



REVISTA INGENIO

Localización óptima de equipos de regulación de voltaje y compensación de reactivos para alimentadores de medio voltaje, mediante algoritmos evolutivos

Optimal location of voltage regulation equipment and reactive compensation for medium voltage feeders, through evolutionary algorithms

Carlos Carreño | Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

Juan Avilés | Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recepción: 07/02/2022

Aceptación: 18/04/2022

PALABRAS CLAVE

Optimización, redes de distribución, genético diferencial, regulación de voltaje.

RESUMEN

En la actualidad, la regulación de voltaje en las redes de distribución tiene un rol importante para el crecimiento económico de un país y progreso humano, dado que una buena calidad de servicio eléctrico entregado a los usuarios finales provoca un efecto directo en la productividad de las industrias, la educación, salud, servicios de comunicación y abastecimiento de agua potable. En este artículo se plantea una solución a corto plazo al problema de bajo voltaje en redes de media tensión, con el ingreso óptimo de equipos de regulación de voltaje por medio de un algoritmo genético en Matlab que evaluará los parámetros eléctricos de la red, antes y después de instalar los equipos de compensación, cumpliendo con la regulación vigente Arconel 005/18 en el sector eléctrico ecuatoriano.

KEY WORDS

Optimization, distribution networks, differential genetics, voltage regulation.

ABSTRACT

Currently, voltage regulation in distribution networks plays an important role in the economic growth of a country and human progress, given that a good quality of electrical service delivered to end users has a direct effect on the productivity of the industries, education, health, communication services and drinking water supply. This article proposes a short-term solution to the problem of low voltage in medium voltage networks, with the optimal input of voltage regulation equipment through a genetic algorithm in Matlab that will evaluate the electrical parameters of the network before and after to install the compensation equipment, complying with the current regulation Arconel 005/18 in the Ecuadorian electricity sector.

I. INTRODUCCIÓN

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica hoy en día, tienen el gran desafío de controlar y corregir los parámetros eléctricos del sistema de distribución, dado al aumento anual de la demanda, provocado por el progreso humano y crecimiento económico del país [1]. Uno de los objetivos principales de las empresas distribuidoras de energía, es suministrar un servicio público de energía eléctrica que satisfaga las necesidades del consumidor final sin comprometer la calidad del servicio brindado, que sea confiable, seguro y adecuado, cumpliendo con los estándares de calidad vigentes en las regulaciones [1][2].

Sin embargo, los efectos indeseables que surgen durante la operación normal del sistema eléctrico, como la caída de tensión, se ven afectados por la longitud eléctrica de la línea y las fluctuaciones de las cargas, lo que provoca grandes pérdidas económicas a los usuarios finales [3]. Para mitigar los problemas de voltaje hay que reconfigurar la red realizando transferencias de carga a otra red o reforzando el sistema de distribución con la instalación de equipos como bancos de condensadores fijos o controlados, transformadores de potencia con cambiadores de taps (OLTC) y reguladores automáticos de voltaje,

considerando la ubicación de forma estratégica debido al alto costo de inversión [4][5].

Si bien se han realizado esfuerzos para mejorar la tensión mediante el balanceo de carga (reconfiguración de red), instalación de bancos de condensadores y repotenciación del alimentador de media tensión, todavía no es posible cumplir con la regulación Arconel 005/18 en algunas zonas del alimentador de media tensión «La Guayaquil» correspondiente a la Corporación Nacional de Electricidad regional Guayas-Los Ríos, el cual presenta problemas de estabilidad de voltaje en el cantón Balzar, por contener gran cantidad de estaciones de bombeo y piladoras [3] [6].

El presente trabajo científico presenta un algoritmo genético diferencial para mejorar la calidad de servicio eléctrico de un alimentador de media tensión mediante la instalación óptima de equipos de regulación de voltaje y de compensación de reactivos a lo largo de la línea [7]. El analista definirá la cantidad de equipos y la capacidad de los equipos a instalar en la red, el modelo de optimización planteado considerará en la evaluación de cada alternativa la función objetivo, la cual es reducir la desviación de voltaje del sistema.

REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

En el artículo [8] para mitigar los problemas de bajo voltaje en la red de distribución y mantener los parámetros eléctricos en los límites establecidos por los estándares ANSI, colocan en operación varios bancos de capacitores a lo largo de un alimentador para reducir la pérdida de potencia. Sin embargo, si se dimensionan e instalan adecuadamente a lo largo del alimentador, los capacitores se pueden utilizar para mejorar el factor de potencia en la subestación de distribución y regular el voltaje en el alimentador, aumentando el margen de voltaje del sistema.

Normalmente, los capacitores se instalan en alimentadores de distribución cuando el nivel de voltaje se reduce en la barra principal de la subestación de distribución en el periodo de demanda máxima. Los capacitores brindan niveles de voltaje aceptables a los clientes en todo el alimentador evitando la necesidad del ingreso de generación a la red en el periodo de máxima carga. La relación costo/beneficio, dependerá de las características de la carga del alimentador.

En [9] se propone emplear un método de optimización basado en MGA (algoritmo microgenético) y FL (lógica difusa) para dimensionar, ubicar y operar los bancos de capacitores en las redes de distribución. Para mejorar la calidad de servicio eléctrico se toma en cuenta la precisión y tiempo de ejecución en la obtención de resultados óptimos por parte del algoritmo.

El algoritmo FL evalúa todos los nodos de la red inicial para determinar qué barra es la adecuada para instalar los bancos de capacitores con base en la función objetivo (reducción de pérdidas), reduciendo el número de soluciones viables. El algoritmo MGA encuentra la solución óptima evaluando y seleccionando cada cromosoma dando como resultado el número, capacidad y tipo de operación del capacitor.

En el artículo [7] se propone una metodología para mejorar la calidad del servicio eléctrico en las redes de distribución de tipo radial. Tomando en cuenta los equipos de compensación y regulación de voltaje instalados, se realiza un controlador neuronal para definir la operación de los bancos de capacitores y los taps de los reguladores de voltaje, para optimizar la red minimizando las pérdidas de energía de todo el circuito de distribución bajo la condición de que los voltajes de las barras se encuentren dentro de los límites estándares (+/- 5% del nominal).

Los datos de entrada del algoritmo controlador son las mediciones de P, Q y/o V en las barras, y la salida son los estados de conmutación óptimos del capacitor y posiciones de toma de reguladores de voltaje correspondientes a un patrón de carga del sistema eléctrico.

El método presentado en [10] consiste en determinar la ubicación óptima de los reguladores de voltaje en el sistema, resolviendo un problema de optimización multiobjetivo que considera la minimización de las pérdidas de potencia activa y la desviación de tensión en el periodo de máxima demanda.

Para la optimización multiobjetivo se utiliza un algoritmo microgenético, capaz de encontrar soluciones que representen las mejores combinaciones posibles entre los objetivos. Estas soluciones constituyen el llamado conjunto óptimo de Pareto. La solución óptima de Pareto no se puede mejorar en ningún objetivo sin empeorar otro.

Las soluciones no dominadas por ninguna otra forman el denominado frente de Pareto. El tomador de decisiones (un ingeniero en nuestro caso) puede elegir cualquiera de las soluciones del frente de Pareto según criterios económicos o técnicos. Normalmente el frente de Pareto se utiliza para ese propósito, ya que la representación gráfica de estas soluciones indica claramente el tipo de compensaciones logradas.

El suministro de energía de media tensión se basará en la optimización de enjambre del proyecto (PSO) para reducir la potencia y la pérdida de energía, así como para mejorar la distribución de voltaje en el sistema de distribución de energía.

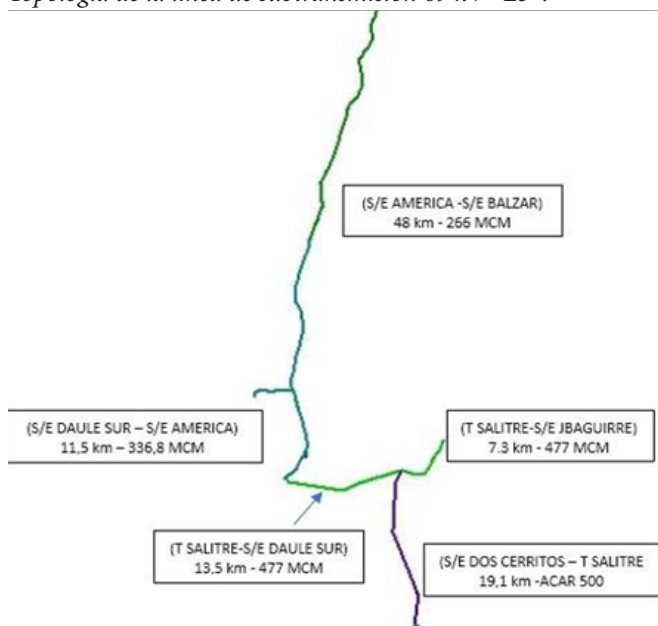
Tabla 1.

Voltaje L-L de servicio en alta tensión en las subestaciones en demanda máxima

Subestación	KM	KV A-B	KV B-C	KV C-A
Dos Cerritos	0	68,85	69,47	68,43
T Salitre	19,418	65,6	65,4	65
JBA	26,76	65,5	65,3	64,9
Daule Norte	36,98	63	62,8	62,4
América	49,431	61,9	61,8	61,3
Santa Lucía	51,141	60,9	60,8	60,3
Laurel	55,388	60,4	60,3	59,9
Palestina	62,698	59,8	59,6	59,2
Balzar	92,143	58,6	58,5	58,1

Figura 1.

Topología de la línea de subtransmisión 69 kV «L5».



DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la línea de subtransmisión L5 está compuesta por cuatro diferentes calibres de conductor (477ACSR, 500ACAR, 366,8ACSR y 266ACSR) dando como resultado una longitud eléctrica total de 93 km desde la s/E Dos Cerritos hasta la s/E Balzar, como se observa en la figura 1 (ver Figura 1). La línea de subtransmisión L5 energiza a 8 subestaciones de distribución con una capacidad instalada total de 110 MVA, presentando una demanda máxima de 45 MVA en el periodo de 13h00 a 15h00.

Debido al calibre, longitud y aumento de consumo de reactivos en la LST L5, existe una caída de tensión significativa en la línea, provocando malestares a los usuarios finales por bajo voltaje e incumpliendo con la regulación de calidad 005/18. En la figura 2 se muestran los voltajes de servicio a nivel de 69 kv en demanda máxima a lo largo de la línea de subtransmisión L5 (ver Figura 2). En la

Figura 2.

Perfil de voltaje de la línea de subtransmisión de 69 kV «L5»

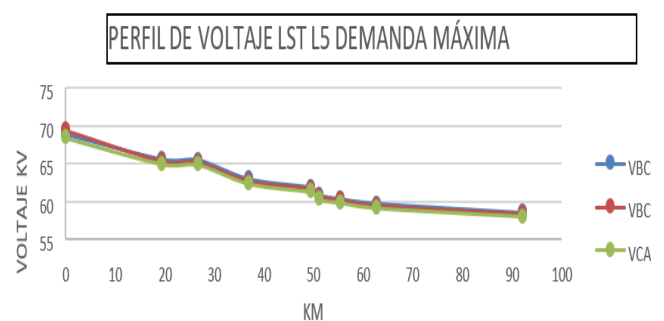


tabla 1 se muestran los voltajes de servicio de cada subestación de distribución en demanda máxima (ver Tabla 1).

En la tabla 2 se muestra el voltaje de servicio en barra principal a 13,8 kv de cada subestación de distribución, verificando que los voltajes se encuentran fuera de la banda de regulación permitida por la regulación Arconel 005/18 desde la s/E Daule norte hasta la s/E Balzar. Además, hay que recalcar que la posición de los taps de los transformadores de potencia que conforman la L5 se encuentran en posición 5 (máxima regulación) (ver Tabla 2).

Como consecuencia del bajo voltaje de servicio, surgen múltiples reclamos por desconexiones abruptas, debido a la actuación de las protecciones de bajo voltaje en las industrias, y por no poder hacer uso de cocinas de inducción en horas de máxima demanda.

Debido a los serios problemas presentados en este sistema, se propone mejorar la red de distribución a corto

Tabla 2.

Voltaje L-L de servicio en media tensión en las subestaciones en demanda máxima

Subestación	KM	KV A-B	KV B-C	KV C-A
JBA	26,76	13,3	13,3	13,3
Daule Norte	36,98	13,1	13,1	13,1
América	49,4	12,9	12,9	12,9
Santa Lucía	51,14	12,7	12,7	12,7
Laurel	55,38	12,6	12,6	12,6
Palestina	62,69	12,6	12,6	12,6
Balzar	92,1	13,1	13,1	13,1

Figura 3.

Topología eléctrica del alimentador La Guayaquil



plazo del alimentador de media tensión La Guayaquil de la subestación de distribución 69/13,8 kv Balzar, la cual tiene una longitud total de 30 km de troncal con configuración radial. La misma está conformada con varios calibres de conductor de aluminio desnudo con calibres ACSR 266, 8; 4/0; 1/0 y # 2. El alimentador tiene un total de 242,86 km de línea que entregan energía eléctrica a 3358 abonados del cantón Balzar.

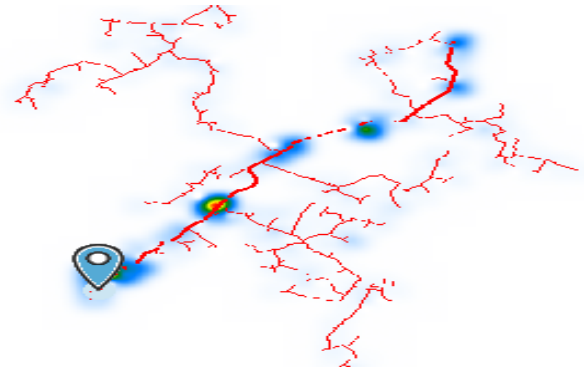
En la figura 3 se observa la topología de la red del alimentador La Guayaquil. El alimentador es un 20% urbano y un 80% rural, tomando la carga de la vía El Empalme (ver Figura 3).

La mayor concentración de carga en el alimentador La Guayaquil se encuentra en la parte urbana del cantón Balzar, y es de tipo residencial. La carga industrial se encuentra a las afuera de Balzar, conformada por las estaciones de bombeo y empresas emparadoras de alimentos, como se observa en la gráfica de densidad de carga de la figura 4 (ver Figura 4).

En la figura 5 se muestra el perfil de voltaje del alimentador La Guayaquil en el periodo de demanda máxima. Se observa que el voltaje de servicio se encuentra por debajo del límite inferior permitido por la regulación de voltaje (ver Figura 5).

Figura 4.

Densidad de carga del alimentador La Guayaquil



II. MÉTODO

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

En este apartado se evidencia la formulación del problema de optimización, el cual se puede dividir en dos subproblemas:

1. Ubicación óptima de los reguladores de voltaje (transformadores regulantes) y selección de posición de los taps.
2. Ubicación óptima de capacitores y dimensionamiento.

A. UBICACIÓN ÓPTIMA DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE Y SELECCIÓN DE POSICIÓN DE LOS TAPS

El problema de ubicación óptima de un regulador de voltaje se define en función de la reducción de las pérdidas de potencia y la minimización de las desviaciones de voltaje. Ambos son esenciales para garantizar la calidad del servicio eléctrico. Es importante señalar que la minimización de uno de estos objetivos implica directamente la disminución del otro.

La determinación de la posición del tap de cada regulador de voltaje es esencial para resolver el problema de optimización. En este tipo de aplicación, el ajuste del

tap mediante un desplazamiento sucesivo puede presentar problemas de convergencia en el flujo de carga, por esta razón se utiliza el algoritmo de Gauss-Seidel para evaluar la red en cada paso del tap, el cual se encuentra como variable de estado dentro de los cálculos del flujo de potencia. Esto es más adecuado para el proceso de optimización y conduce a un mejor rendimiento del algoritmo.

B. UBICACIÓN DE CAPACITORES EN LA RED Y DIMENSIONAMIENTO

En general, todos los problemas de localización óptima de bancos de capacitores en una red de distribución buscan obtener la cantidad, tipo (fijo o intercambiable) de capacitores, localización y capacidad nominal, para mejorar una función objetivo que varía de autor a autor, con el fin de obtener el mayor beneficio. El dimensionamiento se realizará con base en el perfil de carga típico del alimentador ingresando a la red reactivos para tener un factor de potencia mayor o igual al 96%.

FUNCIÓN OBJETIVO Y RESTRICCIONES

A. FUNCIÓN OBJETIVO: DESVIACIÓN DE VOLTAJE EN LAS BARRAS

Este objetivo intenta aplanar el perfil de voltaje a lo largo del alimentador, su expresión matemática se define como:

$$\text{Min } dv = \sum_{j=i} \frac{\Delta V_j}{V_{\text{nominal}}}, \quad j = 1, \dots, N \quad (1)$$

donde ΔV_j es el voltaje de desviación de la barra j con respecto al voltaje nominal y N es el número total de barras del sistema de distribución [4].

B. RESTRICCIONES

En la ecuación (2) se muestra la restricción de voltaje para cada barra del sistema de distribución, donde ΔV_j y V_j son valores límites en el periodo de máxima y mínima carga. El valor máximo y mínimo que se puede presentar en la barra es de 1,06 y 0,94 p. u.

$$\Delta V_j = |V_{\text{nominal}} - V_j| \quad (2)$$

El factor de potencia del alimentador debe cumplir con lo establecido en la regulación Arconel 005/18, tanto en máxima como en mínima demanda.

$$fp \geq 0,96 \text{ (atraso o adelanto)} \quad (3)$$

Las restricciones del flujo de potencia están representadas por las ecuaciones (4) y (5), donde (P_{gi}, Q_{gi}) son las salidas de generación activa y reactiva y (P_{li}, Q_{li}) son las salidas de generación activa y reactiva. [4]

G_{ij} y B_{ij} son la conductancia y la susceptancia de la matriz de admitancia, respectivamente.

$$P_{gi} - P_{li} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$Q_{gi} - Q_{li} = V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

VI. FUNCIÓN OBJETIVO EN TÉRMINO DE LAS RESTRICCIONES

En el problema de optimización, las restricciones (4) y (5) se pueden satisfacer al realizar el cálculo del flujo de potencia [4] y las restricciones de desigualdad (2) y (3) se pueden satisfacer penalizando la función objetivo $f_1(c)$. Finalmente, el problema de optimización con restricciones puede ser reformulado como:

$$f_1(c) = f_1 + f_{p1} + f_{p2} \quad (6)$$

donde w_1 y w_2 son factores de penalización:

$$f_{p1} = w_1 \sum_{j=1}^n |\min(V_j - V^{\text{min}}, 0, V^{\text{max}} - V_j)| \quad (7)$$

$$f_{p2} = w_2 |\min(fp - fp_{\text{min}}, 0)| \quad (8)$$

La ecuación (7) es una función de penalización que se aplica cuando las magnitudes de voltaje están fuera de los límites permitidos. La ecuación (8) es una función de penalización que se aplica cuando el factor de potencia está fuera de los límites permitidos.

REGULACIÓN DE CALIDAD DEL SERVICIO ELÉCTRICO EN ECUADOR

Una de las obligaciones de las empresas distribuidoras de energía eléctrica es cumplir que el voltaje de servicio se encuentre dentro de los límites estipulados en la Resolución N.º Arconel 053/18 del Reglamento 005/18 «Servicios de comercialización y distribución de energía de calidad»; cuando se realice una evaluación de la calidad de la prestación del servicio eléctrico, teniendo en cuenta los siguientes criterios (Conelec, 2018):

1. INDICADOR DE CALIDAD DEL SERVICIO COMERCIAL

En el presente estudio, nos enfocaremos en el nivel de voltaje, correspondiente al ítem A «Calidad del producto» [6]. El índice de la calidad de nivel de voltaje en un punto del sistema de distribución, según la regulación del Arconel, se determina con la siguiente fórmula [6]:

$$\Delta V_k = \frac{V_k - V_N}{V_N} \times 100 [\%] \quad (9)$$

Donde:

$$\begin{aligned} \Delta V_k &= \text{Cambio del voltaje de suministro en comparación al voltaje nominal en el punto .} \\ V_k &= \text{Tensión de suministro en el punto , definido como el valor medio de las medidas registradas.} \\ V_N &= \text{Tensión nominal en el punto .} \end{aligned}$$

La normativa también establece los rangos de voltaje permitidos según el nivel de tensión como se muestra en la tabla 3 (ver Tabla 3).

FLUJO DE POTENCIA (GAUSS-SEIDEL)

El algoritmo de Gauss-Seidel es un procedimiento iterativo que pretende encontrar una solución al sistema de ecuaciones lineales estando dentro del límite de error. Éste es un método robusto y confiable que proporciona convergencia para sistemas eléctricos complejos. Debido a las numerosas iteraciones del método Gauss-Seidel, la convergencia es lenta y directamente proporcional al factor de aceleración.

El método de Gauss-Seidel toma valores calculados en la primera iteración para calcular el valor de una incógnita en la misma iteración. Los resultados son tomados en cuenta para la siguiente iteración, lo cual reduce significativamente el número de iteraciones para lograr la convergencia del flujo de carga [11].

Con la matriz admitancia de barra y aplicando la ley de Kirchoff se obtiene la ecuación (10).

$$I_k = \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (10)$$

Reordenando la ecuación (10) se obtiene la ecuación (11).

$$V_k = \frac{I_k}{Y_{kk}} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (11)$$

Con la potencia aparente en complejo, reemplazando en (11) se obtiene la ecuación (12).

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n^{(i)} \right) \quad (12)$$

Debido a que el método de Gauss-Seidel es iterativo, se obtiene la ecuación (13).

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{(V_k^i)^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n^{(i)} \right) \quad (13)$$

La matriz de admitancia () depende de las impedancias de las líneas conectadas en las barras de la red eléctrica. En un alimentador de media tensión tipo radial encontraremos dos tipos de barras las cuales son:

Barra oscilante: Es la barra fuente tomada como referencia, de la cual solo se especifica la magnitud y ángulo del voltaje. La planta de energía correspondiente a la distribución de voltaje en el sistema de control genera una carga que no es energizada por el resto de las barras más pérdidas en el sistema de energía.

Barra de carga: Es la barra donde se encuentra las cargas de la red, especificando la potencia activa y reactiva.

La programación del código en Matlab se resume en el diagrama de flujo de la figura 6. En nuestro caso de estudio se realizaron concentraciones de cargas para lograr conformar una red de 50 barras y ejecutar el algoritmo de Gauss-Seidel (ver Figura 6).

EQUIPOS DE REGULACIÓN DE VOLTAJE Y COMPENSACIÓN DE REACTIVOS

A. REGULADORES DE VOLTAJE

Los reguladores de voltaje funcionan para mantener los niveles de voltaje dentro de límites fijados por programación, para mejorar la calidad del suministro de energía y son compatibles con los sistemas de distribución automática. Los reguladores de voltaje son autotransformadores reguladores, capaces de regular el voltaje nominal en un +/- 10% en 32 etapas de aproximadamente (5/8%) por cada paso o cambio de 0,75 voltios en una base de 120 v.

En la figura 7 se muestra el circuito de fuerza del regulador de voltaje típico, el cambio está controlado por un circuito de control exterior [12](ver Figura 7).

La instalación óptima de un regulador de voltaje en la red de distribución aumenta significativamente el voltaje de salida, [13] regulando aguas abajo del regulador como se observa en la figura 8 (ver Figura 8).

Adicionalmente, el regulador ayuda a cumplir con las exigencias de calidad de servicio eléctrico ante eventos transitorios que pueden presentarse en la red de distribución, disminuyendo los picos de voltaje. En la figura 9, como caso demostrativo, se muestra la mejora de la onda

Figura 6.

Diagrama de flujo del método de Gauss-Seidel

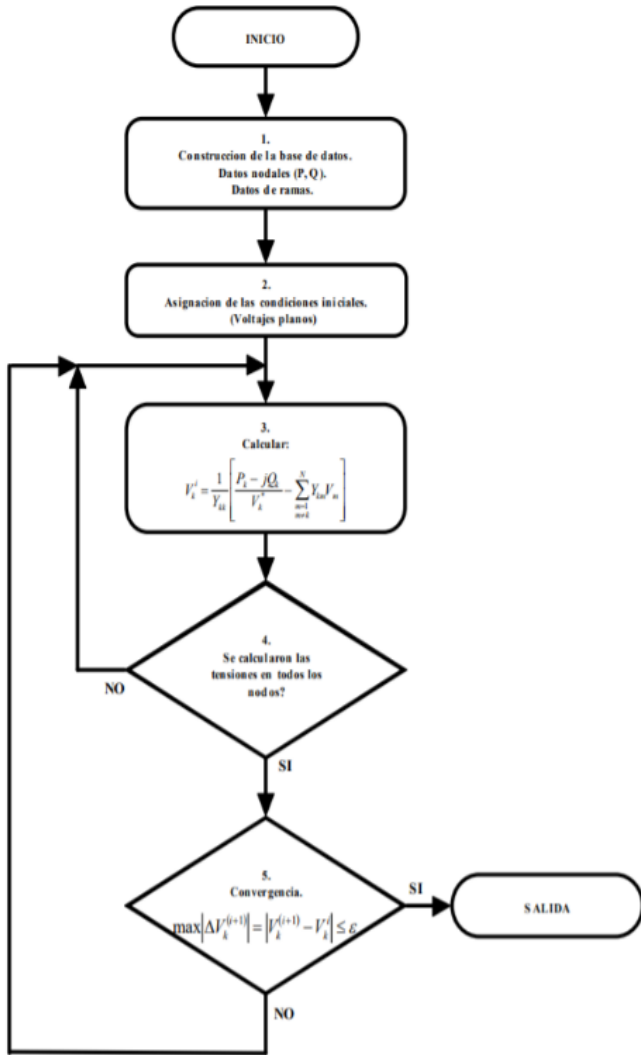


Figura 7. Diagrama de fuerza del regulador de voltaje

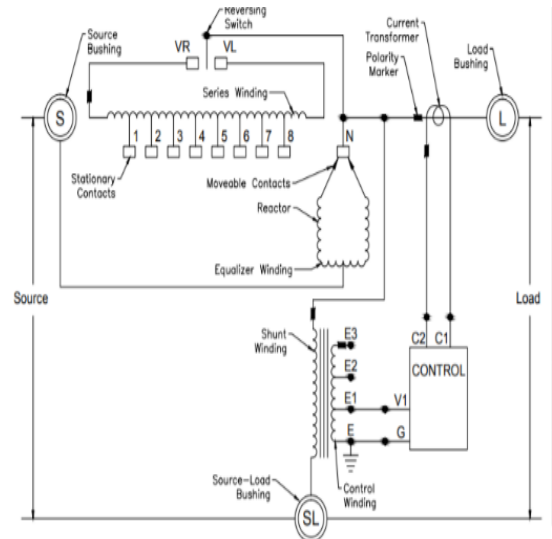
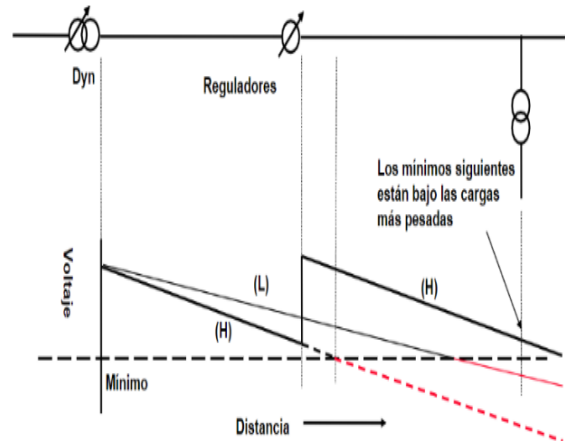


Figura 8.

Perfil de voltaje del circuito de media tensión después de la aplicación de reguladores



de voltaje (rojo) de una barra cuando entra en operación un regulador de voltaje ante una perturbación externa de la red que altera la onda de voltaje de entrada al equipo (verde) (ver Figura 9).

B. CAPACITORES

Las cargas conectadas a lo largo de una red de distribución consumen potencia reactiva, generando pérdidas en el sistema eléctrico y caídas de voltajes. Para mejorar el factor de potencia las empresas distribuidoras penalizan a los usuarios que incumplan con el mínimo factor de potencia (92%) obligándolos a disminuir reactivos e instalando bancos de capacitores en las redes de media tensión para suplir los reactivos de las líneas y transformadores de distribución.

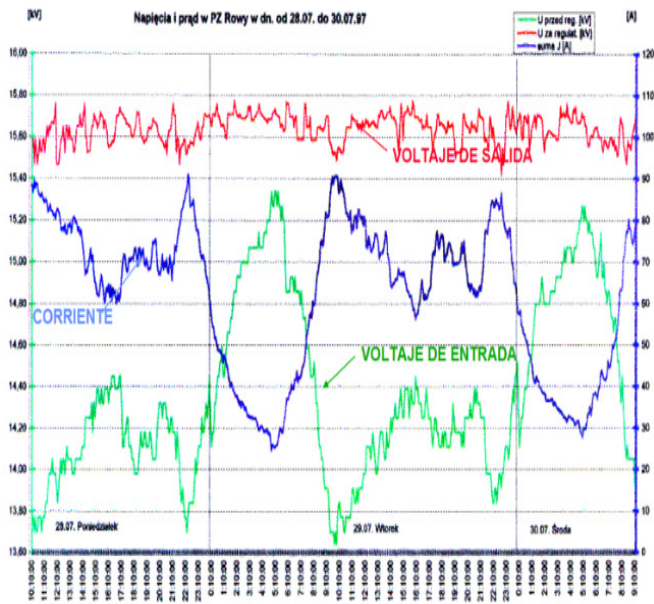
Mediante a ubicación óptima de los bancos de capacitores en la red se logra la compensación de reactivos de

la manera más eficiente para aumentar el factor de potencia, manteniendo los mínimos establecidos por la Arconel. En la figura 10 se observa el resultado de corregir el factor de potencia en la red. La disminución de la potencia reactiva reduce el ángulo entre el voltaje y la corriente aumentando la eficiencia eléctrica de un sistema de distribución (ver Figura 10).

Capacitores fijos: Los capacitores fijos están conectados de manera permanente en la red, inyectando reactivos con base en su capacidad nominal. Se pueden agrupar y formar bancos trifásicos, lo cual significa bajos costos por KVAR instalado. Los capacitores de tipo *fijos* deben ser instalados con base en la demanda mínima del sistema, para no tener problemas de alto voltaje en la línea. En la figura 12 se muestra un perfil de voltaje con la implementación de un banco de capacitores en la red de distribución (ver Figuras 11 y 12).

Capacitores desconectables: Los capacitores desconectables pueden ser configurados para operar por factor de

Figura 9.
Comparación del perfil de voltaje del circuito de media tensión después de la aplicación de reguladores



potencia, voltaje, corriente y potencia reactiva. Estos equipos pueden inyectar reactivos a la red de distribución de acuerdo a la variación de carga presentada tomando en cuenta los parámetros de la red. En la figura 13 se muestra un perfil de carga e ingreso de los bancos de capacitores con base en la necesidad de la red eléctrica [14] (ver Figura 13).

ALGORITMO GENÉTICO

Los algoritmos genéticos son estrategias estocásticas de investigación basadas en la selección natural y que en algunos casos incorporan aspectos de la genética natural, simulando la evolución biológica como estrategia de resolución de problemas. A las posibles soluciones del problema de optimización se las denomina individuos, y cada uno de ellos posee información característica que puede ser representada con cromosomas [15]. Estos cromosomas están formados por una serie de datos que en muchos casos se representan mediante números binarios.

Las estrategias evolutivas resuelven problemas evolucionando cada uno de los individuos a través de generaciones. En la población, cada individuo se distingue según el valor de su *fitness*, que se obtiene con la ayuda de diversas medidas, de acuerdo con el problema a resolver. Para obtener generaciones futuras, se producen nuevos individuos, llamados descendientes, utilizando dos estrategias

Figura 10.
Corrección de factor de potencia con capacitores

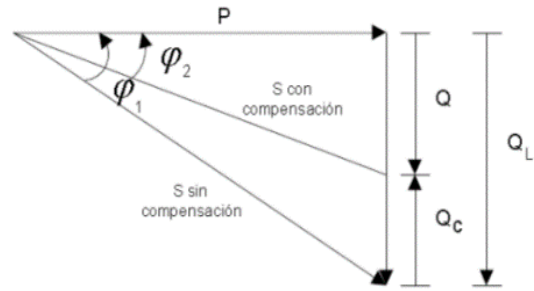


Figura 11.
Banco de capacitores de media tensión



evolutivas básicas, como factores de cruce y mutación (que a menudo se usan indistintamente). Los algoritmos genéticos tienen los siguientes componentes [16]:

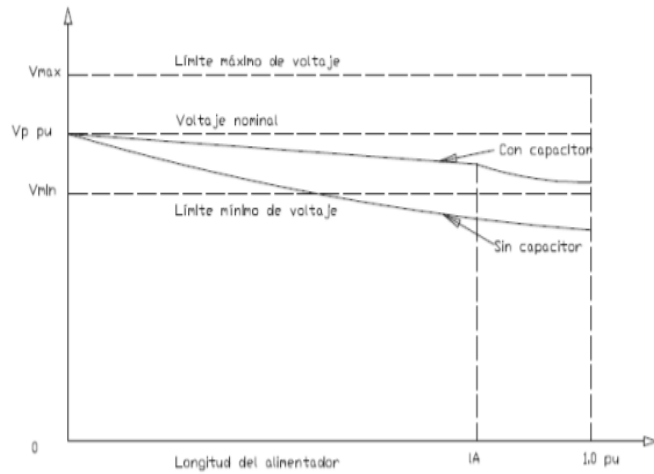
Selección: El proceso de selección escoge de entre la población actual las alternativas que muestran el mayor valor de eficiencia para formar nuevos individuos y así desarrollar sus características en el futuro y nuevos grupos de población.

Cruza: Es el proceso de formación de nuevos individuos que imitan el apareamiento (el intercambio de genes entre pares de individuos llamados padres con un valor de aptitud muy alto), entre dos cromosomas de un organismo. Implica tomar dos hebras de cromosomas o individuos e intercambiar genes. Es el operador más importante del algoritmo genético y actúa como operador de minería, lo que significa que hibridiza individuos para obtener mejores características.

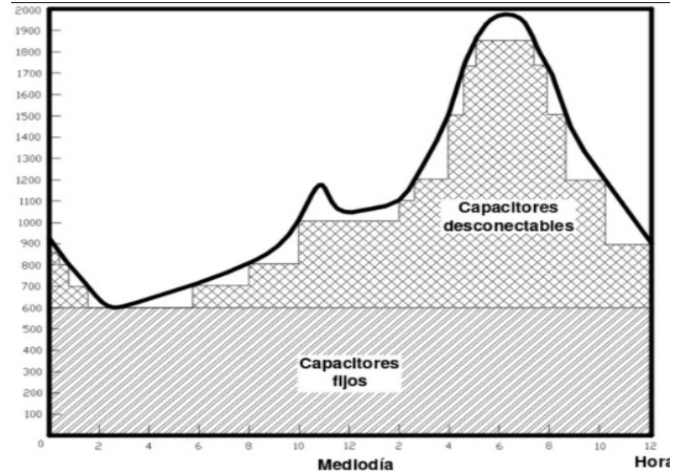
Mutación: En algoritmos genéticos, este operador se usa con menos frecuencia que el operador de cruce. Es un operador exploratorio porque permite que el algoritmo explore en otras regiones, ayudándolo a salir recursivamente de la región óptima. La mutación implica el cambio de ciertos valores de genes, seleccionados al azar, por individuos obtenidos después de la cruce, por lo que, si el valor de un gen específico es uno, se cambiará a cero y viceversa [17].
Reemplazo: Ayuda a mantener el tamaño de la población, los individuos tienen las mejores cualidades posibles en todas las generaciones.

Figura 12.

Perfil de voltaje con capacitores en la red eléctrica


Figura 13.

Operación combinada de capacitores fijos y desconectables según el perfil de carga



1. ALGORITMO GENÉTICO DIFERENCIAL

La evolución diferencial es una técnica metaheurística basada en conjuntos de vectores numéricos. Las principales ventajas de este algoritmo son la simplicidad, la eficiencia, las características de búsqueda local y la velocidad. El proceso mediante el cual se resuelve la evolución diferencial de un problema de optimización se caracteriza por la iteración a través de un conjunto de vectores para hacer que las soluciones candidatas crezcan de acuerdo con una función adecuada. [18] En la figura 14 se muestra las principales operaciones que realiza el algoritmo diferencial para llegar a la mejor solución (ver Figura 14).

1.1. Inicialización de la población

Las variables del problema a optimizar se codifican como vectores de números reales. La población consta de vectores NP, donde g es la generación correspondiente. Cada vector incluye las variables del problema, donde (m = 1... n).

$$x_p^g = \{x_{p,1}^g, x_{p,2}^g, \dots, x_{p,n}^g\} \quad (14)$$

$$p = 1 \dots NP \quad (15)$$

1.2. Mutación diferencial

Consiste en crear NP vectores mutados (llamados también de perturbación) los cuales son creados a partir de 3 individuos elegidos al azar, xa, xb, xc:

$$n_p^g = x_c + F * (x_a - x_b) \quad (16)$$

$$n_p^g = x_{best} + F * (x_a - x_b) \quad (17)$$

$$p = 1 \dots NP \quad (15)$$

1.3. Recombinación

Una vez que se obtienen los vectores de mutación, se realiza una hibridación extensiva con los vectores originales, dando como resultado los vectores de prueba, de la siguiente manera:

$$t_{p,m}^g = \{n_{p,m}^g / x_{p,m}^g \text{ si } rand[0,1] < GR\} \quad (18)$$

1.4. Selección

Se hace simplemente comparando la idoneidad del vector original con el vector de prueba. El portador de la próxima generación será el que tenga el mejor fitness o calidad:

$$t_{p,m}^g = \{t_p^g / x_p^g \text{ si } fit(t_p^g) < fit(x_p^g)\} \quad (19)$$

Figura 14. Diagrama de flujo de las principales operaciones del algoritmo diferencial

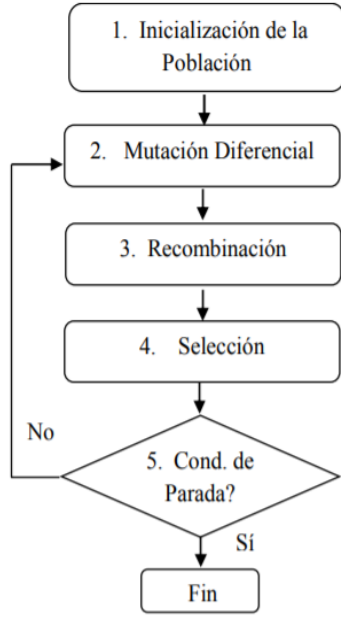


Figura 15. Vector de enteros para reguladores

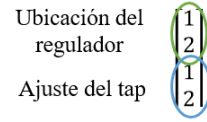


Figura 16. Sistema eléctrico de 4 barras

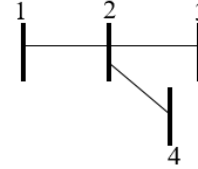
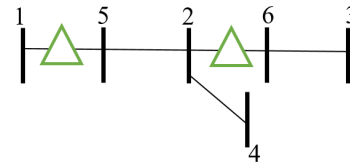


Figura 17. Sistema eléctrico incluyendo los reguladores



EXPLICACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO DESARROLLADO

1. UBICACIÓN ÓPTIMA DE REGULADORES DE VOLTAJE (TRANSFORMADORES REGULANTES)

1.1. Para representar la ubicación de los reguladores, se utilizará un vector de enteros, donde las primeras filas indican la posición de los transformadores regulantes y las últimas filas indican la posición de los taps (ver Figura 15).

Esta información se puede combinar con la información del sistema. Por ejemplo, si se tiene un sistema de 4 barras como se muestra en la figura 16, la información del vector proporcionado por el DE se puede combinar de forma matricial con la información del sistema de la siguiente manera (ver Figura 16):

$$\begin{bmatrix} B_i & B_j & R & X & carga & Regulante & Tap \\ 1 & 2 & R_1 & X_1 & L_1 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & R_2 & X_2 & L_2 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & R_3 & X_3 & L_3 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (20)$$

1.2. Donde se vaya a ubicar un nuevo transformador regulante el algoritmo tiene que incluir una nueva barra en la red de distribución. A la matriz de datos se le agregará una nueva barra por cada transformador regulante según la ubicación en el sistema de distribución. Por ejemplo, considerando la matriz (21) se ubicará un regulante en la línea 1-2 y 2-3, expresando la nueva matriz como:

$$\begin{bmatrix} B_i & B_j & R & X & carga & ubicación & Tap \\ 1 & 5 & 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 5 & 2 & R_1 & X_1 & L_1 & 0 & 0 \\ 2 & 6 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 6 & 3 & R_2 & X_2 & L_2 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & R_t & X_t & L_t & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

La nueva red resultante se puede observar en la figura 17 (ver Figura 17).

1.3. Construir la Ybus con la matriz de datos extendida. La línea donde se ubican los regulantes se les asignará una impedancia y admitancia de cero. La Ybus se construirá de forma convencional encontrando primero los elementos de la diagonal principal, y luego los elementos fuera de la diagonal.

1.4. Calcular el bloque de construcción para cada transformador regulante:

$$Y_{reg} = \begin{bmatrix} |t|^2 Y & -t^* Y \\ -t Y & Y \end{bmatrix} \quad (22)$$

Donde:

- t: porcentaje de regulación del regulador.
- Y: admitancia del regulador.

1.5. Sumar el bloque de construcción de cada regulador a la Y_{bus} .

1.6. Con la nueva Y_{bus} se procede a realizar un flujo de potencia, para calcular los voltajes en las barras.

Figura 18.

Vector de enteros para capacitores

Ubicación del banco de capacitor	$\begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots \\ 3 & 1 & \dots \end{bmatrix}$
Número de bancos de capacitores	$\begin{bmatrix} 3 & 1 & \dots \\ 2 & 1 & \dots \end{bmatrix}$

1.7. Con los voltajes de barra se procede a calcular la desviación de voltaje del sistema.

1.8. Repetir el procedimiento para un nuevo vector entregado por el algoritmo genético diferencial.

2. UBICACIÓN ÓPTIMA DE BANCOS DE CAPACITORES

2.1. Para representar la ubicación de los capacitores, se utilizará un vector de enteros, donde las primeras filas indican la posición de los bancos de capacitores y las últimas filas indican el número de bancos (ver Figura 18).

Por ejemplo, si se tiene un sistema de 4 barras como se muestra en la figura 16, la información del vector proporcionado por el DE se puede combinar de formar matricial con la información del sistema de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} B_i & B_j & R & X & \text{carga} & \text{ubic} & \#\text{bancos} \\ 1 & 2 & R_1 & X_1 & L_1 & 1 & 3 \\ 2 & 3 & R_2 & X_2 & L_2 & 0 & 0 \\ 2 & 4 & R_3 & X_3 & L_3 & 1 & 2 \end{bmatrix} \quad (23)$$

Donde los nuevos capacitores serán ubicados en las barras 2 y 4 como se muestra en la figura 19 (ver Figura 19).

2.2. Con la información presentada en (23) se procederá a construir la Y_{bus} de forma convencional, encontrando primero los elementos de la diagonal principal, y luego los elementos fuera de la diagonal.

2.3. El siguiente paso es calcular la susceptancia del banco, según la capacidad y voltaje nominal.

$$Y_{ci} = \frac{\#\text{bancos} * Q}{Vn^2} \quad (24)$$

2.4. Sumar la admitancia de cada capacitor a la Y_{bus} .

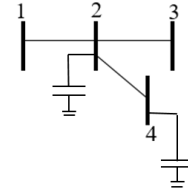
$$Y_{barra} = Y_{barra\ i,i} + Y_{ci} \quad (25)$$

2.5. Con la nueva Y_{bus} se procede a realizar un flujo de potencia, para calcular los voltajes en las barras.

2.6. Con los voltajes de barra se procede a calcular la

Figura 19.

Sistema eléctrico incluyendo los capacitores



desviación de voltaje del sistema y el factor de potencia del sistema.

$$fp = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}} \quad (26)$$

2.7. Repetir el procedimiento para un nuevo vector entregado por el algoritmo genético diferencial.

En la figura 20, se muestra la operación del algoritmo diferencial con un diagrama de flujo tanto para la ubicación de los reguladores como de los capacitores (ver Figura 20). Inicialmente se define una población inicial al azar, donde el algoritmo evaluará cada individuo y calculará su *fitness* por medio de Gauss-Seidel. A partir de la segunda iteración el vector comienza a mutar con base en los mejores resultados obtenidos, luego de eso se realiza una recombinación y, por último, se seleccionan los candidatos que cumplan con las restricciones.

III. RESULTADOS

La figura 21 ilustra el sistema de distribución del alimentador de media tensión La Guayaquil representado en 50 barras, 49 líneas y 30 cargas concentradas para mejor apreciación del sistema. La longitud total de la troncal es de 30 km y su configuración es radial. Está conformada con varios calibres de conductor de aluminio desnudo a lo largo de la línea, los cuales son ACSR 266, 8; 4/0; 1/0 y # 2 (ver Figura 21).

En condiciones iniciales del alimentador La Guayaquil opera a un voltaje de 13.200 v en barra de la subestación Balzar, tiene una desviación de voltaje inicial de 6,2249 y presenta una demanda máxima de 3,3 MW y 1,5 MVAR. Debido a la longitud y calibre del conductor, el 98% de las barras se encuentran por debajo del voltaje permitido por la regulación -5% del voltaje nominal, provocando reclamos de mala calidad por los usuarios finales. Debido a la potencia reactiva consumida por la carga industrial, el alimentador tiene un factor de potencia de 89% en demanda máxima. El código propuesto para el algoritmo de optimización se realizó en Matlab, y los resultados fueron comprobados mediante el software Etap.

Figura 20.

Algoritmo propuesto para la ubicación óptima de reguladores o capacitores

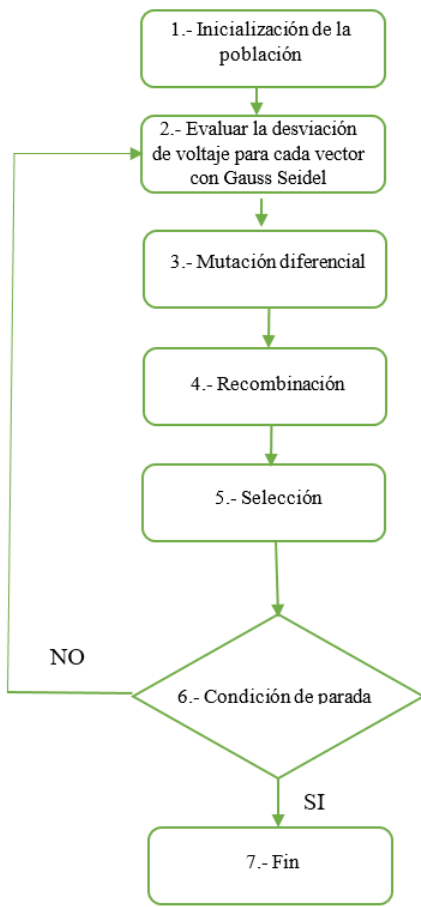
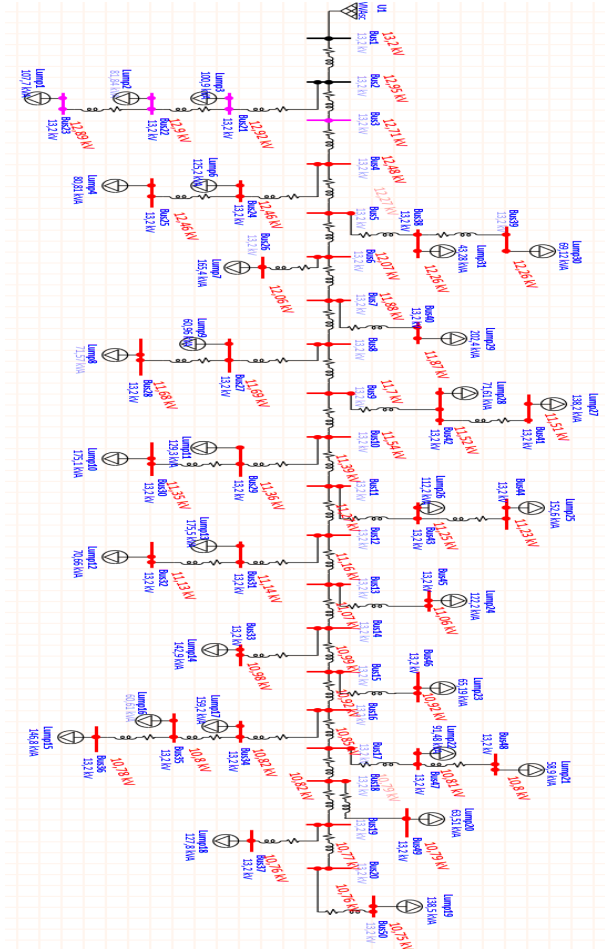


Figura 21.

Condiciones iniciales del alimentador La Guayaquil conformado por 50 barras



Para el ingreso de los reguladores de voltaje y de los capacitores a la red, se evaluarán 5 escenarios, considerando una población inicial de 30 individuos y restricciones de voltaje en barra de y factor de potencia mayor a 96%. A continuación, se detallarán los resultados para cada uno de los escenarios.

ESCENARIO 1: INGRESO DE DOS BANCOS DE REGULADORES DE TENSION.

En la tabla 4 se muestra el resultado óptimo del algoritmo diferencial para la instalación de dos bancos reguladores de tensión. Con la inserción de estos bancos, en las barras 6 y 20, solo el 24% de las barras no cumplen con el límite mínimo de voltaje y la desviación de voltaje del alimentador disminuye un 90,77% respecto al sistema original (ver Tabla 4).

En la figura 22 se muestra la mejora del voltaje en las barras del sistema de distribución con el ingreso de 2 bancos reguladores de voltaje. El mínimo voltaje presentado en la red es de 12,7 kv (ver Figura 22).

ESCENARIO 2: INGRESO DE TRES BANCOS REGULADORES DE TENSION.

En la tabla 5 se muestra el resultado óptimo del algoritmo diferencial para la instalación de tres bancos reguladores en la red. Con la ubicación de los tres bancos (barras 2, 6 y 12) solo el 12% de las barras no cumplen con el límite mínimo de voltaje y la desviación de voltaje del alimentador disminuye un 93,43% respecto al caso original (ver Tabla 5).

En la figura 23 se muestra la mejora del voltaje en las barras del sistema de distribución para este caso. El mínimo voltaje presentado en la red es de 12,7 kV (ver Figura 23).

ESCENARIO 3: INGRESO DE DOS BANCOS DE CAPACITORES.

En la tabla 6 se muestra el resultado óptimo del algoritmo diferencial para la instalación de dos bancos de capacitores en la red (ver Tabla 6). Con la operación de los dos bancos de capacitores el factor de potencia aumenta

Tabla 4.

Ubicación y selección óptima del tap de los dos reguladores de voltaje

Regulador	Barra	Selección del tap	Desviación de voltaje
1	6	2	0,5284
2	20	15	

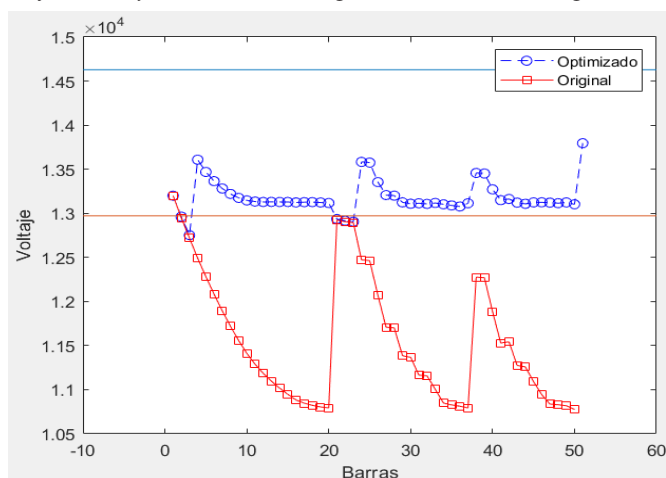
Tabla 5.

Ubicación y selección óptima del tap de los tres reguladores de voltaje

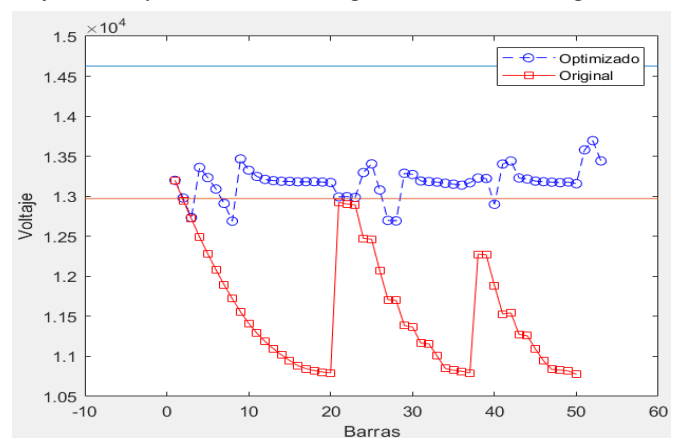
Regulador	Barra	Selección del tap	Desviación de voltaje
1	2	12	0,409
2	6	13	
3	12	2	

Figura 22.

Perfil de voltajes de barra con el ingreso de dos bancos de reguladores

**Figura 23.**

Perfil de voltajes de barra con el ingreso de 3 bancos de reguladores



en un 8,9% y el voltaje aumentó un promedio de 7,7 %. El 98% de las barras no cumplen con el límite mínimo de voltaje y la desviación de voltaje del alimentador disminuyó un 36,7%.

En la figura 24 se muestra la mejora del perfil de voltaje en las barras del sistema de distribución, con el ingreso de 2 bancos de capacitores (ver Figura 24). Se debe notar que aun así no se cumple con la regulación de voltaje. El mínimo voltaje presentado en la red es de 11,8 kv.

ESCENARIO 4: INGRESO DE TRES BANCOS DE CAPACITORES.

En la tabla 7 se muestra el resultado óptimo del algoritmo diferencial para la instalación de tres bancos de capacitores en la red. Con la operación de los tres bancos de capacitores el factor de potencia aumenta un 11% y el voltaje de las barras también aumentó un 5% en promedio. El 98% de las barras aun no cumplen con el límite mínimo de voltaje, pero la desviación de voltaje del alimentador disminuyó un 56,7% (ver Tabla 7).

En la figura 25 se muestra la mejora del voltaje en las barras del sistema de distribución con el ingreso de los 3 bancos de capacitores, pero aun así no se cumple con la regulación de voltaje. El mínimo voltaje presentado en la red es de 12,23 kV (ver Figura 25).

ESCENARIO 5: INGRESO DE DOS BANCOS DE CAPACITORES Y TRES BANCOS DE REGULADORES.

El escenario 5 combinará el ingreso de dos bancos de capacitores y tres bancos de reguladores. De la optimización del escenario 3 se obtendrán las susceptancias de los bancos de capacitores, para luego sumar en las barras correspondientes las susceptancias en la diagonal de la Ybarra del sistema original. La nueva matriz de admitancias se ingresará como dato en el algoritmo de optimización de los transformadores regulantes, para obtener un nuevo resultado combinado.

En la tabla 8 se muestra el resultado obtenido por el algoritmo diferencial, para la instalación de dos bancos de capacitores y tres bancos reguladores de voltaje en la red

Tabla 6.

Ubicación de los dos bancos de capacitores

Capacitor	Barra	Factor de potencia en la red	Desviación de voltaje
1	19	97%	3,966
2	20		

Tabla 7.

Ubicación de los tres bancos de capacitores

Capacitor	Barra	Factor de potencia en la red	Desviación de voltaje
1	19	99%	2,7131
2	20		
3	29		

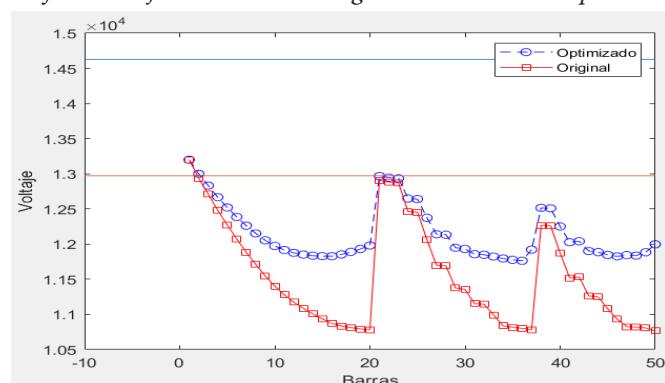
Tabla 8.

Ubicación de dos bancos de capacitores y tres bancos de reguladores

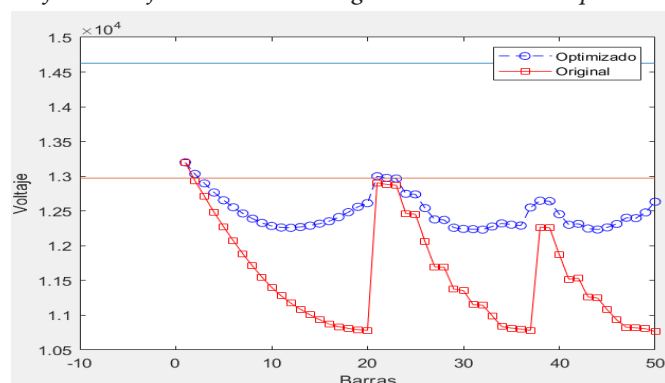
Capacitor	Barra	# Bancos	Factor de potencia en la red	Desviación de voltaje
1	19	1	97%	0,3879
2	20	1		
Regulador	Barra	Tap		
1	2	12		
2	5	10		
3	13	15		

Figura 24.

Perfil de voltajes de barra con el ingreso de 2 bancos de capacitores

**Figura 25.**

Perfil de voltajes de barra con el ingreso de 3 bancos de capacitores



(ver Tabla 8). El 10% de las barras no cumplen con el límite mínimo de voltaje y la desviación de voltaje en las barras del alimentador disminuye un 94%.

En la figura 26 se muestra la mejora del voltaje en las barras del sistema de distribución con el ingreso de 2 bancos de capacitores y 3 bancos de reguladores de voltaje. El mínimo voltaje presentado en la red es de 12,28 kv (ver Figura 26).

Finalmente, la figura 27 muestra la simulación del sistema considerando únicamente los tres transformadores regulantes. La figura 28 muestra la simulación del sistema considerando únicamente los dos capacitores, y la figura

29 muestra la solución más factible, que es la combinación de los tres bancos reguladores de voltaje y dos bancos de capacitores (ver Figuras 27, 28 y 29).

COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En la figura 30 se muestra un diagrama tipo barra para resumir los resultados en cada escenario con base en la función objetivo planteada desde el comienzo del estudio (ver Figura 30). En condiciones iniciales en el periodo que se presenta la demanda máxima del alimentador de distribución La

Figura 26.
Perfil de voltajes de barra con el ingreso de 2 bancos de capacitores y 3 bancos de reguladores de voltaje

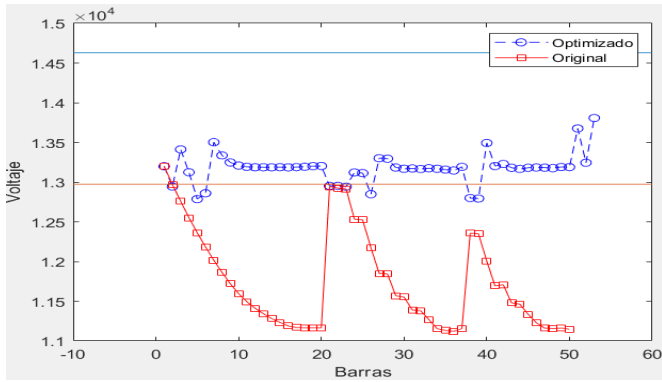


Figura 28.
Resultados del flujo de carga con la operación de dos bancos de capacitores

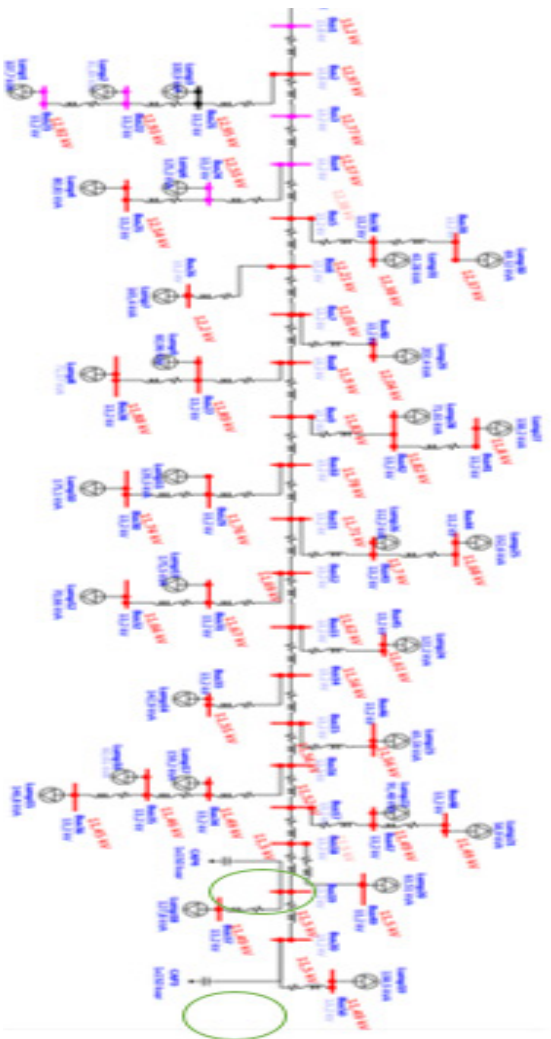
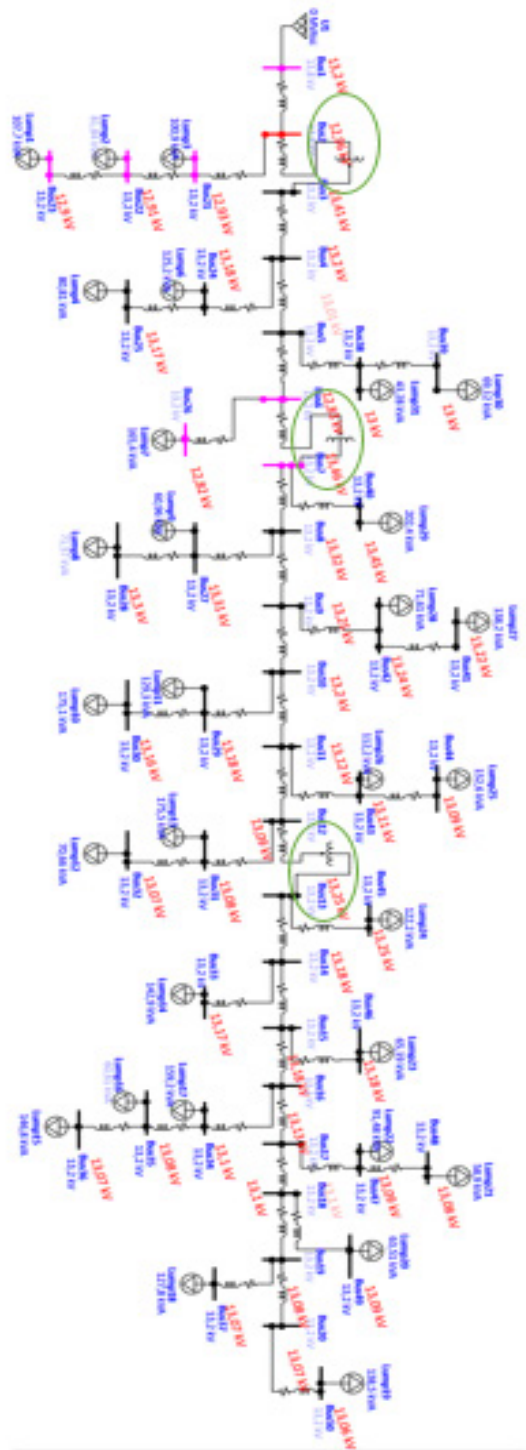


Figura 27.
Resultados del flujo de carga con la operación de tres reguladores de voltaje



Guayaquil, se tiene una caída de voltaje significativa, dando como resultado una afectación al 97% de los abonados, entre residenciales, comerciales e industriales. Como resultado de la simulación, 49 barras no cumplen con el voltaje mínimo requerido y presenta una desviación de voltaje de 6,2249.

Con el ingreso de los 2 bancos reguladores de voltaje a la red, se puede apreciar que, de las 50 barras del sistema eléctrico solo 12 incumplen con la regulación de voltaje Arconel 005/18, teniendo una mejora del 74% en base a la condición inicial. Además, la desviación de

Figura 29. Resultados del flujo de carga con la operación combinada de dos bancos de capacitores y tres bancos reguladores de voltaje

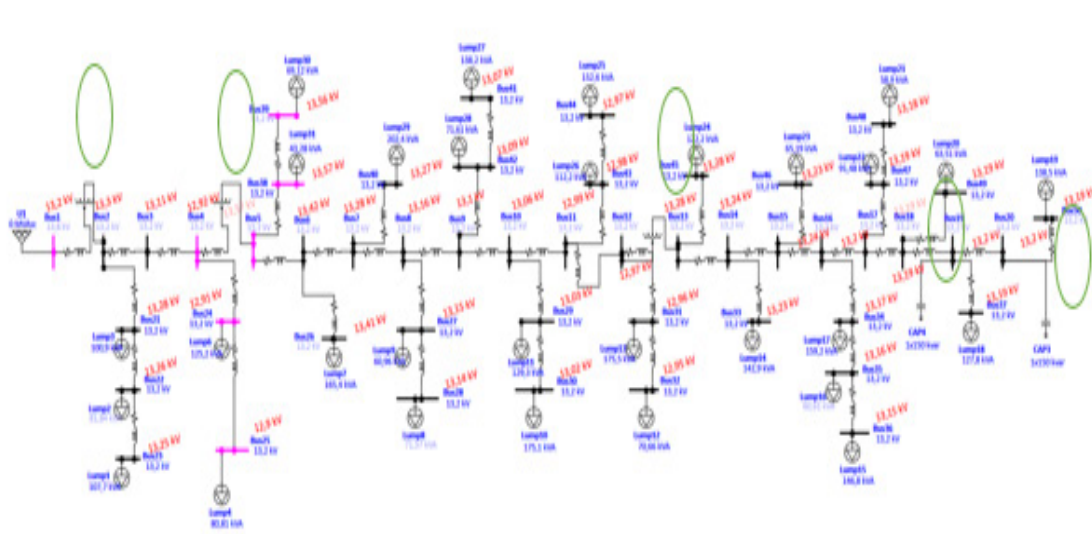
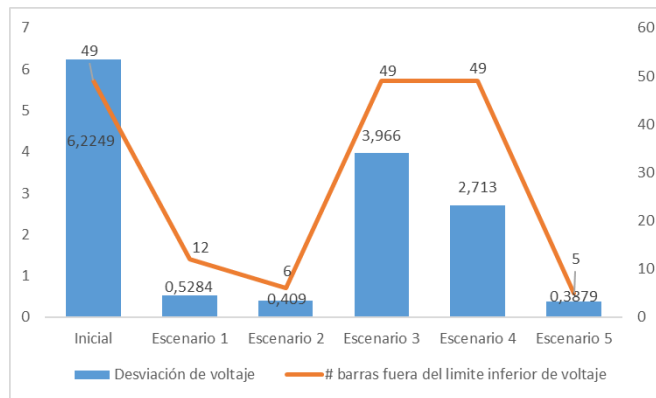


Figura 30. Análisis comparativo de los cinco escenarios



voltaje del alimentador disminuye un 90,77% respecto al sistema original.

Con el ingreso de los 3 bancos de reguladores de voltaje a la red, se puede apreciar que, de las 50 barras del sistema eléctrico solo 6 incumplen con la regulación de voltaje Arconel 005/18, teniendo una mejora del 86% con base en la condición inicial y la desviación de voltaje del alimentador disminuye un 93,43%.

Con el ingreso de los bancos de capacitores se puede apreciar que no son de mucha ayuda en la mejora del voltaje de las barras, tanto con el ingreso de 2 o 3 bancos de capacitores con capacidad de 150 kVAR por banco. La desviación de voltaje tanto con dos y tres bancos de capacitores disminuye un 36,7% y 56,7% respecto al sistema inicial.

Con el ingreso de los 3 bancos de reguladores de voltaje y 2 bancos de capacitores a la red, se puede apreciar que de las 50 barras del sistema eléctrico solo 5 incumplen

con la regulación de voltaje Arconel 005/18, teniendo una mejora del 88%, basado en la condición inicial. La desviación de voltaje del alimentador disminuye un 94% respecto al sistema original.

IV. CONCLUSIONES

En este artículo se realiza un algoritmo genético diferencial para determinar la ubicación óptima de los bancos de reguladores y bancos de capacitores para un sistema conformado por 50 barras con configuración radial y carga equilibrada.

La efectividad del algoritmo diferencial fue demostrado y probado mediante el software ETAP. Dentro de las soluciones obtenidas se comprueba el cumplimiento de la función objetivo, la cual era minimizar la desviación de voltaje del alimentador.

La mejor solución para optimizar el voltaje en el alimentador de media tensión La Guayaquil es instalar 3 bancos de reguladores de voltaje en la red e instalarlo en las líneas 2-3, 4-5, 12-13 con los taps en las posiciones 12, 10 y 15.

Para mejorar el factor de potencia se debe instalar dos bancos de capacitores en las barras 19 y 20 llegando a tener un factor de potencia de 97%; no se sugiere instalar los tres bancos de capacitores, dado que está próximo a sobrecompensar de reactivos el alimentador.

La desviación de voltaje disminuyó un 94% con respecto a la desviación de voltaje inicial, con la operación combinada de los 3 bancos de reguladores y 2 bancos de capacitores de 150 KVAR.

REFERENCIAS

- [1] D. Cárdenas, C. Chávez y L. Quinteros, *Estabilidad de voltaje en redes de distribución eléctrica monofásicas de medio voltaje, aplicando reguladores quick drive tap en estado estable*, *Revista Ingenio*, vol. 4, n.º 1, jun. 2021, doi: 10.29166/ingenio.v4i1.3067.
- [2] F. V. Lima, S. F. Pinto y J. F. Silva, «Power electronics voltage regulators for distribution transformers», en 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, may 2013, pp. 1362-1367. doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635812.
- [3] N. Wight, S. Alahakoon, and P. Pledger, «Voltage drop and unbalance compensation in long distance medium voltage distribution lines a feasibility study», 2015 IEEE 10th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS), 2015, doi: 10.1109/ICIINFS.2015.7398976.
- [4] J. P. Avilés, J. C. Mayo-Maldonado, y O. Micheloud, «A multi-objective evolutionary approach for planning and optimal condition restoration of secondary distribution networks», *Applied Soft Computing*, vol. 90, p. 106182, may 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106182.
- [5] P. Alcaria, S. F. Pinto y J. F. Silva, «Active voltage regulators for low voltage distribution grids: The matrix converter solution», en 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, may 2013, pp. 989-994. doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635745.
- [6] «Regulacion-de-Calidad-Suscrita.pdf». Accedido: 20 de enero de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2019/01/Regulacion-de-Calidad-Suscrita.pdf>
- [7] J. E. Mendoza, D. A. Morales, R. A. López, E. A. López, J.-C. Vannier, y C. A. Coello Coello, «Multiobjective location of automatic voltage regulators in a radial distribution network using a micro genetic algorithm», *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, n.º 1, pp. 404-412, feb. 2007, doi: 10.1109/TPWRS.2006.887963.
- [8] R. T. Bhimarasetti y A. Kumar, «Capacitor placement in unbalanced radial distribution system for loss reduction», en 2015 2nd International Conference on Recent Advances in Engineering Computational Sciences (RAECS), dic. 2015, pp. 1-5. doi: 10.1109/RAECS.2015.7453320.
- [9] H. E. Z. Farag y E. F. El-Saadany, «Optimum shunt capacitor placement in multimicrogrid systems with consideration of islanded mode of operation», *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 6, n.º 4, pp. 1435-1446, oct. 2015, doi: 10.1109/TSTE.2015.2442832.
- [10] C. W. Taylor, «Line drop compensation, high side voltage control, secondary voltage control-why not control a generator like a static VAR compensator?», en 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134), jul. 2000, vol. 1, pp. 307-310 doi: 10.1109/PESS.2000.867601.
- [11] G. M. Gilbert, D. E. Bouchard y A. Y. Chikhani, «A comparison of load flow analysis using DistFlow, Gauss-Seidel, and optimal load flow algorithms», en Conference Proceedings. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.98TH8341), may 1998, vol. 2, pp. 850-853 doi: 10.1109/CCECE.1998.685631.
- [12] A. Kumar, S. Grijalva, J. Deboever, J. Peppanen, y M. Rylander, «Mathematical representation of voltage regulation impact on distribution feeder voltages», en 2019 IEEE 46th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), jun. 2019, vol. 2, pp. 1-5. doi: 10.1109/PVSC40753.2019.9198970.
- [13] M. E. Elkhatab, R. El Shatshat, y M. M. A. Salama, «Optimal control of voltage regulators for multiple feeders», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, n.º 4, pp. 2670-2675, oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2033073.
- [14] R. E. Rinker y D. L. Rembert, «Using the reactive current profile of a feeder to determine optimal capacitor placement», *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, n.º 1, pp. 411-416, ene. 1988, doi: 10.1109/61.4272.
- [15] J. Velásquez y J. Villota, *Aplicación del algoritmo genético no dominado NSGA-II para la aceleración de proyectos de construcción a través de la solución del problema de compensación discreta tiempo-costo (DTCTP) en una obra civil del valle del Cauca*, tesis, Universidad del Valle, Colombia, p. 60, 2019.
- [16] J. T. Jiménez, J. L. Guardado, N. G. Cabrera, J. R. Rodríguez y F. Figueroa, «Transmission expansion planning systems using algorithm genetic with multi-objective criterion», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, n.º 3, pp. 563-568, mar. 2017, doi: 10.1109/TLA.2017.7867609.
- [17] W. Annicchiarico, «Optimización multiobjetivo-multidisciplinario del diseño de estructuras usando colonias de enjambres dinámicos». *Rev. Fac. Ing. ucv* [online]. 2012, vol. 27, n.º 4, pp. 51-64. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652012000400007 (accedido 20 de enero de 2022).
- [18] A. M. Andaluz, *Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos*, Universidad Carlos III de Madrid, p. 14.