

**IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL
VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL
VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

**AUTOR:
JORGE EDUARDO JÁTIVA SIERRA**

**TUTOR:
JUAN ALBERTO BUCHELI ÁVILA**

Quito, Septiembre 2020

Jorge Eduardo Játiva Sierra

IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2020

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña historia e información de contacto:



Jorge Eduardo Játiva Sierra (Y'1991-M'06). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Instituto Tecnológico Superior “Central Técnico” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el análisis del impacto de la generación distribuida en la estabilidad del voltaje en los sistemas de distribución.

jjativas@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Juan Alberto Bucheli Ávila (Y'1960-M'01). Se Graduó de Ingeniero Eléctrico en la Universidad Politécnica Salesiana y Magister en Gestión de Energías en la Universidad Técnica de Cotopaxi. Actualmente se desempeña como docente titular auxiliar nivel 1 en la Universidad Politécnica Salesiana. Áreas de interés: Energía eólica, Energía renovable, Máquinas eléctricas, Generación distribuida, Energía Fotovoltaica.

jbucheli@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2020 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Juan Alberto Bucheli Ávila declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN*” realizado por Jorge Eduardo Játiva Sierra, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., Septiembre de 2020



Juan Alberto Bucheli Ávila


C.C.: 1706576210

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Jorge Eduardo Játiva Sierra, con documento de identificación N° 172480474-3, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *“IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN”*, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., Septiembre de 2020



Jorge Eduardo Játiva Sierra
C.C.: 172480474-3

1. INDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract	1
1. Introducción.....	2
2. Marco Teórico	4
2.1 Generación Distribuida en los Sistemas de eléctricos	4
2.2 Integración de la generación distribuida en la red de distribución	5
2.2.1 Impacto de la integración de la GD en sistemas de distribución.....	6
2.3 Planificación del sistema de distribución	8
2.3.1 Estabilidad de Voltaje	8
2.3.2 Índice de Estabilidad.....	10
2.3.3 Límites de voltaje en sistemas de distribución.....	11
3. Flujos de Potencia	11
4. Formulación Matemática	12
4.1 Función objetivo	12
4.2 Restricciones	12
5. Implementación del Modelo Matemático	14
5.1 Procedimiento de resolución	14
6. Análisis de Resultados	15
6.1 Caso 1 - Evaluación del Modelo matemático que minimiza la variación de voltajes	16
6.2 Caso 2 - Evaluación del Modelo matemático que minimiza pérdidas.....	17
7. Conclusiones.....	19
8. Referencias	20
8.1 Matriz de Estado del Arte.....	24
8.2 Resumen de Indicadores.....	27

2. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de la generación distribuida en los sistemas eléctricos de potencia..4	
Figura 2. Ventajas de la incorporación de generación distribuida al sistema eléctrico..... 7	
Figura 3. Diagrama Unifilar de una Línea de Transmisión. 10	
Figura 4. Diagrama unifilar del sistema a ser evaluado. 15	
Figura 5. Potencia activa entregada por la GD – Caso 1. 16	
Figura 6. Potencia reactiva entregada por la GD- Caso 1. 16	
Figura 7. Perfil de voltaje – Caso 1. 16	
Figura 8. Índice de estabilidad de voltaje – 1 GD – Caso 1 17	
Figura 9. Índice de estabilidad de voltaje – 2 GD – Caso 1 17	
Figura 10. Índice de estabilidad de voltaje – 3 GD – Caso 1. 17	
Figura 11. Potencia activa entregada por la GD – Caso 2 17	
Figura 12. Potencia reactiva entregada por la GD – Caso 2. 17	
Figura 13. Perfil de voltaje – Caso 2. 18	
Figura 14. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 1GD 18	
Figura 15. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 2GD 18	
Figura 16. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 3GD 18	
Figura 17. Índice de estabilidad de voltaje – 1 GD – Caso 2 18	
Figura 18. Índice de estabilidad de voltaje – 2 GD – Caso 2. 18	
Figura 19. Índice de estabilidad de voltaje – 3 GD – Caso 2. 18	
Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte..... 27	
Figura 21. Indicador de formulación del problema - Estado del arte..... 28	
Figura 22. Indicador de solución - Estado del arte..... 28	

3. INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de la generación distribuida 6	
Tabla 2. Algoritmo para solución. 14	
Tabla 3. Datos de las líneas del sistema 15	
Tabla 4. Datos de las cargas..... 15	
Tabla 5. Evaluación de voltaje GAMS - DIGSILENT 15	
Tabla 6. Ubicación de GD – Caso 1..... 16	
Tabla 7. Ubicación de GD – Caso 2..... 17	
Tabla 8. Comparativo de pérdidas..... 19	
Tabla 9. Matriz de estado del arte 24	

IMPACTO DE LA GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN LA ESTABILIDAD DEL VOLTAJE EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Resumen

La generación distribuida GD se asocia a la implementación de pequeñas fuentes de generación, instaladas cerca del consumidor que se conecta a la red de distribución de energía eléctrica. En tal sentido, la ubicación y el tamaño de los generadores distribuidos en las redes de transporte tienen un impacto en la operación y el control de los sistemas eléctricos y a su vez incrementa la confiabilidad en el abastecimiento en la demanda, mejora estabilidad y la calidad del suministro de electricidad, por tal razón se han hecho necesario la realización de estudios eléctricos sobre la integración de la generación distribuida.

Con base a lo citado, el presente trabajo establecerá un modelo de optimización para incorporar GD a la red usando flujos óptimos de potencia, el cual será resuelto mediante GAMS. Las variables eléctricas resultado de la optimización permitirán evaluar el índice de estabilidad de voltaje, tomando en consideración la minimización de las variaciones de voltaje y las pérdidas de potencia activa.

Palabras Clave: Flujos óptimos de potencia, Estabilidad de voltaje, Perfiles de voltaje, Generación distribuida, Técnicas de optimización.

Abstract

GD distributed generation is associated with the implementation of small generation sources, installed near the consumer that connects to the electrical energy distribution network. In this sense, the location and size of the generators distributed in the transmission networks have an impact on the operation and control of the electrical systems and in turn increases the reliability of supply on demand, improves stability and the quality of the electricity supply, for this reason it has become necessary to carry out electrical studies on the integration of distributed generation.

Based on the afore mentioned, the present work will establish an optimization model to incorporate GD to the network using optimal power flows, which will be solved by GAMS. The electrical variables resulting from the optimization will allow evaluating the voltage stability index, taking into consideration the minimization of voltage variations and active power losses.

Keywords: Optimal power flows, Voltage stability, Voltage profiles, Distributed generation, Optimization techniques.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos de distribución han experimentado cambios importantes en el transcurso de los años a causa del aumento de la demanda, muchos usuarios han inclinado sus consumos a diversas actividades. Una de las causas que inciden en el crecimiento de la demanda de los sistemas de distribución, son las distintas tecnologías que se han desarrollado, que además son de fácil acceso a los consumidores, provocando de esta manera un elevado nivel de dependencia a los equipos electrónicos [1].

Con lo mencionado anteriormente, el crecimiento de la demanda ocasiona que las redes de distribución operen a su capacidad máxima o muy cercanas al límite de voltaje, de tal manera que se produce un incremento de pérdidas de energía y potencia en el sistema [2].

Una de las metodologías planteadas para abastecer energía eléctrica de calidad, mejorar la regulación de voltaje y aumentar la confiabilidad del sistema, es la integración de sistemas de generación de pequeña capacidad que se basan en tecnologías que hacen el uso de energías renovables, conocidas como generación distribuida (GD), este nuevo tipo de tecnología de generación se caracteriza por ser de bajo costo y tener una alta eficiencia [3].

Las unidades de generación distribuida se encuentran conectadas paralelamente al sistema o las cargas, su capacidad característica oscila entre los 5 kW hasta los 10 kW, por esta razón se las llama unidades de generación de mediana y pequeña escala. Entre las tecnologías principales para este tipo de generación se encuentran microturbinas, biomasa, celdas de combustible, celdas fotovoltaicas y turbinas de viento [4];

varias de estas tecnologías se encuentran en investigación y otras están en desarrollo, mientras que otras ya controlan el mercado eléctrico a causa de su eficiencia y su funcionalidad utilizando a los recursos renovables.

El costo de implementación de una unidad de generación distribuida tiene una inversión de bajo costo con respecto a la gran inversión que requieren las centrales de generación eléctrica convencionales, su alto costo se debe a la distancia existente entre las centrales y los puntos de abastecimiento, debido a este factor es necesaria la construcción de líneas de transmisión, asimismo de la implementación de infraestructura para los medianos y grandes proyectos de generación. Estos inconvenientes se presentan cuando se analiza a la GD con respecto a una nueva unidad de generación tradicional, resaltando lo conveniente que es la implementación de esta tecnología de generación; los beneficios se suman cuando se pasa al área de transmisión, donde los costos de peaje de transmisión son eliminados debido a que la GD se encuentra cerca de la carga representando de esta manera un ahorro en el costo de la energía, como se visualiza en la Figura 1; además, incrementa la capacidad de transferencia de energía por medio de las líneas de transmisión, ya que la cargabilidad de estas se reduce, causando un crecimiento en los perfiles de voltaje y reduciendo las pérdidas de energía del sistema de distribución, es así como se logra el principal objetivo de los sistemas eléctricos de potencia, dar un suministro de energía económico seguro y confiable [5].

Mediante el uso de la GD se pretende generar electricidad, de alta eficiencia, de bajo costo y menos contaminante debido a la utilización de recursos renovable minimizando principalmente la combustión [6].

Se han realizado varios estudios de planificación referentes a la incorporación de la generación distribuida a los sistemas de distribución y se proponen estudios como en el documento científico [7] que plantean técnicas basadas en optimización analítica y optimización heurística para la ubicación y el dimensionamiento óptimo de una GD con el fin de reducir las pérdidas de potencia y mejorar los perfiles de voltaje en las redes de distribución. También en el documento científico [8], se exponen algoritmos genéticos como una técnica de optimización basada en el mecanismo de selección biológica, esta técnica es empleada para resolver problemas con ubicación óptima de GD en redes de distribución. Mediante estos algoritmos se logra minimizar la pérdida de potencia total en todo el sistema y también se optimiza la asignación de unidades de GD renovables en la red.

Otro de los métodos que involucran a la generación distribuida al sistema de potencia es el descrito en el documento científico [9], donde se presenta un medio de control DVR (Restaurador de Voltaje Dinámico), que tiene como objetivo mejorar la compensación de voltaje. Durante la etapa de compensación de voltaje, este método propone las estrategias para tener un consumo mínimo de energía activa. También se suma la técnica de optimización de enjambre de partículas (PSO) propuesta en el documento científico [10], es empleada para encontrar la ubicación óptima de GD en el sistema de distribución para reducir las pérdidas de potencia real y mejorar el perfil de voltaje.

Y finalmente otro método que es recientemente estudiado es el propuesto en el documento científico [11], que mediante la aplicación de la técnica de red neuronal ofrece una sensibilidad en el límite de estabilidad

de voltaje con respecto a variables del sistema como la generación de potencia reactiva, análisis o evaluación de sensibilidad que usa posteriormente como una guía para modificar la generación de potencia reactiva para aumentar el límite de estabilidad de voltaje.

Por consiguiente, la implementación de la generación distribuida ayuda a un sistema de distribución a evitar que tenga bajos niveles de voltaje y reduce pérdidas de potencia, pero esta implementación se la debe ejecutar de manera óptima, y considerando nuevas restricciones como la determinación de la ubicación y diseño de la topología, es así como intrínsecamente el problema es no lineal. En base a lo descrito se desarrolla el presente trabajo, planteando una metodología distinta para la óptima ubicación de la generación distribuida en el área de distribución como se observa en la Figura 1, tomando en cuenta las características técnicas de los generadores y restricciones de balance de potencia activa y reactiva del sistema, límites de voltaje y variables de decisión, lo que conlleva el desarrollo de un modelo de optimización no lineal entero mixto, que será modelado en el software denominado General Algebraic Modeling System (GAMS). Donde se realizan flujos óptimos de potencia en una red radial, considerando las restricciones operativas y la metodología planteada, se evalúa los resultados de las variables eléctricas al incorporar la generación distribuida, en base a este procedimiento se cumple con dos objetivos en el modelo, el principal objetivo se considera el efecto de la estabilidad de voltaje que en la modelación tiene como función objetivo minimizar el cuadrado de la diferencia de voltajes de cada nodo de conexión a un valor de voltaje deseado que corresponderá al nominal; y el

segundo objetivo del modelo es la minimización de las pérdidas de potencia reactiva, y posteriormente se presentan los resultados obtenidos.

Para complementar el presente trabajo, se tiene secciones ordenadas de la siguiente manera: en la Sección II se describe el impacto de la integración de la Generación Distribuida, los límites de voltaje estandarizados y los aspectos conceptuales sobre la estabilidad de

voltaje; la Sección III muestra el problema de optimización que será resuelto a través de programación no lineal entera mixta (MINLP), la Sección IV muestra la formulación del algoritmo desarrollado para la ubicación óptima de GD; en la Sección V se describen los casos de estudio; y para finalizar en la sección 5 y 6, se muestran los resultados y conclusiones del trabajo.

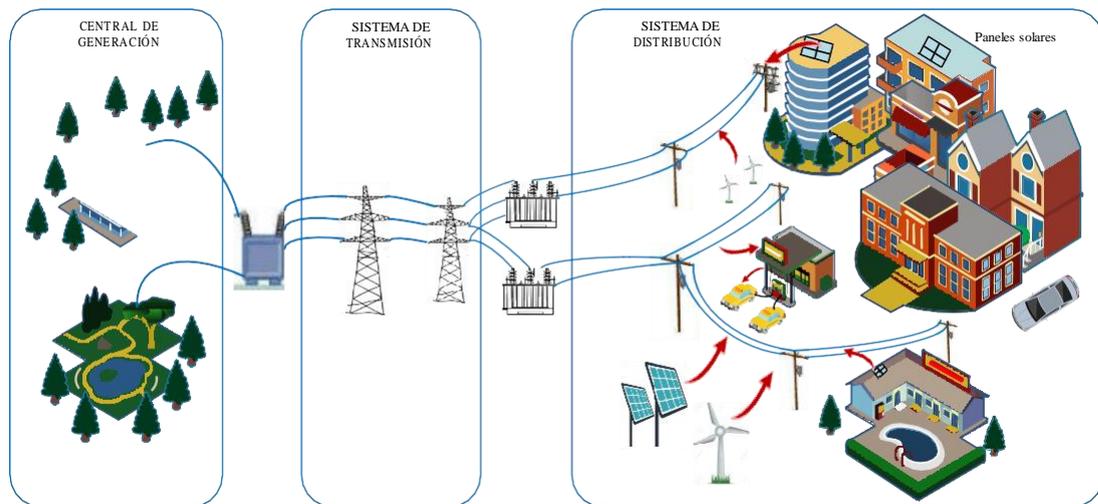


Figura 1. Ubicación de la generación distribuida en los sistemas eléctricos de potencia.

2. Marco Teórico

2.1 Generación Distribuida en los Sistemas de eléctricos

La calidad del servicio eléctrico debe estar en constante mejora, exigiendo que los sistemas de distribución se vuelvan cada vez más robustos, ese planteamiento representa un desafío para los operadores del sistema en lo que respecta a la planificación de la operación del sistema y a la futura expansión, esto se debe al comportamiento dinámico de la demanda y la incorporación de nuevas tecnologías como vehículos eléctricos y las unidades de generación distribuida, este cambio representa una variación en la estructura desde los equipos de protección y medición, los

de control derivados de un estudio previo de las variables eléctricas [12].

La generación distribuida es un elemento principal dentro de los sistemas de distribución, estas son pequeñas fuentes de generación de energía eléctrica que son integradas o instaladas cerca de la carga. Las características principales de la GD en el sistema eléctrico son las siguientes:

- ↓ *Aumenta la calidad y fiabilidad del sistema eléctrico:* ya que son pequeñas fuentes de generación distribuidas en el sistema, la falla de una unidad no es un problema importante para un sistema eléctrico.
- ↓ *Disminuye las pérdidas energía en la red de distribución:* como estas unidades de generación están más cercanas a los puntos de consumo,

hace que las redes de transporte sean más cortas, por tal razón las pérdidas de energía se reducen en el transporte de electricidad desde la generación hasta el consumo.

↓ *Son energías renovables:* la GD se basa más en el uso de energías renovables, por esta razón son las más convenientes para implementarse cerca de la carga.

2.2 Integración de la generación distribuida en la red de distribución

Al integrar la generación distribuida en un sistema de distribución esta puede brindar beneficios técnicos, ambientales y económicos. Desde luego, la GD en los sistemas eléctricos brindará energía para contribuir el abastecimiento de la demanda presente y futura, en áreas industriales, comerciales y residenciales [13].

Al establecer un punto óptimo de ubicación en el sistema puede causar algunos beneficios como: mayor confiabilidad y fiabilidad, reducción de pérdidas y un aumento del perfil de voltaje en el sistema, pero si al contrario se realiza una inadecuada integración de la GD este puede traer consigo algunas consecuencias negativas como: un funcionamiento incorrecto de las protecciones a causa de los flujos de potencia bidireccionales y un aumento de pérdidas en el sistema [14], otro de los problemas que se pueden presentar al momento de integrar la GD en los sistemas de distribución, es que las líneas involucradas estén funcionando al límite de cargabilidad y una alta relación R/X provoca considerables caídas de voltaje e inestabilidad al sistema [15], [16].

El concepto de la generación distribuida está reducido en una definición realizada por varios autores [17], [18], ya que este tipo de generación no tiene una única

definición. No obstante, hay que dejar en claro que el concepto de GD no es algo nuevo que recientemente se ha implementado, sino que este tipo de generación ha ido tomando mayor importancia en el transcurso de los últimos años, a causa de varios factores tecnológicos, políticas energéticas y ambientales. La generación distribuida puede clasificarse según la fuente de donde provienen siendo renovable y no renovable en función del recurso para generación disponible y pueden ser: fotovoltaica, eólica, de gas, motores de combustión interna, celdas de combustible, etc. Pero de manera global se incentiva a la generación distribuida no convencional debido al reducido impacto ambiental que genera, es de pequeña escala en la red de distribución, y puede estar conectada cerca de la carga o en ella.

En la generación no convencional existen varias clases de tecnologías que pueden ser usadas, ya que éstas son adaptables ya sea por su tamaño, su operación y su capacidad de seguir expandiéndose. Para la GD las tecnologías más utilizadas son [19]:

- a. Generación con microturbinas: son unidades que utilizan combustibles (diesel, gas, gasolina, etc.) para generar energía lo que las hace menos eficientes, pero si confiables en operación; la estructura de las microturbinas es un motor o turbina y de una retroalimentación de calor.
- b. Generación con celdas de combustible: su principio de funcionamiento es eficiente, al transformar de forma directa la energía química a energía eléctrica, toma el hidrógeno de los combustibles que reaccionan con el oxígeno y electrolitos formando agua para producir electricidad, es menos contaminante pero el costo de inversión es elevado.

- c. Generación fotovoltaica: esta tecnología aprovecha dos recursos, el primero es el térmico para calentar un fluido producir vapor que impulse a una turbina y generar electricidad, y el segundo recurso más utilizado por este tipo de generación es el fotoeléctrico, que es captado por células solares de un panel para generar energía solar por una diferencia de potencial. La capacidad depende del arreglo de paneles que se incorpore y se caracteriza por ser económica, inagotable y sencilla.
- d. Generación eólica: su instalación es económica, no es contaminante, es sostenible pero dependiente de las condiciones climáticas lo que causa intermitencias e inestabilidad por la variación del viento. Este tipo de generación transforma la energía cinética del viento a energía eléctrica por medio de aerogeneradores.

La integración de la generación distribuida a los sistemas de distribución depende mucho de la eficiencia con la que operan y de la potencia que suministra la generación distribuida a las cargas o al sistema dependiendo de su configuración y tecnología, estas características se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de la generación distribuida.

Tipo de Tecnología	Eficiencia Eléctrica	Potencia nominal
Turbinas a gas	21.9 – 37	1000kW – 40000kW
Microturbinas	25-30	30kW – 200kW
Celdas de combustibles	34 – 54	50kW – 1000kW
PV	10 - 22	>1kW
Motores a gas	36-43	50kW – 5000MW
Motores a Diesel	28 – 42	20kW – 1000kW

2.2.1 Impacto de la integración de la GD en sistemas de distribución

La integración rápida de la GD responde de forma rápida a las circunstancias cambiantes de la demanda del sistema de distribución [16]

De esta manera, la integración de la generación distribuida modifica la estructura radial tradicional del sistema eléctrico, ya que, por la bidireccionalidad de los flujos de potencia, provoca un incremento de los perfiles de voltaje del sistema, además causa que se reduzcan las pérdidas provocadas por los bajos niveles de voltaje presentes en cada nodo.

La integración de la GD a una red de distribución tiene un impacto directo en el flujo de energía de la red. En dónde exista un área dominada por la demanda, la integración de la GD reducirá el flujo de energía en la red de generación debido a que puede conectarse directamente a la demanda. Esto significa reducir el uso de la capacidad de la red de generación para transferir la electricidad del área dominada por la demanda. Mientras que, en un área dominada por la generación, esta conexión aumentará el uso de la capacidad de la red debido a los flujos de energía adicionales desde el área dominada por la generación a la red. Esto puede dar lugar a un exceso de capacidad de la red. Por lo tanto, se puede aplicar el recorte de la generación, como método para reducir la producción de las generaciones para que coincida con la capacidad nominal de la red [20].

La generación distribuida tiene una influencia positiva sobre red, pero si su incorporación no es planificada óptimamente puede traer perjuicios al sistema y ocasionar inestabilidad en el sistema. A continuación, se describen

las ventajas y desventajas de la GD en la red de distribución.

22.1.1 *Ventajas de la generación distribuida en la red de distribución*

Frente al crecimiento de la demanda y a la aparición de nuevas tecnologías de generación que pretenden abastecer a los usuarios de forma directa sin afectar a la red se exponen primeramente los beneficios técnicos, económicos y ambientales en la Figura 2 [21], [22].

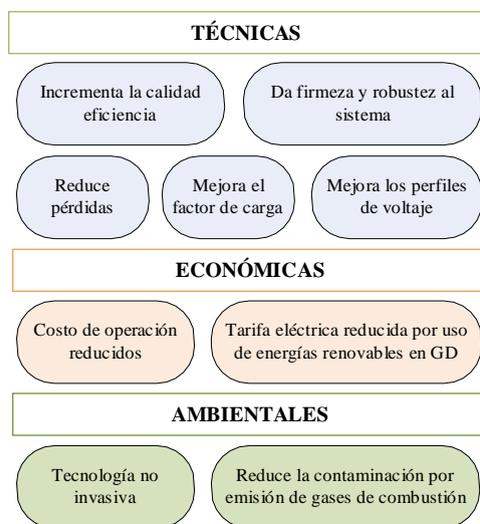


Figura 2. Ventajas de la incorporación de generación distribuida al sistema eléctrico.

Como se mencionó estos beneficios son alcanzables si la integración de la generación distribuida es óptima tanto en la ubicación, dimensionamiento y topología de conexión; se requieren de herramientas de diseño para que la red sea óptima y mitigue problemas como el incremento de pérdidas, falla en protecciones, costos elevados, alteración del perfil de voltaje, etc.

El uso de la GD distribuida nos puede proporcionar varios beneficios como: disminuir reservas fijas, ofrece flexibilidad en las inversiones de la red de transmisión y distribución, y garantizar un servicio eléctrico de calidad con un nivel elevado de seguridad y confiabilidad [23]. Para

garantizar la calidad del suministro de energía eléctrica se incorpora a la generación distribuida que aumenta los índices de confiabilidad e inyecta energía al sistema, siempre y cuando se modele su localización óptima en el sistema de distribución [24], es por este motivo que el presente estudio desarrolla un modelo que permite visualizar estos beneficios a través de índices de estabilidad.

Adicional a los impactos positivos descritos debido la integración de la GD puede traer consigo algunas ventajas más como se indica a continuación [25]:

- ↓ Mediante la integración de GD en el sistema de distribución se busca aumentar la confiabilidad en cuanto al suministro de energía, todo esto es posible puesto que la GD se encuentra dentro de los puntos de consumo.
- ↓ La integración de GD en los sistemas de potencia contribuye a la mejora de perfiles de voltaje, la calidad de energía y apoyo para la estabilidad de voltaje
- ↓ Uno de los grandes beneficios de estas unidades de generación es la baja emisión de contaminación y una alta eficiencia.

22.1.2 *Desventajas de la generación distribuida en los sistemas de distribución*

En base a los aspectos positivos descritos, se resalta la importancia de los estudios de planificación de distribución con la generación distribuida, debido a que si no se los realiza adecuadamente pueden desencadenar en afecciones graves en el sistema de potencia, debido a esto se debe considerar los siguientes aspectos [25]:

- ↓ Algunas de las tecnologías usadas por GD para integrarse al sistema, hacen el uso de dispositivos

electrónicos, estos dispositivos ocasionan la inyección de armónicos en la red.

- ↓ Si la coordinación del sistema no es la correcta, la integración de GD puede ocasionar que existan desbalances de voltajes, sobre voltajes y fluctuaciones en la red.
- ↓ Las pérdidas de potencia en el sistema aumentan si se implementan varias unidades de generación en el sistema.

2.3 Planificación del sistema de distribución

La planificación en los sistemas de distribución es una de las dificultades más importantes al cual se afrontan las empresas distribuidoras. Una buena planificación busca solucionar un problema con dificultad y con muchas soluciones.

Con el continuo aumento de la demanda se obliga al redimensionamiento y a la expansión de los sistemas de distribución [26]. La planificación de la red es una actividad en donde se evalúan los costos de instalación de nuevos equipos, la inserción de nuevas tecnologías de generación, fiabilidad del sistema de distribución que se desea conseguir y reducción de pérdidas, tomando en cuenta el crecimiento de la demanda. En la planificación existen tres posibles necesidades:

- ↓ Planificación de un nuevo sistema.
- ↓ Expansión de un sistema ya existente.
- ↓ Planificación de operación.

Para un nuevo sistema, la planificación requiere de una alta inversión, pero con referencia de las tres planificaciones antes mencionadas es la más sencilla. Para ello, el planificador comienza desde cero y planifica un nuevo sistema en una región dada. Uno de los retos más importantes de la planificación es elegir

el mejor diseño que están dentro de varios tipos que existen, pero infortunadamente este tipo de planificación es la menos habitual. La necesidad de expandir una red existente es mucho más común por el crecimiento de la demanda, por la inserción de nuevas tecnologías de consumo al sistema como los vehículos eléctricos o la actual incorporación de generación distribuida. Este tipo de planificación es más complicada por dos causas: Primero porque existen limitaciones por razones prácticas, operacionales, ambientales y sociales para las nuevas rutas y nuevas ubicaciones de los equipos, mientras que la segunda razón es cuando se parte de un sistema que ya existe, las opciones de actualizarlo son muy variadas como la flexibilidad de cambio que ofrece la integración de la generación distribuida para abastecer a la demanda creciente [24][27].

Para tener una correcta planificación se debe tener en cuenta algunos requisitos mínimos como lo son: un cumplimiento de las condiciones electrotécnicas de los límites de caída voltaje y un adecuado dimensionamiento de líneas y transformadores con el fin de evitar sobrecargas de voltaje, por tal razón en la planificación es necesario realizar estudios esenciales de flujos de potencia, cortocircuito y estabilidad de voltaje y ángulo. Debido a la importancia de la estabilidad, y a que el tema desarrollado en el presente trabajo es la estabilidad referente al voltaje, a continuación, se describe en que consiste y como evaluarlo en base a un índice en un sistema donde se ha incorporado óptimamente a la generación distribuida en el sistema de distribución.

2.3.1 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje se define como la habilidad o capacidad

que posee un sistema de potencia para conservar las magnitudes de voltaje en cada una de las barras en un nivel aceptable en condiciones normales o después de ser expuesto a una perturbación [28]–[30].

En el transcurso de los años el análisis de la estabilidad de voltaje se involucra tanto en los sistemas de generación, sistemas de transmisión y sistemas de distribución. Para lo cual se han realizado estudios de estabilidad de voltaje con el fin mejorar la confiabilidad, robustez y seguridad del sistema [31].

Para el estudio de estabilidad de voltaje se debe tener claro las definiciones de inestabilidad y colapso de voltaje. La inestabilidad del sistema se produce cuando existe un incremento de carga, provocando una caída de voltaje, y ocasionando que el sistema sea incapaz de satisfacer el balance de potencia producida y demandada o imposibilitando la transmisión de potencia desde los puntos de generación hasta los centros de carga [32]. En cambio, el colapso de voltaje se refiere al resultado de una serie de eventos desastrosos que se presentan en el sistema, causando caídas de voltaje en uno o varias barras del sistema, como consecuencia mayor a estos colapsos pueden desembocarse en apagones [33].

Para que el voltaje colapse en un sistema de potencia existen muchos factores tales como: las características de las cargas, la capacidad de transferencia de potencia reactiva de los generadores, los límites de capacidad de potencia reactiva de los generadores y las características de potencia reactiva de equipos de compensación [34].

Existen métodos que se utilizan para poder detectar y predecir la estabilidad de voltaje. Se detecta para conseguir el estado en el que están operando las

barras del sistema y se predice para encontrar los límites de voltaje para un funcionamiento seguro de las barras [35].

Así mismo, mediante diferentes técnicas se busca determinar el impacto de las causas antes citadas, entre las que se puede mencionar son: las curvas PV que relacionan el voltaje en las barras del sistema con la potencia activa consumida por la carga y de la misma forma para la potencia reactiva mediante las curvas QV; otra técnica es el análisis modal QV que está incluido dentro de los métodos estocásticos para el análisis de estabilidad de voltaje, debido a que emplea los resultados de las variables eléctricas instantáneas del sistema de potencia en diferentes estados del tiempo para determinar el estado de la condición de operación en cada una de ellas, sin perjuicio de las mencionadas, también se incluyen dentro de las técnicas el análisis de índices preestablecidos [36].

23.1.1 Estabilidad de Voltaje ante Pequeños Disturbios

Este tipo de estabilidad es capaz de conservar los perfiles de voltaje constantes después de pequeños disturbios, como lo son aumentos de carga en el sistema. La capacidad del sistema es determinada mediante las características de las líneas, controles continuos y discretos en un tiempo específico. La definición de este tipo de estabilidad es favorable para determinar, la repuesta de los voltajes ante pequeños cambios en un sistema eléctrico [31].

23.1.2 Estabilidad de Voltaje ante Grandes Disturbios

Es la capacidad del sistema para mantener los perfiles de voltaje constantes bajo la presencia de grandes disturbios que se presentan en un sistema eléctrico. Los grandes disturbios que pueden ocurrir se

presentan en los sistemas de transmisión, contingencias de cortocircuitos y en pérdidas de generación. La capacidad del sistema bajo grandes disturbios es definida o delimitada por las características del sistema, las características de la carga, las interrelaciones de los controles continuos y discretos y por las protecciones del sistema [31].

2.3.2 Índice de Estabilidad

Los índices de estabilidad son mediciones que ayudan al sistema a prevenir un colapso, ya que estos pueden definir una magnitud escalar que permite ser monitoreada a medida que el sistema presenta alteraciones en presencia de distintas contingencias [37].

Con los mencionado anteriormente, se dice que los índices de estabilidad, pueden ayudar al sistema eléctrico a detectar barras críticas, con esto se puede aplicar acciones correctivas que puedan prevenir de una contingencia severa [38], [39].

El incremento permanente de la demanda ocasiona que la estabilidad en un sistema de distribución se vea afectada, ocasionando que se tenga una caída representativa de voltaje y volviendo al sistema inestable. Este hecho es reconocido por el índice de estabilidad de voltaje, y entonces este índice se lo debe calcular para todas las barras que conforman el sistema radial.

Para determinar el índice de estabilidad, previamente se formula la ecuación (1) de flujos de potencia para una línea [40]:

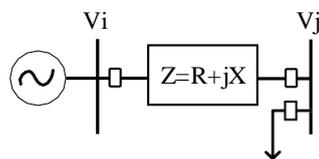


Figura 3. Diagrama Unifilar de una Línea de Transmisión.

$$C(V_i V_j \angle -\delta) - (V_i^2) = (R + jX)(P_i - Q_j) \quad (1)$$

La Figura 3 representa el diagrama unifilar de una línea de transmisión, en donde V_i es el nodo de envío y V_j es el nodo de recibo; mientras δ se trata de la diferencia angular entre ambos voltajes con relación al nodo de envío, además P_j y Q_j son la carga en el nodo de recibo y $R + jX$ es la impedancia de la línea.

Al descomponer la ecuación (1) y efectuar las simplificaciones correspondientes, se determina el siguiente índice:

$$SI_k = V_i^4 - 4(P_k * R_{ik} + Q_k * X_{ik}) * V_i^2 - 4(P_k * X_{ik} + Q_k * R_{ik})^2 \quad (2)$$

Donde:

SI_k	Índice de estabilidad en el nodo k
V_i	Voltaje en el nodo i.
P_k	Demanda de potencia activa en el nodo k.
Q_k	Demanda de potencia reactiva en el nodo k.
R_{ik}	Resistencia de la línea entre los nodos i y k.
X_{ik}	Reactancia de la línea entre los nodos i y k.

En los sistemas de distribución cuando el índice de estabilidad es cercano a uno se entiende que el sistema se encuentra operando de manera estable, mientras que los nodos que tiene un valor menor son expuestos a tener inestabilidad de voltaje, y entonces se convierten en candidatos a los cuales se deben realizar acciones correctivas que requieran. En base a este planteamiento una vez detectada la barra crítica se procederá a ubicar óptimamente a las unidades de generación distribuida para estabilizar

al sistema y obtener una compensación en el voltaje.

2.3.3 Límites de voltaje en sistemas de distribución.

En los sistemas de distribución los límites de voltaje se deben encontrar dentro de los rangos establecidos por la agencia reguladora de cada país. Para ello en los sistemas de distribución internacionalmente estos límites se encuentran en un rango entre 0.9 y 1.1 pu.

3. Flujos de Potencia

La formulación matemática para el desarrollo del presente trabajo se basa en la utilización de flujos de potencia, los cuales generalmente son aplicados a los sistemas eléctricos con redes que transmiten altas cantidades de energía, cuya propiedad básica es la simetría; sin embargo, en sistemas de distribución también pueden ser aplicados a nivel de alimentadores primarios, donde se propone como criterio de simulación que el sistema se mantiene equilibrado y estable.

El modelamiento de un flujo de potencia, también conocido como flujo de carga, involucra un análisis numérico que utiliza una notación simplificada tal como el diagrama unifilar y el sistema por unidad, este estudio, al ser realizado en estado estacionario, permite determinar voltajes, ángulos de los voltajes, potencia activa y potencia reactiva según los tipos de nodos del sistema.

Los resultados del flujo de potencia son importantes para el planeamiento de la expansión de los sistemas eléctricos de potencia, así como para determinar la operación confiable de los sistemas existentes como se han mencionado las variables eléctricas de control más significativas son: i) La magnitud y ángulo de la fase del voltaje en cada nodo; ii) La potencia activa y reactiva fluyendo en cada línea; y, iii)

La potencia activa y reactiva entregada por los generadores o elementos compensadores.

Para la resolución de los flujos de potencia es necesario determinar la impedancia y admitancia de cada elemento y su interdependencia con el sistema eléctrico, logrando así construir la matriz de admitancias o más conocida como “Ybarra”, cuya formulación general se muestra en la siguiente ecuación:

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde Y_{ii} corresponde a la matriz de admitancia propia y Y_{in} corresponde a la matriz de admitancia mutua las cuales son determinadas mediante las siguientes ecuaciones:

$$Y_{ii} = - \sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (4)$$

$$Y_{in} = -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (5)$$

Adicional a la matriz de admitancia, otro parámetro necesario para la modelación de flujos de potencia es el voltaje nodal el cual matemáticamente puede ser determinado conforme la siguiente ecuación:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j|V_i| \sen \delta_i \quad (6)$$

Al interactuar la matriz de admitancia con los voltajes y aplicando las leyes de Kirchhoff, se determina la potencia activa y reactiva nodal, cuya formulación se muestra en la siguiente ecuación.

$$P_i - jQ_i = |Y_{ii}V_i^2| \angle (\theta_{ii}) + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), i \in N \quad (7)$$

De la ecuación anterior, se puede concluir que el componente real corresponde a la potencia activa y el componente imaginario es la potencia reactiva, las mismas que son entregadas en cada nodo, en tal sentido y expresando las ecuaciones en forma rectangular, se obtiene la siguiente formulación matemática.

$$P_i(V, \delta) = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i) - B_{ik} \sin(\delta_k - \delta_i)], i \in N \quad (8)$$

$$Q_i(V, \delta) = -|V_i|^2 B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\delta_k - \delta_i) + G_{ik} \sin(\delta_k - \delta_i)], i \in N \quad (9)$$

De forma complementaria, a fin simular el flujo de potencia, se debe considerar el balance de potencia nodal, tanto en potencia activa y reactiva, cuyas ecuaciones son:

$$\sum P_{g_i} - \sum P_{d_i} = P_i(V, \delta) \quad (10)$$

$$\sum Q_{g_i} - \sum Q_{d_i} = Q_i(V, \delta) \quad (11)$$

Donde:

P_i	Flujo de potencia activa del nodo i hacia los demás nodos contiguos.
P_{g_i}	Potencia activa entregada del generador ubicado en el nodo i.
P_{d_i}	Potencia activa de la carga ubicada en el nodo i.
Q_i	Flujo de potencia reactiva del nodo i hacia los demás nodos contiguos.
Q_{g_i}	Potencia reactiva entregada por el generador ubicado en el nodo i.
Q_{d_i}	Potencia reactiva de la carga ubicada en el nodo i.
V_i, V_k	Voltaje en el nodo i y en el nodo k, respectivamente.
δ_i, δ_k	Ángulo de voltaje en el nodo i y en el nodo k, respectivamente.
g_{ii}	ii-ésimo elemento de la matriz propia de conductancia.
b_{ii}	ii-ésimo elemento de la matriz propia de susceptancia.

g_{ik}	ik-ésimo elemento de la matriz mutua de conductancia.
b_{ik}	ik-ésimo elemento de la matriz mutua de susceptancia.
n	Cantidad total de nodos del sistema.

4. Formulación Matemática

La modelación por desarrollar consistirá en evaluar el impacto de la generación distribuida en la estabilidad del voltaje en los nodos, mediante la evaluación de un SEP en el cual se implementará generación distribuida, minimizando variaciones de voltaje y pérdidas de potencia.

4.1 Función objetivo

Como se ha mencionado, se establecerán dos funciones objetivo, la primera minimizará el cuadrado de la diferencia entre los voltajes de cada nodo y un valor de voltaje de referencia deseado el cual corresponderá al voltaje nominal; y, el segundo modelado minimizará las pérdidas de potencia activa en el sistema analizado. Las ecuaciones siguientes detallan la formulación matemática de las funciones objetivo.

$$\min \sum_{i=1}^N (V_i - V_{ref})^2 \quad (12)$$

$$\min \sum_{i=1}^I P_{g_i} - \sum_{i=1}^K P_{d_i} \quad (13)$$

4.2 Restricciones

El modelo matemático que se asocia a la aplicación de un flujo de potencia para minimizar la función objetivo, considera también las restricciones que aseguran la operación del sistema eléctrico. En tal sentido, a continuación, se detallan las restricciones usadas.

a) Restricciones de Balance de Potencia Activa y Reactiva

El flujo de potencia obedece a un balance nodal, por lo tanto, se debe considerar las potencias inyectadas y las que se retiran de cada nodo del sistema, en tal sentido se puede realizar la siguiente formulación.

$$\begin{aligned} \sum P_{gi} - \sum P_{di} &= V_i^2 \cdot g_{ii} \\ &- |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \delta_{ik} \\ &+ b_{ik} \sin \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum Q_{gi} - \sum Q_{di} &= -V_i^2 \cdot b_{ii} \\ &- |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \delta_{ik} \\ &- b_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (15)$$

Donde:

- P_{gi} Potencia activa entregada del generador ubicado en el nodo i.
- P_{di} Potencia activa de la carga ubicada en el nodo i.
- Q_{gi} Potencia reactiva entregada por el generador ubicado en el nodo i.
- Q_{di} Potencia reactiva de la carga ubicada en el nodo i.
- V_i, V_k Voltaje en el nodo i y en el nodo k, respectivamente.
- δ_i, δ_k Ángulo de voltaje en el nodo i y en el nodo k, respectivamente.
- g_{ii} ii-ésimo elemento de la matriz propia de conductancia.
- b_{ii} ii-ésimo elemento de la matriz propia de susceptancia.
- g_{ik} ik-ésimo elemento de la matriz mutua de conductancia.
- b_{ik} ik-ésimo elemento de la matriz mutua de susceptancia.

b) Restricciones de Límites de Voltaje

La restricción considera los límites inferiores y límites superiores de voltaje en cada nodo, cuya ecuación se muestra a continuación:

$$V_{min_i} \leq V_i \leq V_{max_i} \quad (16)$$

Donde:

- V_{min_i} y V_{max_i} Voltaje mínimo y máximo en el nodo i del sistema

c) Restricción de los ángulos en los nodos

Esta restricción permite mantener la estabilidad angular con el propósito de garantizar una operación segura del sistema eléctrico.

$$\delta_{min_i} \leq \delta_i \leq \delta_{max_i} \quad (17)$$

Donde:

- δ_{min_i} y δ_{max_i} Ángulo mínimo y máximo en el nodo i del sistema

d) Restricción de potencia activa y reactiva de generación

Mediante esta restricción, se trata de que el generador no supere sus límites de producción de potencia activa y reactiva, adicionalmente, esta restricción permitirá determinar las unidades de GD a incorporarse al sistema.

$$X_i \cdot P_{gmin_i} \leq P_{gi} \leq X_i \cdot P_{gmax_i} \quad (18)$$

$$X_i \cdot Q_{gmin_i} \leq Q_{gi} \leq X_i \cdot Q_{gmax_i} \quad (19)$$

Donde:

- P_{gmin_i} Potencia activa mínima y
- P_{gmax_i} máxima del generador i
- Q_{gmin_i} Potencia reactiva mínima y
- Q_{gmax_i} máxima del generador i
- X_i Variable binaria que permite determinar la línea a conmutar

e) Restricción binaria

Con el propósito de que el optimizador determine la cantidad de GD a implementarse en el sistema, se establece la siguiente restricción binaria

$$\sum_{i=1}^G X_i \leq N_{max} \quad (20)$$

Donde:

- X_i Variable de binaria de selección
- N_{max} Número máximo GD a ser implementadas en el sistema.

La ecuación es permite que el optimizador determine la GD a

conectarse en los nodos del sistema, el número máximo depende de las características del sistema a fin de no causar inconvenientes operativos.

5. Implementación del Modelo Matemático

Para la evaluación del modelo de optimización, se usará el modelo de prueba de la IEEE de 15 nodos. De forma secuencial se ingresarán los datos del sistema eléctrico y adicionalmente se determinará las características de las unidades de GD a implementarse. Una vez obtenidos los datos, se procederá a resolver el modelo de optimización mediante el uso de GAMS, cuyos resultados permitirán evaluar el índice de estabilidad de voltaje y demás parámetros eléctricos del sistema.

Como se ha mencionado se resolverán dos modelos que difieren únicamente en la función objetivo. Bajo este contexto y dada las características de las ecuaciones e inecuaciones a resolver, se asevera que el modelo de optimización corresponde a una Programación no Lineal Entera Mixta (MINLP).

5.1 Procedimiento de resolución

Para resolver el problema de optimización se utilizará el software GAMS, para el efecto en base a un proceso de adquisición de las características del sistema eléctrico a usar, las características de los generadores distribuidos, las restricciones impuestas, se procederá a resolver el modelo matemático planteado mediante flujos óptimos de potencia, con el fin de obtener la ubicación óptima de la GD.

Al obtener el resultado de la optimización, se conocerá el o los nodos en donde se implementará la GD, con la cantidad de potencia activa y reactiva que aporta al sistema,

obteniendo los valores de las variables eléctricas como voltajes, ángulos de cada nodo. El algoritmo para el modelo de optimización planteado se muestra en la Tabla 2 subsiguiente.

Tabla 2. Algoritmo para solución.

ALGORITMO GD_SD	
Paso 1	Set datos del sistema eléctrico Set Parámetros de la GD
Paso 2	Set valores iniciales de las variables eléctricas. Problema de Optimización en GAMS Set Condiciones iniciales Set variable binaria $X_{GD_i} \in \{0,1\}$ Set Restricciones de Igualdad $\sum_{i=1}^n P_{g_i} - \sum P_{d_i} = \sum_{i=1}^n P_i$ $\sum_{i=1}^n Q_{g_i} - \sum Q_{d_i} = \sum_{i=1}^n Q_i$
Paso 3	$\sum X(i) = N_{max}$ Set restricciones de desigualdad $V_{i,min} \leq V_i \leq V_{i,max}$ $\delta_{i,min} \leq \delta_i \leq \delta_{i,max}$ $P_{g_i} \leq P_{g_i,max} * X_{GD_i}$ $P_{g_i} \leq P_{g_i,min} * X_{GD_i}$ $Q_{g_i} \leq Q_{g_i,max} * X_{GD_i}$ $Q_{g_i} \leq Q_{g_i,min} * X_{GD_i}$ $\sum_{i=1}^N U_{GD_i} \leq N_{GD,max}$
Paso 4	Mínimización de la F.O e integración de las unidades de GD. $FO = \text{Min} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{ref})^2$
Paso 5	Análisis de resultados: Asignación de las unidades de generación distribuida, evaluación: del perfil de voltaje, índice de estabilidad de voltaje.
Paso 6	Repetir Paso 1 - 3
Paso 7	Mínimización de la F.O e integración de las unidades de GD. $FO = \text{min} \sum_{i=1}^I P_{g_i} - \sum_{i=1}^K P_{d_i}$
Paso 8	Análisis de resultados: Asignación de las unidades de generación distribuida, evaluación: del perfil

de voltaje, índice de estabilidad de voltaje.

Paso 9 Fin

6. Análisis de Resultados

Como se ha mencionado, a fin de evaluar el modelo matemático se usará un sistema eléctrico prototipo de 15 nodos, cuyas características son las que se describen a continuación:

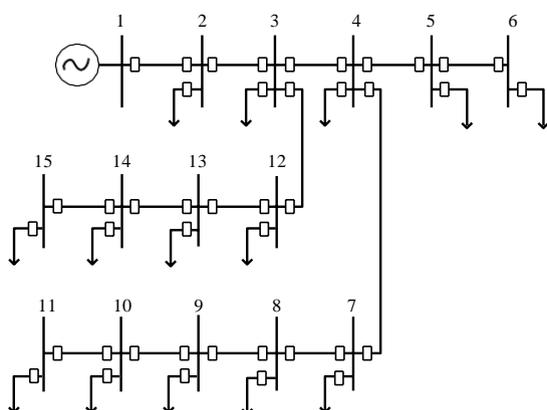


Figura 4. Diagrama unifilar del sistema a ser evaluado.

Tabla 3. Datos de las líneas del sistema.

	Nini	Nfin	R (ohm/km)	X (ohm/km)
L1	1	2	0.0169	0.3978
L2	2	3	0.0016	0.0095
L3	3	4	0.0354	0.1629
L4	4	5	0.0307	0.0788
L5	5	6	0.0746	0.1931
L6	4	7	0.0423	0.1957
L7	7	8	0.0476	0.2201
L8	8	9	0.0370	0.1709
L9	9	10	0.0196	0.0894
L10	10	11	0.0476	0.2201
L11	3	12	0.1455	0.6718
L12	12	13	0.1666	0.4306
L13	13	14	0.2100	0.5449
L14	14	15	0.0561	0.0222

Tabla 4. Datos de las cargas.

	Nc	Pd (MW)	Qd (MW)
n1	1	0	0
n2	2	0.825	0.630

n3	3	1.964	1.530
n4	4	3.801	2.940
n5	5	1.754	1.350
n6	6	0.448	0.360
n7	7	2.531	1.980
n8	8	1.282	0.990
n9	9	0.845	0.660
n10	10	1.111	0.870
n11	11	8.610	0.660
n12	12	0.524	0.420
n13	13	0.1151	0.090
n14	14	0.639	0.480
n15	15	0.551	0.420

El sistema eléctrico planteado considerará un rango entre 0.9 y 1.1 como límites de voltaje, por su parte las restricciones de los ángulos de fase se encuentran en el rango de $\pm 40^\circ$, dichos valores están normalizados por los reguladores de cada país, para el caso del estudio se usó la información obtenida por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad – ARCONEL [41] [42].

La modelación de la capacidad de las unidades de GD se basará en una variable aleatoria entre un valor mínimo de 0 MW y máximo de 5 MW con un factor de potencia mínimo de 0.92, lo cual permitirá que la red se alinee a la normativa de calidad de producto del Ecuador y su operación esté en rangos aceptables.

A fin de validar el modelo optimización, previo a la ubicación de la generación distribuida, se realizó una comparación del voltaje usando Digsilent PowerFactory y GAMS, de lo cual se obtiene la Tabla 5.

Tabla 5. Evaluación de voltaje GAMS - Digsilent.

	Voltaje (PU)		
	GAMS	Digsilent	Error
n1	1.00000	1.00000	0.00%
n2	0.98850	0.98907	0.06%
n3	0.98819	0.98831	0.01%
n4	0.98363	0.98400	0.04%

n5	0.98324	0.98370	0.05%
n6	0.98304	0.98362	0.06%
n7	0.98044	0.98090	0.05%
n8	0.97794	0.97864	0.07%
n9	0.97644	0.97689	0.05%
n10	0.97580	0.97575	0.00%
n11	0.97471	0.97489	0.02%
n12	0.98585	0.98612	0.03%
n13	0.98461	0.98556	0.10%
n14	0.98319	0.98374	0.06%
n15	0.98311	0.98334	0.02%

Como se muestra en la tabla anterior, el error promedio es del 0.04 % entre los resultados obtenidos, de lo cual se asume que el optimizador resuelve un flujo de potencia, aspecto por el cual se procede a desarrollar los casos de estudio.

6.1 Caso 1 - Evaluación del Modelo matemático que minimiza la variación de voltajes

Como se ha mencionado, el primer modelo a ser resuelto considera los datos del sistema descrito y procede a la minimización del cuadrado de la diferencia entre los voltajes de cada nodo y un valor de voltaje de referencia el cual corresponderá al voltaje nominal.

De la resolución se obtiene la ubicación de la GD considerando como máximo la incorporación de 3 unidades, cuya selección se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 6. Ubicación de GD – Caso 1.

	Nodo de Ubicación
1 Unidades de GD	5
2 Unidades de GD	5, 10
3 Unidades de GD	5, 10, 14

Complementario a la ubicación de la GD, se obtiene el aporte de potencia activa y reactiva de las centrales

consideradas como GD, la misma que se muestra en la Figura 5 y Figura 6.

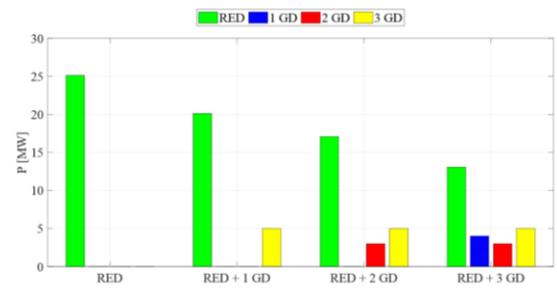


Figura 5. Potencia activa entregada por la GD – Caso 1.

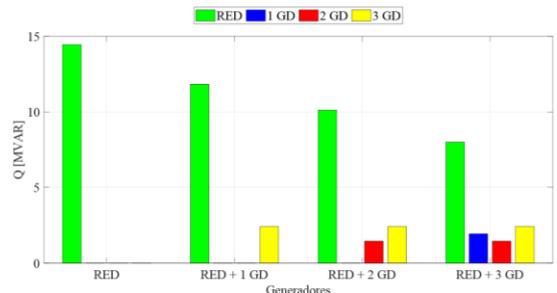


Figura 6. Potencia reactiva entregada por la GD – Caso 1.

Como se aprecia en las figuras, la potencia activa y reactiva entregada por la red disminuye, ya que la GD comienza a entregar su aporte a la red readecuando los flujos de potencia. Con el afán de evaluar el impacto del aporte de la GD, se procede a analizar el perfil del voltaje que se muestra en la Figura 7.

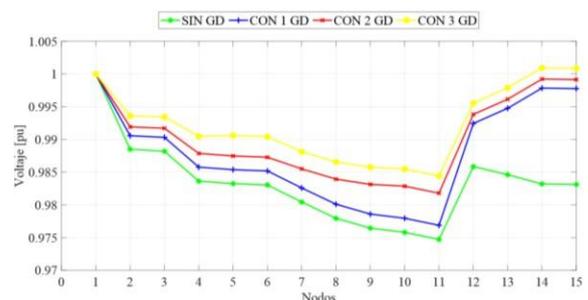


Figura 7. Perfil de voltaje – Caso 1.

De la Figura 7 se señala que, el aporte de potencia activa y reactiva de los GD afectan de forma positiva al perfil de voltaje, ya que incrementan los niveles de voltaje en los nodos del sistema, lo cual implícitamente conlleva a una mejor estabilidad de

voltaje en el sistema como se puede observar en las siguientes figuras.

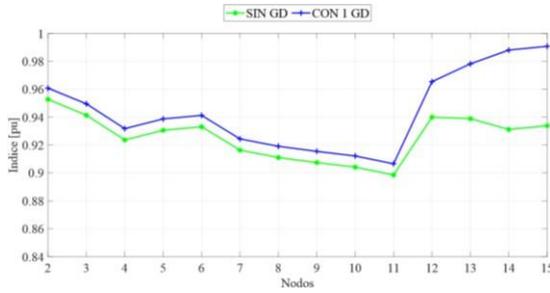


Figura 8. Índice de estabilidad de voltaje – 1 GD – Caso 1

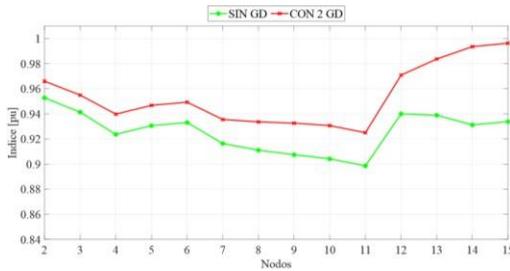


Figura 9. Índice de estabilidad de voltaje – 2 GD – Caso 1

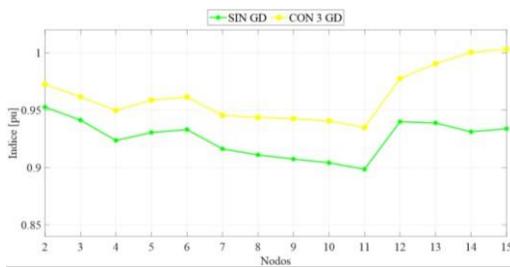


Figura 10. Índice de estabilidad de voltaje – 3 GD – Caso 1.

De las figuras anteriores se puede indicar que la incorporación de GD al sistema permite mejorar el perfil del voltaje y adicionalmente ayuda en la mejora del índice de estabilidad de voltaje.

6.2 Caso 2 - Evaluación del Modelo matemático que minimiza pérdidas

Este análisis mostrará las particularidades en la resolución del modelo cuando la función objetivo cambia con el objeto de minimizar pérdidas, en tal sentido la ubicación de

la GD a ser implementada se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Ubicación de GD – Caso 2.

	Nodo de Ubicación
1 Unidades de GD	7
2 Unidades de GD	7, 9
3 Unidades de GD	7, 9, 10

De la tabla anterior se deduce que el modelo de optimización al cambiar su función objetivo ubica de forma diferente la GD a ser incorporada a comparación al caso 1. A continuación se analiza el aporte de la potencia activa y reactiva de los GD asignados.

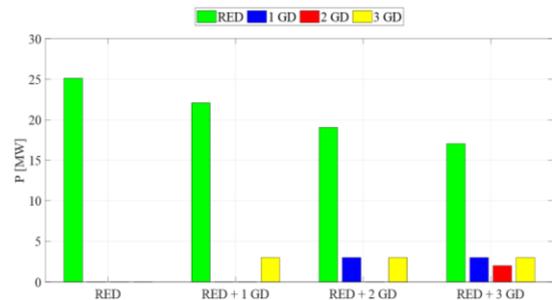


Figura 11. Potencia activa entregada por la GD – Caso 2

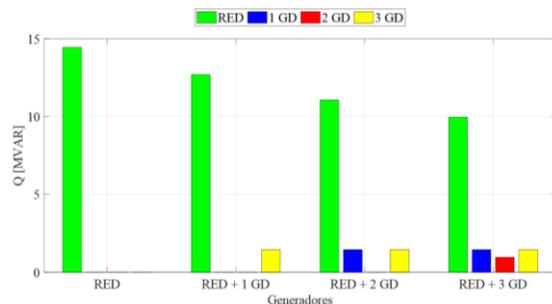


Figura 12. Potencia reactiva entregada por la GD – Caso 2.

Al igual que el caso 1, los GD asignados en el caso 2 entregan potencia activa y reactiva al sistema con el objeto de minimizar pérdidas, pero a su vez esta asignación afecta el perfil de voltaje según puede observarse en la Figura 13.

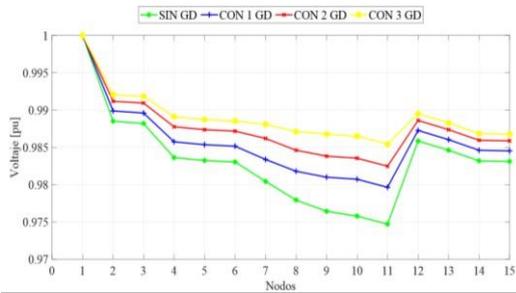


Figura 13. Perfil de voltaje – Caso 2.

A fin de poder validar el impacto de la incorporación de la GD, se procede a evaluar en los niveles de voltaje por caso y por cada una de las centrales de GD que fueron incorporadas.

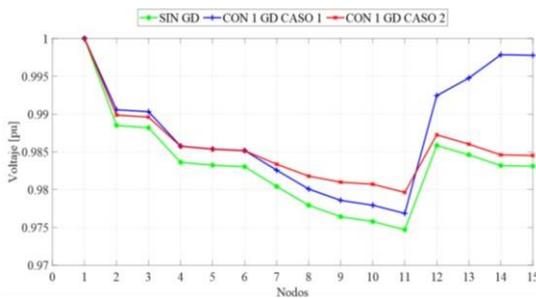


Figura 14. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 1GD.

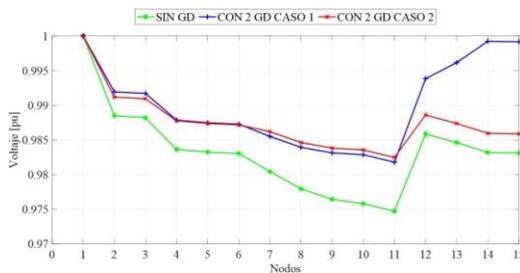


Figura 15. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 2GD.

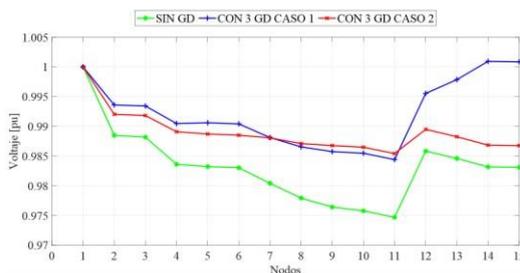


Figura 16. Perfil de voltaje – Caso 1 y 2 – 3GD.

Como se denota, el perfil de voltaje sufre un cambio considerable a

comparación del caso 1, esto ocurre ya que, al minimizar las pérdidas del sistema, el optimizador obliga a los GD a entregar la potencia reactiva necesaria para que las pérdidas en las líneas sean disminuidas, razón por la que el voltaje si bien se eleva, este no tiende a llegar a sus valores máximos a fin de no incrementar las pérdidas del sistema. De forma paralela, se evalúa los índices de estabilidad de voltaje, los cuales se muestran a continuación.

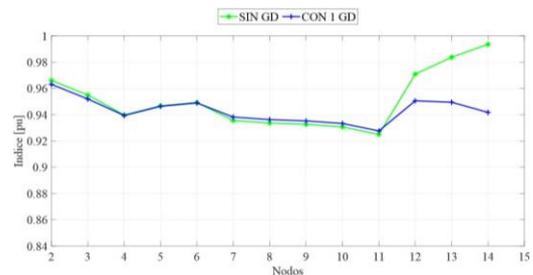


Figura 17. Índice de estabilidad de voltaje – 1 GD – Caso 2

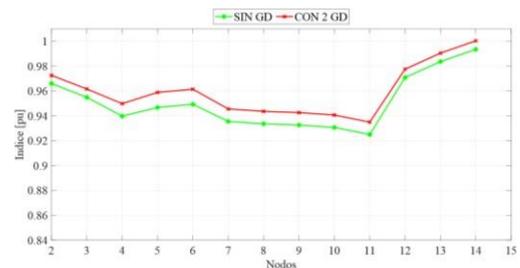


Figura 18. Índice de estabilidad de voltaje – 2 GD – Caso 2.

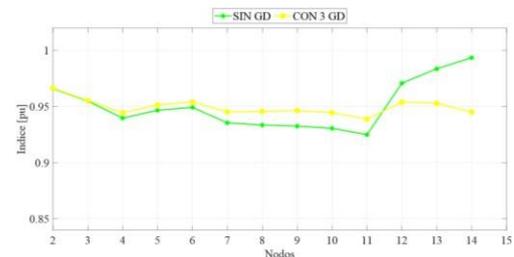


Figura 19. Índice de estabilidad de voltaje – 3 GD – Caso 2.

De la evaluación de los índices de estabilidad se puede señalar que existe una variación al comparar con el caso 1, ya que este modelo al minimizar perdidas los voltajes nodales tienden a elevarse, pero no excesivamente, permitiendo que el índice pueda ser

estable en el sistema. Al realizar una comparación de las pérdidas del sistema, se obtiene la Tabla 8.

Tabla 8. Comparativo de pérdidas

	Pérdidas (MW)	
	Caso 1	Caso 2
1 GD	0.12	0.08
2 GD	0.09	0.07
3 GD	0.07	0.05

De la tabla anterior y tomando en cuenta los resultados de las variables eléctricas analizadas, se puede manifestar lo siguientes aspectos:

- El modelo usado en el caso 1, permite incrementar de manera importante los niveles de voltaje a comparación del modelo del caso 2, esto implica que el índice de estabilidad también se incrementa, pero las pérdidas en el sistema se incrementan, lo cual producirá implícitamente una mayor afectación a la operatividad del sistema.
- El modelo resuelto en el caso 2 permite ubicar GD en el sistema de forma estratégica con el fin de que el índice de estabilidad se encuentre estable en cada nodo, lo cual repercute en un incremento aceptable de los voltajes en los nodos del sistema, lo que conlleva a que las pérdidas sean menores y por ende se garantiza una operación más confiable del sistema.
- De lo expuesto en los dos ítems anteriores se puede indicar que el modelo del caso 2 es más adecuado a aplicarlo en la práctica, ya que el mismo permite obtener un índice de estabilidad estable y además garantiza la normal operación del sistema, minimizando las pérdidas ocasionadas.

7. Conclusiones

Del análisis versado en el presente trabajo, se presentan los siguientes aspectos concluyentes:

El modelo matemático usado en los casos de estudio ha permitido estudiar el impacto de la generación distribuida en las variables eléctricas y en la estabilidad del voltaje, de lo cual se ha señalado que el modelo a ser usado en la práctica es el que corresponde a la minimización de pérdidas, mismo que garantiza una operación adecuada del sistema, dado que las variables eléctricas así como el índice de estabilidad se encuentran en valores aceptables, de conformidad a lo establecido en la normativa relacionada.

Los casos analizados permiten evaluar al sistema eléctrico de prueba en función a las variables eléctricas tales como potencia activa y reactiva entregada por la GD incorporada, de lo cual se observa una readecuación de flujos de potencia, la cual afecta al voltaje y por ende a las pérdidas del sistema, para el estudio estas pérdidas oscilan entre 1,3 a 2,4% de la potencia de la carga correspondiente a cada caso de estudio.

De forma complementaria a lo señalado en el ítem anterior, el voltaje también sufre una variación significativa en cada caso, elevándose sus niveles a comparación del caso sin incorporación de GD, en promedio por caso de estudio, el voltaje se incrementa un valor de 6 al 3 %, respectivamente, a comparación del caso sin GD.

El estudio considero dos modelos de optimización con funciones objetivos diferentes, de lo cual se

concluye que el modelo recomendado en el análisis para la incorporación de GD se asocia a la minimización de pérdidas, sin embargo, puede establecerse otras funciones objetivos a ser analizadas asociadas a cortocircuitos, estabilidad de voltaje o de ángulo, entre otras.

La incorporación de GD es una actividad que debe tomar importancia en los estudios de planificación de las redes, ya que la GD puede desplazar inversiones tanto en la actividad de transmisión de electricidad como en la implementación de plantas de generación a gran escala, pero a su vez es necesario realizar estudios eléctricos más detallados que muestren la afectación y ventajas de la GD a la red.

7.1 Trabajos Futuros

El análisis de este trabajo puede formar la base de nuevas investigaciones relacionadas a las siguientes temáticas:

Planificación de redes de distribución considerando la ubicación óptima de unidades de generación distribuida renovables.

Dimensionamiento y ubicación óptima de la generación distribuida basada en sistemas fotovoltaicos usando algoritmos metaheurísticos.

Análisis de sistemas de generación distribuida para el abastecimiento de cargas desequilibradas.

Determinación de indicadores de rendimiento energético y medioambiental considerando la implantación de generación distribuida.

Gestión energética y control de la generación distribuida agregada a las redes eléctricas.

8. Referencias

- [1] G. E. Marco and R. R. Carlos, "Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de distribución mediante técnicas heurísticas," *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, pp. 1–12, 2015.
- [2] J. M. López-Lezama, A. Padilha-Feltrin, and L. A. Gallego Pareja, "Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas de energía eléctrica," *Ing. y Cienc. - ing.cienc.*, vol. 5, no. 9, pp. 9–23, 2009.
- [3] S. D. E. E. Eléctrica, A. Padilha-feltrin, I. Electricista, and D. Ph, "Ubicación Y Dimensionamiento Óptimo De Generación Distribuida En Sistemas De Energía Eléctrica," *Sci. Tech.*, vol. 15, no. 41, pp. 75–80, 2009.
- [4] L. Hongkai, X. Chenghong, S. Jinghui, and Y. Yuexi, "Green power generation technology for distributed power supply," *2008 China Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. 4, pp. 1–4, 2008.
- [5] S. A. Hosseini, S. H. H. Sadeghi, A. Askarian-Abyaneh, S. H. H. Sadeghi, and A. Nasiri, "Optimal placement and sizing of distributed generation sources considering network parameters and protection issues," *3rd Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2014*, pp. 922–926, 2014.
- [6] P. Chiradeja, "Benefit of distributed generation: A line loss reduction analysis," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2005, pp. 1–

- 5, 2005.
- [7] K. Prakash, F. R. Islam, K. A. Mamun, and S. Ali, "Optimal generators placement techniques in distribution networks: A review," *2017 Australas. Univ. Power Eng. Conf. AUPEC 2017*, vol. 2017-Novem, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [8] Sarfaraz, A. Bansal, and S. Singh, "Optimal allocation and sizing of distributed generation for power loss reduction," *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP700, pp. 15–20, 2016.
- [9] C. Tu *et al.*, "Dynamic Voltage Restorer With an Improved Strategy to Voltage Sag Compensation and Energy Self-Recovery," *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 4, no. 3, pp. 219–229, 2019.
- [10] S. Kansal, B. B. R. Sai, B. Tyagi, and V. placement of wind-based generation in distribution networks Kumar, "Optimal placement of wind-based generation in distribution networks," *IET Conf. Publ.*, vol. 2011, no. 579 CP, p. 104, 2011.
- [11] M. R. Aghamohammadi, M. Mohammadian, and H. Saitoh, "Sensitivity characteristic of neural network as a tool for analyzing and improving voltage stability," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. ASIA PACIFIC, pp. 1128–1132, 2002.
- [12] H. Wang, "Microgrid Generation Planning Considering Renewable Energy Target," *2016 IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 356–360, 2016.
- [13] M. Vinicio and G. Le, "Distribuida Con Almacenamiento En Ambientes Urbanos- Dimensionamiento Y Localización," *Acad. Manag. Rev.*, vol. 1, pp. 301–312, 2017.
- [14] E. F. Durán, "La Generación Distribuida: Retos frente al Marco Legal del Mercado Eléctrico Ecuatoriano," *Rev. Técnica "Energía"*, vol. 10, no. 1, pp. 13–27, 2014.
- [15] R. S. Al Abri, E. F. El-Saadany, and Y. M. Atwa, "Optimal placement and sizing method to improve the voltage stability margin in a distribution system using distributed generation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 326–334, 2013.
- [16] J. Driesen and R. Belmans, "Distributed generation: Challenges and possible solutions," *2006 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet. PES*, pp. 1–8, 2006.
- [17] D. A. Balaguera, A. F. Cortes, and M. A. Uruena, "Distributed generation scheme analysis, as an option for Bogota electrical system," *2012 IEEE Int. Symp. Altern. Energies Energy Qual. SIFAE 2012 - Conf. Proc.*, 2012.
- [18] L. I. Dulău, M. Abrudean, and D. Bică, "Impact of distributed generation upon Reghin - Lăpușna Medium Voltage line," *2014 Int. Symp. Fundam. Electr. Eng. ISFEE 2014*, 2015.
- [19] L. Hongkai, S. Jinghui, and Y. U. Yuexi, "Green Power Generation Technology for Distributed Power Supply," *IEEE Trans. Power Syst.*, no. 4, p. 2.
- [20] M. Pesaran, P. Dang, and V. K. Ramachandaramurthy, "A review of the optimal allocation of distributed generation: Objectives, constraints, methods, and algorithms,"

- Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 75, no. October 2016, pp. 293–312, 2017.
- [21] E. Álvarez and U. Castro, “Generación distribuida y Autoconsumo ;,” *Generación Distrib. y autoconsumo*, vol. 1, pp. 1–41, 2016.
- [22] R. C. Dugan, T. E. Mcdermott, and G. J. Ball, “Planning for distributed generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, no. April, pp. 80–88, 2001.
- [23] J. Garcia-villalobos and P. Eguía, “Integración de Generación Distribuida Intermitente y Vehículos Eléctricos Enchufables,” *Redes Distrib. energía*, no. May, 2015.
- [24] M. N. Hidayat and F. Li, “Impact of Distributed Generation technologies on generation curtailment,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 4–8, 2013.
- [25] B. Saint, “Update on IEEE P1547.7 - Draft Guide to Conducting Distribution Impact Studies for Distributed Resource Interconnection,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, pp. 52–53, 2012.
- [26] X. Qian XIE, Haozhong CHENG, Yi ZHANG, “Active Distribution Network Planning Based on Active Management,” *IEEE Trans. Power Syst.*, no. Ciced, pp. 23–26, 2014.
- [27] J. Song, X. Jing, H. Lia, H. Gu, and Q. Liu, “Distributed power generation technology and the effect of it on the accident of large-scale power grids,” 2008.
- [28] D. Sánchez and C. Barrera, “Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método cpf,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, p. 30, 2018.
- [29] T. Zabaïou, L. A. Dessaint, and I. Kamwa, “Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 5, pp. 924–934, 2014.
- [30] S. S. Y. M. Moghawemi, M. O. Faruque, “A Direct Calculation of Power Margin for Transmission Lines and Buses in Electrical Power System Networks,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 1, p. 1, 1998.
- [31] G. A. L. G. Galo Fernando Patiño Castrillón, “Metodologías para el análisis de estabilidad de tensión en estado estacionario,” *Acad. Manag. Rev.*, vol. 1, pp. 1–118, 2008.
- [32] J. C. Vaschetti and F. Magnago, “Control Automático de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia basado en Sistemas Expertos Automatic Voltage Control in Electrical Power System based on Expert Systems .,” *Redes Distrib. energía*, vol. 23, no. 5, pp. 69–84, 2012.
- [33] C. J. Zapata, “Colapsos de voltaje en sistema de potencia,” *Curso Técnico sobre Tópicos la Desregularización del Sect. Eléctrico, ACIEM*, pp. 1–9, 1996.
- [34] L. Fernanda and A. Albuja, “Clasificación de Riesgos de Colapso de Tensión Basados en el Estudio de Comportamientos de Cargas,” *Tesis*, vol. 1, pp. 1–106, 2017.
- [35] WILMER DAVID CURILLO CASCO, “Ubicación óptima de

- generación distribuida en el sistema de distribución,” *Tesis*, vol. 1, pp. 1–23, 2017.
- [36] C. J. Zapata, “Índices Para Detectar En Tiempo Real Problemas De Estabilidad De Voltaje,” *Sci. Tech.*, vol. 16, no. 44, pp. 19–24, 2010.
- [37] S. M. Pérez-londoño, G. Olivartost, and J. J. Mora-flórez, “Una propuesta de clasificación para los índices de estabilidad de tensión,” *Redes Distrib. energía*, vol. 130, no. 2, pp. 115–130, 2014.
- [38] J. E. Candelo, G. Caicedo, and F. Castro, “Métodos para elestudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia,” *Inf. Technol.*, vol. 19, no. 5, pp. 97–110, 2008.
- [39] D. P. Kothari and I. J. Nagrath, *Modern Power System Analysis*, Third. 2008.
- [40] G. D. R. V. Carlos Luis Vásquez Ubilla, “Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS-Sede Guayaquil,” *Univ. Politec. Sales.*, vol. 1, pp. 1–179, 2017.
- [41] ARCONEL, “Regulacion No. ARCONEL-005-2018: Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica.,” *Arconel*. p. 38, 2019.
- [42] CONELEC, “Regulacion 006/00-Procedimientos de Despacho y Operación.,” p. 129, 2007.

31	2008	Metodologías para el análisis de estabilidad de tensión en estado estacionario	2	✘		✘		✘					✘		✘			✘	✘				✘	
32	2012	Control Automático de Voltaje en Sistemas Eléctricos de Potencia basado en Sistemas Expertos Automatic Voltage Control in Electrical Power System based on Expert Systems	5	✘		✘		✘				✘			✘					✘				
33	1996	Colapsos de voltaje en sistema de potencia	1	✘		✘				✘	✘					✘	✘	✘						
34	2018	Clasificación de Riesgos de Colapso de Tensión Basados en el Estudio de Comportamientos de Cargas	1	✘		✘		✘	✘		✘	✘			✘		✘	✘	✘	✘		✘	✘	
35	2017	Ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución	0	✘	✘	✘		✘	✘			✘	✘							✘	✘		✘	
36	2010	Índices Para Detectar En Tiempo Real Problemas De Estabilidad De Voltaje	4	✘		✘		✘	✘		✘	✘		✘		✘	✘			✘		✘	✘	
37	2014	Una propuesta de clasificación para los índices de estabilidad de tensión	2				✘	✘			✘				✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘	✘	
38	2008	Métodos para el estudio de la estabilidad de voltaje en sistemas de potencia	19	✘			✘	✘	✘		✘			✘		✘	✘	✘	✘	✘	✘		✘	
39	2003	Modern Power System Analysis	1013	✘			✘	✘	✘				✘		✘		✘	✘						
40	2017	Análisis del flujo de potencia en líneas de transmisión largas, usando el banco de pruebas para líneas de transmisión de la UPS	0	✘					✘					✘	✘		✘	✘					✘	
CANTIDAD:				24	16	17	14	16	20	17	16	20	12	13		12	17	20	14	17	15	10	12	17

8.2 Resumen de Indicadores

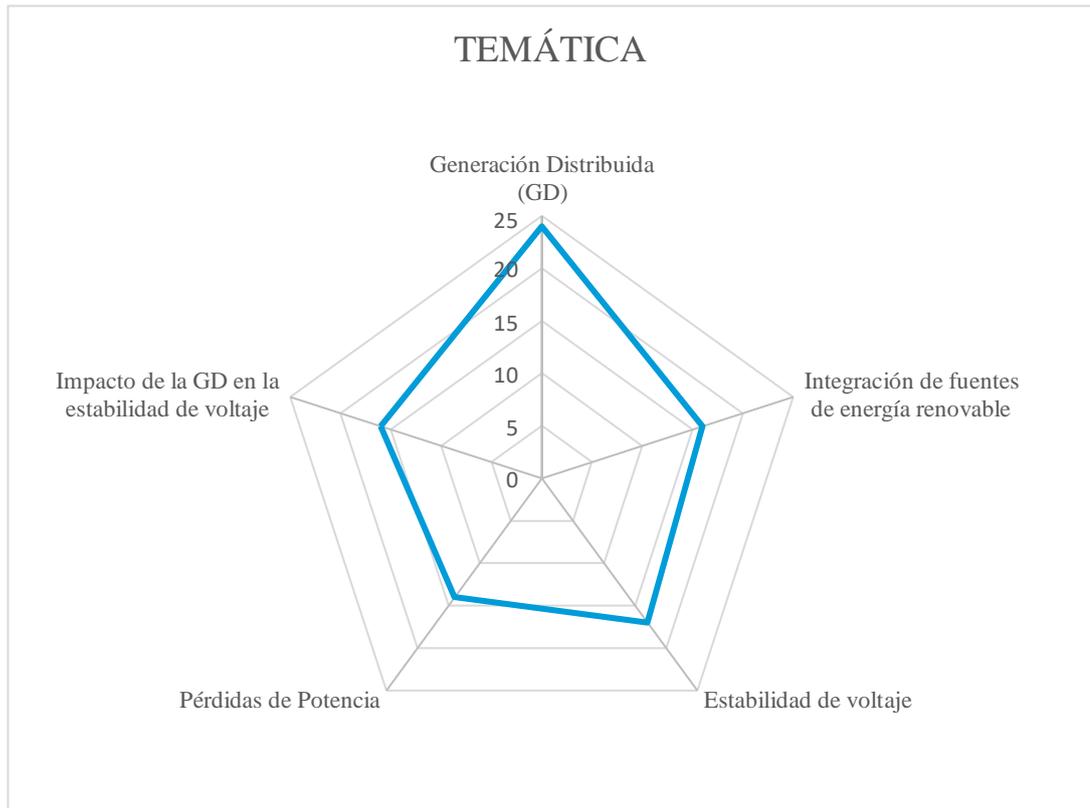


Figura 20. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

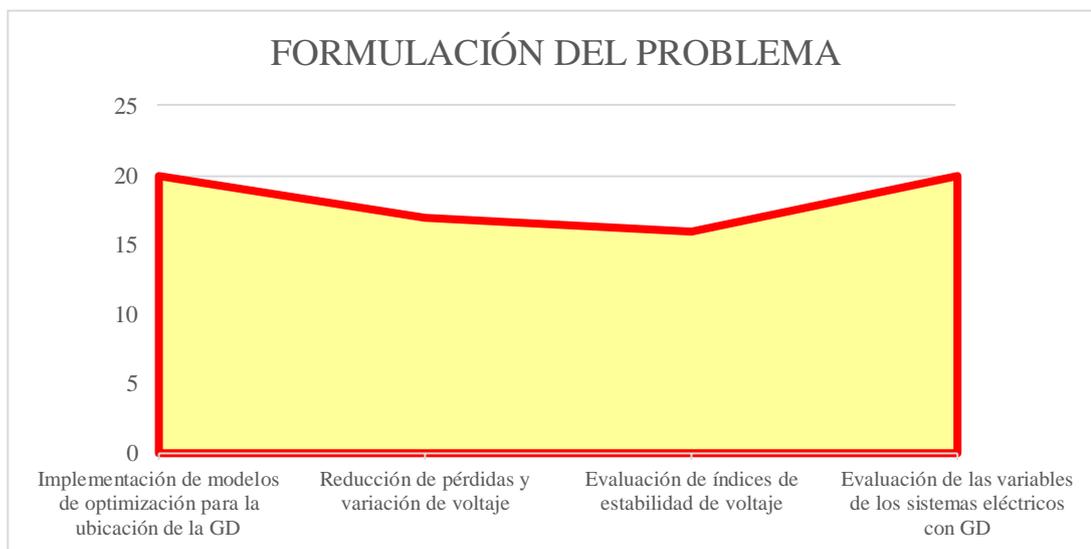


Figura 21. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

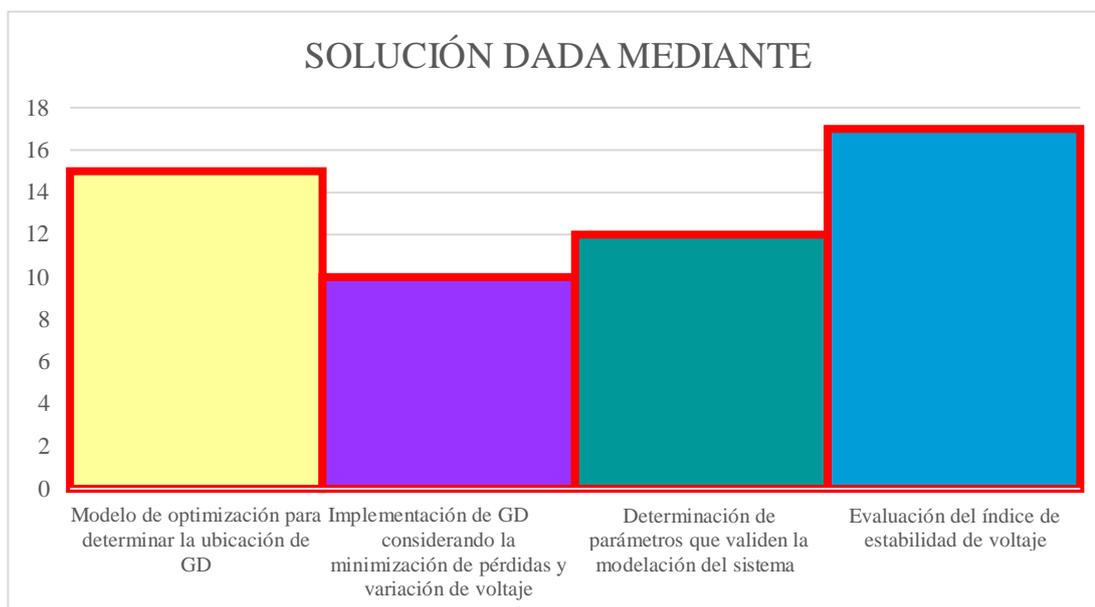


Figura 22. Indicador de solución - Estado del arte.