

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:
UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN COSTOS DE OPERACIÓN**

**AUTOR:
DUKEYRO EDUARDO AYALA MALDONADO**

**DIRECTOR:
SANTIAGO RAÚL ESPINOSA GUALOTUÑA**

Quito, julio 2017

Dukeyro Eduardo Ayala Maldonado

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN COSTOS DE OPERACIÓN

Universidad Politécnica Salesiana
Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Dukeyro Eduardo Ayala Maldonado (Y'1989-M'06). Realizó sus estudios secundarios en el Colegio Bilingüe Blas Pascal, se graduó de técnico en contabilidad con énfasis en informática. Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su afinidad académica está ligada a la optimización en sistemas de distribución, enfocado a la generación distribuida, representado por su trabajo de titulación.

ayala.dukeyro@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 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.

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
©2017 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 *Ubicación optima de generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución basado en costos de operación* realizado por Dukeyro Eduardo Ayala Maldonado, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio 2017



.....

Santiago Raúl Espinosa Gualotuña

Cédula de identidad: 171454141-2

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Dukeyro Eduardo Ayala Maldonado, con documento de identificación N° 172319549-9, 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: “Ubicación óptima de generación distribuida en sistemas eléctricos de distribución basado en costos de operación”, 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: Dukeyro Eduardo Ayala Maldonado

Cédula: 1723195499

Fecha: Julio 2017

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, que fue mi fortaleza en este largo y duro camino, también a mis dos hermosos hijos Thiago Ayala y Dukeyro Ayala que fueron los motores que me impulsaron día tras día, me enseñaron que con la motivación adecuada no hay nada que no se pueda lograr, mis padres Isabel Maldonado y Carlos Ayala, que a pesar de tantos altos y bajos estuvieron ahí para darme la mano, levantarme y aclararme que si era capaz de lograrlo, mis hermanas Madelehyn Ayala y María Julieth Ayala para las cuales espero ser un ejemplo.

Finalmente, pero no menos importante, Santiago Espinosa, bajo su tutela y apoyo pude lograr mi meta de ser ingeniero, también dedico este trabajo a los compañeros que siguen en la lucha de lograr sus sueños, que a pesar de todas las adversidades siguen adelante con temple y sin desfallecer.

Gracias Dios por haberme permitido ser parte de tan prestigiosa institución y de haber puesto en mi camino a gente tan enriquecedora.

Dukeyro Ayala

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| Resumen | 1 |
| 1. Introducción | 2 |
| 2. Energías renovables como parte de la generación distribuida | 4 |
| 2.1. Energía Solar | 4 |
| 2.2. Energía eólica..... | 5 |
| 3. Pérdidas en los sistemas de distribución | 5 |
| 4. Formulación matemática para flujos de potencia..... | 5 |
| 5. Modelo de optimización..... | 7 |
| 5.1. Función objetivo | 8 |
| 5.2. Restricciones | 8 |
| 5.2.1. Restricción de balance de potencia | 8 |
| 5.2.2. Restricción de niveles de voltaje..... | 8 |
| 5.2.3. Restricción de potencia máxima de las líneas..... | 8 |
| 5.2.4. Restricción binaria | 9 |
| 5.2.5. Restricción de potencia máxima del generador distribuido | 9 |
| 5.2.6. Restricción de unidades de generación | 10 |
| 5.3. Escenarios basados en el incremento de la demanda..... | 10 |
| 6. Procedimiento de resolución..... | 10 |
| 7. Caso de estudio | 11 |
| 8. Análisis de resultados..... | 13 |
| 8.1. Ubicación de generación distribuida..... | 13 |
| 8.2. Perfiles de voltaje..... | 13 |
| 8.3. Pérdidas en el sistema | 14 |
| 8.4. Costos de operación por escenario de carga | 14 |
| 9. Conclusiones | 14 |
| 10. Referencias..... | 15 |
| 10.1. Estado del arte | 18 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Diagrama del sistema..... | 11 |
| Figura 2: Condiciones iniciales del sistema..... | 12 |
| Figura 3. Perfil de voltaje de los buses. | 14 |
| Figura 4. Costos variables por escenario de carga. | 14 |
| Figura 5: Indicadores de estado del arte - formulación de problema..... | 20 |
| Figura 6: Indicadores de estado del arte – Temática..... | 20 |
| Figura 7: Indicadores de estado del arte - Solución dada mediante..... | 20 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Descripción de los elementos asociados a pérdidas en conductores..... | 5 |
| Tabla 2: Descripción de los elementos asociados al balance de potencias. | 7 |
| Tabla 3. Descripción de los elementos asociados a la función objetivo | 8 |
| Tabla 4. Descripción de los elementos asociados al balance de potencias. | 8 |
| Tabla 5. Descripción de elementos asociados a la potencia máxima de carga de la línea. 9 | |
| Tabla 6. Descripción de elementos asociados a la potencia activa y reactiva de los generadores distribuidos..... | 9 |
| Tabla 7. Descripción de elementos asociados al crecimiento de demanda. | 10 |
| Tabla 8. Demanda total de cada escenario. | 10 |
| Tabla 9. Características eléctricas de las líneas. | 12 |
| Tabla 10. Características eléctricas de las cargas..... | 12 |
| Tabla 11: Generadores tipo. | 13 |
| Tabla 12. Ubicación óptima de generación distribuida..... | 13 |
| Tabla 13. Potencia de generación de las unidades despachadas. | 13 |
| Tabla 14. Potencias activas de generación, demanda y pérdidas del sistema. | 14 |

UBICACIÓN ÓPTIMA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN BASADO EN COSTOS DE OPERACIÓN

Resumen

El artículo muestra el modelo matemático que permite determinar de manera óptima, tanto técnica como económicamente, la ubicación y tamaño de generación distribuida en una red de distribución, usando para el efecto el optimizador GAMS (General Algebraic Modeling System).

La metodología considera inicialmente la simulación de flujos de potencia del sistema de distribución de topología radial de 33 buses, genérico de la IEEE. Posteriormente se propone un modelo matemático el cual es resuelto a través de la programación no lineal entera mixta usando el optimizador GAMS, teniendo como función objetivo la minimización de los costos de operación del sistema de generación, sin considerar la inversión, respetando las restricciones de los sistemas eléctricos de potencia. Como resultado del modelo, se obtiene la ubicación de generación distribuida a ser insertada en el sistema.

Finalmente, se valoran las mejoras obtenidas en los perfiles de voltaje, los límites de potencia activa en las líneas de distribución; generando además escenarios de demanda con incrementos anuales de carga durante 5 años, a fin de medir la sensibilidad del modelo ante cambios en la demanda.

Palabras Clave: generación distribuida, costos de operación, optimización, programación no lineal entera mixta y flujos de potencia.

Abstract

The paper present the mathematical model that allows determining optimally the location and size of distributed generation in a distribution network, both technically and economically, using the General Algebraic Modeling System (GAMS) optimizer.

The methodology initially considers the simulation of power flows of the radial topology distribution system of 33 buses, generic of the IEEE, next propose a mathematical model solved through mixed nonlinear integer programming using the optimizer GAMS, The objective function is the operational system costs minimization, without the initial investment, but respect the restriction of the power flow system. The model results, obtain the location of DG to be inserted in the system.

Finally, the impact of this, in voltage profile, active power limits of the distribution lines, generate demands scenarios with annual growing for 5 years, to probe the sensibility of model on demand changes.

Keywords: distributed generation, operation cost, optimization, mixed nonlinear integer programming, power flow

1. Introducción

La energía producida por las grandes centrales de generación es transportada por los sistemas de transmisión, la cual a su vez es entregada a los usuarios o consumidores por medio de los sistemas de distribución, mismos que operan en bajo o medio voltaje.[1][2]

La energía eléctrica entregada a los usuarios debe cumplir con criterios normativos de calidad, confiabilidad y seguridad, preestablecidos en la reglamentación de cada país [3], en Ecuador estos criterios son mencionados en la Regulación No. CONELEC 004/01 emitida por el CONELEC ahora ARCONEL, agencia encargada de emitir las normas para el funcionamiento del sector eléctrico ecuatoriano.

Las empresas de distribución son de vital importancia al momento de realizar la planificación del crecimiento de la demanda, ya que estas están en contacto directo con la infraestructura de su área de concesión y conocen las necesidades futuras de la misma, a modo de conocimiento general cabe indicar la tasa de crecimiento de la demanda eléctrica para el Ecuador, establecida en el Plan Maestro de Electrificación - PME 2013 – 2022 vol. 2 sugiere un incremento del 4.7% en promedio anual del consumo energético del país [4].

La demanda de electricidad en todos los países del mundo crece de manera acelerada, este crecimiento de demanda debe ser cubierto obligatoriamente y de manera instantánea, así que la planificación de acciones a tomar para satisfacer esta demanda se vuelve una necesidad para los ingenieros eléctricos [5].

Una gran alternativa para suplir los crecimientos de demanda es la generación distribuida, la cual constituye todas aquellas fuentes de

energía eléctrica que se conectan a una red de distribución eléctrica. Por otra parte, las redes de distribución al tener un flujo unidireccional, permite que sean operadas de forma pasiva, sin embargo, la inclusión de generación distribuida obliga a que la empresa tome medidas para el control de las variables eléctricas que podrán modificarse por el flujo bidireccional producido en la red por la inclusión de la generación distribuida [6].

La programación del despacho de este tipo de generadores no se puede realizar de manera centralizada ya que su comportamiento es relativamente aleatorio, depende de las condiciones meteorológicas del emplazamiento más no de la necesidad del sistema, aspecto que es aplicable únicamente para aquellos generadores que usan energías renovables no convencionales. En tal sentido, la distribuidora tiene la responsabilidad de implementar nuevas tecnologías que permitan el adecuado control del sistema considerando estas particularidades [7][8].

En la gran mayoría de países existen decretos o leyes que dan gran apertura a importantes desarrollos en la producción de energía en regímenes especiales, entre estas se encuentran las centrales de generación fotovoltaica, eólica, hidráulica a baja escala y por otro lado generación térmica de pequeña envergadura, estos tipos de generación son considerados como generación distribuida ya que se conectan a la red de distribución directamente dependiendo del tamaño de los generadores distribuidos estos se conectan a las redes de distribución a diferentes niveles de voltaje, ya que es necesario disminuir las pérdidas por efecto Joule mejorando implícitamente los perfiles de voltaje [9].

Las pérdidas ocurridas en los sistemas de distribución se deben a fenómenos físicos y comerciales que ocurren

dentro del sistema, en ellas se puede decir que existen pérdidas técnicas y no técnicas [7].

Las pérdidas técnicas se deben a fenómenos eléctricos que ocurren en cada parte del sistema y que son atribuibles a los efectos de oposición a la corriente eléctrica por las características técnicas de las redes, en este contexto, es necesario indicar que la mayor parte de las pérdidas técnicas ocurren en la infraestructura de distribución [10].

Las pérdidas de energía eléctrica son un factor que en general afecta la gestión económica de los sistemas de potencia, aspecto por el cual, son consideradas para el cálculo de tarifas ya que económicamente se definen como la diferencia entre la energía generada y la energía entregada, siendo siempre la energía generada mayor a la entregada, estas pérdidas técnicas generan costos en las tarifas mínimas de comercialización de energía, con este antecedente surge la necesidad de minimizarlas cuyo efecto es una disminución del costo de la energía al usuario final [11].

Actualmente la generación distribuida ha adquirido mucha fuerza gracias a las ventajas económicas con las que cuenta, ventaja que otras generadoras no tienen [12].

En estos proyectos se deben evaluar las características técnicas y económicas del emplazamiento, así como tener en cuenta las normativas ambientales del lugar en el cual se va a situar, la evaluación de la tecnología a utilizar, potencia, localización, y número de generadores en una red de distribución dada, dicha información es fundamental para la determinación de un posible generador conectado a la red de distribución [13].

Los posibles impactos técnicos que causa la generación distribuida a una red de distribución deben ser evaluados, fundamentalmente el

control de tensiones, sobrecarga en las líneas de distribución y repercusión económica de los mismos [14][15].

Teniendo en cuenta lo antes mencionado, se debe dimensionar de manera correcta el número, ubicación y tamaño de los generadores a colocarse en el sistema de distribución y para esto es necesario el concepto de optimización, que en términos económicos corresponde a la acción de minimizar un costo sin dejar de lado los criterios técnicos del problema, a nivel eléctrico sería la entrega de energía eléctrica al menor costo posible sin afectar criterios técnicos, ambientales y de seguridad del sistema [16].

Al optimizar se intenta minimizar o maximizar algunos de los parámetros que influyen en el problema de optimización [17], para el efecto de esta investigación se contará con algunos criterios de optimización, estos basados en impactos económicos, confiabilidad de la red, integridad del sistema de distribución, límites térmicos de las líneas de distribución y estabilidad de voltaje[18].

En [19] los autores proponen realizar el análisis en el modelo de 13 barras de la IEEE ya que esta cuenta con una serie de características específicas, cargas balanceadas, así como sistemas trifásicos y monofásico, también conserva las características de una red de distribución que generalmente son radiales, además propone la inserción de tres tipos específicos de generación distribuida, motores sincrónicos, turbinas eólicas y paneles fotovoltaicos sin tomar en cuenta si estos son los adecuados para el emplazamiento, además no se consideran incrementos de demanda, [6], por otra parte usa el modelo de 37 barras de la IEEE, el autor plantea una optimización multi-objetivo la cual atiende a consideraciones técnicas y económicas, una de ellas es el impacto del costo de la tarifa al usuario final, no

se considera incrementos de demanda para escenarios futuros.

Con base al estado del arte efectuado, este proyecto se basa en un modelo genérico de la IEEE de 33 buses en el cual se determinará la ubicación óptima de los generadores distribuidos, a fin de regular los voltajes, cumpliendo con la normativa y el límite de cargabilidad de las líneas de transmisión, solo se evaluará el impacto técnico - económico de los generadores distribuidos en las redes de distribución, además cabe recalcar que este es un sistema balanceado y de medio voltaje, los artículos antes mencionados cuentan con diferentes métodos de resolución, pero no usan programación no lineal entera mixta combinada con un incremento de demanda que pruebe la robustez del mismo [20].

El objetivo fundamental del trabajo es determinar los generadores distribuidos tipo, cuyas características técnicas se muestran en los numerales siguientes, los cuales se conectarán a la red de distribución a fin de mantener niveles de voltajes estables dentro de una banda que oscila entre los 0.95 pu y 1.05 pu, considerando para el efecto la cargabilidad de líneas del sistema sin generar un exceso de pérdidas y de esta manera producir energía al menor costo posible.

Para el desarrollo de este tema de investigación, se omite la valoración de recurso energético directamente relacionado con el emplazamiento [8][21].

El artículo plantea una breve explicación de las energías renovables no convencionales, seguido de la formulación matemática usada en la resolución del problema, finaliza mostrando los resultados obtenidos y concluyendo de los mismos.

2. Energías renovables como parte de la generación distribuida

La inserción de un generador renovable no convencional como generador distribuido puede llegar a tener grandes impactos en los sistemas de potencia ya que sus perfiles de generación dependen de las condiciones meteorológicas, al no ser controlables por los operadores del sistema se tiene diferentes afectaciones en los flujos de potencia, estabilidad, perfil de voltaje, niveles de corto circuito y calidad de la energía entregada a los consumidores [22].

Las energías renovables no convencionales (ERNC) son una manera limpia de producir energía ya que su impacto ambiental frente a las maneras tradicionales de generación es menor, como generación distribuida, las energías renovables no convencionales se basan principalmente en la energía eólica y solar, esto dado que se pueden utilizar unidades de baja potencia sin afectar el entorno urbano [19].

2.1. Energía Solar

Los generadores solares tienen como objetivo aprovechar la energía emitida por el sol, dado esto se puede aprovechar la energía térmica y la radiación electromagnética [23].

Bajo el antecedente descrito, los generadores foto voltaicos son aquellos que aprovechan la radiación electromagnética del haz de luz, excitando un material semiconductor dopado. Este tipo generación solar es muy popular en el área urbana, dado que su instalación se puede dar en edificios con azoteas de gran tamaño y otros tipos de edificaciones, además, pueden ser incluso instalados para auto sustentar las edificaciones en las cuales han sido instalados, liberando así esta carga del sistema de distribución.

Así mismo, estos sistemas son también utilizados para la alimentación del alumbrado público que es una carga importante de las redes de distribución, sus campos son múltiples e interesantes a nivel técnico y económico [23].

2.2. Energía eólica

La energía eólica se basa en aprovechar la energía cinética del viento para mover aspas y de esta manera transformar la energía cinética en energía mecánica que a su vez se transforma en energía eléctrica, los micro generadores son muy utilizados en el área residencial para alimentar cargas específicas, así de esta manera liberan cargas de las redes [24].

3. Pérdidas en los sistemas de distribución

Transportar energía eléctrica siempre tendrá pérdidas técnicas, las empresas de distribución intentan minimizar estas pérdidas ya que ellas incurren en impactos económicos [25].

Al hacer circular corriente sobre un material con una impedancia Z , se produce el conocido efecto Joule que no es más que la transformación de energía eléctrica en calor, generándose así las denominadas pérdidas técnicas, dicho efecto es descrito por (1) y (2) [20].

$$P = V * I = Z * I^2 \quad (1)$$

$$E_{perdida} = \int_0^t Z * I^2(t) * dt \quad (2)$$

Los valores de corriente son conocidos ya que se sabe cuanta corriente demanda el sistema, la impedancia corresponderá a la que se asocia a los conductores circulares como se muestra en (3) [26].

$$Z = \frac{1}{\sigma} * \frac{l}{S} \quad (3)$$

Tabla 1: Descripción de los elementos asociados a pérdidas en conductores.

| Nombre | Descripción |
|---------------|---------------------------|
| P | Potencia activa |
| V | Voltaje |
| I | Corriente |
| Z | Impedancia |
| $E_{perdida}$ | Energía pérdida |
| S | Sección del conductor |
| l | Longitud de la línea |
| σ | Resistividad del material |

El valor de σ es un valor dado por el material del cual esta echo el conductor, para el efecto se usan conductores de aluminio con una conductividad eléctrica de 3.78×10^7 $1/m * \Omega$ [26].

En las líneas se tienen también otras perdidas implícitas, para ello podemos analizarlas en el modelo PI, el cual es generalmente analizado en líneas cortas [26].

La resistencia en serie es la que general la mayor parte de las pérdidas por efecto Joule, así que esta es la que mayor peso tiene al momento de cuantificar las pérdidas [10].

4. Formulación matemática para flujos de potencia

Para generar el modelo de optimización para la ubicación de generación distribuida en un sistema de distribución es necesario conocer los conceptos principales del flujo de potencia y de sus variables eléctricas esto con la finalidad de tener una base teórica sobre la cual analizar los escenarios planteados en el presente documento investigativo.

El estudio de los flujos de potencia ayuda a determinar el valor de las magnitudes eléctricas en régimen permanente para un escenario planteado, se tiene en cuenta que el caso de estudio es un sistema balanceado.

La información más relevante que se obtiene está basada en las magnitudes eléctricas como tal, los valores de los voltajes y ángulos de fase de los mismos en cada barra, carga de las líneas de distribución tanto en potencia activa como reactiva, esta información es de vital importancia dado que cada uno de los escenarios que se analicen proyectarán una diferencia significativa frente al anterior, cumpliendo en cada uno con los objetivos de la investigación.

Teniendo como antecedente que las variables eléctricas resultantes del flujo de potencia son de vital importancia para el caso de estudio, es necesario establecer los datos eléctricos del sistema a modelar, es decir, se deben conocer las impedancias de cada una de las líneas, así como de cada una de las cargas implícitas y su co-relación entre ellas por lo cual es necesario plantear una matriz de admitancia conocida también como “Y de bus”.

Para determinar admitancia que se encuentra entre los elementos que se co-relacionan en los buses del sistema se aplican las ecuaciones (4), (5) y (6)[27].

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \cos \phi_{ij} + j|Y_{ij}| \sin \phi_{ij} \quad (4)$$

$$= G_{ij} + jB_{ij}$$

$$B_{ij} = \frac{X}{R^2_{ij} + X^2_{ij}} \quad (5)$$

$$G_{ij} = \frac{R}{R^2_{ij} + X^2_{ij}} \quad (6)$$

Con fines netamente prácticos se puede dividir la matriz de admitancia en la admitancia propia y matriz de admitancia mutua.

La matriz de admitancia mutua se halla a través de la ecuación (7) y que definida como la matriz (8) [27].

$$Y_{in} = -Y_{in} \angle \phi_{in} \quad (7)$$

$$Y_{in} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{in} & \cdots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & 0 & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & 0 & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \cdots & -Y_{in} & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

Mientras que la matriz de admitancia propia queda definida por la ecuación (9) [27].

$$Y_{ii} = - \sum_{j=1}^N -Y_{in} \angle \phi_{in} \quad (9)$$

Con las ecuaciones y matrices parciales antes mencionadas, la matriz de admitancia queda definida por la ecuación (10) y expresada de forma matricial en (11) [27].

$$[Y_{ij}] = [Y_{in}] + [Y_{ii}] \quad (10)$$

$$Y_{ij} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & -Y_{in} & \cdots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & Y_{ii} & -Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -Y_{in} & \ddots & -Y_{in} \\ -Y_{in} & \cdots & -Y_{in} & Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (11)$$

De manera análoga el voltaje en cada uno de los buses queda definido por la ecuación (12) [27].

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| \cos \delta_i + j|V_i| \sin \delta_i \quad (12)$$

Para obtener los flujos de potencia activa y reactiva del sistema en cuestión se debe calcular la inyección de corriente en cada bus, esta inyección de corriente es determinada con la interacción entre la Y de bus o matriz de admitancias y los voltajes de cada uno de los buses, esta interacción se puede apreciar en (13) y (14) [27]

$$\begin{bmatrix} I_{ij} & \dots & I_{ij} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{ij} & \dots & I_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} & -V_n Y_{in} & \vdots \\ \vdots & -V_n Y_{in} & \ddots & -V_n Y_{in} \\ -V_n Y_{in} & \dots & -V_n Y_{in} & V_i Y_{ii} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} I_i &= Y_{11}V_1 + \dots + Y_{in}V_n \\ &= Y_{ii}V_i \\ &\quad + \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n, i \in N \end{aligned} \quad (14)$$

Las ecuaciones (15) y (16) se utilizan en el cálculo de los flujos de potencia, estas muestran de manera general el flujo de potencia activa y reactiva que circula de un bus a otro, estas ecuaciones son la base fundamental que permite determinar los balances de potencia en cada bus[27].

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

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= |Y_{ii}V_i^2| \angle(\phi_{ii}) \\ &\quad + \sum_{n=1}^N |V_i Y_{in} V_n| \angle(\phi_{in} + \delta_n - \delta_i), i \in N \end{aligned} \quad (16)$$

Al realizar el análisis y tratamiento matemático respectivo igualando los componentes reales e imaginarios de la ecuación (16), se deducen las ecuaciones (17) y (18) las cuales permiten obtener de manera individual las potencias activas y reactivas que circulan del bus i hacia los buses próximos[27].

$$P_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik}) \quad (17)$$

$$Q_i(V, \delta) = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik}) \quad (18)$$

Para determinar las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva en cada uno de los buses se usan las ecuaciones (19) y (20) [27].

$$\sum P g_i - \sum P d_i = P_i(V, \delta) \quad (19)$$

$$\sum Q g_i - \sum Q d_i = Q_i(V, \delta) \quad (20)$$

Tabla 2: Descripción de los elementos asociados al balance de potencias.

| Nombre | Descripción |
|---------------|--|
| P_i | Potencia activa de entrada al bus i |
| Y_{ii} | Admitancia del bus i. |
| ϕ_{in} | Angulo entre la admitancia i y la admitancia k |
| Q_i | Potencia reactiva de entrada del bus i |
| V | Voltaje del Bus i. |
| $ V_i $ | Voltaje en el bus i |
| $ V_k $ | Voltaje en el bus k |
| g_{ik} | Ik-esimo elemento de la matriz de conductancia mutua |
| b_{ik} | Ik-esimo elemento de la matriz de suceptancia mutua |
| δ_{ik} | Angulo de voltaje entre el bus i y el bus k |

5. Modelo de optimización

El modelo matemático a ser planteado cuenta con una función objetivo y una serie de restricciones inherentes a la operación de un sistema eléctrico.

El modelo matemático que corresponde a una programación no lineal entera mixta, será resuelto a través de los algoritmos de optimización usados por GAMS, herramienta que se usa para resolver problemas de optimización ya que los solvers son adaptables según.

los algoritmos y las restricciones del sistema.

5.1. Función objetivo

El modelo matemático tiene como objetivo encontrar el costo mínimo de operación del sistema, como se muestra en la ecuación (21).

$$Co = \sum_{i=1}^n Pg_i * Cv_i \quad (21)$$

Tabla 3. Descripción de los elementos asociados a la función objetivo

| Nombre | Descripción |
|--------|--------------------------------------|
| Co | Costo de operación del sistema |
| Pg_i | Potencia del generador i-ésimo |
| Cv_i | Costo variable del generador i-ésimo |
| n | Número máximo de generadores |

5.2. Restricciones

La función objetivo está sujeta a las restricciones de funcionamiento del sistema como son las de balance de potencia, niveles máximos y mínimos de voltaje, potencias máximas de los generadores distribuidos, así como a la decisión de ubicación o no ubicación de generación distribuida.

5.2.1. Restricción de balance de potencia

La potencia activa y reactiva que un nodo entrega al sistema es igual a la potencia activa y reactiva que ingresa a dicho nodo, a esto se le conoce como balance de potencias y en el caso de estudio quedan definidas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sum Pin_i - \sum Pout_i \\ = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| \\ * (g_{ik} \cos \delta_{ik} \\ + b_{ik} \sin \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum Qin_i - \sum Qout_i \\ = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| \\ * (g_{ik} \sin \delta_{ik} \\ - b_{ik} \cos \delta_{ik}) \end{aligned} \quad (23)$$

Tabla 4. Descripción de los elementos asociados al balance de potencias.

| Nombre | Descripción |
|---------------|--|
| Pin_i | Potencia activa de entrada al bus i |
| $Pout_i$ | Potencia activa de salida del bus i |
| Qin_i | Potencia reactiva de entrada del bus i |
| $Qout_i$ | Potencia reactiva de salida del bus i |
| $ V_i $ | Voltaje en el bus i |
| $ V_k $ | Voltaje en el bus k |
| g_{ik} | Ik-esimo elemento de la matriz de conductancia mutua |
| b_{ik} | Ik-esimo elemento de la matriz de suceptancia mutua |
| δ_{ik} | Angulo de voltaje entre el bus i y el bus k |

5.2.2. Restricción de niveles de voltaje

Para el caso de estudio los voltajes máximos y mínimos tolerables están en los valores de 0.95pu y 1.05pu respectivamente [21].

$$Vmin_i \leq V_i \leq Vmax_i \quad (24)$$

5.2.3. Restricción de potencia máxima de las líneas

Una de las restricciones más interesantes de esta investigación

radica en la carga máxima que puede soportar una línea, esta capacidad está dada por su inductancia y capacitancia, así como del nivel de voltaje que circula por la misma, esto se puede apreciar de mejor manera en la ecuación (25) [27].

$$P_{maxl_{ik}} = SIL = \frac{KV_{l-l}^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (25)$$

Tomando en cuenta el cálculo del SIL, la ecuación que restringe la potencia máxima que puede circular por la línea es la siguiente[27].

$$Pl_{ik} \leq 3 * P_{maxl_{ik}} \quad (26)$$

Tabla 5. Descripción de elementos asociados a la potencia máxima de carga de la línea.

| Nombre | Descripción |
|-----------------|--|
| SIL | Surge impedance loading |
| KV_{l-l} | Voltaje fase – fase expresado en miles de voltios (KV) |
| L | Inductancia en serie de la línea |
| C | Capacitancia en derivación de la línea |
| Pl_{ik} | Potencia activa que circula por la línea que va del bus i al bus k |
| $P_{maxl_{ik}}$ | Potencia activa máxima de la línea que va del bus i al bus k |

5.2.4. Restricción binaria

La variable binaria es utilizada por el optimizador para decidir y analizar bus a bus si es óptimo o no colocar un generador distribuido en dicho lugar.

$$Vb_i \in \{0,1\} \quad (27)$$

5.2.5. Restricción de potencia máxima del generador distribuido

Las potencias de los generadores están restringidas ya que al ser una red de distribución y estar cerca de zonas densamente pobladas no es factible ubicar un generador de gran envergadura, con este antecedente las siguientes ecuaciones restringen las potencias máximas y mínimas de los generadores distribuidos, y a su vez determinar los generadores distribuidos que se considerarán para la ubicación óptima en las barras de sistema que se usará de caso de estudio.

$$PGD_i \leq P_{maxGD_i} * Vb_i \quad (28)$$

$$PGD_i \geq P_{minGD_i} * Vb_i \quad (29)$$

$$QGD_i \leq Q_{maxGD_i} * Vb_i \quad (30)$$

$$QGD_i \geq Q_{minGD_i} * Vb_i \quad (31)$$

Tabla 6. Descripción de elementos asociados a la potencia activa y reactiva de los generadores distribuidos.

| Nombre | Descripción |
|---------------|---|
| PGD_i | Potencia activa del generador distribuido en el nodo i |
| P_{maxGD_i} | Potencia activa máxima del generador distribuido en el nodo i |
| P_{minGD_i} | Potencia activa mínima del generador distribuido en el nodo i |
| QGD_i | Potencia reactiva del generador distribuido en el nodo i |
| Q_{maxGD} | Potencia reactiva máxima del generador distribuido en el nodo i |
| Q_{minGD_i} | Potencia reactiva mínima del generador distribuido en el nodo i |
| Vb_i | Variable binaria para cada generador a ser ubicado en el nodo i |

En las ecuaciones descritas se observa como la variable binaria de decisión

entra a formar parte del modelo matemático.

5.2.6. Restricción de unidades de generación

Otra restricción indispensable en el modelo matemático es el número de generadores que pueden entrar en el sistema, esta restricción queda definida por la siguiente ecuación.

$$\sum_{i=1}^n v b_i \leq N_{maxGD} \quad (32)$$

5.3. Escenarios basados en el incremento de la demanda

Al ubicar los generadores distribuidos nos vemos en la obligación de analizar su impacto al menos en corto plazo. Para el caso del presente documento de investigación se ha considerado un incremento demanda del 4% anual al menos por 5 años, teniendo un total de 6 escenarios, este crecimiento está definido por la siguiente ecuación.

$$Pl_s = (Pin + Cd)^{s-1} \quad (33)$$

$$Ql_s = (Qin + Cd)^{s-1} \quad (34)$$

Tabla 7. Descripción de elementos asociados al crecimiento de demanda.

| Nombre | Descripción |
|--------|---|
| Pl_s | Potencia activa de la carga para cada escenario |
| Pin | Potencia activa total de la carga en el periodo 0 (3.715MW) |
| Ql_s | Potencia reactiva de la carga para cada escenario |
| Qin | Potencia reactiva total de la carga en el periodo 0 (2.3MVar) |
| Cd | Crecimiento de la demanda (4%) |
| s | Cantidad de escenarios (6 en total) |

Al aplicar las ecuaciones (32) y (33) se obtienen los siguientes escenarios de incremento de carga.

Tabla 8. Demanda total de cada escenario.

| Escenario | Pdem MW | Qdem MVar |
|-----------|---------|-----------|
| S0 | 3.715 | 2.3 |
| S1 | 3.715 | 2.3 |
| S2 | 3.889 | 2.408 |
| S3 | 4.072 | 2.521 |
| S4 | 4.264 | 2.640 |
| S5 | 4.464 | 2.764 |

6. Procedimiento de resolución

Para resolver el problema de optimización planteado, se utiliza el software GAMS, el cual, tomando los valores iniciales de las magnitudes eléctricas de todos los elementos del sistema dado, resuelve el problema de optimización propuesto anteriormente. GAMS es el encargado de determinar el flujo óptimo de potencia, minimizando el costo de operación del sistema, tomando en cuenta las restricciones del modelo matemático y el incremento de carga que se suscita en cada uno de los escenarios y variando las posiciones y potencias de los generadores distribuidos.

El algoritmo presentado a continuación muestra el procedimiento empleado para la resolución del modelo de optimización propuesto.

Algoritmo de resolución

- Paso 1: Adquiere valores del sistema.
- Paso 2: **Set** Matriz de admitancias
- Paso 3: **Set** Valores iniciales de las variables eléctricas
- Paso 4: Problema de optimización en GAMS
 - Set** Condiciones iniciales
 - Set** variable binaria
 - $v b_i \in \{0,1\}$
 - Set** Restricciones de igualdad

$$\sum P_{in_i} - \sum P_{out_i} = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \cos \delta_{ik} + b_{ik} \sin \delta_{ik})$$

$$\sum Q_{in_i} - \sum Q_{out_i} = \sum_{k=1}^n |V_i| * |V_k| * (g_{ik} \sin \delta_{ik} - b_{ik} \cos \delta_{ik})$$

Set Restricciones de desigualdad

$$\begin{aligned} V_{min_i} &\leq V_i \leq V_{max_i} \\ P_{l_{ik}} &\leq P_{max_{l_{ik}}} \\ PGD_i &\leq P_{maxGD_i} * Vb_i \\ PGD_i &\geq P_{minGD_i} * Vb_i \\ QGD_i &\leq Q_{maxGD_i} * Vb_i \\ QGD_i &\geq Q_{minGD_i} * Vb_i \\ \sum_{i=1}^n Vb_i &\leq N_{maxGD} \end{aligned}$$

Paso 5: Minimización de la función objetivo e ingreso de la GD

$$Co = \sum_{i=1}^n P g_i * C v_i$$

Paso 6: Repetir pasos del 1 – 5 para cada uno de los 5 escenarios con carga incrementada

Paso 7: Análisis de resultados

Paso 8: Fin

7. Caso de estudio

El caso de estudio considera el modelo de 33 buses de la IEEE, esta topología radial es comúnmente usada en el estudio de sistemas de distribución.

Los datos de los parámetros eléctricos del sistema corresponden a los de datos del modelo, entre los más relevantes se puede mencionar los siguientes: niveles de voltajes nominales, potencias de las cargas, configuración de la red e impedancias de las líneas, las siguientes tablas ilustran estos datos.

Para el efecto de poder realizar le flujo óptimo de potencia del sistema hemos

tomado en referencia las siguientes bases, la potencia nominal de 10MVA y el voltaje nominal de 12.66 KV.

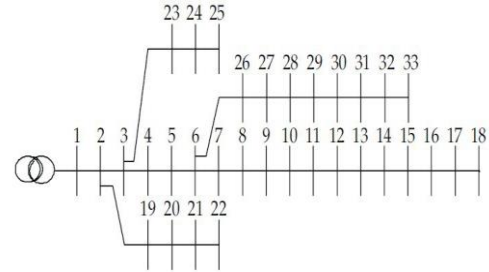


Figura 1. Diagrama del sistema.

Como primer paso del caso de estudio se precede a evaluar si el optimizador está realizando un correcto análisis del sistema. Para el efecto, se realiza una simulación en DigSilent y se comparan los resultados obtenidos con el optimizador, eso da una validación del modelo de optimización, tomado en cuenta que no se aplican las restricciones del modelo sino las inherentes del sistema.

Para el modelo inicial del sistema se toman las siguientes consideraciones: La base de potencia aparente es de 10 MVA.

El voltaje nominal en todas las barras del sistema es de 12.66 kV, teniendo un voltaje máximo y mínimo de 12.03kV y un voltaje máximo de 13.29kV.

El bus uno es considerado bus slack, así el modelo ubicara generadores en distintas barras del sistema según sea óptimo.

Como se puede observar en la tabla 7, se muestran los datos de las líneas o tramos de conexión del sistema mencionado en la figura 1, se ha considerado que el voltaje en todos los tramos es de 12.66 kV y su longitud es de 1 km

Tabla 9. Características eléctricas de las líneas.

| Bini | Bfin | V (kV) | R (p.u) | X(p.u) | Longitud (Km) |
|------|------|--------|---------|---------|---------------|
| 1 | 2 | 12,66 | 0,00575 | 0,00293 | 1 |
| 2 | 3 | 12,66 | 0,03076 | 0,01567 | 1 |
| 3 | 4 | 12,66 | 0,02284 | 0,01163 | 1 |
| 4 | 5 | 12,66 | 0,02378 | 0,01211 | 1 |
| 5 | 6 | 12,66 | 0,0511 | 0,04411 | 1 |
| 6 | 7 | 12,66 | 0,01168 | 0,03861 | 1 |
| 7 | 8 | 12,66 | 0,04439 | 0,01467 | 1 |
| 8 | 9 | 12,66 | 0,06426 | 0,04617 | 1 |
| 9 | 10 | 12,66 | 0,06514 | 0,04617 | 1 |
| 10 | 11 | 12,66 | 0,01227 | 0,00406 | 1 |
| 11 | 12 | 12,66 | 0,02336 | 0,00772 | 1 |
| 12 | 13 | 12,66 | 0,09159 | 0,07206 | 1 |
| 13 | 14 | 12,66 | 0,03379 | 0,04448 | 1 |
| 14 | 15 | 12,66 | 0,03687 | 0,03282 | 1 |
| 15 | 16 | 12,66 | 0,04656 | 0,034 | 1 |
| 16 | 17 | 12,66 | 0,08042 | 0,10738 | 1 |
| 17 | 18 | 12,66 | 0,04567 | 0,03581 | 1 |
| 2 | 19 | 12,66 | 0,01023 | 0,00976 | 1 |
| 19 | 20 | 12,66 | 0,09385 | 0,08457 | 1 |
| 20 | 21 | 12,66 | 0,02555 | 0,02985 | 1 |
| 21 | 22 | 12,66 | 0,04423 | 0,05848 | 1 |
| 3 | 23 | 12,66 | 0,02815 | 0,01924 | 1 |
| 23 | 24 | 12,66 | 0,05603 | 0,04424 | 1 |
| 24 | 25 | 12,66 | 0,0559 | 0,04374 | 1 |
| 6 | 26 | 12,66 | 0,01267 | 0,00645 | 1 |
| 26 | 27 | 12,66 | 0,01773 | 0,00903 | 1 |
| 27 | 28 | 12,66 | 0,06607 | 0,05826 | 1 |
| 28 | 29 | 12,66 | 0,05018 | 0,04371 | 1 |
| 29 | 30 | 12,66 | 0,03166 | 0,01613 | 1 |
| 30 | 31 | 12,66 | 0,0608 | 0,06008 | 1 |
| 31 | 32 | 12,66 | 0,01937 | 0,02258 | 1 |
| 32 | 33 | 12,66 | 0,02128 | 0,03319 | 1 |

potencias activas expresadas en kW y sus potencias reactivas expresadas en kVAr así como sus voltajes mínimos y máximos.

Tabla 10. Características eléctricas de las cargas.

| Bus | Vn (kV) | Vmin (kV) | Vin (kV) | Vmax (kV) | Pload (kW) | Qload (kVAr) |
|--------------|---------|-----------|----------|-----------|-------------|--------------|
| 1 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 0 | 0 |
| 2 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 100 | 60 |
| 3 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 4 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 120 | 80 |
| 5 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 30 |
| 6 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 7 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 200 | 100 |
| 8 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 200 | 100 |
| 9 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 10 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 11 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 45 | 30 |
| 12 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 35 |
| 13 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 35 |
| 14 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 120 | 80 |
| 15 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 10 |
| 16 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 17 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 18 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 19 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 20 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 21 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 22 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 40 |
| 23 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 90 | 50 |
| 24 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 420 | 200 |
| 25 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 420 | 200 |
| 26 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 25 |
| 27 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 25 |
| 28 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 20 |
| 29 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 120 | 70 |
| 30 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 200 | 600 |
| 31 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 150 | 70 |
| 32 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 210 | 100 |
| 33 | 12,66 | 12,03 | 12,66 | 13,29 | 60 | 40 |
| Total | | | | | 3715 | 2300 |

El modelo matemático está diseñado para ubicar generación en puntos específicos según la necesidad del sistema, ya que este está considerado en la hora más crítica de consumo de la carga, tomando en cuenta que este abastecimiento sea lo más económico posible sin dejar de lado ninguno de los lineamientos técnicos planteados y establecidos en el modelo realizado.

En la tabla 8 se pueden observar las características eléctricas de las cargas conectadas a cada uno de los buses, sus

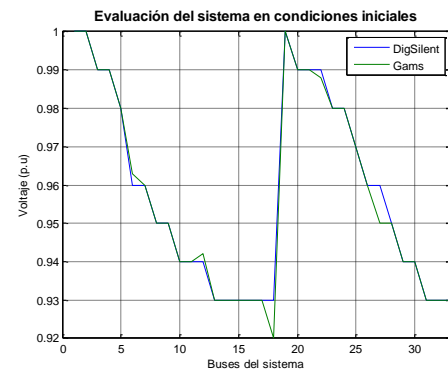


Figura 2: Condiciones iniciales del sistema.

Como se puede observar en la figura 2, el optimizador permite correr el flujo de potencia y los valores arrojados son

muy similares a los de DigSilent, esto da la certeza de que puede efectuar las simulaciones para el modelo planteado.

Una vez comprobado la eficiencia del optimizador, se procede a resolver el problema de optimización, para el efecto, las unidades de generación distribuida son consideradas como mini generadores así que sus potencias oscilan entre los 2MW y 5MW.

Tabla 11: Generadores tipo.

| Generador tipo | Pmax (kW) | Pmin (kW) | Qmax (kVAR) | Qmin (kVAR) | Costo (\$/MWh) |
|----------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------------|
| Fotovoltaico | 2000 | 0 | 657 | -657 | 0,25 |
| Eolico | 5000 | 0 | 1600 | -1600 | 0,3 |

8. Análisis de resultados

Una vez avalado que el GAMS permite obtener el flujo de potencia, se procedió a resolver el modelo matemático planteado, obteniéndose los resultados correspondientes, los cuales se analizarán en la presente sección.

8.1. Ubicación de generación distribuida

Teniendo como referencia el sistema en condiciones iniciales y con las consideraciones técnicas antes mencionadas, se procede a resolver el modelo matemático de optimización, mediante programación no lineal entera mixta, con la finalidad de obtener el menor costo de operación del sistema, determinándose a su vez la ubicación óptima de los generadores distribuidos a ser incorporados en el modelo de prueba.

Como resultado de la optimización para los diferentes escenarios de carga, se obtiene la ubicación de los generadores distribuidos como se

puede apreciar en la tabla 9, el optimizador analizó y determinó en cada escenario la ubicación óptima de las unidades de generación.

Tabla 12. Ubicación óptima de generación distribuida.

| Bus | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 |
|------------|----|----|----|----|----|
| B3 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B18 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| B21 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| B24 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B30 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| B33 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

La potencia de generación de las unidades despachadas se muestra en la tabla 10.

Tabla 13. Potencia de generación de las unidades despachadas.

| Bus | P(MW) S1 | P(MW) S2 | P(MW) S3 | P(MW) S4 | P(MW) S5 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| B3 | 0,000 | 1,728 | 1,813 | 1,472 | 1,544 |
| B18 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,599 | 0,627 |
| B21 | 0,689 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| B24 | 1,607 | 0,907 | 0,950 | 0,999 | 1,045 |
| B30 | 1,177 | 0,993 | 1,041 | 1,218 | 1,276 |
| B33 | 0,283 | 0,299 | 0,311 | 0,000 | 0,000 |
| Total | 3,756 | 3,927 | 4,114 | 4,289 | 4,493 |

8.2. Perfiles de voltaje

Como se puede observar en la figura 3, los voltajes siempre están por encima de los niveles regidos por la normativa, los cuales fueron parte de las restricciones del sistema.

Los perfiles de voltaje de las condiciones iniciales del sistema no cumplen con la normativa internacional en sus barras más alejadas, sin embargo, a través del ingreso de los generadores distribuidos se convierte en una solución adecuada para este problema, ya que los niveles de voltaje están dentro del rango preestablecido.

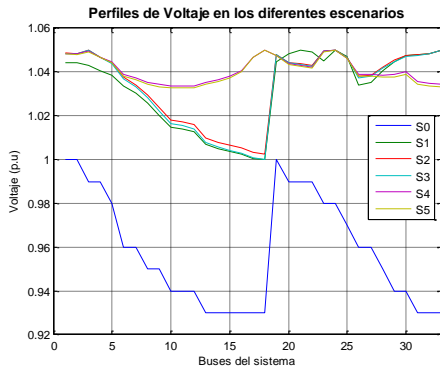


Figura 3. Perfil de voltaje de los buses.

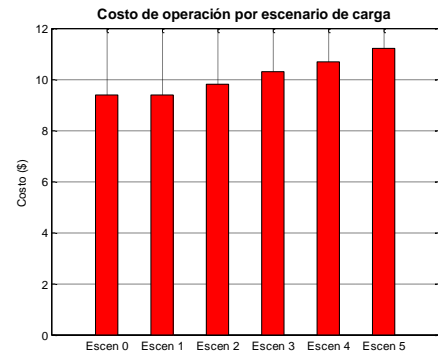


Figura 4. Costos variables por escenario de carga.

8.3. Pérdidas en el sistema

En la tabla 11 se muestran los valores de generación y demanda para cada uno de los escenarios, la diferencia de estos valores da el valor de las pérdidas técnicas del sistema, estas quedan expresadas en MW y en un valor porcentual respecto de la potencia de demanda.

Tabla 14. Potencias activas de generación, demanda y pérdidas del sistema.

| Escenario | P generada (MW) | P demanda (MW) | Pérdidas (MW) | Pérdidas (%) |
|-----------|-----------------|----------------|---------------|--------------|
| S0 | 3,8700 | 3,7150 | 0,1550 | 4,172% |
| S1 | 3,7560 | 3,7150 | 0,0410 | 1,104% |
| S2 | 3,9270 | 3,8896 | 0,0374 | 0,961% |
| S3 | 4,1140 | 4,0724 | 0,0416 | 1,021% |
| S4 | 4,2890 | 4,2638 | 0,0252 | 0,591% |
| S5 | 4,4930 | 4,4642 | 0,0288 | 0,645% |

Como se observa en los resultados, con la incorporación de la generación distribuida, las pérdidas se reducen, minimizando de forma implícita el costo a usuario final.

8.4. Costos de operación por escenario de carga

Cada uno de los escenarios de carga se ve afectado por el incremento de demanda, en la siguiente figura se observa cómo ha ido variando el costo en cada uno de los escenarios, tomando en cuenta que este es el costo óptimo para dicho escenario.

9. Conclusiones

Los mini o micro generadores son las opciones más acertadas al momento de poner generación distribuida en un sistema radial, dado que dan la facilidad de efectuar una inversión razonable de capital en varios puntos del sistema, mejorando así aspectos técnicos inherentes a la operación del sistema.

La inserción de generación distribuida mejora significativamente los perfiles de voltaje y con esto disminuye las pérdidas técnicas que el sistema presenta, aspecto que conlleva implícitamente a la reducción del costo de generación y por ende a una minimización en la tarifa a usuario final.

Como se mencionó previamente los generadores distribuidos pueden ser de energías renovables no convencionales, esto además de tener los beneficios técnicos, disminuye el impacto ambiental que otras tecnologías producen.

Cabe recalcar que debe haber un límite de generadores distribuidos, esto con el afán de que su inserción no tenga efectos adversos en la estabilidad del voltaje del sistema, de igual manera este exceso puede conllevar a que no se cargue de una manera adecuada las líneas y se esté sub utilizando su capacidad dimensionada, lo antes mencionado podría conllevar a un

análisis interesante para trabajos futuros.

La investigación planteada demuestra que la inyección de generación distribuida en una red de distribución es una decisión eficiente, confiable, segura, ambiental y económicamente sustentable.

GAMS es una herramienta informática muy poderosa cuando de optimización se trata, un correcto planteamiento del problema y un contraste adecuado de los términos de referencia dan como resultado un análisis adecuado del sistema a ser optimizado.

10. Referencias

- [1] E. Hossain, E. Kabalci, R. Bayindir, and R. Perez, "Microgrid testbeds around the world: State of art," *Energy Convers. Manag.*, vol. 86, pp. 132–153, 2014.
- [2] V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 246–256, 2015.
- [3] J. V. Canto Dos Santos, I. F. Costa, and T. Nogueira, "New genetic algorithms for contingencies selection in the static security analysis of electric power systems," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 6, pp. 2849–2856, 2015.
- [4] S. R. Gampa and D. Das, "Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 66, pp. 25–40, 2015.
- [5] K. Zhou, S. Yang, Z. Chen, and S. Ding, "Optimal load distribution model of microgrid in the smart grid environment," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, pp. 304–310, 2014.
- [6] P. Dehghanian, S. H. Hosseini, M. Moeini-Aghtaie, and A. Arabali, "Optimal siting of DG units in power systems from a probabilistic multi-objective optimization perspective," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 51, pp. 14–26, 2013.
- [7] W. Guan, Y. Tan, H. Zhang, and J. Song, "Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 68, pp. 210–221, 2015.
- [8] C. Ma, P. Kaufmann, J. C. T??bermann, and M. Braun, "Optimal generation dispatch of distributed generators considering fair contribution to grid voltage control," *Renew. Energy*, vol. 87, pp. 946–953, 2016.
- [9] A. Bagheri, H. Monsef, and H. Lesani, "Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 73, pp. 56–70, 2015.
- [10] R. Rajaram, K. Sathish Kumar, and N. Rajasekar, "Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG)," *Energy Reports*, vol. 1, pp. 116–122, 2015.
- [11] D. Q. Hung, N. Mithulananthan, and K. Y. Lee, "Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for

- minimizing energy loss,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 179–186, 2014.
- [12] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, “Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 226–235, 2016.
- [13] M. H. Moradi and M. Abedini, “A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 66–74, 2012.
- [14] M. Rahmani-Andebili, “Simultaneous placement of DG and capacitor in distribution network,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 131, pp. 1–10, 2016.
- [15] V. Vita, T. Alimardan, and L. Ekonomou, “The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks’ Voltage Profile and Energy Losses,” *2015 IEEE Eur. Model. Symp.*, pp. 260–265, 2015.
- [16] K. Y. Liu, W. Sheng, Y. Liu, X. Meng, and Y. Liu, “Optimal siting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 69, pp. 430–440, 2015.
- [17] S. M. Elsayed, R. A. Sarker, and D. L. Essam, “A new genetic algorithm for solving optimization problems,” *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 27, pp. 57–69, 2014.
- [18] S. Kansal, V. Kumar, and B. Tyagi, “Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 53, no. 1, pp. 752–760, 2013.
- [19] A. M. Abd-rabou, A. M. Soliman, and A. S. Mokhtar, “Impact of DG different types on the grid performance,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 149–160, 2015.
- [20] A. Bayat, A. Bagheri, and R. Noroozian, “Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 77, pp. 360–371, 2016.
- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std 1250 - IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems*, vol. 2011, no. March, 2011.
- [22] A. Ulbig and G. Andersson, “Analyzing operational flexibility of electric power systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 72, pp. 155–164, 2015.
- [23] J. G. Hernández-Travieso, C. M. Travieso, J. B. Alonso, and M. K. Dutta, “Solar radiation modelling for the estimation of the solar energy generation,” *2014 7th Int. Conf. Contemp. Comput. IC3 2014*, pp. 536–541, 2014.
- [24] C. A. Ramos-Robles and A. Irizarry-Rivera, “Development of Eolic generation under economical uncertainty,” *2004 Int. Conf. Probabilistic Methods Appl. to Power Syst.*, vol. 681, pp. 711–716, 2004.
- [25] R. Viral and D. K. Khatod, “An analytical approach for sizing and siting of DGs in balanced radial distribution networks for loss minimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol.

- 67, pp. 191–201, 2015.
- [26] A. M. García, “Evaluación del impacto de la generación distribuida en la operación y planificación de las redes de distribución eléctrica,” p. 192, 2006.
- [27] William D. Stevenson, *análisis_de_sistemas_electricos_de_potencia_stevenson_.pdf*, Segunda. Mexico DF., 1975.

10.1. Estado del arte

| DATOS | | TEMÁTICA | | | | FORMULACION DEL PROBLEMA | | | | RESTRICCIONES DEL PROBLEMA | | | | PROPUESTA PARA RESOLVER EL PROBLEMA | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | | | | | | | |
|-------|------|--|-------|------------------|---------------|--|-----------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|--------------------|--------|--------|-------------------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------|------------------------|----------------|--------------------|------------------------|---------------------|------------------------|-----------------------|---|
| ITEM | AÑO | TÍTULO DEL ARTÍCULO | CITAS | Ubicación optima | Tamaño optimo | Impacto de GD Energía renovables no convencionales | Redes de distribución | Minimización de pérdidas | Ubicación de GD | Minimización de costos | Flujos de potencia | Costos | Tamaño | Flujos de potencia | Potencia activa y reactiva | Cargabilidad de líneas | Crecimiento de la demanda | Ubicación optima de GD | Swan Algoritmo | Algoritmo genético | Ubicación optima de GD | Tamaño optimo de GD | Estabilidad de voltaje | Rendimiento de la red | |
| 1 | 2014 | Microgrid testbeds around the world: State of art | 73 | | | | ☒ | | | | | | | ☒ | | | | | | | | | | | ☒ |
| 2 | 2015 | Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth | 35 | ☒ | | | ☒ | | ☒ | | | | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | | | | ☒ | ☒ | ☒ | |
| 3 | 2015 | New genetic algorithms for contingencies selection in the static security analysis of electric power systems | 6 | | | ☒ | | | | | ☒ | | | ☒ | ☒ | | ☒ | | | ☒ | | | | | ☒ |
| 4 | 2015 | Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load | 27 | ☒ | ☒ | | ☒ | | ☒ | | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | | | ☒ | | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | |
| 5 | 2014 | Optimal load distribution model of microgrid in the smart grid environment | 33 | | | | ☒ | | | | | | | | | | ☒ | | | | | | | | ☒ |
| 6 | 2013 | Optimal siting of DG units in power systems from a probabilistic multi-objective optimization perspective | 44 | ☒ | | | ☒ | | ☒ | | | | | ☒ | ☒ | | | ☒ | | | | ☒ | | | ☒ |
| 7 | 2015 | Distribution system feeder reconfiguration considering different model of DG sources | 18 | | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | | | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | | | | ☒ | | | ☒ |
| 8 | 2016 | Optimal generation dispatch of distributed generators considering fair contribution to grid voltage control | 3 | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | ☒ | | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | | | | | | ☒ | ☒ |
| 9 | 2015 | Integrated distribution network expansion planning incorporating distributed generation considering uncertainties, reliability, and operational conditions | 24 | ☒ | ☒ | | ☒ | ☒ | ☒ | | | ☒ | | ☒ | ☒ | | ☒ | | | ☒ | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|------|--|-----------|----|---|---|---|----|---|----|---|---|----|----|---|---|---|---|--|----|---|---|----|---|---|---|
| 10 | 2015 | Power system reconfiguration in a radial distribution network for reducing losses and to improve voltage profile using modified plant growth simulation algorithm with Distributed Generation (DG) | 23 | | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ | ✘ | | | ✘ | | | | ✘ | | ✘ | | | | |
| 11 | 2014 | Optimal placement of dispatchable and nondispatchable renewable DG units in distribution networks for minimizing energy loss | 55 | ✘ | | | ✘ | | ✘ | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | ✘ | | | | ✘ | | | ✘ | | |
| 12 | 2016 | Hybrid approach for optimal placement of multiple DGs of multiple types in distribution networks | 17 | ✘ | ✘ | | ✘ | | | | | | ✘ | ✘ | | | ✘ | | | | ✘ | | | ✘ | | |
| 13 | 2012 | A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems | 476 | ✘ | ✘ | | | ✘ | | ✘ | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | | | |
| 14 | 2016 | Simultaneous placement of {DG} and capacitor in distribution network | 3 | | | | | ✘ | | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | | | | | | ✘ | | |
| 15 | 2015 | The Impact of Distributed Generation in the Distribution Networks' Voltage Profile and Energy Losses | 3 | | | | ✘ | | ✘ | | | | ✘ | ✘ | | | | ✘ | | | | | | ✘ | | |
| 16 | 2015 | Optimal siting and sizing of DGs in distribution system considering time sequence characteristics of loads and DGs | 9 | ✘ | ✘ | | | | ✘ | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | |
| 17 | 2014 | A new genetic algorithm for solving optimization problems | 71 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✘ | | |
| 18 | 2013 | Optimal placement of different type of DG sources in distribution networks | 109 | ✘ | | | ✘ | | | ✘ | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | ✘ | | | ✘ | | |
| 19 | 2016 | Optimal siting and sizing of distributed generation accompanied by reconfiguration of distribution networks for maximum loss reduction by using a new UVDA-based heuristic method | 11 | ✘ | ✘ | | | | ✘ | | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | | | ✘ | ✘ | | |
| 20 | 2011 | IEEE Std 1250 - IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ✘ | |
| 21 | 2013 | Analyzing Operational Flexibility of Power Systems | 47 | | | | | ✘ | ✘ | | | | ✘ | | | ✘ | ✘ | | | | | | | | | |
| 22 | 2015 | Impact of DG different types on the grid performance | 1 | | | | ✘ | | ✘ | | ✘ | | | | ✘ | ✘ | | | | | | | | | ✘ | |
| 23 | 2014 | Solar radiation modelling for the estimation of the solar energy generation | 2 | | | | | ✘ | | | | | ✘ | | ✘ | | | | | | | | | | ✘ | |
| 24 | 2004 | Development of Eolic generation under economical uncertainty | 4 | | | | | ✘ | | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | | | | | | ✘ | |
| 25 | 2015 | An analytical approach for sizing and siting of DGs in balanced radial distribution networks for loss minimization | 34 | ✘ | ✘ | | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | | | | ✘ | ✘ | |
| 26 | 2006 | Evaluación del impacto de la generación distribuida en la operación y planificación de las redes de distribución eléctrica | | | | | | ✘ | | ✘ | | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | ✘ | | | | | | | | ✘ | ✘ | ✘ |
| 27 | 1975 | Análisis de sistemas eléctricos de potencia | | | | | | | | ✘ | | | | ✘ | | | | | | | | | | | | |
| | | | CANTIDAD: | 12 | 7 | 7 | 7 | 17 | 8 | 12 | 3 | 6 | 11 | 22 | | 5 | 3 | | | 13 | 7 | 6 | 15 | | | |

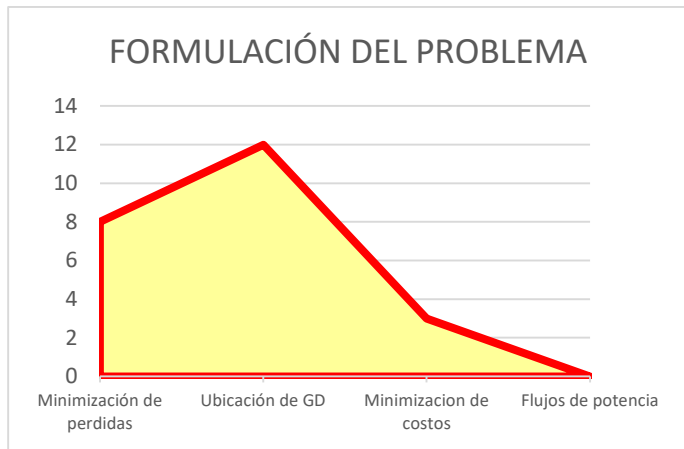


Figura 5: Indicadores de estado del arte - formulación de problema.

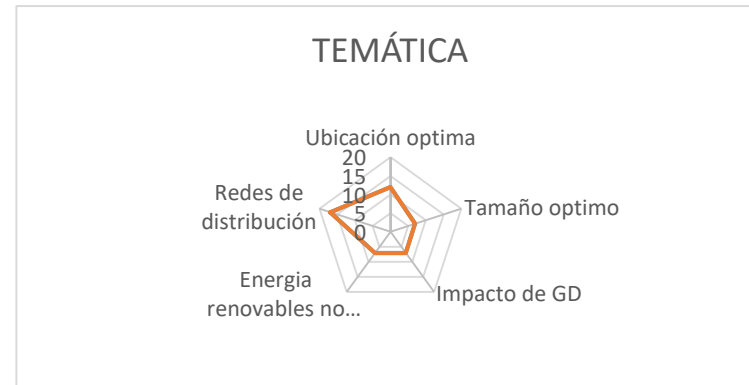


Figura 6: Indicadores de estado del arte - Temática

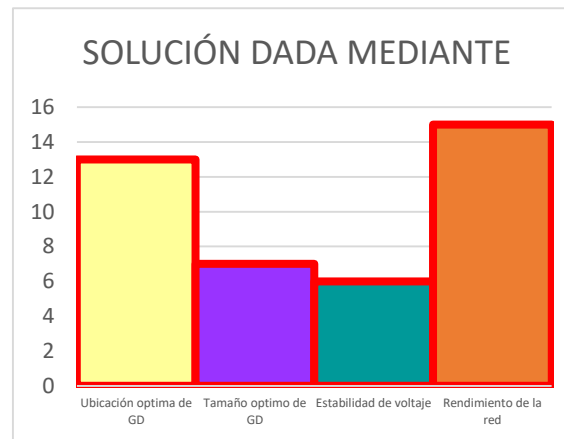


Figura 7: Indicadores de estado del arte - Solución dada mediante.