

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Planeamiento de expansión de los sistemas de distribución eléctrica mediante el uso de un algoritmo voraz

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

Autor:

Bryam Remigio León Brabo

Director:

Santiago Patricio Torres Contreras

ORCID:  0000-0002-8803-6811

Cuenca, Ecuador

2023-06-09

Resumen

Una adecuada planificación de un sistema de distribución de energía eléctrica es crucial para garantizar que los consumidores serán provistos de una energía de calidad. A lo largo del siglo pasado y en comienzos del presente, la planificación de los sistemas de distribución se realizaba de forma rudimentaria, sin métodos de solución matemáticos. Paulatinamente la planeación de la expansión de sistemas de distribución usando métodos de optimización ha ofrecido resultados eficaces y confiables. Mediante el presente artículo se presenta una innovadora alternativa de expansión de sistemas de distribución mediante el uso de algoritmos de búsqueda local y solución aleatoria. El método aplicado ha generado resultados eficaces que han sido validados en un sistema de distribución de 54 nodos.

Palabras clave: corriente alterna, metodología iterativa, sistema de distribución radial, software Julia



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

An adequate planning of an electric power distribution system is crucial to ensure that consumers will be provided with quality energy. Throughout the last century and the beginning of the present one, distribution system planning was carried out in a rudimentary manner, without mathematical solution methods. Gradually, the planning of distribution system expansion using optimization methods has offered effective and reliable results. This article presents an innovative alternative for distribution system expansion through the use of local search algorithms and random solution. The applied method has generated effective results that have been validated in a 54-node distribution system.

Keywords: alternating current, iterative methodology, Julia software, radial distribution system



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Nomenclatura	7
1. Introducción	10
2. Formulación Matemática	11
2.1. Flujo de potencia AC	11
2.2. Herramienta computacional	14
2.3 Algoritmos voraces	15
3. Metodología	15
4. Resultados	18
5. Análisis de resultados	21
6. Conclusiones y recomendaciones	21
Referencias	23

Índice de figuras

Figura 1 Notación radial de los sistemas de distribución, imagen referencial de (Mieth & Dvorkin , 2018).....	12
Figura 2 Semejanza entre el software Julia y Matlab	14
Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo voraz	16
Figura 4 Diagrama de flujo para adición de barras candidatas	17
Figura 5 Representación del sistema de prueba	19
Figura 6 Resultado de la expansión del sistema de distribución.....	20
Figura 7 Convergencia del algoritmo	20

Índice de tablas

Tabla 1 Tipo de Conductores disponibles	19
Tabla 2 Adición de barras candidatas al sistema existente	20

Nomenclatura

Conjuntos

Γ Grafo que representa topología del sistema de distribución.

B1 Diccionario que contiene los datos de las barras existentes en la red de distribución.

L1 Diccionario que contiene los datos de las líneas existentes en la red de distribución.

G1 Diccionario que contiene los datos de los generadores existentes en la red de distribución.

B2 Diccionario que contiene los datos de las barras candidatas en la red de distribución.

L2 Diccionario que contiene los datos de las líneas candidatas en la red de distribución.

Índices

k Barras existentes y barras candidatas.

r, c, a Características barras.

f, t Líneas existentes y líneas candidatas.

u Generadores existentes y generadores candidatos.

Funciones

U Optimización para flujo óptimo AC de redes de distribución.

F Función objetivo para problema de expansión.

Parámetros

λ Número total de barras candidatas.

ω Total ramas candidatas.

d_p^i Demanda de potencia activa en barra i.

d_Q^i Demanda de potencia reactiva en barra i.

v^i Voltaje en barra i.

v_L^i Voltaje mínimo permitido en barra i.

v_i^i Voltaje máximo permitido en barra i.

g_p^i Generación de potencia activa en barra i.

g_Q^i Generación de potencia reactiva en barra i.

θ_i^L Mínima potencia activa generada barra generadora.

μ_i^L Mínima potencia reactiva generada barra generadora.

θ_i^U Máxima potencia activa generada barra generadora.

μ_i^U Máxima potencia reactiva generada barra generadora.

f_k^P Flujo de potencia activa en la barra i.

f_k^Q Flujo de potencia reactiva en la barra i.

R_f^t Resistencia de la línea ft.

X_f^t Reactancia de la línea ft.

S_f^t Capacidad de corriente de la línea ft.

β_i Costo generación potencia activa barra generadora.

γ_i Costo generación potencia reactiva barra generadora.

δ_i Barras hijas de la barra i

Vectores

χ Vector que cuenta con las barras existentes.

Φ Vector que cuenta con las líneas existentes.

u Vector que cuenta con los generadores existentes.

F Vector que cuenta con las barras candidatos.

ρ Vector que cuenta con las líneas candidatos.

v Vector que cuenta con los generadores candidatos.

Variables flujo de potencia

v Voltaje en barra.

f_p Flujo de potencia real en barra.

f_q Flujo de potencia reactiva en barra.

g_p Generación de potencia real en barra.

g_q Generación de potencia reactiva en barra.

Parámetros algoritmo voraz

τ Costo de inclusión de rama candidata a sistema.

α Variable binaria de decisión de inclusión de rama candidata a sistema.

n Numero de etapas por iteración.

ρ Número de iteraciones a realizar el algoritmo.

κ Número de barras candidatas agregados al sistema de distribución.

Φ Barra seleccionada para agregar a la red de distribución

Y Vector de orden de los barras candidatas agregados a la red.

Σ Vector de orden de las líneas candidatas agregados a la red.

Ψ Matriz de barras adicionadas en todas las iteraciones.

Θ Matriz de líneas adicionadas en todas las iteraciones.

1. Introducción

Una planificación óptima de la expansión de los sistemas de distribución es fundamental para garantizar que los consumidores puedan contar con un servicio que ofrezca características enfocadas en: calidad, seguridad, y confiabilidad. Según (Vahidinasab, y otros, 2017), definen a la expansión de un sistema de distribución expresándolo como un proceso que busca encontrar la mejor ruta de conexión entre las subestaciones existentes y cargas proyectadas del sistema de distribución.

Existen varios enfoques que pueden determinar la dirección de la planificación, dependiendo de las necesidades requeridas. Sin embargo, todos tienen la misma función: suplir la demanda en presente y futuro de todos los consumidores, cumpliendo con todas las restricciones requeridas por la institución reguladora, optimizando recursos de: construcción, mantenimiento y pérdidas del sistema.

Se puede encontrar una gran variedad de alternativas para diseñar una planificación de expansión, destacando el uso de algoritmos voraces, métodos heurísticos, y modelos matemáticos. Por ejemplo(Porkar, Poure, & Saadate, 2011), consideran las siguientes alternativas para un planeamiento exitoso: ampliar la capacidad de las subestaciones existentes, construir nuevas subestaciones, mejora de alimentadores existentes y construcción de nuevos alimentadores. Mientras tanto, autores como (Rana, y otros), exponen muchas de las ventajas que se pueden obtener a partir de una planificación correcta, resaltando las ventajas económicas, técnicas, y ambientales.

En ocasiones se puede utilizar metodologías inéditas para la expansión, tal como en (Bosisio, y otros, 2020) , que presenta un plan de expansión de sistemas de distribución en condiciones normales y en contingencia basado en la utilización de GIS. El uso de una combinación de la triangulación de Launay con una programación lineal entera no mixta es implementado en esta referencia, enfocado principalmente en la instalación de nuevas subestación y repotenciación de las existentes.

La metodología expuesta en (Hoang, Marinus, Bosman, & La Poutre) diseña una combinación de varios algoritmos evolutivos para obtener un modelo exitoso, enfocándose en búsquedas locales y topologías de redes de tipo bucle abierto. También en (Gomes ,

Giraldo, & Castro, 2022) sugiere que la mejora de subestaciones y alimentadores son claves para evitar futuros desperfectos que pueden aparecer en la red.

Varios estudios (Lavorato, Rider, Garcia, & Romero, 2010), (Faia, Canizes, Faria, & Vale, 2019), (Alvarez -Herault, Dib, Ionescu, & Raison, 2022), y (Wang & Jing, 2022) adaptan índices de sensibilidad a las metodologías propuestas, con el objeto de garantizar la demanda a los consumidores, optimizando costos. Las mismas implementan programación no lineal, específicamente algoritmos genéticos y búsquedas locales

Con la incursión de nuevas tecnologías dentro de los sistemas de distribución, se comenzó a incluir la generación distribuida en la expansión de los sistemas de distribución. Las referencias (Xing, Hong, & Sun, 2018), y (Picard, Aguado, Cobos, Fuster-Roig, & Quijano-Lopez, 2021) exponen ventajas ambientales y económicas al implementar dichas opciones.

El presente artículo propone la expansión de un sistema de distribución mediante el uso de un algoritmo voraz de búsqueda local iterativo. El mismo es validado en un sistema de 54 nodos; la estructura establecida del presente artículo considera las siguientes secciones: formulación matemática, metodología, resultados, análisis de resultados, conclusiones y recomendación

2. Formulación Matemática

2.1. Flujo de potencia AC

Mediante la resolución de flujo de potencia AC se puede comprobar la convergencia de un sistema de distribución candidato a la expansión. (Mieth & Dvorkin, 2018), presentan la formulación del flujo de potencia óptimo AC para redes de distribución que es implementado en la metodología del presente trabajo.

Se observa que en (Mieth & Dvorkin, 2018) representa a la red de distribución como un grafo, constituido por nodos y ramas, como se observa en la siguiente formulación: $\Gamma(B,L)$. Donde: Γ representa la red de distribución, B representa las barras y L indica las líneas del sistema de distribución respectivamente.

El flujo óptimo de potencia AC que es implementado requiere solamente redes radiales, por lo cual resulta imperativo clasificar a las barras para verificar la topología de la red. Aquellas barras que cuenten con una subestación, son denominadas barras raíces, y las cuales solamente tengan consumidores son llamadas barras no raíces.

Con el objeto de verificar la radialidad, se emplea una configuración maestro-esclavo en la topología, donde las barras raíces y no raíces son los maestros, y esclavos respectivamente. Posteriormente, se caracteriza a los elementos del sistema. Cada barra cuenta con su demanda neta: activa y reactiva, representada por d_P^i y d_Q^i , respectivamente, donde: $i \in B$; todas las barras poseen un voltaje $v^i \in [v_L^i, v_U^i]$, donde: $i \in \Gamma$ en el cual v_L^i y v_U^i representan el límite mínimo y máximo de voltaje permitido. Adicionalmente, todas las barras raíces tienen una generación de potencia activa y reactiva representados por g_P^i y g_Q^i respectivamente, en el cual: $g_P^i \in [g_{Pu}^i, g_{PL}^i]$ y $g_Q^i \in [g_{Qu}^i, g_{QL}^i]$ son los intervalos de máxima y mínima potencia activa y reactiva generada respectivamente. El flujo activo y reactivo de potencia se representa mediante f_P^i y f_Q^i , donde: $i \in B$. Cada línea del sistema de distribución cuenta con su propia resistencia R_f^t , reactancia X_f^t , y capacidad máxima de conducción S_f^t donde: $f, t \in B$. La notación se observa en la figura número uno

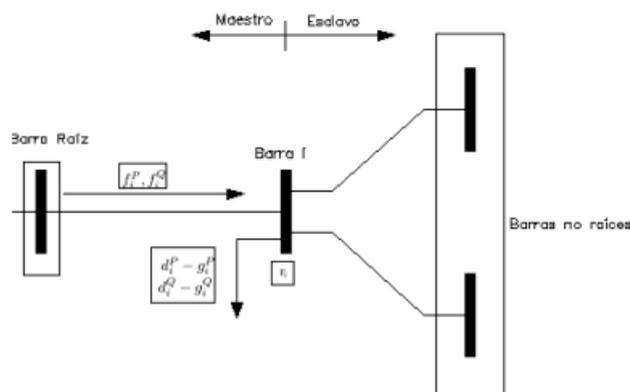


Figura 1 Notación radial de los sistemas de distribución, imagen referencial de (Mieth & Dvorkin , 2018)

El cálculo del flujo de potencia basado en (Ortiz, 2014) es construido mediante un problema de optimización, una vez comprobada la radialidad del sistema, procede a la formulación de la función objetivo, la misma que busca minimizar el costo de generación de las subestaciones mientras supe la demanda de las barras raíces y no raíces, representada en la siguiente ecuación:

$$U = \sum_{i=1}^{\lambda} gp_i * \beta_i + \sum_{i=1}^{\lambda} gq_i * \gamma_i \quad (1)$$

Sujetos a las siguientes restricciones:

1. \forall Barras raíces:

$$\theta_i^L \leq gp_i \leq \theta_i^U \quad (2)$$

$$\mu_i^L \leq gq_i \leq \mu_i^U \quad (3)$$

2. \forall Barras no raíces:

$$gp_i = 0 \quad (4)$$

$$gq_i = 0 \quad (5)$$

3. \forall Barras:

$$d_i^P - gp_i + \sum_{c=1}^{\delta_i} fp_i = fp_i \quad (6)$$

$$d_i^Q - gq_i + \sum_{c=1}^{\delta_i} fq_i = fq_i \quad (7)$$

$$v_i^L \leq v_i \leq v_i^U \quad (8)$$

4. \forall Líneas:

$$S_f^t \geq fp_i^2 + fq_i^2 \quad (9)$$

Las ecuaciones 2-3 representan los límites de generación activa y reactiva en todas las barras raíces; mientras tanto, las ecuaciones 4-5 restringen la generación de potencia en las barras no raíces. Las ecuaciones 6-8 vigilan el cumplimiento del balance del flujo de potencia activa, reactiva, y niveles de voltaje en cada barra.

Finalmente la ecuación 9 evita que se sobrepase la capacidad de corriente de las líneas. Para el diseño del planeamiento del sistema de distribución propuesto se plantea un problema de optimización, con la finalidad de minimizar costos de construcción de líneas. La función objetivo es formulada en la siguiente ecuación:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{\omega} (\alpha_i * \tau_i) \quad (10)$$

Donde: α_i representa una variable binaria, tomando el valor de 1 si la rama candidata i es agregada al sistema, caso contrario, su valor es 0 si aquella rama no es agregada al sistema i no se agrega al sistema; τ_i representa el costo de cada rama candidata i .

La ecuación 10 está sujeta a una sola restricción, la variable α_i puede tomar el valor de 1 si y solo si el flujo óptimo AC del sistema converge al agregar la rama candidata i al sistema de distribución, mediante el cumplimiento de la ecuación 1, sujeto a las restricciones en las ecuaciones 2-9.

2.2. Herramienta computacional

La planificación propuesta es elaborada mediante un algoritmo computacional, implementado en el ambiente Julia. Se puede definir a Julia como un ambiente de programación de código abierto y de alto rendimiento, dinámico, con una sintaxis amigable para el usuario. Presenta una gran similitud con el software Matlab, tradicionalmente utilizado para la resolución de problemas de optimización. En la siguiente figura se puede observar la similitud entre los dos programas mencionados:

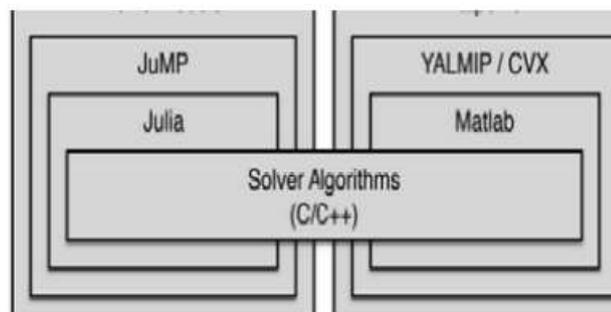


Figura 2 Semejanza entre el software Julia y Matlab

(Dunning , Huchette , & Lubin), evidencian que Julia es una herramienta efectiva para resolver problemas de optimización. Julia emplea el uso de un paquete llamado JuMP para la resolución de este tipo de problema. Este paquete permite que los problemas sean resueltos mediante una gran variedad de "solvers", cada solver variará dependiendo de la clase de problema a solucionar, siendo los más utilizados los de tipo: lineal [LP], no lineal [NLP], y programación no lineal entera mixta [MINLP].

Se emplea Julia como una herramienta para la resolución de las ecuaciones 1, y 10 cumpliendo con todas las restricciones requeridas para cada función objetivo respectivamente.

La resolución de los problemas de optimización propuestas se ejecuta mediante el solver Ipopt, un solver eficaz para problemas de optimización no lineal [NLP].

2.3 Algoritmos voraces

Mediante la inclusión de algoritmos voraces como herramienta para solucionar problemas de optimización, se ha conseguido obtener soluciones más efectivas y precisas. El trabajo expuesto en (Armijos Toro, 2015) cataloga a esta clase de algoritmos como una vía ideal para resolución de estos problemas, basándose en su estructura simple.

(Armijos Toro, 2015) Define a los algoritmos voraces como metodologías para la resolución de problemas matemáticos, ideales para la implementación de problemas de optimización. Estos algoritmos destacan por su capacidad de toma de decisiones en el momento, sin considerar sus posibles consecuencias.

Los algoritmos voraces basan su efectividad en la estrategia de seleccionar la mejor decisión en cada etapa, sin considerar las anteriores o las siguientes. A partir de este comportamiento basan su efectividad, pues, al tomar la decisión correcta en cada etapa, esta desencadenará en una solución óptima global.

Existen varias clases de algoritmos voraces que son empleados tomando en consideración el problema a resolver. Se escribió en (Armijos Toro, 2015) los más utilizados, resaltando a los algoritmos voraces de búsqueda local y los algoritmos de generación de soluciones voraces aleatorias los cuales son utilizados para resolver el problema planteado en el presente artículo.

3. Metodología

El problema de expansión propuesta es resuelto mediante la implementación de un algoritmo voraz, utilizando un método de búsqueda local y generación de respuestas aleatorias. El algoritmo basa su funcionamiento en (Ortiz, 2014), ejecutándose un número fijado de iteraciones, determinada de manera empírica en esta ocasión, cada iteración cuenta con n etapas en cada iteración, en cada etapa se adiciona una barra o más barras candidatas al sistema de distribución. Para conectar la barra candidata seleccionada al sistema de distribución existente en cada etapa se selecciona la mejor ruta de construcción de líneas candidatas, continuando hasta que todas las barras candidatas sean conectadas al sistema de distribución existente.

Cada etapa evalúa la construcción de la mejor ruta para la conexión de la barra candidata al sistema de distribución existente basando su elección en la ecuación 10. Una vez seleccionada una ruta se comprueba que la selección sea válida, verificando que el flujo de potencia AC descrito en las ecuaciones 1 y 9 converja con la nueva barra y nueva ruta agregada.

En caso de no ser factible una alternativa la iteración es desestimada, por otra parte, si está es factible en todas sus etapas, la topología final es almacenada en un vector solución de n filas. En el siguiente diagrama de flujo se observa el proceso a seguir en la presente planificación.

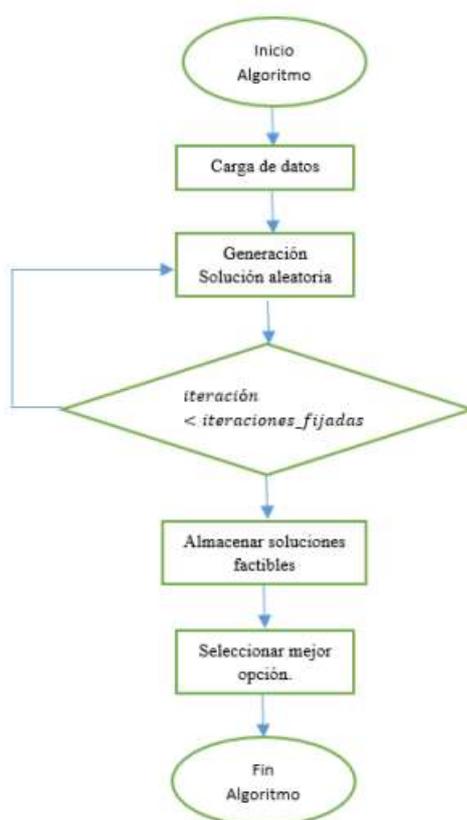


Figura 3 Diagrama de flujo del algoritmo voraz

La codificación del problema consiste en la carga de datos de barras, líneas, y subestaciones existentes y candidatas mediante formato CSV.files. Mediante el uso del paquete DATAFRAME, los datos son organizados en diccionarios, siendo utilizados para el cálculo del flujo óptimo de potencia AC.

En el diccionario de barras existentes y candidatas se almacenan los siguientes parámetros: demanda de potencia real kW y reactiva kVAR, rango de voltajes V pu; los diccionarios de las

líneas candidatas poseen los parámetros de: barra de origen, barra de destino, resistencia $\frac{\Omega}{\text{km}}$, inductancia $\frac{\Omega}{\text{km}}$, capacidad de corriente A, longitud Km y costo $\frac{\$}{\text{km}}$. Adicionalmente cada barra raíz cuenta con un diccionario para las subestaciones existentes, en el cual se encuentran los datos de: barra de ubicación, máxima potencia activa generada MW, máxima potencia reactiva generada MVAR, costo de generación $\frac{\$}{\text{MW}}$.

A partir de la carga de todos los datos requeridos por el algoritmo, la ejecución del algoritmo inicia, cuando este finalice se arrojará un vector de soluciones que contendrá las soluciones factibles de la expansión del sistema de distribución. Mediante el software Julia se recorre todas las soluciones factibles y selecciona la opción menos costosa, dando por terminado el planteamiento. A continuación se describe diagrama de flujo implementado para el algoritmo.

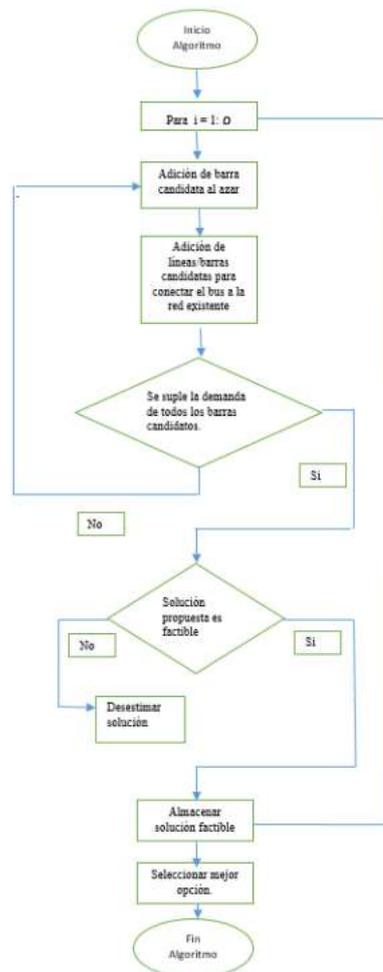


Figura 4 Diagrama de flujo para adición de barras candidatas

El algoritmo implementado se describe en el siguiente pseudocódigo:

Algoritmo 1: Pseudocódigo para un algoritmo de búsqueda local

```
1: Cargar:  $B_1, L_1, G_1, B_2, L_2$ 
2: Para  $i = 1$  to  $\rho$  Hacer
3:   Comienzo
4:   Para  $i = 1$  to  $n$  Hacer
5:     Inicio
6:     Escoger una barra candidato aleatoriamente de  $B_2$ 
7:     Si Barra seleccionada  $\in$  Sistema Entonces
8:       Ir a Inicio
9:     Terminar Si
10:    Escoger mejor ruta unir Barra candidata a Sistema
11:    Si Converge Flujo Óptimo de potencia nuevo sistema Entonces
12:      Continuar hacia la siguiente etapa
13:    Caso contrario
14:      Ir hacia Comienzo
15:    Terminar Si
16:  Terminar Para
17:  Guardar orden adición Barras y Lineas
18: Terminar Para
19: Evaluar todas las soluciones factibles
20: Seleccionar la opción mas barata
```

4. Resultados

Una vez explicado el proceso a seguir para el planeamiento de la expansión, se verifica su validez mediante la simulación de la expansión de un sistema de distribución, utilizado en el caso uno de (Ortiz, 2014).

El sistema a simular es un sistema de distribución a un nivel de voltaje de 28kV monofásico, constituido por dieciocho barras existentes, de los cuales dos son barras raíces, y las restantes pertenecen al grupo de las barras no raíces; adicionalmente el sistema de distribución existente está formado por dieciséis líneas de distribución.

El planeamiento comprende la expansión del sistema aumentando el número de barras, hasta obtener un total de cincuenta y cuatro barras, cincuenta barras no raíces y cuatro barras raíces. En la siguiente figura se observa el sistema a simular, las barras raíces son representados por un cuadro, mientras que las barras no raíces se representan con círculos.

Las barras existentes están marcados con color rojo, mientras que las barras a instalar tienen un color negro; las líneas existentes en el sistema son dibujados con color azul, y las líneas candidatas se observan con un color negro.

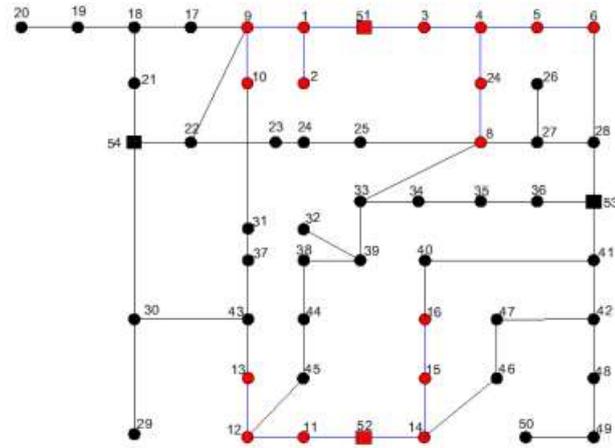


Figura 5 Representación del sistema de prueba

Con la finalidad de obtener un análisis completo del sistema de expansión, se ha optado por incluir ocho tipos de conductores que pueden adaptar las líneas candidatas a construir. Cada tipo de conductor se diferencia en su resistencia, inductancia, capacidad de corriente, y costo de instalación. Dichos datos son mostrados en la siguiente tabla.

Tabla 1 Tipo de Conductores disponibles

Tipo	$R \frac{\Omega}{\text{km}}$	$x \frac{\Omega}{\text{km}}$	[A]	$\frac{\$}{\text{km}}$
1	0.36	0.25	556	70
2	0.29	0.24	680	100
3	0.23	0.24	773	110
4	0.19	0.22	866	120
5	0.18	0.12	1175	135
6	0.14	0.12	1385	150
7	0.11	0.12	1546	160
8	0.09	0.11	1732	180

Para la simulación del problema planteado se fijó un número de iteraciones de ciento sesenta veces, y cada iteración contará como máximo con un número de treinta y cuatro etapas. En las siguientes figuras se ilustran los resultados obtenidos en la simulación. En la figura 6 se muestra la topología obtenida, y en figura 7 se observa el costo en cada iteración realizada.

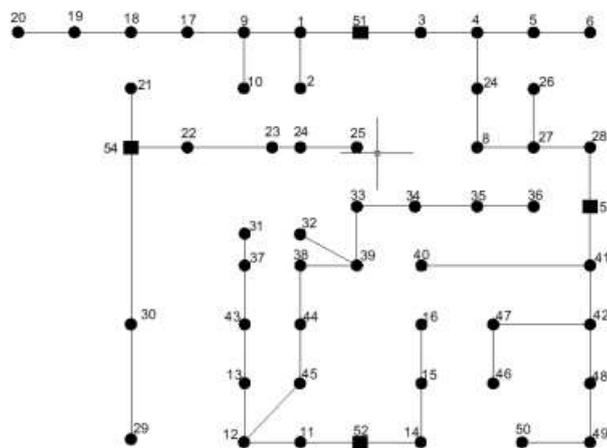


Figura 6 Resultado de la expansión del sistema de distribución

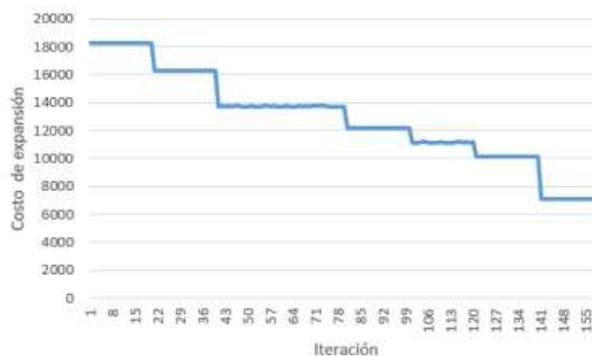


Figura 7 Convergencia del algoritmo

Como se mencionó en la sección 2-C, el algoritmo implementado en la simulación, considera de mucha importancia el orden de adición de cada una de las barras candidatas al sistema de distribución. La misma que se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 2 Adición de barras candidatas al sistema existente

Nro.	Barras			
1-4	53	54	20	19
5-8	18	17	35	34
9-12	33	39	38	44
12-16	45	41	30	26
17-20	27	37	43	36
21-24	23	22	32	28
25-28	46	47	42	25
29-32	24	21	31	29
33-36	48	49	40	50

5. Análisis de resultados

Finalizada la simulación del sistema de expansión, mediante un computador Lenovo Intel i7, 2.60GHz, 33GB RAM, se consiguieron las siguientes observaciones:

1. Las primeras barras agregados son las barras candidatas raíces, ya que estas funcionan como generadores. Con su inclusión se brinda un mayor número de rutas de construcción para tener una mayor probabilidad de éxito.
2. El tiempo de ejecución total del algoritmo es de un aproximado de once minutos, sin embargo, no puede ser definido como corto o largo debido a que no existe un tiempo base definido en las referencias consultadas. Sin embargo, mediante algún algoritmo de filtrado de alternativas mediante vecindarios sería posible reducir el tiempo de cálculo.
3. El costo total de la expansión del sistema de distribución es de 7095,98 dólares; los conductores seleccionados para la expansión son de calibre tipo 1. Comparando los resultados con (Ortiz, 2014), en donde el costo de expansión es de 7633,39 dólares, se obtiene un ahorro de 7.05 %.
4. Mediante la ejecución del algoritmo se observa que el orden de adición de las barras y líneas candidatas altera el costo final de la expansión del sistema. Es menester evaluar la mayor cantidad de alternativas de soluciones posibles.

6. Conclusiones y recomendaciones

Se implementó una novedosa metodología que aún no ha sido explorada para el planeamiento de expansión de sistemas de distribución, en la cual la solución cumple con todos los requerimientos deseados. Los hallazgos más importantes se describen a continuación:

1. Al implementar un algoritmo voraz de búsqueda local y soluciones aleatorias, se utiliza un proceso diferente al normalmente utilizado por los algoritmos voraces usados en las referencias. En este caso se requiere un mayor número de posibles soluciones, e iteraciones a realizar el algoritmo, ya que este tipo de algoritmo voraz solamente analiza cada etapa, pudiendo llegar a caer en una solución óptima local.
2. El planeamiento propuesto es solamente para sistemas de distribución con una topología tipo radial, la misma que se ha logrado en el sistema propuesto gracias a la inclusión de los dos barras raíces candidatas, proveyendo un mayor número de alternativas de expansión.
3. En el presente caso de estudio opta por no estudiar la cargabilidad de cada barra raíz, solamente analiza el estudio de la búsqueda de la opción menos costosa para la

expansión del sistema; sin embargo, mediante el cálculo de flujo de potencia AC de las redes de distribución propuestas se pudo corroborar que el sistema convergerá correctamente, respetando las restricciones

4. Normalmente en el uso de algoritmos voraces de selección aleatoria no influye el orden de selección de las variables, sin embargo, en este proceso se pudo observar que efectivamente el orden altera el resultado final. Se puede explicar gracias a la aparición de nuevas rutas que puede tomar el sistema al agregar primero una barra u otra, brindando al problema nuevas alternativas de solución.
5. Julia ha resultado una herramienta computacional eficaz y oportuna para poder resolver problemas de optimización no lineales. Es eficaz al momento de brindar un entorno amigable con el usuario y una sintaxis muy parecida a los lenguajes de programación más utilizados en la industria.
6. Debido a la inclusión de nuevas tecnologías de generación distribuida dentro de los sistemas de distribución, se ha observado que la radialidad puede ser omitida por la presencia de flujos de potencia bidireccionales.
7. Es importante considerar en un futuro sistemas de distribución con una topología de tipo bucle abierto, el cual puede garantizar un sistema radial de distribución, en caso de operación normal o de contingencia del sistema

Referencias

- Alvarez -Herault, M.-C., Dib, J.-P., Ionescu, O., & Raison, B. (2022). *Long-Term Planning of Electrical Distribution Grid: How Load Uncertainty and Flexibility Affect the Investment Timing*. Hugo Morais.
- Armijos Toro, L. M. (2015). *Diseño e implementación de un modelo matemático de optimización para la conformación de equipos de trabajo*. Quito: Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Bosisio, A., Berizzi, A., Amaldi, E., Bovo, C., Morotti, A., Greco, B., & Iannarelli, G. (2020). *A GIS-bases approach for high-level distribution networks expansion planning in normal and contingency operation considering reliability*. Porto: 21st Power Systems Computation Conference.
- Dunning, I., Huchette, J., & Lubin, M. (s.f.). *JuMP: A modeling language for mathematical optimization*. SIAM Review, vol. 59, no. 2, pp. 295–320, 2017.
- Faia, R., Canizes, B., Faria, P., & Vale, Z. (2019). *Distribution Network Expansion Planning Considering the Flexibility Value for Distribution System Operator*. Porto: Institute of Engineering- Polytechnic of Porto.
- Gomes, L. L., Giraldo, J. S., & Castro, C. A. (2022). *A Bi-level Model for the Resilient Operation of Distribution Systems using a Matheuristic Nested Decomposition*. Campinas: School of Electrical and Computing Engineering, University of Campinas.
- Hoang, N. L., Marinus, O. G., Bosman, P. A., & La Poutre, H. (s.f.). *Medium-Voltage Distribution Network Expansion Planning with Gene-pool Optimal Mixing Evolutionary Algorithms*. Amsterdam: Center for Mathematics and Computer Science.
- Lavorato, M., Rider, M. J., Garcia, A. V., & Romero, R. (2010). *A constructive Heuristic Algorithm for Distribution System Planning*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 25 NO3.
- Mieth, R., & Dvorkin, Y. (2018). *Data- Driven Distributionally Robust Optimal Power Flow for Distribution Systems*.
- Ortiz, J. M. (2014). *Planeamiento Multi-Etapa coordinado de sistemas de distribución de energía eléctrica usando un algoritmo de búsqueda tabú*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pererira.
- Picard, J. L., Aguado, I., Cobos, N. G., Fuster-Roig, V., & Quijano-Lopez, A. (2021). *Electric Distribution System Planning Methodology Considering Distributed Energy Resources: A contribution towards Real Smart Grid Deployment*. Branislav Hredzak.
- Porkar, S., Poure, P., & Saadate, S. (2011). *Distribution system planning considering integration*. France: GREEN-Université Henri Poincaré Nancy.
- Rana, H. A., Mokryaini, G., Rajamani, H., Aghaei, J., Nikman, T., & Prashan. (s.f.). *Operation and Planning of Distribution Networks with integration of Renewable Distributed Generators Considering Uncertainties: A Review*. Shiraz University of Technology.
- Rossi, M., Rossini, M., Viganò, G., Migliavacca, G., Siface, D., Fifer, I., . . . Bakken, I. (2021). *Planning of distribution networks considering flexibility of local resources: how to deal with transmission system services*. Milan: Cired 2021 Conference Paper 973.

- Vahidinasab, V., Tabarzadi, M., Arasteh, H., Alizadeh, M., Sheikhzadeh, H., Mehran, K., & Sepaspian, M. (2017). *Overview of Electric Energy Distribution Networks Expansion Planning*. Tehran: Department of Electrical Engineering Abbaspour School of Engineering.
- Valencia, A., Hincapie Ricardo, & Gallego, R. (202). *Optmial Planning of Secondary Power Distribution Systems Considering Renewable and Storage Sources: An Energy Management Approach*. Colombia: Instituto Tecnologico Metropolitano.
- Wang, D., Ochoa, L., & Harrison, G. (2009). *Expansion planning of distribution networks considering uncertainties*. In Proceedings of the Universities Power Engineering Conference.
- Wang, Q., & Jing, M. (2022). *Multi-Stage Expansion Planning of Distribution Network Considering Distributed Power Generation*. Front. Energy Res.
- Xing, H., Hong, S., & Sun, X. (2018). *Active Distribution Network Expansion Planning Considering Distributed Generation Integration and Network Reconfiguration*. Shanghai: Shangai University of Electric Power.