadas por la cantidad de energía que consumen los equipos durante el desarrollo de producción, transferencia, traslado y reparto y la concentración de energía no registrada que aumenta cuando la energía se transmite a través de las líneas, convertidores y otros componentes del SDE [22].

Las pérdidas de energía no estratégicas se refieren con la no pérdida real de energía, es decir, si un usuario utiliza esta energía para realizar alguna actividad, ya sea que se encuentre registrado o no en la empresa de distribución, recibe solo una parte o ninguna compensación por la prestación del servicio, lo que resulta una pérdida económica para el sistema [23].

### ***Pérdidas anuales de energía.***

Las pérdidas anuales de energía se refieren a la proporción de energía producida que no es utilizada por los usuarios finales debido a diversas ineficiencias en la red de distribución [24].

Una red de distribución contiene una serie de errores desde la planificación hasta el mantenimiento de los equipos, se debe por los diversos elementos que intervienen en el transporte de la energía eléctrica como transformadores, generadores y líneas de transmisión que mediante los herrajes que son utilizados para su conexión pueden ocasionar pérdidas que pueda reducir la vida útil de los mismos [24].

## 2.7 Desviación de voltaje.

El desvío del voltaje es la variación del voltaje suministrado a los consumidores respecto de su valor nominal. En todos los SDE, es importante mantener los voltajes dentro en un cierto rango para respaldar la seguridad, eficiencia y fiabilidad de los equipos eléctricos de consumo [25].

$$(1) DV = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{Nbus} (U_n - U_{i,t})^2$$

Donde:

- $T$  es el número de horas.
- $Nbus$  es el número de barras.
- $U_n$  es el voltaje nominal o igual a 1 p.u.
- $U_{i,t}$  es el voltaje de cada barra en el tiempo.

## 2.8 Algoritmos Híbridos.

El procedimiento para un algoritmo híbrido se determina mediante la combinación de dos técnicas que tienen como objetivo aprovechar el potencial y compensar sus deficiencias de los SDE. Existen métodos híbridos más habituales que combinan métodos de enjambre con métodos que mejoran algunas búsquedas locales, o métodos heurísticos con programación matemática clásica, combinados con enfriamiento simulado y algoritmos genéticos para lograr una DG óptima en las líneas de distribución con una mejor ubicación [25],[26].

## 2.9 Algoritmo de ramificación y acotamiento.

El algoritmo de ramificación y acotación es una técnica precisa ampliamente utilizada en problemas de optimización combinatoria. Su metodología se basa en dividir el problema original en subproblemas más pequeños (procedimiento de ramificación), ordenarlos en forma de árbol y calcular los límites superior e inferior de cada subproblema (procedimiento de acotación). Estas restricciones nos permiten identificar

y descartar regiones del espacio de búsqueda que no contienen soluciones óptimas, reduciendo significativamente el esfuerzo computacional.

Este enfoque garantiza soluciones óptimas al explorar sistemáticamente las partes requeridas del espacio de búsqueda, lo que lo hace particularmente útil en el caso de restricciones complejas y grandes. Además, también es aplicable en varios campos, como la planificación de redes eléctricas, la logística y el diseño de sistemas. [27].

## 3 Formulación del problema.

Es fundamental mantener el voltaje dentro de un rango aceptable al diseñar y operar sistemas de energía para garantizar su confiabilidad y eficiencia. Uno de los principales desafíos en los sistemas de repartición de energía de 33 barras de la IEEE es determinar los problemas con las desviaciones de voltaje y las pérdidas de energía anuales asociadas. La topología radial se puede incluir en varios sistemas de resolución de flujos de potencia, un análisis de estudio en dichas redes se puede considerar como un resultado favorable ya que las presentes redes radiales son específicas en las subestaciones cuando existe una desconexión del sistema, es decir que, si ocurre una falla, la línea sale totalmente del sistema y puede ocasionar pérdidas más específicas en los equipos de transporte.

Con lo referido anteriormente, una solución óptima para un sistema de distribución con mayor confiabilidad y estabilidad de en la red, su solución radica en varios métodos y algoritmos de optimización que considera datos iniciales de ejecución, pero puede implicar altos costos de inversión y un tiempo prolongado. Como un recurso que se adapte a las condiciones del sistema se considera una implementación de energía distribuida que basas en energía fotovoltaica, cuyo objetivo

es minimizar tanto la desviación de voltaje como las pérdidas.

Como solución se propone, dimensionar y ubicar de manera óptima una generación distribuida considerando en este caso la energía fotovoltaica mediante la programación y aporte de un algoritmo híbrido, basado en la integración del algoritmo de ramificación y acotamiento.

Como resultado de la correcta optimización mediante el algoritmo y la metodología de la implementación de diversos algoritmos en conjunto, se puede obtener un análisis de mejora en la reducción de pérdidas y su desviación de voltaje, donde se debe considerar datos de análisis de la irradiación solar que proviene en la localidad de Quito-Ecuador y como sería su afectación durante el periodo anual si se considera las peores condiciones para recoger la energía solar.

### 3.1 Modelado matemático.

La determinación óptima del dimensionamiento y ubicación de generación distribuida de paneles fotovoltaicos dentro de una topología radial se realiza mediante flujos de potencia en Newton Raphson teniendo así un sistema híbrido.

La resolución de los algoritmos consiste las diversas numeraciones matemáticas y sistemáticas de todas las posibles soluciones que pueden existir en la red, de tal manera se puede analizar las diversas agrupaciones y combinaciones que se obtengan al ingresar energía fotovoltaica.

Con las posibles soluciones se puede clasificar el número de barras para un correspondiente análisis de las más afectadas en su perfil de voltaje y de esta manera establecer una correcta solución para minimizar la tendencia exponencial que afectan las pérdidas en el sistema.

La ejecución de varios algoritmos juntos para llegar a una solución óptima puede considerar en primer plano la inicialización del dilema, es decir que se definan las

restricciones y la función objetivo con los parámetros iniciales.

Las restricciones que se toman en cuenta para este análisis de estudio de optimización, es mantener los estándares de voltaje dentro de los límites operaciones del sistema en este caso un perfil mínimo de 0,95 [p.u.] y un perfil máximo de 1,05 [p.u].

El sistema de 33 barras establece un voltaje base de su sistema de 12,6kV y una potencia aparente base de generación de 100MVA, los datos de irradiación que intervienen en el análisis se consideran de acuerdo a la localidad mediante su latitud y longitud, en este caso se toma en cuenta la ciudad de Quito-Ecuador con un promedio de resultados como se muestra en la Tabla 1

**Tabla 1.** Valores de irradiación en la ciudad de Quito-Ecuador

Mes	Wm <sup>2</sup> /día
Enero	201.88
Febrero	230.38
Marzo	182.60
Abril	193.78
Mayo	186.71
Junio	211.10
Julio	228.09
Agosto	231.75
Septiembre	243.37
Octubre	208.01
Noviembre	226.14
Diciembre	210.27

Mediante el análisis de optimización se logra un resultado favorable en las barras que requieran la implementación de energía fotovoltaica, de tal manera se corrige la desviación de voltaje y ayuda con la disminución de las pérdidas en la topología radial de 33 barras de la IEEE.

Para el análisis en el caso de estudio se considera inicialmente un sistema de prueba en condiciones normales para conocer de manera específica el comportamiento que presenta el perfil de voltaje para su posterior calcular su desviación en porcentaje y de esta manera conseguir análisis de resultados que favorezcan al sistema de distribución.

### 3.1.1 Función objetivo

La función objetivo de este algoritmo es, llegar a un resultado donde se pueda disminuir la desviación de voltaje y las pérdidas que se ingresan en el sistema de esta manera el objetivo principal es mitigar dichas pérdidas de energía totales del SDE de 33 barras de la IEEE.

Los algoritmos y el método iterativo analizan las barras con el perfil de voltaje más bajo con el fin de ejecutar un análisis de matemático de manera ordenada con todas las agrupaciones y combinaciones posibles que ingresen en la red con ayuda de la energía fotovoltaica [28]. Se presenta mediante la siguiente ecuación el cálculo de pérdidas que se analizan en el sistema.

$$L_{ij} = \frac{1}{2} R_{ij} I_{ij}^2 \quad (2)$$

Donde:

- $L$  representa las pérdidas de potencia
- $R_{ij}$  es la resistencia de la línea entre las barras  $i$  y  $j$ .
- $I_{ij}^2$  es la corriente que fluye entre las barras  $i$  y  $j$ .

$$\text{Minimizar } E_{PA} = \sum_{t=1}^{8760} \sum_{i=1}^n \frac{(P_{i,t}^2 + Q_{i,t}^2) R_i}{|V_{i,t}|} \cdot \Delta t \quad (3)$$

Donde:

- $E_{PA}$  Pérdidas anuales de energía (kWh)
- $n$  Número de líneas en el sistema.
- $t$  intervalo del tiempo (horas en un año).
- $P_{i,t}$  Potencia activa en la línea  $i$  en el intervalo  $t$  (Kw).
- $Q_{i,t}$  Potencia reactiva en la línea  $i$  en el intervalo  $t$  (kVAR).
- $R_i$  Resistencia de la línea  $i$  ( $\Omega$ ).
- $|V_{i,t}|$  Voltaje en el nodo asociado a la línea  $i$  en el intervalo  $t$  (Kv).
- $\Delta t$  Duración del intervalo (1 hora).

Además de minimizar las pérdidas de energía, la función objetivo también debe gestionar las desviaciones de voltaje del

sistema. Esto significa que los voltajes de todas las barras se mantienen dentro de los límites operativos permitidos, generalmente definidos  $V_{min}$  y  $V_{m\acute{a}x}$ . cómo se presenta en la siguiente ecuación:

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}, \forall i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (4)$$

Donde:

- $V_i$  es el voltaje en la barra  $i$ .
- $V_{min}$  y  $V_{max}$  son los límites mínimos y máximos de voltaje permitido

En esta función objetivo también hay restricciones que se tomaron en cuenta y la primera es del cálculo de energía que asegura, en cada barra del sistema, el total de la generación y la demanda debe igualar la suma de las potencias inyectadas desde otras barras menos las pérdidas en las líneas. Esto garantiza que la energía generada y consumida esté equilibrada, evitando desbalances que podrían desestabilizar el sistema.

$$P_{Gi} - P_{Di} = \sum_{j=1}^n V_i V_j (G_{ij} \cos \phi_{ij} + B_{ij} \sin \phi_{ij}) \quad (5)$$

Donde:

- $-P_{Gi}$  es la potencia activa originada en la barra  $i$ .
- $P_{Di}$  es la potencia activa requerida en la barra  $i$ .
- $V_i$  es la magnitud del voltaje en la barra  $i$ .
- $V_j$  es la magnitud de voltaje en la barra  $j$ .
- $G_{ij}$  es la conductancia de la línea entre las barras  $i$  y  $j$ .
- $B_{ij}$  es la susceptancia de la línea entre las barras  $i$  y  $j$ .
- $\phi_{ij}$  es la diferencia de ángulo de fase entre las barras  $i$  y  $j$ .

### 3.2 Flujos de potencia ramificación y acotamiento.

El criterio de flujo de potencia de ramificación y acotamiento es un procedimiento eficaz de optimización del sistema de flujo, particularmente adecuado para problemas complejos y no convexos. Este método divide el problema original en subproblemas manejables y calcula los límites superior e inferior para cada subproblema, descartando aquellos que no mejoran la solución actual.

A través de la optimización del flujo de energía, reduciendo las pérdidas, aumentando su factor de potencia y determinando las configuraciones óptimas de generación y carga en la red. Aunque requiere mucha computación, su capacidad para reducir el espacio de búsqueda lo hace valioso para problemas de optimización de sistemas eléctricos.

**Tabla 2.** Pseudocódigo Algoritmo de ramificación y acotamiento

Algoritmo de ramificación y acotamiento
<b>Paso 1:</b> Inicio
<b>Paso 2:</b> Flujo de potencia al sistema (NR)
<b>Paso 3:</b> Ploss= Obtenemos la pérdida total del sistema.
<b>Paso 4:</b> Aplicar el algoritmo a partir de Ploss
<b>Encontrar:</b> Min (Ploss)
Inicio mejor valor = Infinito // Valor inicial de la mejor solución
Inicio cola de subproblemas= Lista vacía
Inicio subproblema inicial=(Ploss)
<b>While</b>
Cola de subproblemas NO está vacía
Hacer subproblema = extraer subproblema (cola de subproblemas)
// Calcular la pérdida total para este subproblema
Ptotal= 0
<b>For</b> i=1 hasta n
<b>Hacer</b> Flujo de potencia
Ptotal = Ploss 1,2,3....., etc.
<b>End</b>
<b>For</b>
//Verificar si la solución es mejor que mejor valor
<b>If</b> (Ptotal<mejor valor cumple restricciones
<b>Else</b> mejor valor = Ptotal
<b>Ramificación:</b> Dividir el problema en subproblemas.
subproblema1 = ramificar (subproblema, condiciones1)
subproblema2 = ramificar (subproblema, condiciones2)
// Acotación: eliminar subproblemas que no pueden ser mejores
<b>If</b> (acotar(subproblema1) < mejor valor

---

```

else Agregar subproblema1 a cola de subproblemas.
If (acotar(subproblema2) < mejor valor)
    else Agregar subproblema2 a cola de subproblemas.
End.
Regresar Mejor Valor
End.
Paso 5: Mejor valor= Valor min (Ploss)
Paso 6: Ubica y dimensiona la GD
Paso 7: Encuentra la solución óptima.
Paso 8: Grafica resultados
Paso 9: Fin

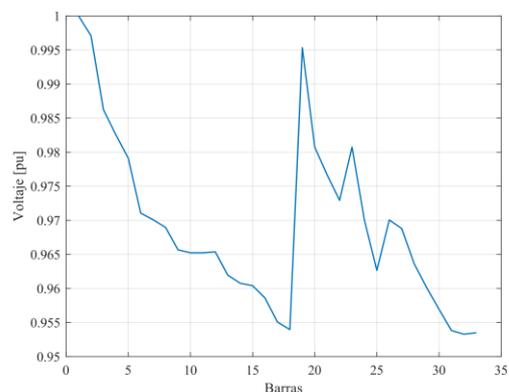
```

---

### 3.3 Casos de estudio.

Se implementa un sistema de generación distribuida fotovoltaica para el dimensionamiento y ubicación óptima mediante un algoritmo híbrido basado en algoritmo ramificación y acotamiento, se plantea un escenario de prueba de la IEEE de 33 barras con una topología radial.

El voltaje base de este sistema es de 12,6 kV y su potencia base es de 100MVA, la cual mediante un flujo de potencia sin insertar ningún tipo de generación distribuida fotovoltaica se obtuvo como datos sus perfiles de voltajes y sus pérdidas anuales de energía en estado normal.



**Figura 5.** Perfiles de voltaje en condiciones iniciales.

Para un análisis de comparación se calcula la demanda del 5% anual en un tiempo parcial de crecimiento de 5 años.

## 4 Análisis de resultados

En este artículo se implementó metodología heurística, la cual son mediante algoritmos híbridos siendo este fundamental para un análisis completo para

obtener un dimensionamiento óptimo de la producción fotovoltaica distribuida en los sistemas de distribución, esta simulación fue ejecutado en el software Matlab con la utilización de algoritmos computacionales, datos de librerías del software, el cual también está basado en el algoritmo de ramificación y acotamiento para disminuir las pérdidas de energía y la desviación de voltaje anuales dándonos fiabilidad de este método de resolución, el sistema de prueba es de topología radial la cual se obtendrán resultados favorables en el sistema.

Al terminar la simulación el algoritmo ubico y dimensiono la GD en el sistema encontrando la mejor solución ya que disminuyo las pérdidas de energía del sistema que en estado inicial son de: 0.1223 p. u y cuando se ejecutó el algoritmo la perdida de energía disminuyo a =0.0628 p.u disminuyendo un 64,29 % las pérdidas totales de energía en el sistema y determinando en que barras se ubicara la GD mostrados en Tabla 4 y su dimensionamiento en Tabla 3 cabe recalcar que si la simulación sigue las perdidas en vez de reducir irán aumentando y por esto el algoritmo se detiene cuando ya encuentra la mejor solución.

#### 4.1.1 Dimensionamiento y ubicación óptima de generación distribuida solar fotovoltaica.

Para su posterior dimensionamiento se toma en cuenta la demanda de energía que tiene Quito durante un periodo de 365 días, considerando de manera específica la irradiación con el mes menos favorable para la obtención de la conversión de la energía eléctrica, de tal forma la potencia entregada al sistema tendrá un valor acorde a lo que se realice en la simulación se considera este rango específico debido al coste de implementación que presenta la ejecución para añadir energía distribuida, en este caso los paneles que favorecen de manera óptima a un sistema de ejecución puede tener una potencia que va de acuerdo al rango

mencionado, dependiendo de la demanda del sistema mediante la ejecución del algoritmo de ramificación y acotamiento, se obtienen datos de ingreso de energía distribuida en kWh, esto quiere decir que a futuro mediante un análisis matemático se determina cuantos paneles en serie y paralelo se pueden incluir para tener la potencia generada por el algoritmo computacional y de esta forma conseguir un resultado específico.

Teniendo en cuenta los parámetros de análisis de la generación distribuida se toma en cuenta 5 escenarios diferentes de valores que pueden ser ingresados en el sistema, con el fin de obtener más valores con los que se pueda ajustar tanto al valor de eficiencia, así como a la durabilidad de vida útil de cada uno de los elementos.

A continuación, en la Tabla 3 está el dimensionamiento óptimo que se obtuvo en la simulación.

**Tabla 3.** Potencia de cada planta fotovoltaica

Generación Fotovoltaica	Potencia [kW]
<b>GD1</b>	2450
<b>GD2</b>	1100
<b>GD3</b>	800
<b>GD4</b>	500
<b>GD5</b>	250

En Tabla 4 se ve la ubicación de generación fotovoltaica inyectada en las barras escogidas por la simulación realizada.

**Tabla 4.** Ubicación de las plantas fotovoltaicas en el sistema de distribución.

Ubicación de generación fotovoltaica	Generación Fotovoltaica
<b>Barra 14</b>	GD1
<b>Barra 19</b>	GD2
<b>Barra 23</b>	GD3
<b>Barra 28</b>	GD4
<b>Barra 31</b>	GD5

Después de la inyección de GD solar fotovoltaica los perfiles de voltajes cambian

llegando casi a la unidad mejorando el sistema de distribución (SD), con esto se demuestra que la inyección de GD en el SDE es favorable obteniendo dimensionamiento y ubicación óptimo de GD posteriormente mostrado en la Figura 7 el perfil de voltaje mejorado con la inyección de GD.

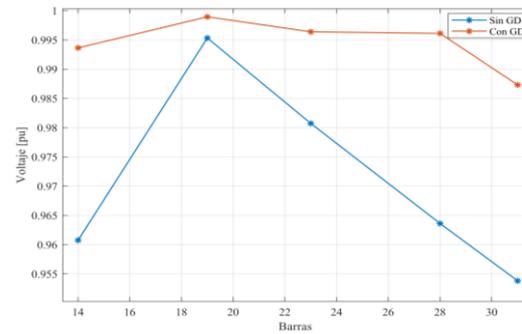
**Tabla 5.** Perfiles de voltaje antes y después de GD

BARRAS	Perfil de voltaje sin GD p.u	Perfil de voltaje con GD p.u
<b>Barra 14</b>	0.9607	0.9936
<b>Barra 19</b>	0.9953	0.9989
<b>Barra 23</b>	0.9807	0.9964
<b>Barra 28</b>	0.9636	0.9961
<b>Barra 31</b>	0.9538	0.9873

#### 4.1.2 Mejora de los perfiles de voltaje en la red de 33 barras.

En la simulación se obtuvo una ubicación y tamaño óptimo de la generación distribuida solar en el sistema de 33 barras que tiene la topología radial en distribución como se refleja en la Figura 6, comparando los resultados en condiciones iniciales sin la inyección de GD en la figura 5, después de la simulación se muestra una mejoría favorable en el sistema, representando unos voltajes mejorados en todo el sistema, después de analizar el sistema a de distribución mejorada se procede a realizar los cálculos respectivos para encontrar su desviación de voltaje, tomando como estudio de caso el aumento de la demanda al 5% por cinco años en el siguiente apartado se dará un análisis más profundo a los resultados obtenidos.

Al obtener los perfiles de voltajes en cada uno de los años, se procedió a realizar el cálculo de la desviación del voltaje en cada una de las barras en las cuales están inyectadas el GD las cuales están reflejados en las barras de cada una de las figuras.



**Figura 6.** Perfil de voltaje p.u. Con DG en cada barra

En los siguientes apartados están las soluciones obtenidas en cada uno de los estudios de caso las cuales que a medida que la demanda va aumentando los resultados son diferentes en cada uno de ellos, como en el año 1 la desviación del voltaje es un poco menor a la que va a ser en el año 5 ya que aumentando la demanda, la inyección de GD en el sistema sufre cambios como en los perfiles de voltaje cada vez menorando cada año pero al ver la última imagen en el año 5 la inyección de GD en estas barras aún son confiables y eficientes ya que todavía mantienen un rango aceptable, haciendo que el sistema de distribución aun siga manteniéndose en los rangos de operación.

#### 4.1.3 Desviación de voltaje total

En la figura 8, se muestra los resultados finales que obtuvimos con la simulación en el Matlab, se muestran como los perfiles de voltaje mejoraron en las barras las cuales están inyectadas con GD, dando como resultado el mejoramiento en el sistema y mejorando los perfiles de voltajes ilustradas en las líneas entrecortadas como se puede observar en las barras 14,19,28,31 sus perfiles de voltaje mejoraron casi llegando al 1p.u al igual que la barra 19 se muestra que se mejoró mínimamente, pero esto hace que la desviación del voltaje se disminuya. En las barras se muestran las desviaciones del voltaje en porcentaje (%) ya que en p.u son muy bajas por esto se realizó la transformación para tener un mejor análisis de las desviaciones, como se observa en las

barras de color celeste las desviaciones del voltaje en el sistema en estado base son:

- **Barra 14:** 3.92 (%)
- **Barra 19:** 0.47 (%)
- **Barra 23:** 1.93 (%)
- **Barra 28:** 3.64 (%)
- **Barra 31:** 4.62 (%)

En las barras de color rojo se muestran como la desviación del voltaje disminuye con la inyección de GD en las barras seleccionadas por la simulación las cuales son:

- **Barra 14:** 0.64 (%)
- **Barra 19:** 0.1 (%)
- **Barra 23:** 0.36 (%)
- **Barra 28:** 0.39 (%)
- **Barra 31:** 1.27(%)

La inyección de Generación Distribuida Fotovoltaica en un sistema de distribución radial de 33 barras mejora los perfiles de voltaje y disminuye las desviaciones de voltaje a través de los siguientes mecanismos:

1. Reducción de las caídas de tensión al generar energía localmente cerca de las cargas.
2. Mejora en la regulación de voltaje mediante el control de la potencia reactiva por parte de los inversores fotovoltaicos.
3. Balance de la carga y la generación, reduciendo las fluctuaciones de voltaje, especialmente en barras de carga alta.
4. Alivio de sobrecargas en las líneas de transmisión durante los picos de demanda, mejorando la estabilidad del sistema.

Al mantener el voltaje dentro de los límites óptimos en todo el sistema, la Generación Distribuida Fotovoltaica no solo optimiza la eficiencia operativa, sino que también contribuye a la fiabilidad y calidad del suministro eléctrico, reduciendo las pérdidas y mejorando la estabilidad de la

red en un sistema radial como el de IEEE 33 barras.

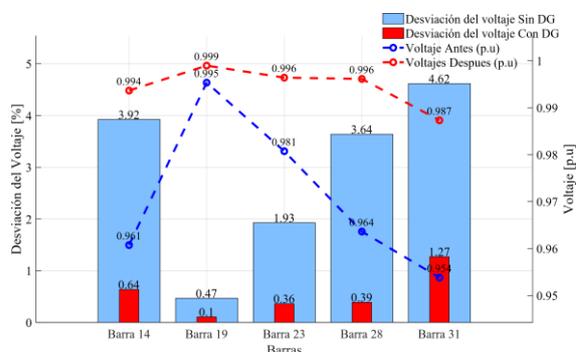


Figura 7. Desviación del voltaje y perfil de voltaje total.

A continuación, se mostrará los cambios de las desviaciones y perfiles de voltaje mientras la demanda va aumentando al 5% en un estudio de cinco años.

#### 4.1.4 Desviación de voltaje en año 1

Al incrementarse la demanda del sistema en un 5%, los perfiles de voltaje presentan ligeras variaciones, pero permanecen dentro de los rangos establecidos en la simulación. Los valores de perfil de voltaje en las barras analizadas son:

- **Barra 14:** 0.992 p.u
- **Barra 19:** 0.999 p.u
- **Barra 23:** 0.995 p.u
- **Barra 28:** 0.994 p.u
- **Barra 31:** 0.985 p.u

Las desviaciones de voltaje reflejan un incremento moderado:

- **Barra 14:** 0.83 (%)
- **Barra 19:** 0.13 (%)
- **Barra 23:** 0.45 (%)
- **Barra 28:** 0.57 (%)
- **Barra 31:** 1.50 (%)

La inyección de generación distribuida solar contribuye a la estabilidad del sistema al proveer generación local, disminuyendo las corrientes en las líneas de transmisión y reduciendo las caídas de voltaje.

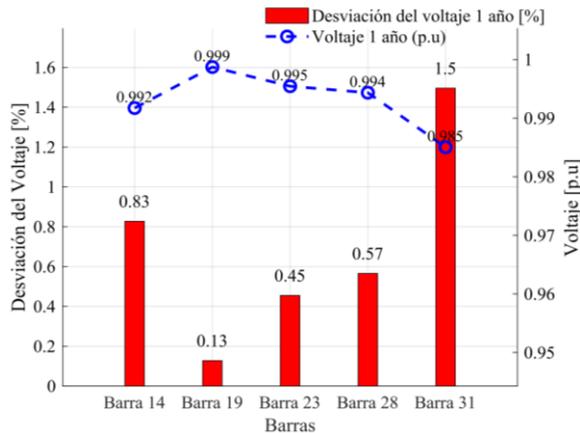


Figura 8. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 1.

#### 4.1.5 Desviación de voltaje en año 2

En este año, los perfiles de voltaje disminuyen levemente debido al incremento progresivo de la demanda, pero se mantienen dentro de los límites permitidos:

- Barra 14: 0.990 p.u
- Barra 19: 0.998 p.u
- Barra 23: 0.994 p.u
- Barra 28: 0.992 p.u
- Barra 31: 0.983 p.u

Se muestra como el perfil del voltaje al aumentar la demanda bajan, pero siguen en los rangos establecidos.

Al igual en las desviaciones de voltaje existe un ligero incremento:

- Barra 14: 1.03 (%)
- Barra 19: 0.15 (%)
- Barra 23: 0.55 (%)
- Barra 28: 0.75 (%)
- Barra 31: 1.74 (%)

La generación distribuida ayuda a mantener niveles estables al compensar localmente las fluctuaciones de carga y mejorar el flujo de potencia reactiva.

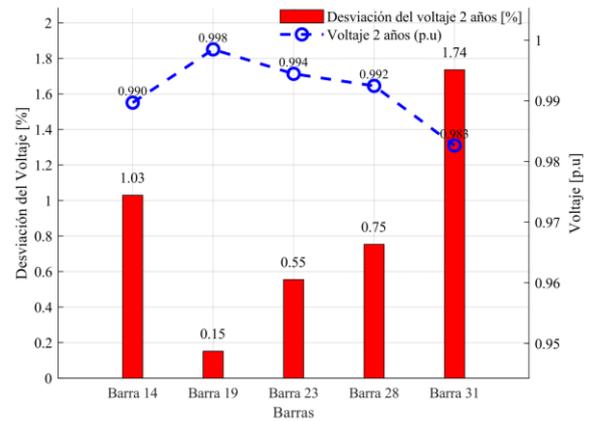


Figura 9. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 2.

#### 4.1.6 Desviación de voltaje en año 3

En la figura 11 al igual que los anteriores años tenemos variaciones las cuales son:

Perfil de voltaje:

- Barra 14: 0.988 p.u
- Barra 19: 0.998 p.u
- Barra 23: 0.993 p.u
- Barra 28: 0.990 p.u
- Barra 31: 0.980 p.u

Desviación del voltaje:

- Barra 14: 1.24 (%)
- Barra 19: 0.18 (%)
- Barra 23: 0.66 (%)
- Barra 28: 0.95 (%)
- Barra 31: 1.99 (%)

El sistema sigue siendo confiable gracias a la ubicación estratégica de las plantas solares, que atenúan el impacto de la creciente demanda sobre los perfiles de voltaje.

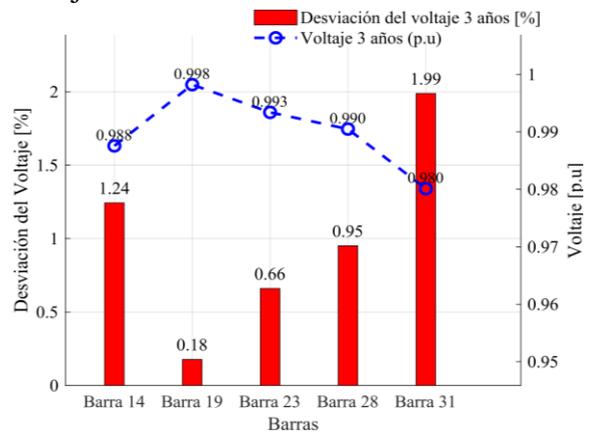


Figura 10. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 3.

#### 4.1.7 Desviación de voltaje en año 4

En este año se demuestran variaciones al igual que los años anteriores en la figura 12 los datos obtenidos son:

Perfil de voltaje:

- **Barra 14:** 0.985 p.u
- **Barra 19:** 0.998 p.u
- **Barra 23:** 0.992 p.u
- **Barra 28:** 0.988 p.u
- **Barra 31:** 0.977 p.u

Desviación del voltaje:

- **Barra 14:** 1.47 (%)
- **Barra 19:** 0.2 (%)
- **Barra 23:** 0.77 (%)
- **Barra 28:** 1.16 (%)
- **Barra 31:** 2.25 (%)

La inyección de generación solar, junto con ajustes en la topología de red, permite mantener la estabilidad del sistema.

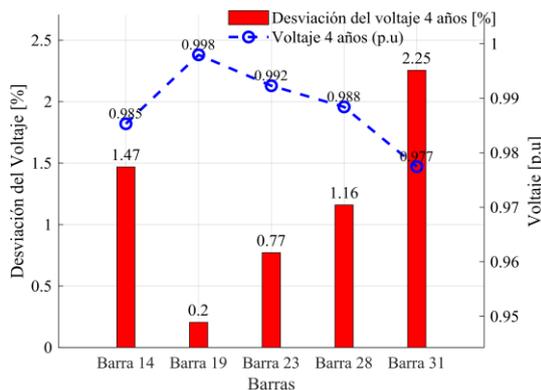


Figura 11. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 4.

#### 4.1.8 Desviación de voltaje en año 5

Finalmente, al quinto año comparado con los años posteriores sigue siendo variable pero aun demostrando que se mantiene dentro del rango a continuación se muestran los resultados obtenidos.

Perfil de voltaje:

- **Barra 14:** 0.983 p.u
- **Barra 19:** 0.998 p.u
- **Barra 23:** 0.991 p.u
- **Barra 28:** 0.986 p.u
- **Barra 31:** 0.975 p.u

Desviación del voltaje:

- **Barra 14:** 1.71 (%)
- **Barra 19:** 0.23 (%)
- **Barra 23:** 0.89 (%)

- **Barra 28:** 1.38 (%)
- **Barra 31:** 2.54 (%)

El perfil de voltaje en la barra 19 a partir del año 2 no varía debido a que la distribución estratégica de la generación y posibles elementos de compensación reactiva contribuyen a la estabilidad del sistema en esta barra.

Las variaciones observadas son mínimas y no afectan de manera significativa la calidad del servicio, permitiendo mantener la operatividad y fiabilidad del sistema de 33 barras con la inyección de cinco plantas de generación fotovoltaica mostrado en figura 13.

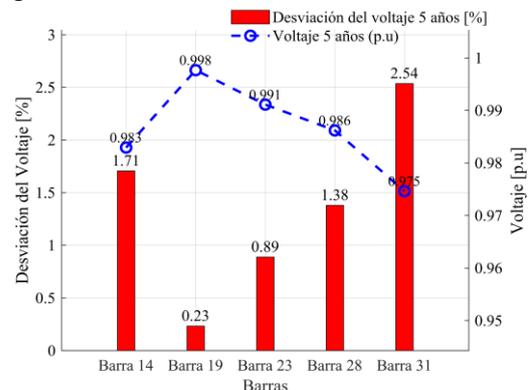


Figura 12. Desviación del voltaje y perfil de voltaje en el año 5.

Finalmente, después del análisis realizado aun manteniendo el aumento de la demanda al 5% el sistema inyectado con GD mantiene rangos fiables de operatividad, se puede realizar el análisis para más años y mantenerse confiable la aplicación del algoritmo aun es válido en este SDE de 33 barras de la IEEE.

Después de haber realizado los análisis correspondientes en la desviación del voltaje, en este SDE de 33 barras también se buscó la mitigación de las pérdidas periódicas de energía la cual se logró con el objetivo, así dejando en evidencia que el SD es confiable y eficiente.

#### 4.2 Minimización de las pérdidas anuales de energía.

Se demostró que la GD de energía solar produciéndose en un método efectivo para

mitigar las pérdidas de energía del sistema eléctrico. La distancia que recorre la electricidad para llegar a los puntos de consumo se reduce significativamente al integrar GD cerca de los puntos de consumo, así reduciendo las pérdidas por oposición de corriente en las líneas de transmisión y distribución.

Además, el decrecimiento en las pérdidas de energía mejora la sostenibilidad del sistema eléctrico. Al disminuir las pérdidas, se reduce la necesidad de generar más energía para compensarlas, lo que resulta en una menor demanda de generación de energías convencionales. Esto tiene un efecto positivo tanto en términos económicos como ambientales, ya que reduce los costos operativos y fomenta una mayor adopción de energías puras y renovables. Mostrando, así como una solución integral de generación distribuida solar, optimizada con su ubicación y dimensionamiento, que mejora la eficacia de la red eléctrica y fomentando la aplicación de los recursos renovables energéticos.

A continuación, se presentan gráficos y diagramas que detallan la mitigación en las pérdidas de energía a lo largo de cinco años, para ilustrar visualmente los resultados de nuestro estudio. Estas imágenes muestran los beneficios alcanzados de manera clara y concisa, destacando la eficiencia del sistema y la sostenibilidad de la estrategia implementada. Estas figuras muestran claramente las mejoras en el funcionamiento del sistema eléctrico, lo que confirma la eficacia de las medidas implementadas y su beneficio para la infraestructura energética.

#### 4.2.1 Reducción de las pérdidas anuales de energía.

En la Figura 14 se muestra el impacto de la Generación Distribuida Fotovoltaica (GD) sobre las pérdidas anuales de energía en el sistema. En el estado base, las pérdidas oscilan entre 29,000 y 30,000 kW/día

debido a la distribución de energía a largas distancias. Sin embargo, al inyectar GD fotovoltaica en el sistema, las pérdidas se reducen significativamente a un rango de 11,000 a 12,000 kW/día, lo que representa una mejora aproximada del 60.68%. Esta reducción se debe principalmente a la generación de energía solar, lo que disminuye las pérdidas técnicas de la red y reduce la dependencia de la generación centralizada. Además, la inyección de energía fotovoltaica contribuye a una mayor estabilidad del sistema, reduciendo los costos operativos y apoyando a la transición hacia un sistema energético más sostenible y eficiente.

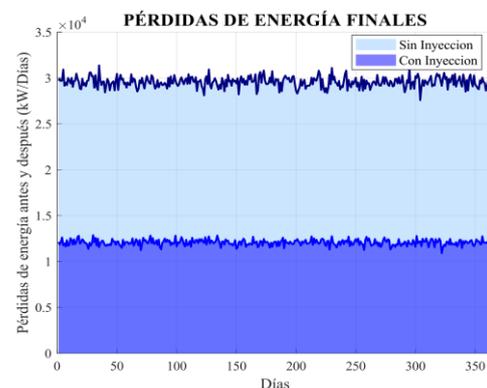


Figura 13. Pérdidas anuales de energía en (Kw/días).

A continuación, se muestra un análisis de como las pérdidas anuales van variando con el aumento de la demanda.

#### 4.2.2 Reducción de las pérdidas anuales de energía año 1,2,3,4,5

En la figura 15 se muestran los resultados de las pérdidas anuales de energía en el sistema aumentando la demanda al 5% cada año empezando desde el año 0 hasta el año 5.

A continuación, se hará un análisis de cada resultado obtenido en la simulación realizada.

#### Minimización de las pérdidas anuales de energía:

**Año 1:** La integración de generación distribuida solar al sistema permitió controlar las pérdidas energéticas. Aunque

se registró un ligero aumento en el pico de pérdidas diarias, alcanzando 13,590 kW/día frente a los 12,668 kW/día del Año 0, este incremento mínimo refleja la efectividad del sistema en minimizar las pérdidas de energía a pesar del incremento en la demanda.

**Año 2:** Las pérdidas de energía alcanzaron un pico de 14,872 kW/día, superando el valor del Año 1 (13,590 kW/día). Sin embargo, el sistema operó dentro de un rango estable, indicando que la generación distribuida continúa mitigando significativamente los efectos del incremento en la demanda.

**Año 3:** El pico de pérdidas ascendió a 16,322 kW/día, representando un aumento respecto al Año 2 (14,872 kW/día). A pesar de este incremento, el sistema mantuvo condiciones operativas confiables, demostrando la estabilidad del modelo de generación distribuida implementado.

**Año 4:** Se observó un pico de pérdidas de 17,707 kW/día, mayor al del Año 3 (16,322 kW/día). El sistema continuó operando de manera estable, destacando que la generación distribuida solar sigue desempeñando un papel crucial en la reducción de las pérdidas de energía.

**Año 5:** El pico de pérdidas de energía llegó a 19,365 kW/día, el valor más alto del período analizado. Sin embargo, la ubicación y dimensionamiento óptimos de la generación distribuida solar contribuyeron a mantener las pérdidas anuales en niveles mínimos en relación con el incremento constante de la demanda. Esto evidencia la eficacia del sistema para equilibrar estabilidad y eficiencia operativa a largo plazo. Este análisis resalta cómo la generación distribuida solar, adecuadamente implementada, permite minimizar las pérdidas energéticas anuales,

incluso frente al crecimiento progresivo de la demanda eléctrica.

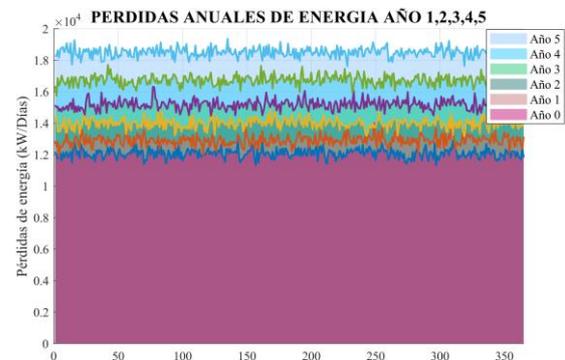


Figura 14. Pérdidas anuales de energía año 1,2,3,4,5.

## 5 Conclusiones.

Con la implementación del algoritmo híbrido en el SDE de 33 barras de la IEEE, se concluye que la inyección de generación distribuida solar, logra minimizar las pérdidas anuales de energía y la desviación del voltaje con la integración de GD no solo optimiza el desempeño del sistema, sino que también asegura su operatividad y fiabilidad a largo plazo, convirtiéndose en una solución sostenible y eficaz para enfrentar los desafíos energéticos futuros.

Se obtuvo un dimensionamiento y ubicación óptima de generación distribuida solar tomando como principal factor las diferentes radiaciones considerando el mes menos favorable y dando como resultado un mejoramiento del sistema.

En este artículo se evaluó diferentes parámetros para la obtención de una ubicación óptima de la generación distribuida solar siendo esta muy eficiente ya que con la inserción de la GD en las barras se obtuvo como resultado un sistema que puede estar operativo a pesar de que su demanda aumente.

Con la generación distribuida mediante la utilización de algoritmos de optimización se puede considerar una iniciativa fundamental para el análisis de energías renovables que pueden ser utilizadas para múltiples beneficios que ayuden tanto a la

red eléctrica como al medio ambiente y la sociedad.

## 6 Trabajos futuros

Ampliar el algoritmo híbrido para incluir criterios adicionales como la huella de carbono, los costos de instalación y la resiliencia del sistema permite una evaluación completa y decisiones más informadas en la planificación de redes de distribución con generación solar fotovoltaica.

Investigar cómo los cambios en los patrones de radiación solar y las mejoras tecnológicas en los paneles fotovoltaicos y reserva de energía afectan el dimensionamiento óptimo, ajustando los modelos de optimización para evaluar la robustez del sistema bajo diferentes condiciones futuras.

Implementar este algoritmo híbrido en otro sistema de distribución para comprobar si este método puede resolver diferentes sistemas.

## 7 Referencias

- [1] M. Purlu and B. E. Turkay, “Optimal Allocation of Renewable Distributed Generations Using Heuristic Methods to Minimize Annual Energy Losses and Voltage Deviation Index,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 21455–21474, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3153042.
- [2] P. A. Juárez Stecanella, D. Vieira, M. V. Leite Vasconcelos, and A. L. de Ferreira Filho, “Statistical analysis of photovoltaic distributed generation penetration impacts on a utility containing hundreds of feeders,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 175009–175019, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3024115.
- [3] K. Lmesri, S. Chabaa, M. A. Jallal, A. Zeroual, N. El Assri, and S. Nachat, “PV power prediction based on Artificial Neural Network optimized by Genetic Algorithm,” in *Proceedings of 2021 9th International Renewable and Sustainable Energy Conference, IRSEC 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/IRSEC53969.2021.9741202.
- [4] A. Singla, K. Singh, and V. K. Yadav, “Optimization of Distributed Solar Photovoltaic Power Generation in Day-ahead Electricity Market Incorporating Irradiance Uncertainty,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 545–560, May 2021, doi: 10.35833/MPCE.2019.000164.
- [5] D. V Bhatt, Y. H. Bhatt, and V. H. Pakka, “IEEE Loss Sensitivity and Voltage Deviation Index Based Intelligent Technique for Optimal Placement and Operation of Distributed Generators.”
- [6] A. R. Kheirkhah, C. F. Meschini Almeida, N. Kagan, and J. B. Leite, “Optimal Probabilistic Allocation of Photovoltaic Distributed Generation: Proposing a Scenario-Based Stochastic Programming Model,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/en16217261.
- [7] Malaviya National Institute of Technology and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *8th IEEE India International Conference on Power Electronics : IICPE 2018 : December 13-15, 2018, venue: MNIT Jaipur (Raj.) India*.
- [8] IEEE Power & Energy Society. Malaysia Chapter, IEEE Power & Energy Society, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2018 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC) : 7-10 Oct. 2018*.
- [9] A. Harb, W. A. Saliek, and M. Alhusseini, “On the Impacts of Renewable Energy on Distribution Power Systems and the Effects of Energy Storage Systems,” in *2023 14th International Renewable Energy Congress, IREC 2023*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/IREC59750.2023.10389307.
- [10] N. Deyhimi, H. Torkaman, M. Shadaei, M. Shabanirad, and M. Kermani, “Comparative Multi-objective

- Investigation of Radial and Ring Distribution System in the Presence of DGs,” in *21st IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 5th IEEE Industrial and Commercial Power System Europe, IEEEIC / I and CPS Europe 2021 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/IEEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584527.
- [11] Aswan University. Faculty of Engineering and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Proceedings of 2019 International Conference on Innovative Trends in Computer Engineering (ITCE) : February 2nd-4th, 2019, Aswan Mövenpick Hotel, Aswan, Egypt*.
- [12] A. Aguila-Téllez, D. González, G. Gutiérrez, and L. Ortiz, “Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de distribución usando PSO,” *I+D Tecnológico*, vol. 18, no. 1, pp. 50–68, Jul. 2022, doi: 10.33412/idt.v18.1.3219.
- [13] IEEE Industry Applications Society, IEEE Power & Energy Society, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Lahore Section, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2019 3rd International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE) : proceedings : 23-24 October, 2019, Lahore, Pakistan*.
- [14] IEEE Staff, *2017 IEEE PES PowerAfrica*. IEEE, 2017.
- [15] “Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica.”
- [16] M. Gavrilas, B.-C. Neagu, Universitatea Tehnică “Gh. Asachi” Iași. Faculty of Electrical Engineering, IEEE Romania Section, Academia Română (1990- ). Engineering Sciences Section. Power Engineering Committee, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *EPE 2020 : proceedings of the 2020 International Conference and Expositions on Electrical and Power Engineering*.
- [17] Institute of Electrical and Electronics Engineers. India Council, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Madras Section, Amrita Vishwa Vidyapeetham, and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE INDICON : 15th IEEE India Council International Conference : Dec. 16-18, 2018*.
- [18] I. Elvis, P. Soto, and J. W. Dixon, “CELDAS FOTOVOLTAICAS EN GENERACION DISTRIBUIDA,” 2005.
- [19] D. Esparza, J. Torres, J. Sánchez, and J. M. Rivas, “Celdas solares de tercera generación a base de puntos cuánticos y perovskitas,” 2020.
- [20] D. Juliana, R. Benavides, E. A. Mogollón, and J. B. Jaimes, “Avances en las tecnologías para obtención de energía eléctrica por medio de sistemas de aprovechamiento por energía solar fotovoltaica y eólica.”
- [21] Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca, IEEE Power & Energy Society., and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *Proceedings of 2019 8th International Conference on Modern Power Systems (MPS) : 21- 23 May 2019, Cluj-Napoca, Romania*.
- [22] I. Alberto Tama Franco MAE, “Energía LAS PÉRDIDAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA INTRODUCCIÓN.”
- [23] Fusion, “CONTOL Y REDUCCION DE PERDIDAS NO TECNICAS \_PABLO MENA\_.”
- [24] A. Gonzalez-Moreno, J. Marcos, I. De La Parra, and L. Marroyo, “Inverter-based PV ramp-rate limitation strategies: minimizing energy losses,” in *ENERGYCON 2022 - 2022 IEEE 7th International Energy Conference, Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022. doi: 10.1109/ENERGYCON53164.2022.9830218.
- [25] L. H. Berrío and C. Zuluaga, “Smart Grid and solar photovoltaic energy as renewable energy source for the distributed

- generation in the global energy context,” *ingeniería y desarrollo*, vol. 32, no. 2, pp. 369–396, Jun. 2014, doi: 10.14482/inde.32.2.4957.
- [26] A. A. Alomoush, A. A. Alsewari, H. S. Alamri, K. Aloufi, and K. Z. Zamli, “Hybrid Harmony Search Algorithm With Grey Wolf Optimizer and Modified Opposition-Based Learning,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 68764–68785, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2917803.
- [27] J. Plazarte and D. De Operaciones, “CONTROL DE VOLTAJE A TRAVÉS DE PROGRAMACIÓN ENTERA-MIXTA DE COMPENSADORES Y LTC’S DE UN MODELO ELÉCTRICO.”
- [28] Y. Lim, S. Javaid, Y. Tan, and R. Khwanrit, “Minimizing Energy Loss for Multiple Load Power Flow Assignment in Smart Homes,” in *2023 International Conference on Energy, Power, Environment, Control, and Computing, ICEPECC 2023 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. doi: 10.1109/ICEPECC57281.2023.10209436.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 6. Matriz de estado del arte

DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.																											
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS					TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
			CITAS	Sistemas de distribución eléctrica	Generación distribuida solar fotovoltaica	Desviación del voltaje en sistemas de distribución	Pérdidas de energía en el sistema de distribución	Medición de irradiancias	Minimización de la desviación del voltaje	Equilibrio de potencia activa	Minimización de pérdidas anuales en el sistema	Mejoramiento del sistema de distribución	Irradiancia	Demanda	Corriente	Energía renovable	Índice de desviación de voltaje	Mantener los rangos de operación del voltaje	Dimensionamiento óptimo en la red de distribución eléctrica	Minimizar las pérdidas anuales de energía	Diseño y gestión de redes de energía sostenible	Algoritmo Híbrido	Ubicación óptima de la generación distribuida fotovoltaica	Método de ramificación y acotamiento	Minimización de pérdidas y desviación del voltaje en el sistema		
1	2022	Optimal Allocation of Renewable Distributed Generations Using Heuristic Methods to Minimize Annual Energy Losses and Voltage Deviation Index	80	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘			
2	2020	Statistical Analysis of Photovoltaic Distributed Generation Penetration Impacts on a Utility Containing Hundreds of Feeders	27	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪			
3	2021	PV power prediction based on Artificial Neural Network optimized by Genetic Algorithm	3	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	✘	▪			
4	2021	Optimization of Distributed Solar Photovoltaic Power Generation in Day-ahead Electricity Market Incorporating Irradiance	22	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪			
5	2021	IEEE Loss Sensitivity and Voltage Deviation Index Based Intelligent Technique for Optimal Placement and Operation of Distributed Generators	22	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	▪	✘	✘	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪			

6	2023	Optimal Probabilistic Allocation of Photovoltaic Distributed Generation: Proposing a Scenario-Based Stochastic Programming Model	3	✘	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪
7	2018	Moth Search Optimization for Optimal Integration of DERs for Annual Energy Loss Minimization in Distribution Systems	9	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	✘	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	▪	✘	▪	▪

## DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
IT E M	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas de distribución eléctrico	Generación distribuida solar fotovoltaica	Desviación del voltaje en sistemas de distribución	Pérdidas de energía en el sistema de distribución	Medición de irradiancias	Minimización de la desviación del voltaje	Equilibrio de potencia activa	Mejoramiento del sistema de distribución	Irradiancia	Demanda	Corriente	Energía renovable	Índice de desviación de voltaje	Mantenimientos operativos del voltaje	Dimensionamiento óptimo en la red de distribución eléctrica	Minimizar las pérdidas anuales de energía	Diseño y gestión de redes de energía sostenible	Algoritmo Híbrido	Ubicación óptima de la generación distribuida fotovoltaica	Método de ramificación y acotamiento	Minimización de pérdidas y desviación del voltaje en el sistema
8	2018	Voltage Stability Index and Voltage Deviation Improvements using Intelligent Algorithms for Capacitor Sizing and Placement	6	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪
9	2023	On the Impacts of Renewable Energy on Distribution Power Systems and the Effects of Energy Storage Systems	0	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	✘	▪	▪	▪	▪	✘	✘	▪	▪	✘	▪	▪
10	2021	Comparative Multi-objective Investigation of Radial and Ring Distribution System in the Presence of DGs	5	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	▪	✘
11	2019	Recloser-fuse Coordination of Radial Distribution Systems with Different Technologies of Distributed Generation	5	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘
12	2018	Sistemas de distribución	84	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	✘	✘	▪
13	2022	Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de distribución usando PSO	0	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	✘	▪

14	2019	Optimal Placement and Sizing of Distributed Generator in Meshed Distribution System	4	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	✘	▪	▪	▪	✘	✘	▪
15	2017	Providing Electricity to Remote Communities with DC Powered Devices Using Solar PV Systems	4	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	✘	▪	✘	▪	✘
16	2014	Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica	25	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	✘	▪	✘	▪

## DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS	CITAS	TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA					
					Sistemas de distribución eléctrico	Generación distribuida solar fotovoltaica	Desviación del voltaje en sistemas de distribución	Pérdidas de energía en el sistema de distribución	Medición de irradiancias	Minimización de la desviación del voltaje	Equilibrio de potencia activa	Minimización de pérdidas anuales en el sistema	Mejora del sistema de distribución	Irradiancia	Demanda	Corriente	Energía renovable	Índice de desviación de voltaje	Mantener los rangos de operatividad del voltaje	Dimensionamiento óptimo en la red de distribución eléctrica	Minimizar las pérdidas anuales de energía	Diseño y gestión de redes de energía sostenible	Algoritmo Híbrido	Ubicación óptima de la generación distribuida fotovoltaica	Método de ramificación y acotamiento
16	2014	Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica	25	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	✘	▪	✘	▪
17	2020	Optimizing the Operation of Photovoltaic Panel Systems	12	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	✘	▪	✘
18	2018	A Real-Time Comparative Data Analysis of Different Types of Solar Panels During Partial Shading with Distinct Tilt Angles	4	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	✘	▪	✘	▪	✘
19	2005	Celdas Fotovoltaicas en generacion distribuida.	36	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	✘	✘	▪	▪	✘	▪	▪	▪
20	2020	Celdas solares de tercera generación a base de puntos cuánticos y perovskitas	0	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	▪	▪	▪	▪	✘	▪	▪	✘	▪	✘	✘

21	2018	Avances en las tecnologías para obtención de energía eléctrica por medio de sistemas de aprovechamiento por energía solar fotovoltaica y eólica	1	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	⊗	⊗	▪	▪	⊗	▪	⊗	
22	2019	Requirements of a real time monitoring and analysis system of power losses in electrical transmission and distribution systems	3	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	⊗	▪	⊗	⊗	▪	⊗	▪
23	2018	Energía las pérdidas de energía eléctrica introducción	3	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	⊗	▪	⊗	⊗	▪	▪
24	2017	Control y reducción de perdidas no técnicas _pablo mena	7	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	⊗	▪	▪	▪	⊗	⊗	▪	▪	⊗	▪	⊗	▪
25	2022	Inverter-based PV ramp-rate limitation strategies: minimizing energy losses	1	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	⊗	▪	▪	⊗	▪	▪	▪
26	2014	Smart Grid and solar photovoltaic energy as renewable energy source for the distributed generation in the global energy context	13	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	⊗	▪	⊗	▪	▪	⊗	▪	▪

**DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN PARA MINIMIZAR LAS PÉRDIDAS ANUALES DE ENERGÍA Y EL ÍNDICE DE DESVIACIÓN DE VOLTAJE CONSIDERANDO UN ALGORITMO HÍBRIDO BASADO EN RAMIFICACIÓN Y ACOTAMIENTO.**

DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
IT E M	AÑ O	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CIT A S	Sistema s de distribu ción eléctrico	Gen eración distri bui da sola r foto volt aica	Des via ción del voltaje en sist emas de distri bución	Pér didas de ené rgi a en el sist ema de distri bución	Me dici ón de irr adiancias	Mini mizaci ón de la desvia ción del voltaje	Eq uilibri o de pot enc ia activa	Mini mizaci ón de pér didas anuales en el sist ema	Mejora miento del sistema de distribu ción	Irr adiancia	De manda	Co rriente	En ergía no re no vable	Índ ice de des via ción de voltaje	Ma nte ner los ran gos de ope rati vidad del voltaje	Dim ensionam iento ópti mo en la red de distri bución eléct rica	Mini mi zar las pér didas anuales de energía	Dis eño y gesti ón de redes de energía sost enible	Algorit mo Híbrido	Ubic ación ópti ma de la gener ación distri bui da fotov oltaica	Mét odo de rami ficación y acot amiento	Mini mizac ión de pér didas y des via ción del voltaje en el sist ema
27	2019	Hybrid Harmony Search Algorithm With Grey Wolf Optimizer and Modified Opposition-Based Learning	49	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪
28	2019	Control de voltaje a través de programación entera-mixta de compensadores y ltc's de un modelo eléctrico	0	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	⊗	▪	⊗	⊗	▪	▪	⊗
29	2021	A Mixed-Integer Nonlinear Problem Algorithm to Control Finite State Machines using Branch and Bound	0	⊗	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	▪	▪	▪	⊗	▪	⊗	▪	⊗	⊗	▪	▪

### 7.2 Resumen de Indicadores

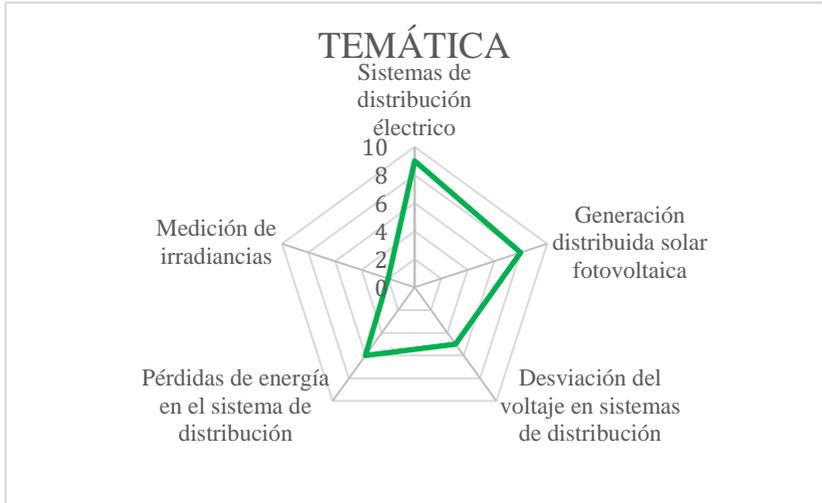


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.



Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

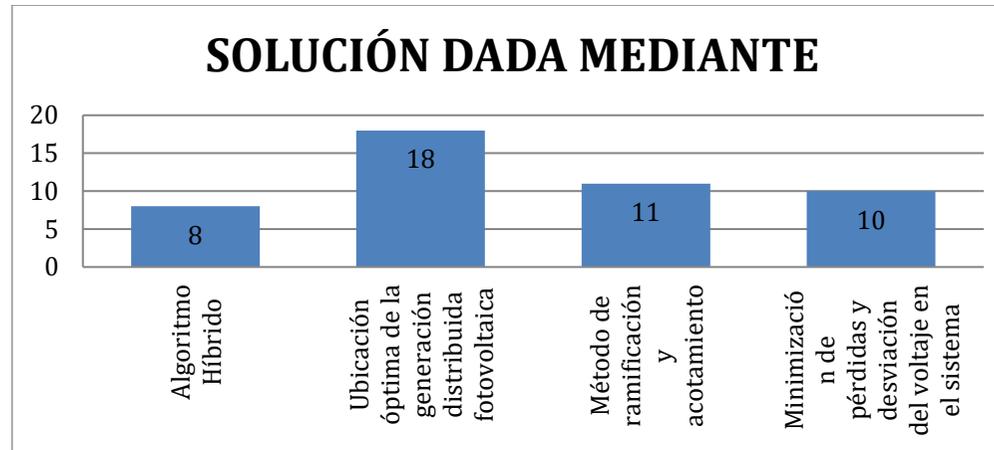


Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte.

## 8 Anexos

Tabla 7. Datos de líneas del sistema IEEE de 33 barras.

Datos de Líneas				
Nº Línea	Bus inicial	Bus final	R [ohm]	X [ohm]
1	1	2	0.0922	0.0477
2	2	3	0.4930	0.2511
3	3	4	0.3660	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.8190	0.7070
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	1.7114	1.2351
8	8	9	1.0300	0.7400
9	9	10	1.0400	0.7400
10	10	11	0.1966	0.0650
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.4680	1.1550
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.5910	0.5260
15	15	16	0.7463	0.5450
16	16	17	1.2890	1.7210
17	17	18	0.7320	0.5740
18	2	19	0.1640	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.8980	0.7091
24	24	25	0.8960	0.7011
25	6	26	0.2030	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.0590	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.9630
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.3410	0.5302
33	8	21	2.0000	2.0000
34	9	15	2.0000	2.0000
35	12	22	2.0000	2.0000
36	18	33	0.5000	0.5000
37	25	29	0.5000	0.5000

Tabla 8. Datos de cargas del sistema IEEE de 33 barras.

Datos de Cargas		
Nº Barra	P [kW]	Q [kvar]
1	0	0
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	20	100
8	20	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	600
31	150	70
32	210	100
33	60	40