

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERA ELÉCTRICA**

**TEMA:  
ÓPTIMA UBICACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN EL  
PERFIL DE TENSIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA.**

**AUTOR:  
CAROLINA ALEXANDRA VÁSQUEZ BARBA**

**TUTOR:  
SANTIAGO RAÚL ESPINOSA GUALOTUÑA**

**Quito, Septiembre 2016**

Carolina Alexandra Vásquez Barba

**ÓPTIMA UBICACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA  
BASADO EN EL PERFIL DE TENSIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2016

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



**Carolina Vásquez** (Y'1992-M'09), nació en Quito, Ecuador. Bachiller con especialidad en Ciencias Exactas en el Colegio Experimental 24 de Mayo, Ecuador 2010. Egresada de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en técnicas de modelado y simulación matemática orientados a la óptima ubicación de fuentes de generación distribuida en el Sistema de Distribución Eléctrico.

**karolinavas21@gmail.com**

*Dirigido por:*



**Santiago Raúl Espinosa-Gualotuña** (Y'1983-M'10), nació en Quito, Ecuador. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador en 2007. Sus principales áreas de investigación incluyen Operación de los sistemas de potencia, Transacciones Internacionales de Energía, Mercado Eléctrico, Sistemas de Energía Renovable y Eficiencia Energética. Actualmente trabaja en la Agencia de Regulación y Control de Energía del Ecuador, además es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador.

**sespinosa@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**

2016 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

### **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Santiago Espinosa declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica* realizado por Carolina Alexandra Vásquez Barba, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, septiembre 2016



Santiago Raúl Espinosa Gualotuña.

Cédula de identidad: 171454141-2

### Cesión de derechos de autor

Yo, Carolina Alexandra Vásquez Barba, con documento de identificación N° 171741852-7, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: "Óptima ubicación de fuentes de generación distribuida basado el perfil de tensión de sistemas de distribución eléctrica", 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 impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Carolina Vásquez

Cédula: 171741852-7

Fecha:

## Índice de Contenido

Resumen.....	1
Abstract .....	1
1. Introducción .....	2
2. Integración de Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico.....	3
2.1 Estabilidad de Voltaje.....	4
2.2 Índice de Estabilidad.....	4
2.3 Límites máximos y mínimos de voltaje tolerables en el sistema de distribución.....	5
3. Modelamiento del Sistema .....	5
3.1 Formulación matemática para flujos de potencia. ....	5
3.2 Modelo de Optimización .....	6
4. Procedimiento de Resolución.....	7
5. Caso de Estudio.....	7
6. Análisis de Resultados .....	8
6.1 Evaluación del sistema en condiciones iniciales .....	8
6.2 Evaluación de los resultados de la optimización. ....	8
6.2.1) Incorporación de las unidades de GD.....	9
6.2.2) Índice de Estabilidad de Voltaje.....	9
6.2.3) Perfil de Voltaje.....	9
6.2.4) Pérdidas de Energía .....	9
7. Conclusiones .....	9
8. Referencias .....	10
8.1 Estado del Arte .....	12

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama unifilar de una línea del sistema de distribución radial.....	4
Figura 2. Diagrama del Sistema Eléctrico.....	7
Figura 3. Voltajes Iniciales del sistema.....	8
Figura 4. Comparación del índice de estabilidad. ....	9
Figura 5. Voltaje del Sistema de Distribución. ....	9
Figura 6: Indicadores de Estado del Arte – Temática .....	14
Figura 7: Indicadores de Estado del Arte - Formulación del Problema .....	14
Figura 8: Indicadores de Estado del Arte - Solución .....	14

## Índice de Tablas

Tabla 1: Características de la Generación Distribuida.....	3
Tabla 2: Variables del modelamiento del Sistema.....	6
Tabla 3: Variables y coeficientes en el modelo de optimización.....	7
Tabla 4. Características eléctricas del Sistema de Distribución.....	8
Tabla 5: Potencia Generada por las unidades de GD.....	9
Tabla 6: Pérdidas de Potencia del Sistema.....	9
Tabla 7: Matriz de estado del arte. Parte 1.....	12
Tabla 8: Matriz de estado del arte. Parte 2.....	13

# ÓPTIMA UBICACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN EL PERFIL DE TENSIÓN DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

Carolina Vásquez<sup>1</sup>, Santiago Espinosa<sup>2</sup>

## Resumen

El presente artículo establece el problema de optimización que a través de su resolución permite ubicar de forma técnica las unidades de Generación Distribuida (GD), considerando el efecto de la mejora en el perfil de voltaje en un sistema eléctrico de distribución, cuyo resultado permite la reducción de pérdidas de potencia y a su vez incrementa la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico. La metodología planteada, considera la simulación de flujos de potencia en un sistema de quince (15) barras con topología radial, donde en primera instancia, no se toma en cuenta la incorporación de la GD y cuyos resultados sirven para valorar al sistema antes de la optimización. Posteriormente, se aplica un modelo matemático desarrollado, el cual tiene como función objetivo mejorar el perfil de voltaje del sistema, minimizando la diferencia entre los voltajes de cada nodo y un valor de voltaje de referencia deseado; para el efecto, el modelo se encuentra obligado a cumplir las restricciones técnicas de tipo lineal y no lineal inherentes a la operación del sistema. Por lo expuesto y dado que el modelo de optimización debe elegir la ubicación de la GD mediante variables de decisión, su resolución será realizada a través de la programación no lineal entera mixta mediante la utilización del General Algebraic Modeling System (GAMS).

## Abstract

This article found an optimization model that allows to locate units Distributed Generation (DG) for improving the voltage profile in an electrical distribution system, it results reducing losses power and in turn increases the stability and reliability of the electrical system. The methodology considers a system of fifteen (15) buses with radial topology for the simulation of power flows, which in the first instance is not taken the incorporation of the GD and the results are used to evaluate the system before optimization. Subsequently, applied a mathematical model, which aims to raise the system voltage profile, minimizing the difference between the voltages of each node and a value desired reference voltage; the model is required to comply technical constraints using linear and nonlinear programming. The optimization model to choose the location of the GD by decision variables, its resolution will be made through the not linear integer mixed programming using the General Algebraic Modeling System (GAMS).

**Keywords:** Distributed generation, mixed integer programming, optimization, voltage profile.

**Palabras Clave:** Generación distribuida, programación no lineal entera mixta, optimización, perfil de voltaje.

---

<sup>1</sup> Estudiante de Ingeniería Eléctrica - Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito. Correo: cvasquezb@est.ups.edu.ec

<sup>2</sup> Máster en Eficiencia Energética, Ingeniero Eléctrico – Profesor en la Universidad Politécnica Salesiana – Profesional de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL).

## 1. Introducción

El sistema eléctrico de distribución, año a año experimenta notables cambios debido al crecimiento de la demanda, dado a que los usuarios han volcado sus consumos en temas intensivos y de uso frecuente tales como: cocción, calentamiento de agua y transporte. Otro factor que también influye al incremento de la demanda del sistema es el desarrollo de la tecnología y la fácil accesibilidad que tienen a ella los consumidores, causando un alto nivel de dependencia de los usuarios a los equipos electrónicos[1].

Por lo mencionado, el aumento de la demanda origina que las redes de distribución del sistema operen frecuentemente al máximo de su capacidad y cerca de los límites de inestabilidad de voltaje[2], provocando el aumento de pérdidas de potencia y energía al sistema[3].

Una de las soluciones propuestas en [4] para suministrar energía eléctrica de calidad, mejorar la confiabilidad del sistema y la regulación del voltaje es la incorporación de fuentes pequeñas de generación basadas en la tecnología de energías renovables conocida como generación distribuida (GD), este tipo de generación no convencional es muy atractiva debido a su rápida implementación, bajo costo y su alta eficiencia[5].

La GD corresponde a unidades de generación de pequeña y mediana escala conectadas paralelamente a la carga o al sistema de distribución, su tamaño puede variar entre 5kW a 100 MW. Las principales tecnologías utilizadas para este tipo de generación son turbinas de viento, celdas fotovoltaicas, micro-turbinas, celdas de combustible, biomasa[6]; algunas aún en investigación y desarrollo, otras ya dominando el mercado eléctrico debido a sus características amigables con el medio ambiente y la abundante disponibilidad de recursos.

El implementar GD en los sistemas de distribución tiene una inversión relativamente baja en comparación con la construcción de grandes centrales eléctricas convencionales ya que por lo general estos centros de generación se encuentran alejados de los lugares de consumo, por lo cual es necesaria la construcción de líneas de transmisión además de la implementación de

infraestructura para los medianos y grandes proyectos de generación[7].

Así mismo, debido a que la GD está cerca de la carga, los costos por peaje de transmisión se eliminan, lo que representa un ahorro en el costo de la energía; adicionalmente, la capacidad de transferencia de energía a través de las líneas de transmisión y distribución tiende a aumentar, ya que la cargabilidad de las mismas se reduce, produciendo de manera implícita una reducción en las pérdidas de energía y un incremento en el perfil de voltaje del sistema de distribución, aumentando la calidad y seguridad del servicio eléctrico[8].

La GD promete generar electricidad con alta eficiencia y baja contaminación, con costos de mantenimiento relativamente bajos debido a la ausencia de piezas móviles[9].

Las investigaciones [10] y [11] proponen para la reducción de las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de voltaje la ubicación y el dimensionamiento óptimo de GD usando un algoritmo metaheurístico PSO (Particle Swarm Optimization) que provee soluciones aproximadas más no óptimas.

Por su parte, en [8] se presenta un método de localización y dimensionamiento de GD usando en primer lugar una análisis de bifurcación para determinar los nodos del sistema más vulnerables desde el punto de vista de estabilidad y el tamaño óptimo se determina usando un método de búsqueda con programación dinámica (DP).

Un nuevo enfoque para el análisis y mejora de la estabilidad de voltaje basado en la aplicación de redes neuronales y sus características de sensibilidad se presenta en [12], determinándose en este trabajo que la estabilidad es analizada en estado estático y su índice propuesto corresponde al límite de capacidad de carga del sistema.

Con el mismo propósito de mejorar la compensación de voltaje en [13], se propone un método de control DVR (Dynamic Voltage Restorer).

En [14], la ubicación de la GD se realiza usando un análisis de sensibilidad y se establece un índice de voltaje (Vindex) para evaluar el perfil de voltaje del sistema después de la incorporación de la nueva generación.

Por lo expuesto, la implementación de GD es una alternativa para ayudar al sistema de



distribución a contrarrestar los bajos niveles de voltaje, pero esta implementación se la debe realizar de manera adecuada. El problema de determinar la ubicación apropiada de la GD es intrínsecamente no lineal, es por esto que el presente artículo plantea una metodología diferente para la óptima ubicación de la GD, ya que se tomará en cuenta, además de las características técnicas de los generadores y las restricciones de balance de potencia del sistema, las variables de decisión, que conllevará al desarrollo de un modelo de optimización no lineal entero mixto, el cual será resuelto mediante la aplicación del software denominado General Algebraic Modeling System (GAMS). A fin de evaluar los resultados del flujo óptimo de potencia en una red radial aplicando las restricciones y metodología planteada, se presentará los resultados de las variables eléctricas al incorporar la GD, tomando en cuenta el efecto la estabilidad de voltaje y el cumplimiento de las restricciones inherentes del SEP. La parte complementaria del presente trabajo se organiza de la siguiente manera: en la Sección II se presenta el impacto de integrar unidades de Generación Distribuida en el sistema eléctrico, los límites de voltaje normados y los aspectos conceptuales sobre la estabilidad de voltaje; la Sección III se establece el problema de optimización a ser resuelto a través de la programación no lineal entera mixta; la Sección IV muestra el algoritmo utilizado para la ubicación óptima de las unidades de GD; en la sección V se describe el caso en estudio; y, finalmente en las Secciones VI y VII muestran los resultados y conclusiones, respectivamente.

## 2. Integración de Generación Distribuida en el Sistema Eléctrico.

El mercado eléctrico centralizado ha empezado un proceso de transformación debido a la integración de nueva generación en el sistema de distribución, esto se debe a importantes contrariedades que afectan la confiabilidad y seguridad del suministro eléctrico. Entre los problemas presentados se encuentra que, las redes están operando al límite de su capacidad y la alta relación R/X de los sistemas de distribución da lugar a grandes caídas de voltaje e inestabilidad al sistema[15]. Para contrarrestar estos problemas se ha dado lugar a la integración

de nuevos tipos de generación más eficientes y amigables con el medio ambiente como es la generación distribuida (GD)[16].

Este tipo de generación no tiene una definición única y común, por esta razón para definirla se ha sintetizado las definiciones dadas por varios autores[17][18], de los cuales se desprende que, la GD corresponde a generación no convencional a pequeña escala conectada en o cerca de la carga del sistema de distribución. Sin embargo, se debe conocer que, el concepto de generación distribuida no es un nuevo paradigma que ha sido formulado recientemente, en realidad se trata de un concepto básico que está tomando mayor importancia, impulsado por diversos factores tecnológicos y políticas energéticas y ambientales.

Muchas de las tecnologías utilizadas para este tipo de generación no convencional son flexibles en aspectos como operación, tamaño y capacidad de expansión. Entre las tecnologías más usadas para GD se puede citar la generación eólica, fotovoltaica, micro turbinas, turbinas de gas y células de combustible, cuyas potencias típicas de generación se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Características de la Generación Distribuida [19].

<i>Tipo de Tecnología</i>	<i>Eficiencia Eléctrica (%)</i>	<i>Electricidad Nominal</i>
<i>Micro Turbinas</i>	14-30	30kW-400kW
<i>Turbinas de Gas Natural</i>	21-40	500kW-30MW
<i>Celda de Combustible</i>	36-42	100-200kW
<i>Celda Fotovoltaica</i>	15	Residencial: 2kWp Comercial: 50kWp Industrial: 500kWp
<i>Generador Eólico</i>	15-30	>5MW
<i>Cogeneración</i>	40-60	>20Mw

La Generación Distribuida se ha convertido en una opción para: brindar mayor flexibilidad al sistema al aplazar la implementación de nuevas líneas de transmisión y distribución; permitir un despacho de carga uniforme; reducir la necesidad de una reserva fija; y, proporcionar un servicio de electricidad con un alto nivel de confiabilidad y seguridad.

El beneficio de esta generación ha sido observado de diversas maneras, pero una de las más importantes se radica en el uso de GD para

inyectar energía al sistema y mejorar los índices de confiabilidad, obteniendo un mejor resultado cuando se propone su ubicación óptima en el sistema de distribución.

La Generación Distribuida puede ser incorporada al sistema eléctrico mucho más rápido que las soluciones convencionales, lo que permite responder de manera rápida a las condiciones cambiantes de la demanda del sistema[16].

Por lo tanto, el ingreso de GD cambia la estructura radial tradicional del sistema eléctrico, ya que la bidireccionalidad del flujo de potencia influye en el incremento del nivel de voltaje del sistema; pero de esta forma también se ayuda al sistema a reducir sus pérdidas que son resultado de los bajos niveles de voltaje presentes en cada nodo.

## 2.1 Estabilidad de Voltaje

Como resultado del análisis en [20]-[21] se deriva que, la estabilidad de voltaje es la capacidad de un sistema de potencia para mantener el nivel aceptable de esta magnitud en todas las barras del sistema, en condiciones normales de operación y después de una perturbación. La inestabilidad de voltaje es producida cuando las condiciones del sistema varían provocando una caída de voltaje incontrolable, dejando al sistema incapaz de satisfacer el balance de potencia generada y demandada o imposibilitando la transmisión de potencia desde los puntos de generación hasta los centros de carga. Existen varios factores en los sistemas de potencia reales que aportan a que el voltaje colapse, como la capacidad de transferencia de potencia reactiva de los generadores y las características de las cargas, los límites de capacidad de potencia reactiva de los generadores y las características de potencia reactiva de dispositivos de compensación.

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.

## 2.2 Índice de Estabilidad

Los índices de estabilidad de voltaje son factores escalares que permiten determinar la proximidad del sistema a un colapso de voltaje, mismos que tienen relación con los elementos de la matriz de admitancia del sistema y los resultados de flujos de potencia (magnitudes de voltaje o ángulos). Concomitante con lo mencionado, los índices de estabilidad permiten detectar barras críticas, y definir a partir de estos, áreas críticas de estabilidad de voltaje para aplicar acciones correctivas.

La estabilidad del voltaje en un sistema de distribución se ve afectada por el permanente incremento de la demanda, provocando que el sistema pase a un estado de inestabilidad de voltaje al presentar una caída desenfrenada de esta magnitud. Este evento es identificado por el índice de estabilidad de voltaje en estado estable, y deberá ser calculado para todos los nodos del sistema radial. En este sentido y a fin de determinar el índice antes citado se procede a formular las ecuaciones de flujo de potencia para una línea:

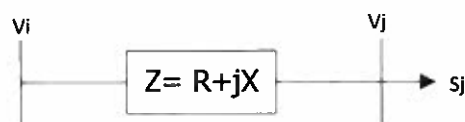


Figura 1. Diagrama unifilar de una línea del sistema de distribución radial.

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

Donde  $V_i$  y  $V_j$  son los voltajes de envío y recibo respectivamente;  $\delta$  es la diferencia angular entre dichos voltajes con referencia en el nodo de envío;  $P_j$  y  $Q_j$  es 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:

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

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.

De los análisis desarrollados en [22], se determina que, el índice mientras más cercano a un valor de uno, el sistema de distribución se encuentra en estado estable de operación, los nodos con menor índice de estabilidad son propensos a presentar inestabilidad de voltaje y candidatos para efectuar las acciones correctivas que se requieran.

### 2.3 Límites máximos y mínimos de voltaje tolerables en el sistema de distribución.

Las variaciones de voltaje en los sistemas de distribución deben encontrarse dentro de un rango determinado comúnmente por el ente regulador de cada país. En este contexto, internacionalmente la banda de voltaje comúnmente aceptada oscila entre un valor de 0.95 pu y 1.05 pu para sistemas eléctricos de potencia, mientras que para sistemas de distribución se encuentra dentro de una banda entre 0,9 y 1,1 pu [23].

## 3. Modelamiento del Sistema

Para elaborar el modelo de optimización es necesario conocer de forma inicial los valores de las variables eléctricas del sistema, para esto es necesario simular un flujo de carga del sistema eléctrico propuesto para el estudio.

Una vez conocidos los resultados, se procederá con la aplicación del modelo matemático y la rigurosidad del mismo a fin de cumplir las metas planteadas en el presente estudio.

### 3.1 Formulación matemática para flujos de potencia.

El estudio de flujo de potencia permite encontrar la solución de régimen permanente de la red del sistema para un escenario de carga dado. La principal información que se obtiene de este estudio incluye las magnitudes y los ángulos de fase de voltajes en los nodos, potencia reactiva en los nodos de generación, flujo real y reactivo de potencia en las líneas de transmisión del sistema eléctrico.

Para un estudio de flujo de potencia es necesario conocer como parámetro inicial la impedancia de cada uno de los elementos y su interdependencia con todo el sistema eléctrico, por lo que es necesario obtener la matriz de admitancia del sistema comúnmente denominada "Ybarra". Para determinar la admitancia conformada por cada uno de los elementos que se interconectan entre las barras del sistema eléctrico se aplican las ecuaciones (3), (4) y (5). Para sintetizar la matriz de admitancia se la divide entre la admitancia propia y mutua de cada elemento. La matriz de admitancia mutua ( $Y_{in}$ ) está definida en la ecuación (6) y la matriz en (7), mientras que la ecuación (8) muestra la matriz de admitancia propia ( $Y_{ii}$ ).

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j|Y_{ij}| \sen \theta_{ij} = G_{ij} + j B_{ij} \quad (3)$$

$$B_{ij} = \frac{X}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (4)$$

$$G_{ij} = \frac{R}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (5)$$

$$Y_{in} = -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (6)$$

$$Y_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & 0 & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & 0 \end{bmatrix}$$

(7)

$$Y_{ii} = -\sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \theta_{in} \quad (8)$$

Como resultado de la aplicación de las funciones matemáticas antes mencionadas, la matriz de admitancia estará conformada acorde a (9) y (10).

$$Y_{ij} = Y_{in} + Y_{ii} \quad (9)$$

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{in} & \dots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \dots & -Y_{in} & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (10)$$

Así mismo, el voltaje en la barra (i) para cada una de las barras viene dado por (11).

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j|V_i| \sen \delta_i \quad (11)$$

Para obtener la potencia activa y reactiva, es necesario obtener la inyección de corriente por cada nodo. Esta inyección resulta de la interacción entre la matriz de admitancia y los voltajes de cada barra y se obtiene a través de las

ecuaciones (12) y (13). Las ecuaciones (14) y (15) se utilizan para determinar las potencias activa  $P_i$  y la reactiva  $Q_i$  para cada nodo.

$$\begin{bmatrix} I_{ij} & \dots & I_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{ij} & \dots & I_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$I_i = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 \dots Y_{in}V_n = Y_{ii}V_i + \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad (13)$$

$$P_i - jQ_i = Y_{ii}V_i^2 + V_i \cdot \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \quad (14)$$

$$P_i - jQ_i = |Y_{ii}V_i^2| \angle(\theta_{ii}) + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| \angle(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i), i \in N \quad (15)$$

Al igualar los componentes reales e imaginarios de la ecuación (14) y descomponerlos, se deducen las ecuaciones (15) y (16), las cuales permiten obtener la potencia activa y reactiva de cada nodo respectivamente.

$$P_i(V, \theta) = |V_i^2| [G_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [G_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) - B_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (16)$$

$$-Q_i(V, \theta) = |V_i^2| [B_{ii} + \sum_{k=1}^N |V_i V_k| [B_{ik} \cos(\theta_k - \theta_i) + G_{ik} \sin(\theta_k - \theta_i)], i \in N \quad (17)$$

Tabla 2: Variables del modelamiento del Sistema.

Nombre	Interpretación
$P_i$	Flujo de potencia activa.
$Q_i$	Flujo de potencia reactiva
$ V_i, V_k $	Módulos de voltaje en el nodo $i$ y del nodo $k$
$\delta_i, \delta_k$	Ángulo del voltaje en el nodo $i$ y en el nodo $k$
$G_{ii}$	ii-ésimo elemento de la matriz propia de conductancia nodal.
$B_{ii}$	ii-ésimo elemento de la matriz propia de susceptancia nodal.
$N$	cantidad total de nodos del sistema.
$G_{ik}$	ik-ésimo elemento de la matriz mutua de conductancia nodal.
$B_{ik}$	ik-ésimo elemento de la matriz mutua de susceptancia nodal.

### 3.2 Modelo de Optimización

Para el presente estudio, el objetivo del modelo de optimización es minimizar el cuadrado de la diferencia entre los voltajes de cada nodo y un valor de voltaje de referencia deseado cuyo valor de este último corresponderá al voltaje nominal.

La función objetivo mencionada se encuentra expresada en la ecuación (18), misma que garantizará que los valores de voltaje en los nodos se encuentren cercanos del voltaje

nominal; así mismo, las restricciones a ser aplicadas para la resolución de este problema estarán relacionadas a las condiciones operacionales de un sistema eléctrico, entre las principales se puede mencionar las condiciones de balance nodal de potencia activa y reactiva obtenidas con las ecuaciones (19), (20), (21) y (22), con las ecuaciones (25) (26) (27) y (28) se establece el límite máximo y mínimo de potencia de los GD; y, los límites de los niveles de voltaje en los nodos con la ecuación (23), de igual forma la ecuación (24) restringe el límite de los ángulos del voltaje.

La ecuación (29) corresponde a definición de la variable binaria de decisión sobre ubicar (si vale 1) o no (si vale 0) una unidad de GD en una determinada barra. El número máximo de unidades de GD para ser instalados en el sistema es una restricción más que se considera y está dada por la ecuación (30).

Se tiene como variables del problema la magnitud y el ángulo del voltaje en todos los nodos y las potencias (activa y reactiva) que suministran los generadores distribuidos y la subestación del sistema de distribución.

A continuación, se presentan en forma detallada el problema de optimización a ser resuelto.

$$FO = \text{Min} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{ref})^2 \quad (18)$$

Sujeto a:

#### Ecuaciones de Balance de Potencia

$$PG_i - PD_i - P_i(V, \theta) = 0. \quad (19)$$

$$QG_i - QD_i - Q_i(V, \theta) = 0. \quad (20)$$

$$P_i(V, \theta) = \sum_{k=1}^n |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \cos \theta_{ik} + b_{ik} \sin \theta_{ik}). \quad (21)$$

$$Q_i(V, \theta) = \sum_{k=1}^n |V_i| \cdot |V_k| \cdot (g_{ik} \sin \theta_{ik} - b_{ik} \cos \theta_{ik}). \quad (22)$$

#### Límites de la magnitud de los voltajes nodales

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (23)$$

#### Límites de los ángulos de los voltajes Nodales

$$\theta_{i \min} \leq \theta_i \leq \theta_{i \max} \quad (24)$$

#### Límites de potencia de los GD

$$PG_i \leq PG_i \max \cdot U_{GDi} \quad (25)$$

$$PG_i \geq PG_i \min \cdot U_{GDi} \quad (26)$$

$$QG_i \leq QG_i \max \cdot U_{GDi} \quad (27)$$

$$QG_i \geq QG_i \min \cdot U_{GD_i} \quad (28)$$

**Variable binaria para ubicar las unidades de GD**

$$U_{GD_i} \in \{0,1\} \quad (29)$$

**Número máximo de unidades de GD a ubicar**

$$\sum_1^i U_{GD_i} \leq N_{GDmax} \quad (30)$$

Tabla 3: Variables y coeficientes en el modelo de optimización.

Nombre	Interpretación
$V_i$	Voltaje en el nodo i (en pu).
$V_{ref}$	Voltaje de referencia (1 pu).
$V_k$	Magnitud del voltaje en el nodo k.
$V_i \max, V_i \min$	Voltajes máximo y mínimo permitidos en el nodo i.
$n$	Número de nodos del sistema de distribución.
$PG_i, QG_i$	Potencia activa y reactiva entregadas por la unidad de GD en el nodo i.
$P_i(V, \theta)$	Inyección neta de potencia activa en el nodo i
$Q_i(V, \theta)$	Inyección neta de potencia reactiva en el nodo i
$g_{ik}$	Parte real de la matriz de admitancia nodal.
$b_{ik}$	Parte imaginaria de la matriz de admitancia nodal.
$\theta_{ik}$	Ángulo entre los nodos i y k
$PG_i \min$	Límite mínimo de potencia activa del GD ubicado el nodo i
$PG_i \max$	Límite máximo de potencia activa del GD ubicado en el nodo i
$QG_i \min$	Límite mínimo de potencia reactiva del GD ubicado en el nodo i.
$QG_i \max$	Límite máximo de potencia reactiva del GD ubicado en el nodo i.
$U_{GD_i}$	Variable binaria de decisión en el nodo i
$N_{GDmax}$	Número máximo de unidades de GD a ubicar en el sistema

#### 4. Procedimiento de Resolución

El algoritmo para resolver el modelo de optimización planteado, requiere el uso del GAMS, el cual, a través de la adquisición de datos de los generadores, de los nodos y de las características de las líneas para formar la "Ybarra", procede a resolver el modelo de optimización antes descrito.

El software GAMS es el encargado de realizar el flujo de potencia y minimizar la diferencia de voltaje en cada nodo. En tal sentido y para efectos de inicialización de las variables eléctricas, se usa los resultados arrojados por el software DigSilent el cual simula el sistema eléctrico propuesto de forma preliminar.

A continuación, se presenta el procedimiento para la resolución del modelo de optimización planteado mediante el siguiente algoritmo.

#### Algoritmo de Resolución

Paso 1: Set Matriz de admitancias.

Paso 2: Leer Base datos del Sistema Eléctrico.

Pase 3: Set valores iniciales de las variables eléctricas (De la simulación del flujo de potencia en Digsilent)→GAMS.

Paso 3: Problema de Optimización en GAMS

Set Condiciones Iniciales

Set Variable binaria

$$U_{GD_{ij}} \in \{0,1\}$$

Set Restricciones de igualdad

$$P_{gi} - P_{car_i} - P_i = 0$$

$$Q_{gi} + Q_{cap_i} - Q_{car_i} - Q_i = 0$$

Set Restricciones de desigualdad

$$V_{min} \leq V_i \leq V_{max}$$

$$PG_i \leq PG_i \max \cdot U_{GD_i}$$

$$PG_i \geq PG_i \min \cdot U_{GD_i}$$

$$QG_i \leq QG_i \max \cdot U_{GD_i}$$

$$QG_i \geq QG_i \min \cdot U_{GD_i}$$

$$\sum_1^i U_{GD_{ij}} \leq N_{GDmax}$$

Paso 4: Minimización de la F.O e integración de las unidades de GD.

$$F.O = \sum_{i=1}^n (V_i - V_{ref})^2$$

Paso 7: Análisis de resultados: Asignación de las unidades de generación distribuida, evaluación: del perfil de voltaje, índice de estabilidad de voltaje y pérdidas en el sistema de distribución.

Paso 8: Fin

#### 5. Caso de Estudio

A continuación, se presenta la descripción del sistema eléctrico utilizado para el modelamiento y simulaciones. Se considera un sistema de distribución radial de 15 barras, cuyas características como la impedancia de las líneas y las potencias de cargas se muestran en la tabla 4 y están calculadas con un voltaje y potencia base de 11.432 kV y 30 MVA, respectivamente.

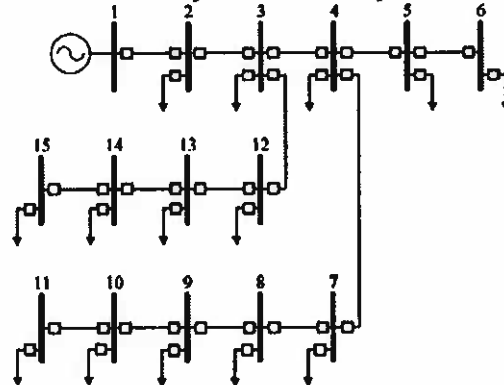


Figura 2. Diagrama del Sistema Eléctrico [24].

Tabla 4. Características eléctricas del Sistema de Distribución.

Nin	Nfin	R (p.u)	X(p,u)	B(p,u)	Pload(p,u)	Qload(p,u)
1	2	0,0063	0,1504	0,0000	0,0208	0,0021
2	3	0,0003	0,0018	0,0015	0,0495	0,0051
3	4	0,0067	0,0308	0,0353	0,0958	0,0098
4	5	0,0058	0,0149	0,0025	0,0442	0,0045
5	6	0,0141	0,0365	0,0000	0,0113	0,0012
4	7	0,0080	0,0370	0,0312	0,0638	0,0066
7	8	0,0090	0,0416	0,0000	0,0323	0,0033
8	9	0,0070	0,0323	0,0015	0,0213	0,0022
9	10	0,0037	0,0169	0,0035	0,0280	0,0029
10	11	0,0090	0,0416	0,0020	0,2170	0,0022
3	12	0,0275	0,1270	0,0000	0,0132	0,0014
12	13	0,0315	0,0814	0,0000	0,0029	0,0003
13	14	0,0397	0,1030	0,0000	0,0161	0,0016
14	15	0,0106	0,0042	0,0000	0,0139	0,0014

La alimentación principal del sistema de distribución está en la barra 1, a través de una única subestación. Sin embargo, se supone que pueden existir unidades de generación que pueden ser conectadas a los diferentes nodos del sistema, dependiendo de las condiciones de operación y las necesidades operativas, estas unidades de generación adicionales provienen de las llamadas unidades de GD.

Para la evaluación del modelo planteado, las unidades de GD son consideradas como unidades de micro generación, por tal motivo las capacidades de estas unidades se encontrarán dentro de un rango entre 1 y 2MW.

Conociendo los parámetros y condiciones iniciales del sistema, se procede a resolver el problema de optimización, el cual está conformado por la función objetivo y restricciones expuestas anteriormente. Para cumplir con el objetivo de mantener los voltajes cerca del voltaje nominal y reducir las pérdidas al sistema por el aumento de la demanda se propone una metodología que mejorará el perfil de voltaje del sistema de distribución inyectando potencia de la GD en barras puntuales del sistema previamente elegidas a través de la activación de la variable binaria de decisión.

La simulación se realiza cuando el sistema experimenta la situación más crítica es decir cuando se encuentra operando en la hora de demanda alta.

## 6. Análisis de Resultados

### 6.1 Evaluación del sistema en condiciones iniciales

De manera preliminar se procede a simular el flujo de potencia de carga radial empleando

DigSILENT. A fin de evaluar los resultados obtenidos de la simulación, se procede a efectuar la resolución del problema de optimización considerando únicamente las restricciones inherentes y necesarias para la operación del sistema, es decir un problema optimización relajado bajo condiciones mínimas sin la activación de nuevas unidades de GD. La comparación de los resultados obtenidos en DigSILENT y GAMS se muestra en la gráfica siguiente.

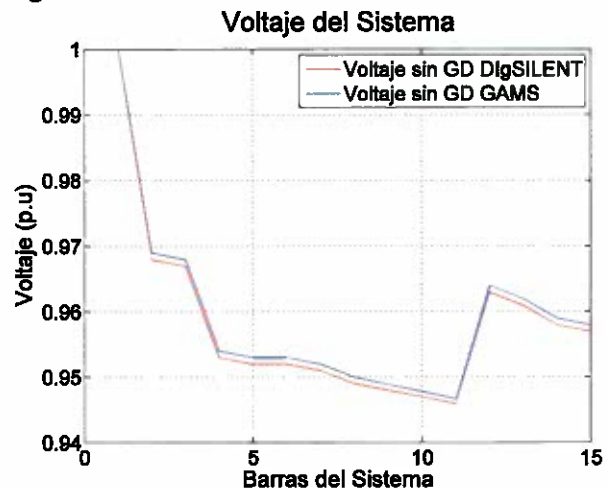


Figura 3. Voltajes Iniciales del sistema.

Como se observa, los valores obtenidos son similares, lo cual valida que el optimizador está efectuando una simulación adecuada del sistema sin considerar la incorporación de la GD.

Una vez comprobado que el modelo de optimización concuerda con la realidad física de los sistemas eléctricos, se procede con la modelación del caso de estudio planteado. Para este fin, se considerará la situación más crítica de abastecimiento que experimenta el sistema, es decir cuando opera en la hora de demanda máxima, lo que implica que el sistema se ve afectado por el mayor consumo de energía eléctrica presentando mayores caídas de voltaje mismas que se ven reflejadas en las pérdidas de energía.

### 6.2 Evaluación de los resultados de la optimización.

Con los parámetros iniciales obtenidos de la simulación del flujo de potencia se procede a resolver el modelo matemático de optimización a fin de despachar la GD mediante la resolución de la programación no lineal entera mixta.

### 6.2.1) Incorporación de las unidades de GD

Las unidades de GD despachadas, como resultado de la resolución del problema matemático propuesto, se encuentran ubicadas en los nodos 4, 10 y 14, cuyas potencias de generación tanto activa como reactiva se muestran en la tabla 5.

Tabla 5: Potencia Generada por las unidades de GD.

Nodos	Unidades de GD			
	$P_g$ (pu)	$P_g$ (MW)	$Q_g$ (pu)	$Q_g$ (MVAR)
4	0.055	1.655	0.000675	0.02025
10	0.062	1.869	0.000637	0.01910
14	0.053	1.596	0.000624	0.01871

### 6.2.2) Índice de Estabilidad de Voltaje

De la misma forma, se observa que el índice de estabilidad presentado, denota una mejora significativa en las barras del sistema que son propensas a experimentar inestabilidad cuando se procede con la optimización mediante GAMS, aspecto que se muestra en la siguiente figura.

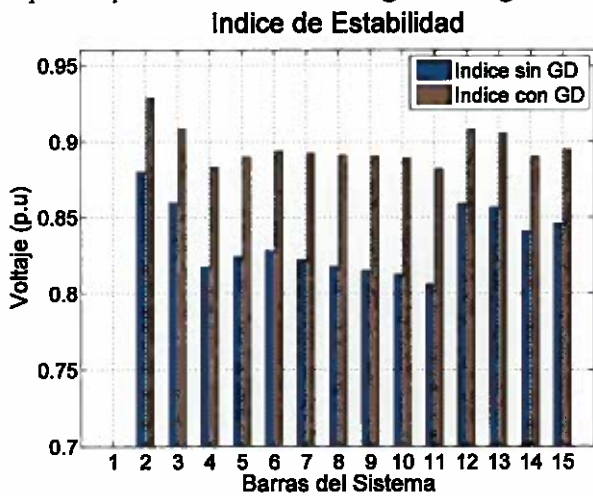


Figura 4. Comparación del índice de estabilidad.

### 6.2.3) Perfil de Voltaje

Como consecuencia de la ubicación y despacho de la GD, las nuevas potencias tanto activa como reactiva ingresan al sistema haciendo que el flujo tome un doble sentido de dirección, gracias a esto, en la figura 5 se puede observar como el perfil de voltaje mejora notablemente y se encuentra dentro de los límites de estabilidad de voltaje satisfaciendo de esta forma el objetivo planteado en este artículo.

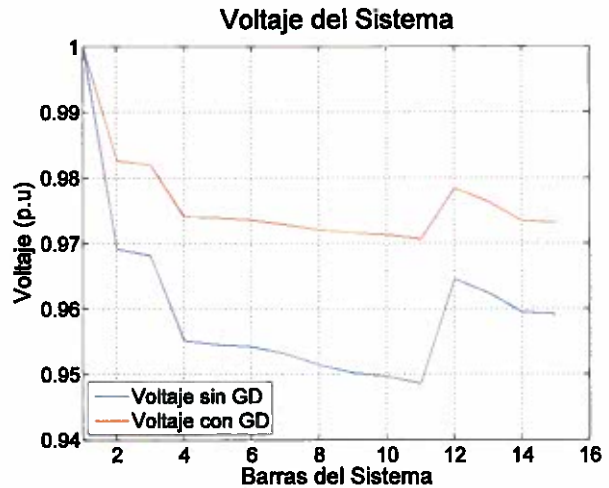


Figura 5. Voltaje del Sistema de Distribución.

### 6.2.4) Pérdidas de Energía

Por su parte y como resultado implícito de la resolución del modelo de optimización, se obtiene que las pérdidas de potencia se ven reducidas como se puede observar en la tabla 6. De esta manera se contribuye en la adecuada operación del sistema eléctrico y permite un uso óptimo del recurso de generación disponible.

Tabla 6: Pérdidas de Potencia del Sistema.

Pérdidas	$P$ (pu)	$P$ (MW)	$Q$ (pu)	$Q$ (MVAR)
sin GD	0.01094	0.32815	0.12244	3.67308
con GD	0.00549	0.16469	0.06039	1.81162

## 7. Conclusiones

La incorporación de generación, permite que el perfil de voltaje mejore significativamente, logrando así que los niveles de voltaje se mantengan dentro de una banda adecuada en términos de seguridad, produciendo intrínsecamente una mayor confiabilidad del sistema al garantizar el suministro continuo de energía a la demanda.

La conexión de GD a un sistema de distribución se convierte en una solución eficiente para mejorar los problemas operativos de la red como es la regulación del voltaje. Además, al ser un tipo de energía que puede ser implementada con energías renovables permite la reducción del impacto ambiental que ocasionan otros tipos de generación de energía convencional.

El modelo de optimización planteado, cuya resolución a través de la programación no lineal entera mixta, permite obtener la ubicación

óptima de las unidades de generación distribuida, la cual además de cumplir con las exigencias establecidas por el modelo matemático, permiten mantener la estabilidad del sistema cuando la demanda aumenta. Sin embargo, se debe mencionar que existe un límite de unidades de GD, ya que el exceso de dichas GD podría sobrepasar el límite de estabilidad de voltaje evaluado en la curva PV, aspecto que conllevaría a que la GD tenga un efecto contrario y el perfil del voltaje no muestre cambios que contribuyan con la óptima operación del sistema de distribución. En tal sentido, se sugiere como trabajo futuro que el aspecto antes citado pueda ser integrado en el desarrollo de un nuevo modelo de optimización logrando de esta forma mejorar los resultados obtenidos del presente trabajo.

Finalmente, el artículo realizado demuestra que efectivamente la incorporación de GD en sistemas de distribución ayuda a aliviar el sistema y de forma implícita minimizan las pérdidas técnicas del mismo; sin embargo, la incorporación de GD conlleva a que la operación y protección del sistema de distribución sea modificado a fin de que la operación del mismo sea confiable considerando los nuevos flujos bidireccionales de potencia.

## 8. Referencias

- [1] S. Ray, A. Bhattacharya, and S. Bhattacharjee, "Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 76, pp. 53–68, 2016.
- [2] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 4, pp. 1815–1822, 2010.
- [3] H. Li, S. Ge, and H. Liu, "Analysis of the Effect of Distributed Generation on Power Grid," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 1–5, 2012.
- [4] Debabrata Kundu, "Distributed Generation Connected to the GRID," 2000.
- [5] S. Li, K. Tomsovic, and T. Hiyama, "Load following functions using distributed energy resources," *2000 Power Eng. Soc. Summer Meet. (Cat. No.00CH37134)*, vol. 3, no. c, pp. 1756–1761, 2000.
- [6] 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.
- [7] P. Kayal and C. K. Chanda, "Placement of wind and solar based DGs in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, pp. 795–809, 2013.
- [8] M. Esmaili, E. C. Firozjaee, and H. A. Shayanfar, "Optimal placement of distributed generations considering voltage stability and power losses with observing voltage-related constraints," *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1252–1260, 2014.
- [9] P. Chiradeja, "Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis," *2005 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Asia Pacific*, pp. 1–5, 2005.
- [10] K. Dharageshwari and C. Nayanatara, "Multiobjective optimal placement of multiple distributed generations in IEEE 33 bus radial system using simulated annealing," *IEEE Int. Conf. Circuit, Power Comput. Technol. ICCPCT 2015*, no. 2014, 2015.
- [11] G. Zareiegovar, R. R. Fesaghandis, and M. J. Azad, "Optimal DG Location and Sizing in Distribution System to Minimize Losses , Improve Voltage Stability , and Voltage Profile," *Proc. 17th Conf. Electr. Power Distrib. Networks*, pp. 1–6, 2012.
- [12] M. Aghamohammadi, "Sensitivity characteristic of neural network as a tool for analyzing and improving voltage stability," ... *Exhib. 2002 ...*, no. 1, pp. 1128–1132, 2002.
- [13] S. Biricik, S. K. Khadem, S. Redif, and M. Basu, "Control of the dynamic voltage restorer to improve voltage



- quality,” *2014 IEEE 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2014*, no. 3, pp. 0–4, 2014.
- [14] R. S. Al Abri, E. F. El-saadany, S. Member, 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. 1–9, 2012.
- [15] S. K. Injeti and N. Prema Kumar, “A novel approach to identify optimal access point and capacity of multiple DGs in a small, medium and large scale radial distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 45, no. 1, pp. 142–151, 2013.
- [16] J. Driesen and R. Belmans, “Distributed generation: challenges and possible solutions,” *2006 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, 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. D. U. L. Å. U and M. Abrudean, “Impact of Distributed Generation Upon Reghin – Lăpușna Medium Voltage Line,” pp. 2–6, 2014.
- [19] F. M. González-longatt, “Tecnologías de Generación Distribuida: Costos y Eficiencia,” 2004.
- [20] L.-A. Dessaint, I. Kamwa, and T. Zabaïou, “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.
- [21] F. A. Althowibi and M. W. Mustafa, “Line voltage stability calculations in power systems,” *PECon2010 - 2010 IEEE Int. Conf. Power Energy*, pp. 396–401, 2010.
- [22] K. V Kumar and M. P. Selvan, “Planning and operation of Distributed Generations in distribution systems for improved voltage profile,” *2009 IEEE PES Power Syst. Conf. Expo.*, vol. 620015, pp. 1–7, 2009.
- [23] D. Committee, I. Power, and E. Society, *IEEE Std 1159™-2009, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, vol. 2009, no. June. 2009.

## 8.1 Estado del Arte

Tabla 7: Matriz de estado del arte. Parte 1.

ÓPTIMA UBICACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN EL PERFIL DE TENSION DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA																												
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	TEMÁTICA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PUNTO PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA												
					Distributed Generation (DG)	Integrate Renewable energy resources	Power Losses	Voltage Stability	IMPACT OF THE DG SIZE ON VOLTAGE STABILITY	LOADABILITY LIMIT AS SECURITY INDEX	Types of distributed generation	VOLTAGE STABILITY	Reduce power losses	Uncorroborated drop in voltage magnitude following	Load in Peak Demand	Facilitating power from renewable	Raises de Potencia	Limits the magnitude and angles of the model voltages	Power limits of DG	Maximum number of DG to using	Minimize the network power loss	Efficiently allocate DG	Minimize the number of voltage collapse	SEMI-DEFINITION	Improve Voltage Stability and Voltage Profile	OPTIMAL SIZING OF DG	Variable literature para ubicar las unidades de DG	
1	2000	Distributed Generation Connected to the GRID in aad following functions using distributed energy resources	Ver (Dehbrita Kund 2000)	6	X					X		X																
2	2000	Sensitivity characteristics of neural network as a tool for analyzing and improving voltage stability	Ver (Zhang 2000)	56		X	X	X	X					X														
3	2002	Techniques for Generation Distributed Costly	Ver (Alghamdi y Hamud 2002)	6			X	X	X																			
4	2004	Distributed generation challenges and possible solutions	Ver (Gonzalez y Iniguez 2004)	4		X		X	X																			
5	2006	A new index of voltage stability considering distributed network	Ver (Diaz 2006)	12		X		X	X																			
6	2008	Planning and operation of distributed generations in distributed systems for improved voltage profile	Ver (Bhargava 2008)	13		X		X	X																			
7	2009	Optimal allocation of ESS in distribution systems with a high penetration of wind energy	Ver (Ding 2009)	11		X		X	X																			
8	2009	Line voltage stability calculations in power systems	Ver (Kumar 2009)	3			X	X	X																			
9	2010	Optimal DG location and Sizing in Distribution System to Minimize Losses, Improve Voltage Stability, and Voltage Profile	Ver (Awa 2010)	5			X	X	X																			
10	2010	Optimal Placement and Sizing Method to Improve the Voltage Stability Margin in a Distributed System Using Distributed Generation	Ver (Awa 2010)	8			X	X	X																			
11	2012	Distributed generation scheme analysis as application for the electrical system	Ver (Zarengava 2012)	0			X	X	X																			
12	2012	Ubicación óptima de fuentes de generación distribuida en redes de media tensión	Ver (Ara 2012)	9			X	X	X																			
13	2012	Placement of wind and solar based DG in distribution system for power loss minimization and voltage stability improvement	Ver (Plummer y Rodriguez 2012)	3			X	X	X																			
14	2013	Optimal placement and sizing of distributed generation in distribution systems for power loss minimization and voltage stability improvement	Ver (Plummer 2013)	14			X	X	X																			

Tabla 8: Matriz de estado del arte. Parte 2.

ÓPTIMA UBICACIÓN DE FUENTES DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA BASADO EN EL PERFIL DE TENSION DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA		DATOS		CITAS	TEMÁTICA										RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	Distributed Generation (DG)	Integrate Renewable resources	Power Losses	Voltage Stability	IMPACT OF THE DC SIZE ON VOLTAGE STABILITY	LOADABILITY LIMIT AS SECURITY INDEX	Types of distributed generation	VOLTAJE STABILITY	Reduce power losses	(controllable) drop in voltage magnitude following	Lost Load in Peak Demand	Fluctuating power from renewable result in grid power oscillation	Balance de Potencia	Limits the magnitude and angles of the nodal voltages	Power limits of DG	Maximum number of DG to allow	Managed by central controller	OPTIMAL SIZING OF DG	Decrease the energy cost of microgrids	STABILITY INDEX	Improve Voltage Stability and Voltage Profile	OPTIMAL SIZING OF DC	Variable sources for smart grids
18	2014	Benefit of Distributed Generation: A Line Loss Reduction Analysis	\cite{C/Wade:ja2005}	11	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>						<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		
19	2014	Control of the dynamic voltage restorer to improve voltage quality	\cite{Barek:2014}	9			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>		
20	2014	Impact of Distributed Generation Upon Reglan – Lapuqa Medium Voltage Line	\cite{UZO14}	5				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>						
21	2014	Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices	\cite{Dorram:2014}	16	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
22	2015	Multiojective optimal placement of multiple distributed generations in IEEE 33 bus radial system using simulated annealing	\cite{Dhargath:mn2015}	4	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
23	2016	Optimal placement of switches in a radial distribution network for reliability improvement	\cite{Raj:2016}	6			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
24	2016	Analysis of the Effect of Distributed Generation on Power Grid	\cite{Raj:2016}	8	<input checked="" type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>								<input checked="" type="checkbox"/>			<input checked="" type="checkbox"/>			
25																											
26																											
				CANTIDAD	425	7	11	15	17	20	6	9	9	9	9	5	13	3	5	1	20	11	5	3	14	7	0

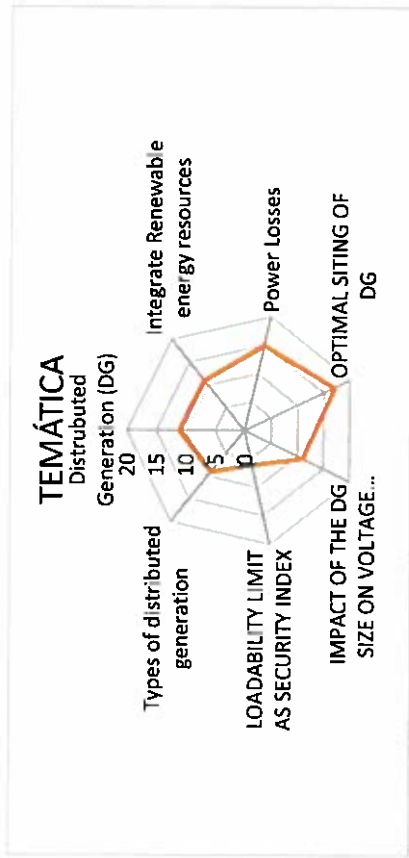


Figura 6: Indicadores de Estado del Arte – Temática

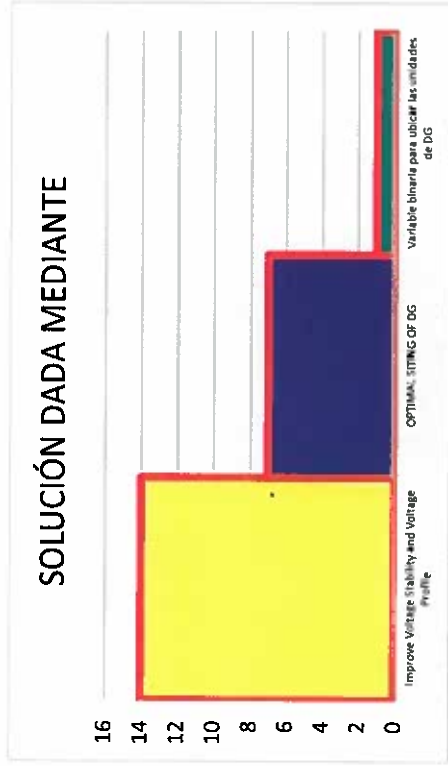


Figura 8: Indicadores de Estado del Arte - Solución

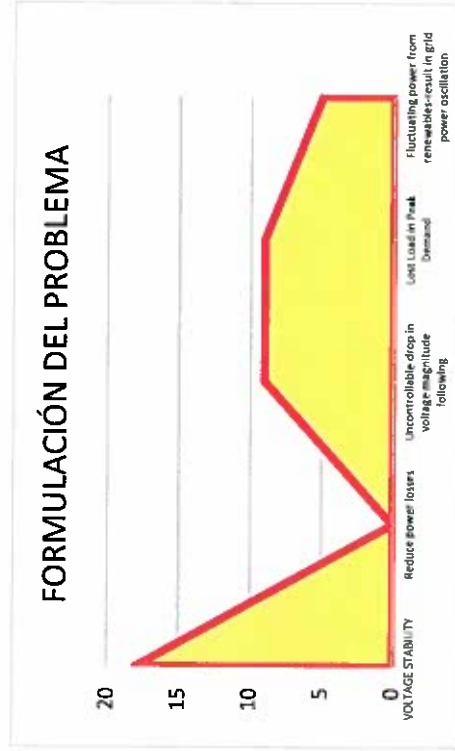


Figura 7:Indicadores de Estado del Arte - Formulación del Problema