



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**AJUSTE DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN EL ALIMENTADOR ALAMOR
MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS PARA LA ADECUADA UBICACIÓN DE BANCOS
DE CONDENSADORES**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniera Eléctrica

AUTORA: MARÍA JOSÉ ESTRELLA GRANDA

TUTOR: ING. ARTURO GEOVANNY PERALTA SEVILLA, PhD.

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, María José Estrella Granda con documento de identificación N° 1105769077, manifiesto que:

Soy la autora y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 28 de agosto del 2023

Atentamente,



María José Estrella Granda

1105769077

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, María José Estrella Granda con documento de identificación N° 1105769077, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autora del Proyecto técnico: “Ajuste de los perfiles de voltaje en el alimentador Alamor mediante el uso de técnicas para la adecuada ubicación de bancos de condensadores”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniera Eléctrica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de agosto del 2023

Atentamente,



María José Estrella Granda

1105769077

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Arturo Geovanny Peralta Sevilla con documento de identificación N° 0102199072, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: AJUSTE DE LOS PERFILES DE VOLTAJE EN EL ALIMENTADOR ALAMOR MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS PARA LA ADECUADA UBICACIÓN DE BANCOS DE CONDENSADORES, realizado por María José Estrella Granda con documento de identificación N° 1105769077, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 28 de agosto del 2023

Atentamente,



Firmado electrónicamente por:
ARTURO GEOVANNY
PERALTA SEVILLA

Ing. Arturo Peralta Sevilla, Ph.D

0102199072

DEDICATORIA

A mi mujer valiente, mi mami, por nunca dejar que me rinda, por darle sentido a mi vida porque tú estás en ella y mostrarme lo bella que es , por estar para mi y levantarme siempre, todo esto no hubiera sido posible sin ti. A mi estrella, todo este proceso es por ti, estuviste en los peores momentos con las palabras adecuadas, confiaste en mí cuando ni yo misma lo hacía, sé que de donde estás disfrutas este triunfo que es totalmente tuyo, te amo papi. A mis motores, mis hermanos Fabricio y Camila mi vida no estuviera completa sin ustedes. A mi compañero de vida Juan Pablo, te amo hermanito.

María José

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de seguir viendo su creación.

A mi papá por haber creído en mí, apoyarme siempre y seguir iluminando mi mundo desde arriba como una estrella, me quedo siempre con tus palabras y tu amor que ahora son mi mayor tesoro.

A mi mamá por ser mi luz en este mundo, nunca soltarme la mano y nunca dejar que me rinda por más difícil que todo se pusiera, te amo.

A mis hermanos Fabricio y Camila que son mi fuerza completamente, gracias por amarme tanto.

A mis tres abuelitos por siempre tenerme en sus pensamientos y oraciones y a mi abuelito por cuidarme desde arriba.

A cada uno de mis tíos y primos por amarme tanto, por siempre estar para mí cuando los necesito, nunca soltarme, y ser mis guías en todo momento.

A mis amigos y amigas por haberse convertido en mi familia y estar siempre para mí, gracias por haberme hecho sentir en casa.

Al Ingeniero Arturo Peralta por brindarme su tiempo, su apoyo y su ayuda en el desarrollo de este trabajo. Sin duda, su supervisión, conocimiento e información fueron parte fundamental; sin ella, este proyecto no hubiera sido posible.

A los Ingenieros de la Universidad Politécnica Salesiana, quienes han desempeñado el papel de mis maestros. Siempre han contribuido significativamente a mi crecimiento tanto profesional como personal, influyendo en mis valores y mi ética.

A la Empresa Eléctrica Regional del Sur S. A. por brindarme la información necesaria con que esté trabajo se llevó a cabo.

Agradezco sinceramente a todas las personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron a que el camino que me ha llevado hasta aquí fuera posible. Siempre ocuparán un lugar especial en mi corazón.

María José

RESUMEN

La aplicación del algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) para la optimización de los perfiles de voltaje en un alimentador eléctrico representa un enfoque innovador y eficaz en el ámbito de la gestión de la calidad del suministro eléctrico. El PSO, basado en principios de inteligencia colectiva, simula el comportamiento social de las partículas en busca de óptimos en un espacio de soluciones. Este método se ha revelado como un recurso valioso para ajustar los parámetros de control en sistemas de distribución, permitiendo una respuesta dinámica y precisa ante fluctuaciones de carga y condiciones operativas cambiantes.

Una de las aplicaciones más notables de este enfoque radica en la ubicación estratégica y la operación de bancos de capacitores. La implementación de bancos de capacitores ha demostrado ser una solución efectiva para mitigar las pérdidas de voltaje y reducir las pérdidas de potencia activa y reactiva en sistemas de distribución. Al inyectar corriente reactiva en las ubicaciones adecuadas, se compensan las caídas de voltaje y se mejora la eficiencia del sistema en general. El algoritmo PSO se convierte en un aliado crucial al determinar la posición óptima de estos bancos de capacitores, así como sus valores de capacitancia, lo que garantiza un despliegue efectivo y una respuesta a las condiciones cambiantes de carga.

En este contexto, la implementación práctica del algoritmo PSO utilizando el entorno de programación MATLAB ofrece una herramienta potente para la simulación y optimización de sistemas eléctricos de distribución. A través, de la modelización detallada de la red y la incorporación de restricciones operativas y técnicas, se ha logrado una mejora significativa en los perfiles de voltaje, junto con una disminución notable en las pérdidas de potencia activa y reactiva. Los resultados tangibles obtenidos en este estudio validan la capacidad del algoritmo PSO para abordar los desafíos de regulación y optimización en sistemas eléctricos de distribución, lo que confirma su relevancia en la industria y abre puertas hacia la mejora continua de la calidad del suministro eléctrico.

ABSTRACT

The application of the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm for optimizing voltage profiles in an electrical feeder represents an innovative and effective approach in the realm of power supply quality management. Based on principles of collective intelligence, PSO simulates the social behavior of particles in search of optima within solution spaces. This method has proven to be a valuable resource for adjusting control parameters in distribution systems, enabling dynamic and precise responses to load fluctuations and changing operational conditions.

One of the most notable applications of this approach lies in the strategic placement and operation of capacitor banks. The implementation of capacitor banks has shown to be an effective solution for mitigating voltage drops and reducing active and reactive power losses in distribution systems. By injecting reactive current at appropriate locations, voltage drops are compensated, and system efficiency is enhanced. The PSO algorithm becomes a crucial ally in determining the optimal positioning of these capacitor banks, as well as their capacitance values, ensuring effective deployment and responsiveness to changing load conditions.

In this context, the practical implementation of the PSO algorithm using the MATLAB programming environment offers a powerful tool for simulating and optimizing electrical distribution systems. Through detailed network modeling and the incorporation of operational and technical constraints, significant improvements in voltage profiles have been achieved, accompanied by a noticeable reduction in active and reactive power losses. The tangible results obtained in this study validate the PSO algorithm's capability to address regulation and optimization challenges in distribution systems, confirming its relevance in the industry and paving the way for continuous enhancement of power supply quality.

ÍNDICE GENERAL

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	i
CERTIFICACIÓN	ii
DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTOS	v
RESUMEN	vi
ABSTRACT	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMA Y OBJETIVOS	2
1 MARCO TEÓRICO	4
1.1 Sistemas de Distribución y Alimentador Primario	4
1.1.1 Topología de los Sistemas de distribución	4
1.2 Estrategias para el análisis del perfil de voltaje en un alimentador . . .	5
1.2.1 Técnicas de optimización	6
1.3 Normativa de la caída de voltaje de Alimentadores Primarios	7
1.3.1 Cálculo de la caída de voltaje de un circuito eléctrico según la NEC/NFPA70/NTC2050 (<i>National Electrical Code</i>)	7
1.3.2 Perfiles de voltaje admisibles en un alimentador del sistema eléctrico de distribución	8
1.3.3 Voltajes máximos y mínimos en un alimentador eléctrico	8
1.4 Revisión Óptima de Banco de Capacitores	9
1.4.1 Capacitores Dinámicos	9

1.4.2	Capacitores Físicos	9
1.5	Estado del Arte	10
2	ALGORITMO PSO	13
2.1	Descripción del Algoritmo	13
2.1.1	Parámetros del PSO	15
2.1.1.1	Tamaño del Enjambre	15
2.1.1.2	Dimensionamiento y Dominio	15
2.1.1.3	Factor de aceleración	15
2.1.1.4	Criterio de parada	15
2.1.2	Planteamiento del proceso de optimización	16
2.1.2.1	Función Objetivo	16
2.1.2.2	Restricciones	17
3	METODOLOGÍA	20
3.1	Sistema de 10 barras	20
3.2	Flujo de Potencia	21
3.3	Algoritmo PSO	23
3.3.1	Error Aproximado con PSO	30
4	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DEL BANCO DE CONDESADORES CASO DE ESTUDIO ALIMENTADOR ALAMOR	32
4.1	Diagrama unifilar Subestación Pindal	32
4.2	Características Técnicas Alimentador Alamor	33
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	40
5.1	Conclusiones	40
5.2	Recomendaciones	41
	ANEXOS	42
	A ANEXO 1: Datos referenciales del alimentador Alamor	43
	BIBLIOGRAFÍA	47

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	<i>Representación de la instalación física de un banco de condensadores [1].</i>	10
1.2	<i>Formulación del problema</i>	11
1.3	<i>Diagrama para la formulación del problema</i>	11
1.4	<i>Estado del Arte</i>	12
2.1	<i>Partición de datos cuantitativos del PSO [2]</i>	16
2.2	<i>Diagrama de flujo del algoritmo PSO</i>	19
3.1	<i>Sistema radial de 10 barras [2]</i>	21
3.2	<i>Perfiles de voltaje</i>	28
3.3	<i>Perdidas de potencia Activa y Reactiva.</i>	28
3.4	<i>Perdidas de potencia Activa y Reactiva.</i>	30
3.5	<i>Error Aproximado con PSO</i>	31
4.1	<i>Diagrama Unifilar subestación Pindal</i>	33
4.2	<i>Perfiles de voltaje</i>	34
4.3	<i>Perfiles de voltaje</i>	36
4.4	<i>Pérdidas de potencia activa y reactiva</i>	37

ÍNDICE DE TABLAS

1.1	Límites para el índice de nivel de voltaje	8
3.1	Comparación de voltajes antes y después	26
3.2	Potencia reactiva antes y después del uso de PSO	27
3.3	Resultados de pérdidas de potencia activa antes y después del uso de PSO	29
3.4	Resultados de pérdidas de potencia reactiva antes y después del uso de PSO	30
4.1	Niveles de voltaje de salida del Alimentador Alamor	33
4.2	Cargabilidad del alimentador Alamor periodo 2018-2022	34
4.3	Pérdidas de potencia activa antes y después del uso de PSO	38
4.4	Pérdidas de potencia reactiva antes y después del uso de PSO	39
A.1	Datos de voltaje en los nodos principales del alimentador Alamor.	43
A.2	Datos potencia activa y reactiva en las barras seleccionadas del alimentador Alamor	44
A.3	Nodos seleccionados como caso de estudio alimentador Alamor	45

INTRODUCCIÓN

En este trabajo de titulación se propone el uso de técnicas para la adecuada ubicación de banco de condensadores para mantener un voltaje estable. Este enfoque tiene como objetivo principal garantizar el cumplimiento de los requerimientos normativos [3] y mejorar la confiabilidad del suministro de energía eléctrica en el sistema.

Lo que se espera desarrollar a través de este trabajo es mejorar los perfiles de voltaje del alimentador primario Alamor perteneciente a la subestación Pindal, para asegurar la estabilidad del sistema. Es importante destacar que cualquier fluctuación en el perfil de voltaje puede tener un efecto negativo en los otros alimentadores de las barras de la subestación mencionada, lo que puede provocar algunos apagones e interrupciones de energías en áreas adyacentes. Por lo tanto, mejorar los perfiles de voltaje es crucial para mantener la confiabilidad del suministro de energía eléctrica en todo el sistema [4].

En el Capítulo Uno, se aborda el desarrollo del marco teórico, que incluye la revisión de la normativa vigente para la caída admisible de voltaje en los alimentadores primarios y el diseño de bancos de condensadores. El Capítulo Dos, se centra en el desarrollo del algoritmo PSO (*Optimización por Enjambre de Partículas*) junto con su pseudocódigo genérico. En el Capítulo Tres se presenta la implementación del algoritmo PSO en un sistema de diez barras. En el Capítulo Cuatro, se propone una metodología que comprende un análisis inicial de los parámetros técnicos del alimentador Alamor, así como la ubicación óptima de bancos de condensadores. Finalmente, el Capítulo Cinco presenta las conclusiones y recomendaciones derivadas de los resultados obtenidos en el estudio.

PROBLEMA Y OBJETIVOS

Problema

El problema teórico que se plantea consiste en lograr un ajuste adecuado del perfil de voltaje en un alimentador. Esto se busca conseguir mediante el uso de técnicas para la ubicación correcta de bancos de condensadores.

El perfil de voltaje en un sistema eléctrico es un factor crítico que puede afectar el funcionamiento de los equipos eléctricos y electrónicos, así como la vida útil de los mismos. En este sentido, es necesario que los perfiles de voltaje se mantengan dentro de los valores nominales para evitar problemas de sobretensión o subvoltaje [5].

En numerosas ocasiones, los perfiles de voltaje en los alimentadores primarios presentan variaciones y desviaciones con respecto a los valores nominales, lo cual puede tener un impacto negativo en el funcionamiento de los equipos eléctricos en la red. Una de las principales causas de estas variaciones en los perfiles de voltaje es la presencia de una carga desequilibrada [4].

La variación en la carga de los sistemas eléctricos conlleva a fluctuaciones en el voltaje, las cuales pueden afectar el funcionamiento de los equipos y generar problemas de calidad de energía en la red eléctrica.

Una solución común para estabilizar el voltaje en los sistemas de distribución eléctrica es la instalación de bancos de condensadores, los cuales pueden ayudar a mejorar la eficiencia en la distribución de energía eléctrica, reducir la pérdida de energía, disminuir la demanda de potencia reactiva y mejorar el factor de potencia en la red.

Objetivo General

Ajustar los perfiles de voltaje en el alimentador primario Alamor perteneciente a la subestación Pindal a través del uso de bancos de condensadores para mantener el voltaje en valores aceptables de acuerdo con la normativa de calidad de energía vigente en el Ecuador.

Objetivos Específicos

- Modelar el sistema de subestación de 69kV de la EERSSA verificando el estado de cargabilidad y los perfiles de voltaje del alimentador primario Alamor con la herramienta MatPower para el estudio de flujo de potencia.
- Corregir los perfiles de voltaje y mejorar la eficiencia energética en el Alimentador Alamor, determinando el punto de acoplamiento común y los grupos de condensadores adecuados para la conexión.
- Validar la eficacia de la ubicación de bancos de condensadores para la reducción de los perfiles de voltaje en el sistema eléctrico, mediante la realización de pruebas y comparación de los resultados con los criterios y estándares de eficiencia energética establecidos en [6], a fin de garantizar la más adecuada corrección de voltaje y un aumento en la eficiencia energética del sistema.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Sistemas de Distribución y Alimentador Primario

Los sistemas de distribución son un conjunto de equipos, líneas y elementos que se utilizan para llevar la energía eléctrica desde los puntos de generación o transformación de alto voltaje hasta los consumidores finales, ya sean hogares, empresas o industrias [7]. Un alimentador eléctrico, por su parte, constituye una configuración de elementos y conductores eléctricos cuya función radica en trasladar la energía eléctrica desde un punto de suministro, como una subestación, hasta un lugar de consumo o un transformador de distribución. Los alimentadores eléctricos desempeñan un papel crucial en el sistema de distribución de energía eléctrica, ya que facilitan la transferencia eficiente de energía a largas distancias, desde puntos centrales de suministro hasta una serie de puntos de consumo [7].

1.1.1 Topología de los Sistemas de distribución

1. Radial: En un sistema de distribución radial, las líneas de distribución se conectan en una configuración en forma de árbol, desde la subestación hasta los usuarios finales. Es la topología más común para sistemas de distribución eléctrica de baja y media tensión [8].
2. Anillo: En un sistema de distribución en anillo, las líneas de distribución se conectan en un circuito cerrado, de manera que la energía puede fluir en ambas direcciones. Este tipo de topología se utiliza principalmente en sistemas de distribución de alta tensión [8].

3. Radial con bucles: En esta topología, se crean bucles en la red eléctrica para proporcionar una mayor redundancia y mejorar la confiabilidad del sistema [8].
4. Mallado: En este sistema, las líneas de distribución se conectan en una configuración de malla, de manera que la energía puede fluir en múltiples direcciones. Esta topología se utiliza en sistemas de distribución de alta tensión y es común en grandes áreas metropolitanas [8].
5. Combinaciones: También es posible combinar diferentes topologías para crear sistemas de distribución eléctrica más complejos y eficientes. Por ejemplo, se puede utilizar una topología radial en áreas rurales o suburbanas, mientras que en áreas urbanas se puede utilizar una topología en anillo o mallada para proporcionar una mayor redundancia y confiabilidad [8].

1.2 Estrategias para el análisis del perfil de voltaje en un alimentador

A continuación se enlista las principales estrategias para el análisis del perfil de voltaje en un alimentador:

1. Monitoreo continuo: La estrategia más común para el análisis del perfil de voltaje en un alimentador eléctrico es el monitoreo continuo, que implica la medición constante de los niveles de voltaje en diferentes puntos del alimentador. Para ello, se utilizan dispositivos de medición como los registradores de voltaje, que registran y almacenan los niveles de voltaje a lo largo del tiempo [9].
2. Análisis estadístico: Otra estrategia consiste en realizar un análisis estadístico de los datos de voltaje obtenidos a través del monitoreo continuo. Este análisis permite identificar patrones y tendencias en el comportamiento del voltaje, así como la presencia de eventos anómalos como picos de voltaje o caídas de tensión [9].
3. Modelos de simulación: El uso de modelos de simulación computacional es otra estrategia útil para el análisis del perfil de voltaje en un alimentador eléctrico. Estos modelos permiten simular el comportamiento de la red eléctrica bajo diferentes condiciones de operación, y pueden ser utilizados para evaluar el impacto de la ubicación de los bancos de condensadores en el perfil de voltaje [9].

4. Análisis de armónicos: Los armónicos son componentes de frecuencia no deseada presentes en las señales eléctricas. En el análisis del perfil de voltaje, es importante evaluar la presencia de armónicos y su impacto en la calidad del suministro eléctrico. Para ello, se utilizan dispositivos de medición especiales, como los analizadores de espectro, que permiten identificar la presencia y la magnitud de los armónicos [9].
5. Análisis de la carga: Finalmente, el análisis de la carga conectada al alimentador eléctrico puede ser una estrategia útil para entender el comportamiento del voltaje en la red. Este análisis implica evaluar la distribución de la carga en el alimentador, identificar cargas no balanceadas y evaluar la capacidad del sistema para soportar la carga actual y futura [9] [4].

1.2.1 Técnicas de optimización

Entre las técnicas de optimización utilizadas en sistemas de distribución para mejorar los perfiles de voltaje se encuentran:

1. Capacitores: La instalación de capacitores en el sistema de distribución puede reducir la caída de voltaje en las líneas de transmisión y mejorar el perfil de voltaje. Los capacitores proporcionan la energía reactiva necesaria para contrarrestar la carga inductiva de la línea y consecuentemente mejorar el factor de potencia de la red [7].
2. Transformadores reguladores de voltaje: estos transformadores se utilizan para controlar el voltaje en el sistema de distribución. Son capaces de aumentar o disminuir el voltaje según sea necesario para mantener un suministro constante y estable [7].
3. Cambiadores de tomas automáticos: estos dispositivos se utilizan en conjunto con los transformadores reguladores de voltaje para ajustar el voltaje en el sistema de distribución. Los cambiadores de tomas automáticos monitorean el voltaje y ajustan el transformador en consecuencia para mantener un suministro de voltaje estable [1].
4. Sistemas de control y monitoreo en tiempo real: estos sistemas permiten a los operadores del sistema monitorear y controlar el voltaje en tiempo real. Los datos recopilados pueden utilizarse para identificar áreas problemáticas y abordar las causas subyacentes de los problemas de voltaje [1].

5. Tecnología avanzada de sensores: la tecnología avanzada de sensores, como los medidores inteligentes, puede proporcionar datos en tiempo real sobre el consumo de energía y el nivel de voltaje en la red de distribución. Estos datos se pueden utilizar para optimizar la demanda y mejorar el perfil de voltaje [10].

1.3 Normativa de la caída de voltaje de Alimentadores Primarios

En Ecuador, la regulación de los perfiles de voltaje en los alimentadores primarios se encuentra establecida por la *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2305:2012*, que aborda la Calidad del Suministro de Energía Eléctrica [6], y la *Resolución N°ARCERNNR-017/2020*, que hace mención a la “Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica” [11].

1.3.1 Cálculo de la caída de voltaje de un circuito eléctrico según la NEC/NFPA70/NTC2050 (*National Electrical Code*)

Según la normativa [6] en el Artículo 210-19 “La caída de voltaje en cualquier circuito ramal no debe ser mayor del 1,5%. La caída de voltaje conjunta en los conductores del alimentador y los circuitos ramales no debe ser mayor del 2,5 %”. El método de la caída de voltaje en función de los KVA, depende de los siguientes principios:

- Considerar una carga con factor de potencia constante, la caída de voltaje a través del circuito es proporcional a la cantidad de carga.
- Considerar un conductor uniforme con carga y factor de potencia constantes, por lo tanto la caída de voltaje será proporcional a la longitud del circuito.
- Se puede considerar cargas uniformemente o no distribuidas sobre el circuito, la caída de voltaje acumulada, será la producida por la suma de todas las cargas que inciden en el nodo común.

De forma general para cualquier número de fases del circuito, la caída de voltaje está dada por la ecuación 1.1.

$$kVA.m = \frac{KVA(D) \cdot l}{kV^2} \cdot (r \cdot \cos(\phi) + x \cdot \sen(\phi)) \quad (1.1)$$

Donde:

kVA(D)= Demanda del alimentador.

kV= voltaje del alimentador.

r= resistencia del alimentador en ohmios/unidad de longitud.

x= reactancia del alimentador en ohmios/unidad de longitud.

ϕ = ángulo de desfase de la corriente y voltaje del alimentador.

1.3.2 Perfiles de voltaje admisibles en un alimentador del sistema eléctrico de distribución

En lo que respecta a la calidad del producto como se menciona en el capítulo IV en [11], los rangos de voltajes admitidos se describen en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1: Límites para el índice de nivel de voltaje

Nivel de voltaje	Rango Admisible
Alto Voltaje	+/- 5%
Medio Voltaje	+/- 6%
Bajo Voltaje	+/-8 %

1.3.3 Voltajes máximos y mínimos en un alimentador eléctrico

- Voltaje Máximo:

El voltaje máximo permitido en un alimentador eléctrico se define para garantizar la seguridad de las personas y proteger los equipos y dispositivos conectados al sistema eléctrico. En sistemas de distribución de bajo voltaje, el voltaje máximo suele ser 127 V en línea neutro y 220 V en línea-línea. Para sistemas de medio voltaje, los voltajes máximos pueden variar, pero suelen estar en el rango de varios miles de voltios entre 11 kV a 33 kV [3].

- Voltaje Mínimo:

El voltaje mínimo permitido en un alimentador eléctrico es importante para garantizar el funcionamiento adecuado de los equipos eléctricos y electrónicos

conectados al sistema. Un voltaje demasiado bajo puede provocar un mal funcionamiento de los equipos y en casos extremos, puede dañarlos. Para sistemas de baja tensión, el voltaje mínimo suele ser 120-127 V en corriente alterna monofásica y 220 V en corriente alterna trifásica. Sin embargo, el voltaje mínimo permitido puede variar dependiendo del país y la normativa local [3].

1.4 Revisión Óptima de Banco de Capacitores

Es un proceso mediante el cual se analiza y optimiza la instalación y operación de bancos de capacitores en un sistema eléctrico de potencia. Su objetivo principal es mejorar la eficiencia y estabilidad del sistema eléctrico, reduciendo pérdidas, mejorando los perfiles de voltaje y optimizando el factor de potencia [1].

1.4.1 Capacitores Dinámicos

Los capacitores dinámicos, también conocidos como capacitores conmutados o capacitores conmutables, son un tipo especial de capacitores utilizados en electrónica para almacenar y liberar cargas eléctricas de manera controlada. A diferencia de los capacitores convencionales, que mantienen su carga constante, los capacitores dinámicos pueden cambiar su capacidad y almacenar o liberar energía en respuesta a señales de control [1].

1.4.2 Capacitores Físicos

La estructura básica de un capacitor físico consiste en dos placas conductoras, que pueden ser de metal o algún otro material conductor, colocadas en paralelo y separadas por un dieléctrico, que es un material aislante que evita el flujo de corriente entre las placas. La capacidad del capacitor para almacenar carga depende del área de las placas, la distancia entre ellas y las propiedades dieléctricas del material utilizado [1].

En la Figura 1.1 se representa la instalación física de un banco de condensadores.

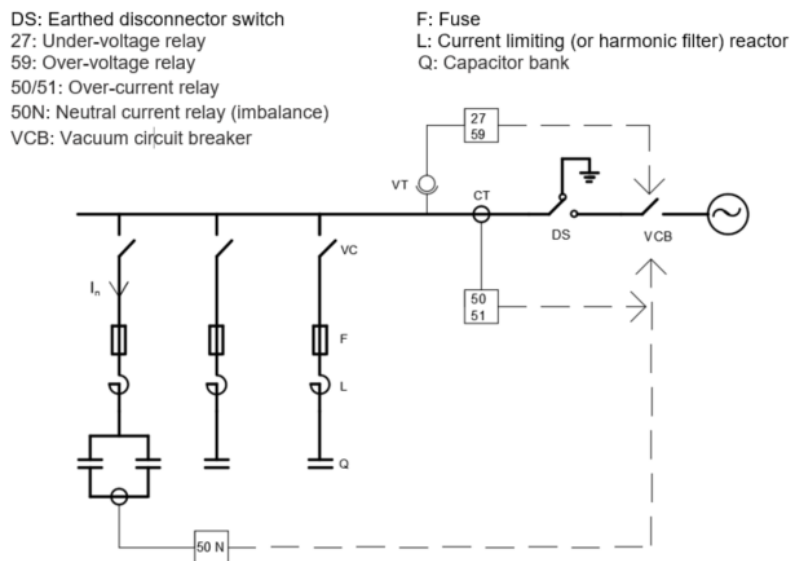


Figura 1.1: Representación de la instalación física de un banco de condensadores [1].

1.5 Estado del Arte

En esta sección se realiza una revisión bibliográfica para la resolución de la formulación del problema del tema propuesto en el desarrollo de este trabajo.

En la Figura 1.2, se analiza la formulación del problema para el proyecto propuesto. En esta imagen se describen la temática que aborda el problema de mejorar los perfiles de voltajes, como la caída de voltaje en los alimentadores, perfiles de voltaje, tipo y ubicación de banco de capacitores, reglamento de caída de voltaje y el uso de banco de capacitores para disminuir la caída de voltaje.

De esta forma una vez identificada los temas alrededor del problema se describe el número de fuentes bibliográficas utilizadas para abordar las temáticas existentes como se muestra en la Figura 1.3, se identifica los temas principales y el número de fuentes bibliográficas utilizadas para abordar cada el problema propuesto.

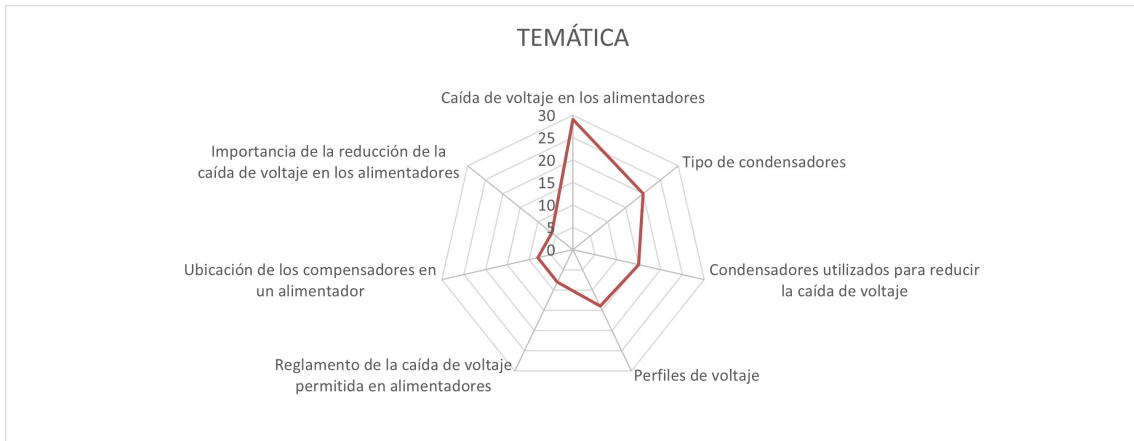


Figura 1.2: *Formulación del problema*

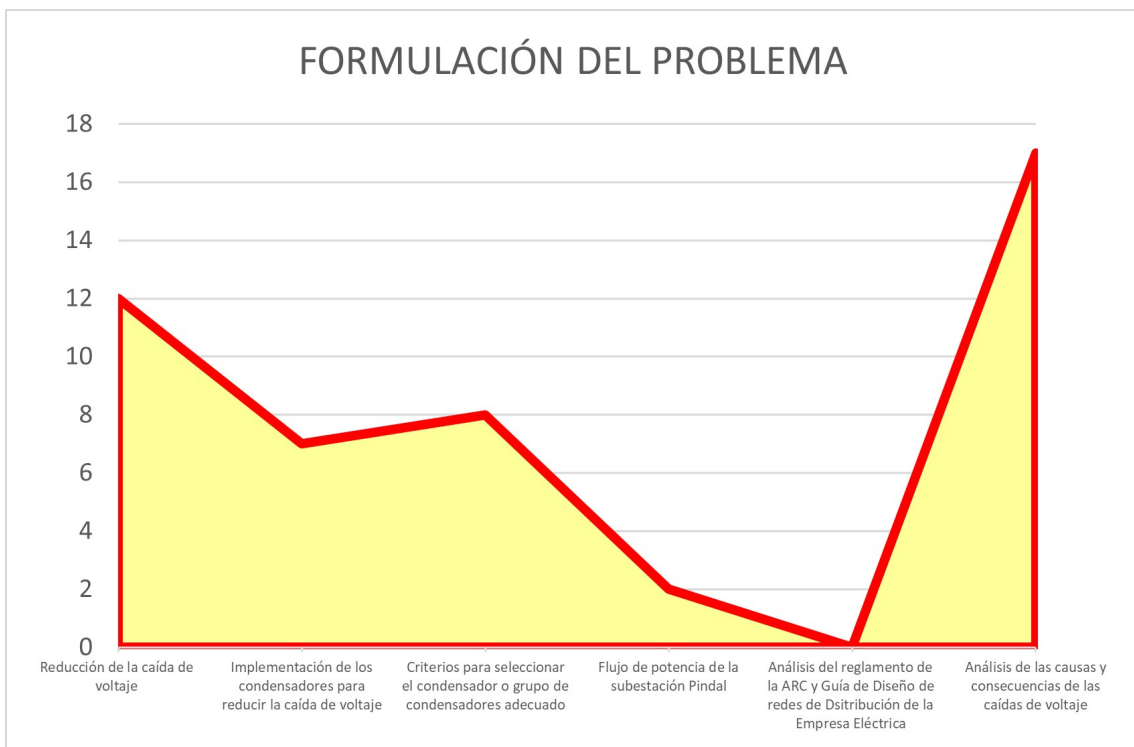


Figura 1.3: *Diagrama para la formulación del problema*

En resumen a continuación se muestra la matriz de estado de arte para el tema propuesto en la Figura 1.4 :

CAPÍTULO 2

ALGORITMO PSO

El algoritmo metaheurístico que se aplica para la ubicación óptima de los bancos de capacitores es la optimización por enjambre de partículas (PSO).

2.1 Descripción del Algoritmo

El método consiste, en que a partir de una población o enjambre de posibles soluciones las cuales se denominan partículas se mueven a lo largo de un espacio de búsqueda considerando dos aspectos fundamentales: su posición y su velocidad. Estas partículas se presentan en forma de vectores con múltiples dimensiones (n-dimensiones), este vector ocupa una posición conforme atraviesa todos los espacios de la solución con la velocidad asignada en las condiciones iniciales [2]. Este proceso permite que las partículas retengan en su memoria la mejor posición encontrada hasta el momento en cada iteración. En el contexto del PSO (Optimización por Enjambre de Partículas) , cada partícula toma una posición identificada con la letra x que se expresa mediante la ecuación 2.1.

$$x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in} \quad (2.1)$$

Las soluciones iniciales se seleccionan al azar, para que luego a través del algoritmo de PSO se busque el valor óptimo que vaya actualizando las posibles soluciones en cada iteración, la solución óptima depende de la velocidad (v) de cada partícula como se representa en la ecuación 2.2.

$$v_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in} \quad (2.2)$$

Una vez seleccionadas las condiciones iniciales en lo que respecta a posición y velocidad, el comportamiento de las partículas se describe mediante la ecuación

2.3 y 2.4.

$$v_{d+1} = k \cdot (w + v_d + \phi_1 \cdot rand \cdot (Pbest - xd) + \phi_2 \cdot rand \cdot (Gbest - Xd)) \quad (2.3)$$

$$x_{d+1} = x_d + v_{d+1} \quad (2.4)$$

Donde:

w = Factor de peso de inercia.

ϕ_1 y ϕ_2 = Factores de aceleración.

$rand$ = Valor aleatorio entre 0 y 1.

k = Factor de construcción.

$Pbest$ = Mejor posición de la partícula.

$Qbest$ = Mejor posición del conjunto de partículas en todas las iteraciones.

v_d = Velocidad de la partícula.

x_d = Posición de la partícula.

Para el factor de peso inercial tomado en cada iteración se debe ocupar la ecuación 2.5.

$$w = w_{m\acute{a}x} - \frac{w_{m\acute{a}x} - w_{m\acute{i}n}}{iter_{m\acute{a}x}} \cdot iter \quad (2.5)$$

Donde:

$w_{m\acute{a}x}$ =peso máximo.

$w_{m\acute{i}n}$ =peso mínimo.

$iter_{m\acute{a}x}$ =total de número de iteraciones.

$iter$ =número de iteración actual.

Por otra parte los factores de aceleración manejan el tamaño de los pasos de cada iteración, estos valores no deben ser muy pequeños debido a que puede darse el caso de que no tengan la suficiente velocidad para alcanzar las regiones alrededor del objetivo [2].

2.1.1 Parámetros del PSO

2.1.1.1 Tamaño del Enjambre

El conjunto de partículas utilizado para alcanzar una solución óptima mediante el algoritmo varía generalmente de 20 a 40 partículas. Sin embargo, es importante destacar que este número puede aumentar de manera proporcional a la complejidad del problema [2].

2.1.1.2 Dimensionamiento y Dominio

La dimensión de las partículas debe corresponder al número de variables de control involucradas en el problema. Además, el dominio de estas partículas está directamente influenciado por las restricciones presentes.

2.1.1.3 Factor de aceleración

Los coeficientes de ϕ_1 y ϕ_2 manejan una velocidad relativa con la que la partícula busca la mejor posición particular y grupal, se considera que $\phi_1 \geq 2$ y $\phi_2 \leq 4$.

2.1.1.4 Criterio de parada

Se pueden tener dos criterios de parada, el uno en base al número de iteraciones, o bien, si el error aproximado es menor al 1%, es decir valor absoluto al comparar la mejor solución actual y la mejor solución anterior.

$$E_a = 100 \cdot \frac{|mejorsoluciónactual - mejorsoluciónanterior|}{mejorsoluciónactual} \quad (2.6)$$

En la imagen de la Figura 2.1 se describe la agrupación de las partículas utilizando los criterios mencionados en las subsecciones del presente documento.

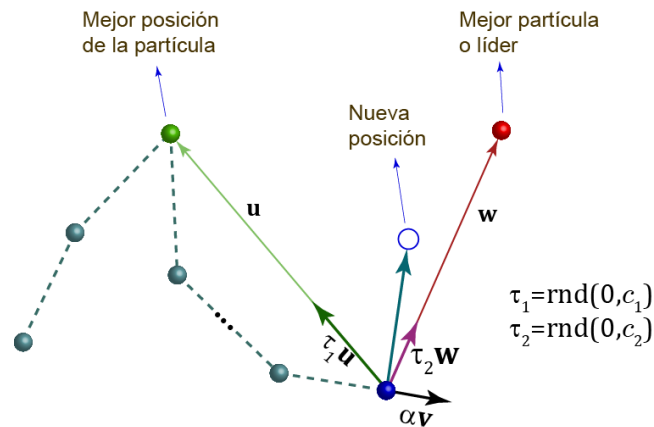


Figura 1.1: Movimiento de una partícula.

Figura 2.1: Partición de datos cuantitativos del PSO [2]

2.1.2 Planteamiento del proceso de optimización

El propósito del problema en cuestión es determinar la ubicación óptima para situar los bancos de capacitores, con el fin de reducir las pérdidas en una red de distribución eléctrica.

2.1.2.1 Función Objetivo

La función objetivo se establece en base al voltaje y matriz de admitancia del circuito mediante la ecuación 2.7, también se puede apreciar esta Función Objetivo en la Figura 3.4 [2].

$$\text{Minimizar } J = \sum_{i=1}^N (P_i \cdot C_P + Q_i \cdot C_Q) \quad (2.7)$$

Donde:

J =Función objetivo que se desea minimizar.

N =Es el número total de barras o nodos en el sistema eléctrico.

P_i = Representa las pérdidas de potencia activa en la barra i del sistema eléctrico.

C_P =Es el costo de las pérdidas de potencia activa por unidad.

Q_i =Representa el valor de potencia reactiva que contribuye cada banco de capacitores a las barras candidatas activas.

C_Q =Es el costo de instalación de un banco de condensadores por unidad.

El costo promedio asociado a las pérdidas de potencia activa según lo citan en [2], es de 0.04 \$/kW, mientras que el costo por instalación de banco de capacitores incluido sistema de control promedio es de 40 \$/kVar.

2.1.2.2 Restricciones

Las restricciones están asociadas a las ecuaciones de balance de potencia activa y reactiva como se puede observar en las ecuaciones 2.8 y 2.9.

$$P_{gen} - \sum_{j \in N_B} G_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cdot \cos\theta_{ij}) = 0 \quad (2.8)$$

$$Q_{gen} - \sum_{j \in N_B} -B_{ii}(V_i^2 + V_j^2) - B_{ij}(V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cdot \cos\theta_{ij}) = 0 \quad (2.9)$$

Donde:

G_{ij} =valor real de la matriz de admitancia.

B_{ij} =valor imaginario de la matriz de admitancia.

V_i =valor de la barra de salida.

V_j =valor de la barra de llegada.

θ_{ij} = diferencia de ángulo entre barras.

P_{gen} =Potencia activa generada.

Q_{gen} =Potencia reactiva generada.

N_B = número de barras del sistema.

Para cumplir con los perfiles adecuados de voltaje se debe considerar los límites operacionales, los cuales están comprendidos entre 0.95 y 1.05 en p.u.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (2.10)$$

Donde:

V_i^{min} = límite de voltaje mínimo en la barra.

V_i^{max} = límite de voltaje máximo en la barra.

V_i = voltaje de referencia en la barra.

Además, se debe incorporar la restricción que asegura que el factor de potencia del sistema permanezca dentro de los límites permitidos, tal y como se detalla en la

siguiente ecuación

$$FP_i \geq 0.92 \quad (2.11)$$

Donde:

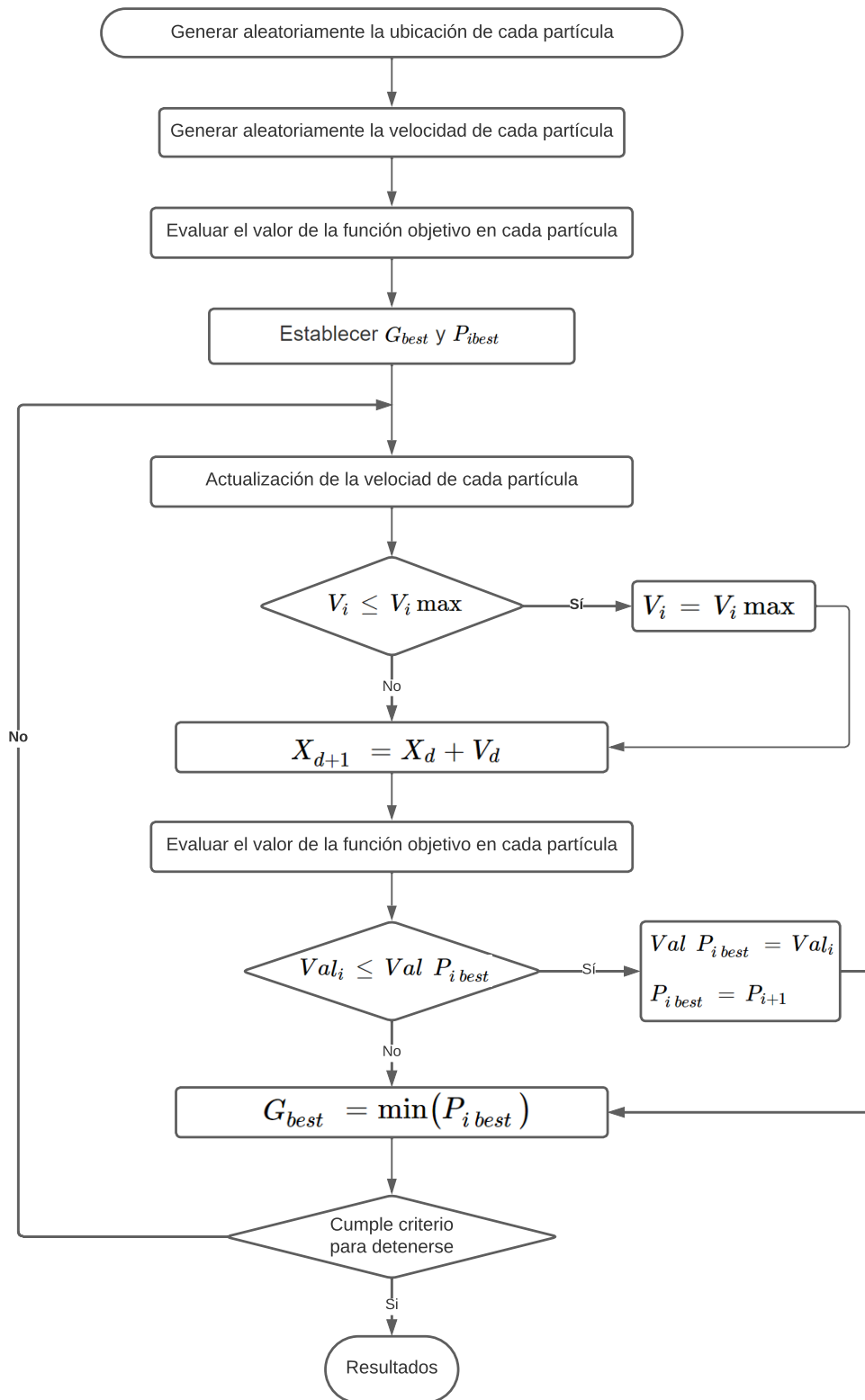
FP_i representa el factor de potencia en la barra i del sistema eléctrico.

Esta restricción asegura que en cada barra del sistema, el factor de potencia sea igual o mayor a 0.92. Un factor de potencia mayor a 0.92 indica una mayor capacidad de corregir la potencia reactiva y, por lo tanto, una mejora en los perfiles de voltaje del sistema eléctrico.

Otra restricción que también se debe tomar en cuenta es la capacidad mínima y máxima del banco de capacitores en cada barra, para lo cual se considera que el máximo sea de menor o igual capacidad de la potencia reactiva que genere cada barra.

El algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) utilizará esta restricción durante el proceso de búsqueda para encontrar la mejor combinación de variables (como las pérdidas de potencia activa y reactiva) que cumplan con esta condición, al mismo tiempo que minimiza la función objetivo previamente definida (el costo por pérdidas de potencia activa, en conjunto con el costo de los bancos de capacitores).

De esta manera, el algoritmo PSO buscará la solución óptima que cumpla con la restricción de factor de potencia mayor a 0.92 y mejore los perfiles de voltaje del sistema eléctrico. En la Figura 2.2 se detalla el diagrama de flujo del PSO. Las variables planteadas por el flujo de potencia controlan la potencia reactiva y se relacionan con el despacho óptimo de reactivos por parte de los bancos de condensadores. Se anticipa que a través del proceso de optimización, se lograrán obtener valores óptimos que contribuyan a la disminución de las pérdidas y al mejoramiento del perfil de voltaje en el alimentador Alamor. Este enfoque será el tema central de la Tesis de Grado en el campo de la Electricidad.

**Figura 2.2:** Diagrama de flujo del algoritmo PSO

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Sistema de 10 barras

El sistema de 10 barras consta de 10 nodos o barras interconectadas que representan los buses de una red eléctrica. Cada barra puede representar una generación, una carga o una conexión de transmisión entre buses. Estos buses se numeran del uno al diez para su identificación.

En un sistema de 10 barras, se pueden encontrar diferentes tipos de buses:

- Barra Slack (*Barra de referencia*): Es la barra donde se fija el voltaje y el ángulo de fase. Generalmente se designa como la Barra 1 (Bus 1) en un sistema de 10 barras, esta barra puede representar el arranque de un alimentador en la subestación.
- Barras PV (*Generación controlada por voltaje*): Son barras donde el voltaje se mantiene constante, pero la generación puede variar para mantener el voltaje constante. Estas barras suelen representar generadores.
- Barras PQ (*Potencia reactiva y activa controladas*): Son barras donde tanto la potencia activa como la reactiva pueden variar para mantener el equilibrio en el sistema. Estas barras suelen representar las cargas.

El estudio del flujo de potencia en un sistema de 10 barras implica calcular las magnitudes y los ángulos de los voltajes en cada barra, así como las potencias activas y reactivas fluyendo a través de las líneas de transmisión. Esto se realiza mediante

métodos de solución de ecuaciones que modelan las características eléctricas del sistema, como las impedancias de las líneas, las cargas y las generaciones.

En la imagen de la Figura 3.1 se describe el sistema radial de 10 barras como ejemplo de estudio para determinar la ubicación óptima de un banco de condensadores.

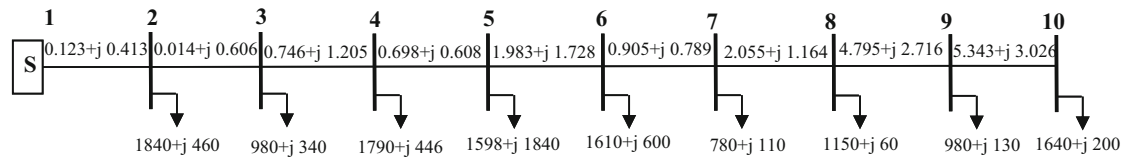


Figura 3.1: Sistema radial de 10 barras [2]

3.2 Flujo de Potencia

El proceso para correr el flujo de potencia en Matlab, se describe a continuación:

Los datos de línea y de barra se leen desde un archivo Excel. A continuación, se calculan los valores de resistencia (R) y reactancia (X) en por unidad (pu) dividiendo los valores de resistencia y reactancia en el archivo por la impedancia base (Z_b). Luego, se crea la matriz binaria que representa el conexionado de la matriz de admitancia del bus (YBUS) inicializando una matriz de ceros y asignando valores de uno bajo la diagonal.

La ecuación para calcular la impedancia base (Z_b) es:

$$Z_b = \frac{KV^2}{MVA} \quad (3.1)$$

Donde:

Z_b : impedancia base en pu.

KV : tensión base en kV.

MVA : es la potencia base en MVA.

El cálculo del flujo de carga. Toma los datos de línea (LD), datos de barra (BD), la matriz de admitancia del bus (YBUS), resistencias (R), reactancias (X) y la potencia base (MVA) como entrada y devuelve los valores de voltaje (V), corriente (I), pérdida de potencia activa (Ploss) y pérdida de potencia reactiva (Qloss).

El flujo de carga se calcula mediante el método de barrido hacia adelante y hacia atrás (*Forward-Backward Sweep*). El algoritmo iterativo se ejecuta durante un número máximo de iteraciones (*Max_{iter}*) para converger a una solución.

Las ecuaciones clave utilizadas en el flujo de carga son:

- Cálculo de la corriente en cada rama (I) utilizando la potencia compleja (S) y el voltaje del bus (V_B):

$$I = \frac{\bar{S}}{\bar{V}_B} \quad (3.2)$$

Donde:

I : corriente en el bus en A.

S : potencia compleja en VA.

V_B : voltaje del bus en V.

- La ecuación para calcular el voltaje en cada bus (V_B) mediante el barrido hacia adelante y hacia atrás:

$$\bar{V}_B = \bar{V}_o - \overline{YBUS'} \cdot \overline{ZD} \cdot \overline{YBUS} \cdot \bar{I} \quad (3.3)$$

Donde:

V_o : voltaje inicial del bus en V.

$YBUS$: matriz de admitancia del bus.

ZD : matriz diagonal de la impedancia de línea.

I : corriente en el bus en A.

- La ecuación para calcular la pérdida de potencia activa (P_{loss}) y reactiva (Q_{loss}) en cada rama:

$$P_{loss} = (|I|^2) \cdot R \quad (3.4)$$

$$Q_{loss} = (|I|^2) \cdot X \quad (3.5)$$

Donde:

P_{loss} : pérdida de potencia activa en W.

Q_{loss} : pérdida de potencia reactiva en VAR.

I : valor absoluto de la corriente en A.

R : resistencia en pu.

X : reactancia en pu.

3.3 Algoritmo PSO

Proceso implementado en MATLAB (código), se describe la ubicación óptima de un banco de capacitores en un sistema de 10 barras, tomado de [2]. El algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO, por sus siglas en inglés) es una técnica de optimización inspirada en el comportamiento social de los pájaros y peces. Se utiliza para resolver problemas de optimización global, donde se busca encontrar la mejor solución en un espacio de búsqueda multidimensional.

Dentro del marco del problema de optimización de la ubicación de bancos de capacitores en sistemas eléctricos, el propósito principal radica en identificar la ubicación más adecuada para la instalación de los capacitores. Esto se hace con el propósito de mejorar el perfil de voltaje y disminuir las pérdidas de potencia en el sistema.

El algoritmo PSO funciona mediante la simulación de un enjambre de partículas en un espacio de búsqueda. Cada partícula representa un posible resultado para el problema y se desplaza a lo largo del espacio de búsqueda con el objetivo de encontrar la solución óptima. Las partículas ajustan su posición y velocidad en función de su experiencia personal y de la experiencia colectiva del enjambre.

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas en el algoritmo PSO para la ubicación óptima de bancos de capacitores:

1. Inicialización:

- Se definen los límites y restricciones del problema, como los voltajes mínimo y máximo permitidos y las capacidades mínima y máxima del banco de capacitores. En cada iteración, de forma aleatoria se designan

los valores de los banco de capacitores que estén dentro de los límites de cada bus.

- Se establecen los parámetros del algoritmo PSO, como el número de partículas, el número máximo de iteraciones, y los parámetros cognitivo y social.
- Se inicializan las posiciones y velocidades de las partículas. En este caso, las posiciones representan la presencia o ausencia de un capacitor en cada barra del sistema.

2. Evaluación de la aptitud:

- Se define una función de aptitud o fitness que es la función objetivo descrita en la ecuación 2.7 que evalúa las posiciones de los capacitores, la mejora de los perfiles de voltaje, las pérdidas de potencia y factor de potencia, esto se alcanza validando las restricciones del modelo de optimización descritas en las ecuaciones 2.8 - 2.11 .
- En este caso, la función de aptitud puede basarse en perfiles de voltaje, donde se penalizan los voltajes fuera del rango objetivo y se busca minimizar la diferencia entre los voltajes y los límites objetivo.

3. Actualización de la mejor posición personal y global:

- Cada partícula mantiene un registro de su mejor posición personal (la posición que ha tenido el mejor valor de aptitud hasta el momento) y el valor de aptitud correspondiente.
- Se actualiza la mejor posición personal si la aptitud de la posición actual es mejor que la mejor aptitud personal registrada.
- Se actualiza la mejor posición global si la aptitud de la posición actual es mejor que la mejor aptitud global registrada.

4. Actualización de las velocidades y posiciones:

- Se utiliza la ecuación de actualización de velocidad de PSO para ajustar la velocidad de cada partícula.
- La velocidad de una partícula se actualiza en función de su velocidad anterior, la distancia a su mejor posición personal y la distancia a la mejor posición global.
- Se utiliza un parámetro de peso de inercia para controlar la influencia de la velocidad anterior en la nueva velocidad. La ecuación de actualización de velocidad puede variar dependiendo de la variante específica de PSO utilizada.

5. Ejecución del flujo de carga:

- Después de actualizar las posiciones de los capacitores, se ejecuta el flujo de carga para evaluar el impacto de la ubicación de los capacitores en el sistema eléctrico.
- Se utilizan ecuaciones del flujo de carga para calcular el perfil de voltaje, las pérdidas de potencia activa y reactiva, y otros parámetros del sistema.
- En este caso, se utiliza la función `runPowerFlow()` que ejecuta el flujo de carga con los datos de línea, datos de barra, matriz de admitancia, resistencia y reactancia en *p.u.*, como se detalla en la sección 3.

6. Actualización de la mejor posición y valor global:

- Se compara la aptitud de la posición después de ejecutar el flujo de carga con la mejor aptitud global registrada.
- Si la aptitud es mejor, se actualiza la mejor posición global con la posición actual y se actualiza el valor de la mejor aptitud global.

7. Repetición de las iteraciones:

- El proceso de actualización de velocidades y posiciones, ejecución del flujo de carga y actualización de la mejor posición y valor global se repite durante un número predeterminado de iteraciones.
- En cada iteración, se busca mejorar la solución actual y acercarse a la solución óptima.

Al finalizar las iteraciones, se obtienen las mejores posiciones de los capacitores y se muestra el resultado, incluyendo el perfil de voltaje antes y después del uso de PSO, las pérdidas de potencia activa y reactiva, las capacidades de capacitancia óptimas por barra y el error aproximado. Para este caso de estudio, el programa nos indica que se debe instalar una capacidad de banco de condensadores de 3000.00 kVAR, que deben ser ubicados en las barras 5, 6, 8 y 10, con una capacidad reactiva de 1759.00, 363.00, 362.00 y 516.00 kVAR respectivamente.

Al inyectar esta potencia reactiva en el sistema se obtuvieron como resultado los voltajes que se describen en la Tabla 3.1:

La caída de voltaje se puede calcular utilizando la fórmula:

$$\text{Caída de voltaje (\%)} = \left(\frac{V_{\text{after}} - V_{\text{before}}}{V_{\text{before}}} \right) \cdot 100$$

Tabla 3.1: Comparación de voltajes antes y después

N° de Barras	Voltaje antes de PSO (<i>p.u.</i>)	Voltaje después de PSO (<i>p.u.</i>)
1	1.0000	1.0000
2	0.9929	0.9953
3	0.9874	0.9934
4	0.9634	0.9769
5	0.9480	0.9654
6	0.9171	0.9396
7	0.9071	0.9313
8	0.8890	0.9158
9	0.8587	0.8900
10	0.8375	0.8724

Calculando la caída de voltaje para cada índice de la tabla, se obtiene:

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_1 = \left(\frac{1.0000 - 1.0000}{1.0000} \right) \cdot 100 = 0\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_2 = \left(\frac{0.9939 - 0.9929}{0.9929} \right) \cdot 100 \approx 0.1008\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_3 = \left(\frac{0.9893 - 0.9874}{0.9874} \right) \cdot 100 \approx 0.1926\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_4 = \left(\frac{0.9672 - 0.9634}{0.9634} \right) \cdot 100 \approx 0.3941\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_5 = \left(\frac{0.9528 - 0.9480}{0.9480} \right) \cdot 100 \approx 0.5042\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_6 = \left(\frac{0.9249 - 0.9172}{0.9172} \right) \cdot 100 \approx 0.8385\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_7 = \left(\frac{0.9149 - 0.9072}{0.9072} \right) \cdot 100 \approx 0.8467\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_8 = \left(\frac{0.8969 - 0.8890}{0.8890} \right) \cdot 100 \approx 0.8900\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_9 = \left(\frac{0.8669 - 0.8587}{0.8587} \right) \cdot 100 \approx 0.9556\%$$

$$\text{Caída de voltaje } (\%)_{10} = \left(\frac{0.8460 - 0.8375}{0.8375} \right) \cdot 100 \approx 1.0149\%$$

En las Figuras 3.2 y 3.3, se describe una comparación de voltajes y pérdidas de potencia activa y reactiva antes y después del uso de PSO.

En la Tabla 3.2 se puede apreciar el cambio de la potencia reactiva en el sistema de 10 barras

Tabla 3.2: Potencia reactiva antes y después del uso de PSO

N° de Barras	Potencia reactiva antes (kW)	Potencia reactiva después (kW)
1	0.00	0.00
2	460	460
3	340	340
4	446	446
5	1840	81
6	600	237
7	110	110
8	60	-302
9	130	130
10	200	-316

Perfiles de Voltaje:

- La gráfica de perfiles de voltaje muestra cómo varían los voltajes en cada una de las barras del sistema eléctrico.
- En el eje x , se representa el Número de la barra, mientras que en el eje y se representa el valor del Voltaje en por unidad ($p.u.$).
- La línea azul muestra los voltajes antes de aplicar el algoritmo PSO, y la línea roja muestra los voltajes después de aplicar el algoritmo.
- Al comparar las dos líneas, podemos observar los cambios en los voltajes de las barras y determinar si el algoritmo PSO logró mejorar la estabilidad del sistema eléctrico.
- Las barras cuyos voltajes están por debajo del límite mínimo permitido se ajustan al valor mínimo, mientras que las barras cuyos voltajes están por encima del límite máximo permitido se ajustan al valor máximo.

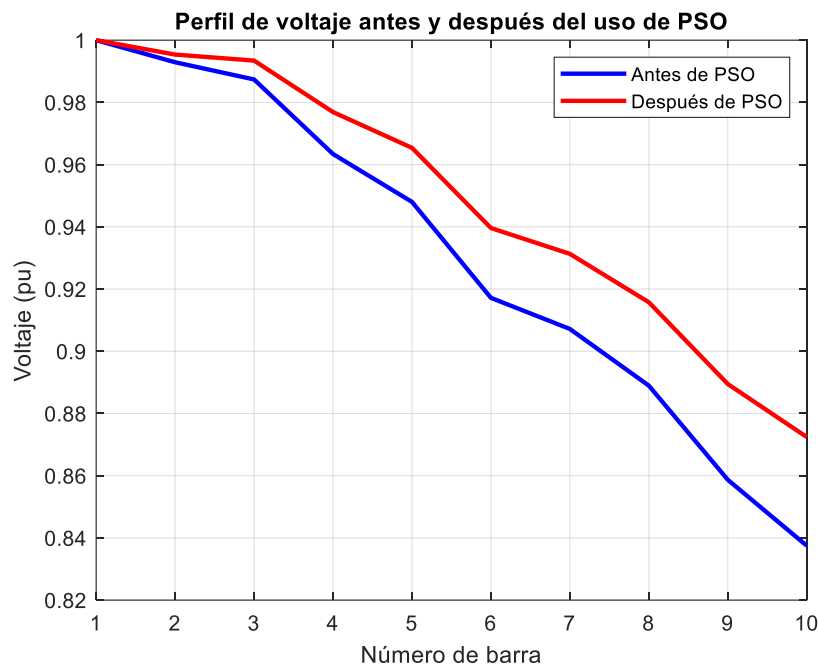


Figura 3.2: Perfiles de voltaje

Pérdidas de Potencia:

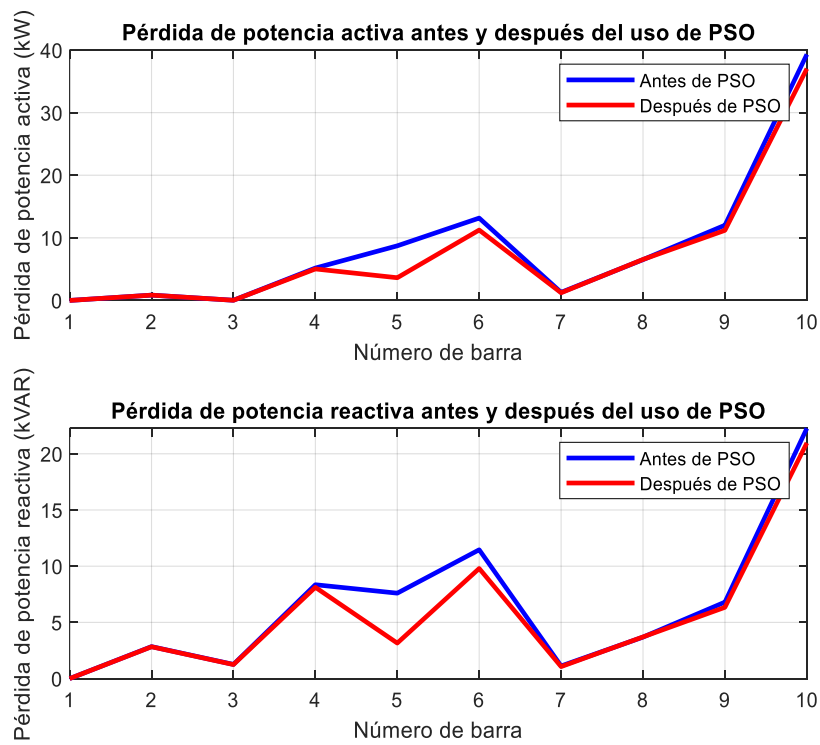


Figura 3.3: Perdidas de potencia Activa y Reactiva.

- La gráfica de pérdidas de potencia muestra cómo varían las pérdidas de potencia activa y reactiva en cada una de las barras del sistema eléctrico.
- En el eje x , se representa el número de la barra, mientras que en el eje y se representa el valor de la pérdida de potencia en kilovatios (kW) para la potencia activa y en kilovoltamperios reactivos ($kVAR$) para la potencia reactiva.
- La línea azul muestra las pérdidas de potencia antes de aplicar el algoritmo PSO, y la línea roja muestra las pérdidas de potencia después de aplicar el algoritmo.
- Al comparar las dos líneas, podemos determinar si el algoritmo PSO logró reducir las pérdidas de potencia en el sistema eléctrico.
- Las pérdidas de potencia se calculan multiplicando el cuadrado de la corriente en cada barra por la resistencia para la potencia activa y por la reactancia para la potencia reactiva.

Los resultados se pueden visualizar de manera más efectiva en las Tablas 3.3 y 3.4 que presenta las pérdidas de potencia activa y reactiva tanto antes como después de la colocación de los bancos de capacitores.

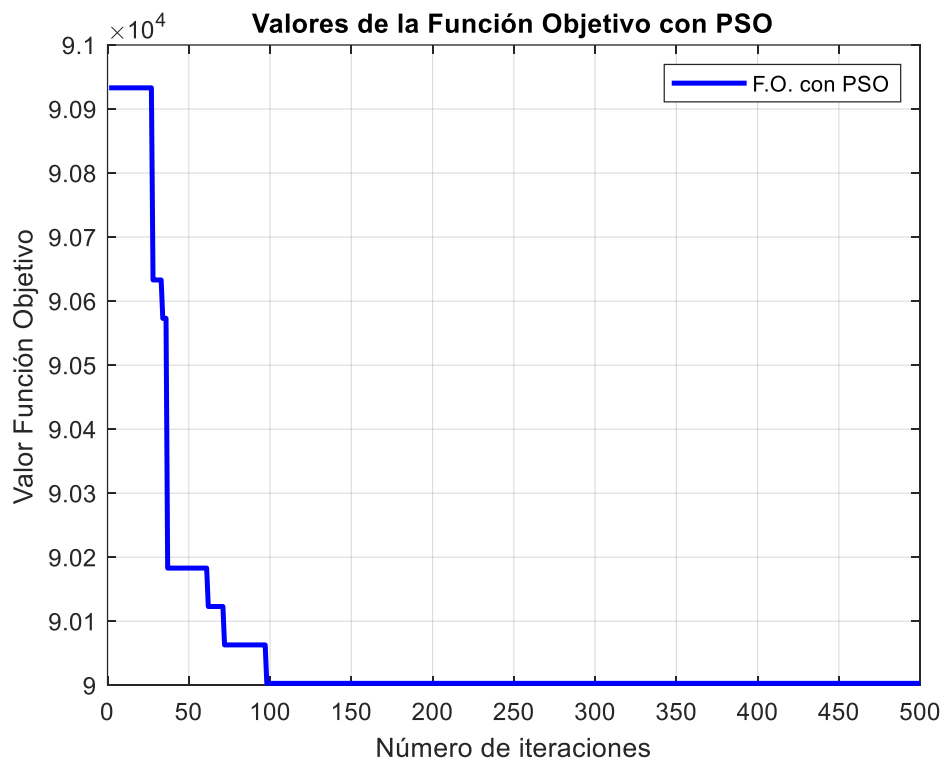
Tabla 3.3: Resultados de pérdidas de potencia activa antes y después del uso de PSO

N° de Barras	Potencia activa antes (kW)	Potencia activa después (kW)
1	0.000	0.000
2	0.850	0.846
3	0.029	0.028
4	5.172	5.030
5	8.724	3.626
6	13.156	11.245
7	1.290	1.224
8	6.519	6.517
9	12.015	11.198
10	39.309	37.018

Función Objetivo:

Tabla 3.4: Resultados de pérdidas de potencia reactiva antes y después del uso de PSO

N° de Barras	Potencia reactiva antes ($kVAR$)	Potencia reactiva después ($kVAR$)
1	0.000	0.000
2	2.846	2.833
3	1.263	1.248
4	8.352	8.122
5	7.600	3.159
6	11.461	9.796
7	1.124	1.066
8	3.693	3.709
9	6.805	6.342
10	22.264	20.966

**Figura 3.4:** Pérdidas de potencia Activa y Reactiva.

3.3.1 Error Aproximado con PSO

El cálculo del error aproximado se realiza en cada iteración del algoritmo. Este error aproximado proporciona información sobre la convergencia del algoritmo hacia una

solución óptima y se utiliza para evaluar el rendimiento y la precisión del algoritmo PSO en la resolución del problema en cuestión, este error hasta llegar a la última iteración debe disminuir. La fórmula utilizada dentro del algoritmo es:

$$RE = \frac{|ValorIter_k - ValorIter_{k-1}|}{ValorIter_k} \cdot 100\% \quad (3.6)$$

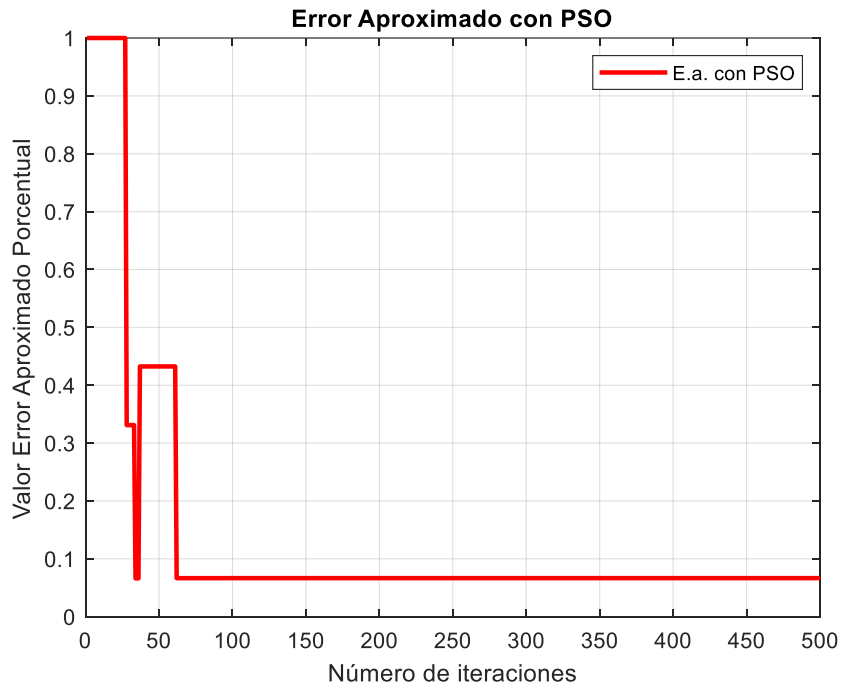


Figura 3.5: *Error Aproximado con PSO*

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LA UBICACIÓN ÓPTIMA DEL BANCO DE CONDESADORES CASO DE ESTUDIO ALIMENTADOR ALAMOR

4.1 Diagrama unifilar Subestación Pindal

La subestación Pindal se encuentra localizada en la provincia de Loja, cuenta con un transformador eléctrico de 5 MVA , un voltaje de 69/13.8 kV y cinco alimentadores primarios entre ellos Pozul, Pindal, Zapotillo, Alamor y Sabanilla.

El alimentador primario Alamor abastece de energía eléctrica a la comunidad de Mangahurquillo en el Limo, cantón Puyango de la provincia de Loja. Este alimentador es uno de los más conflictivos de la Empresa Eléctrica Regional del Sur, debido a su gran longitud y configuración radial [12]. En la imagen de la Figura 4.1 se presenta el diagrama unifilar de la subestación el Pindal.

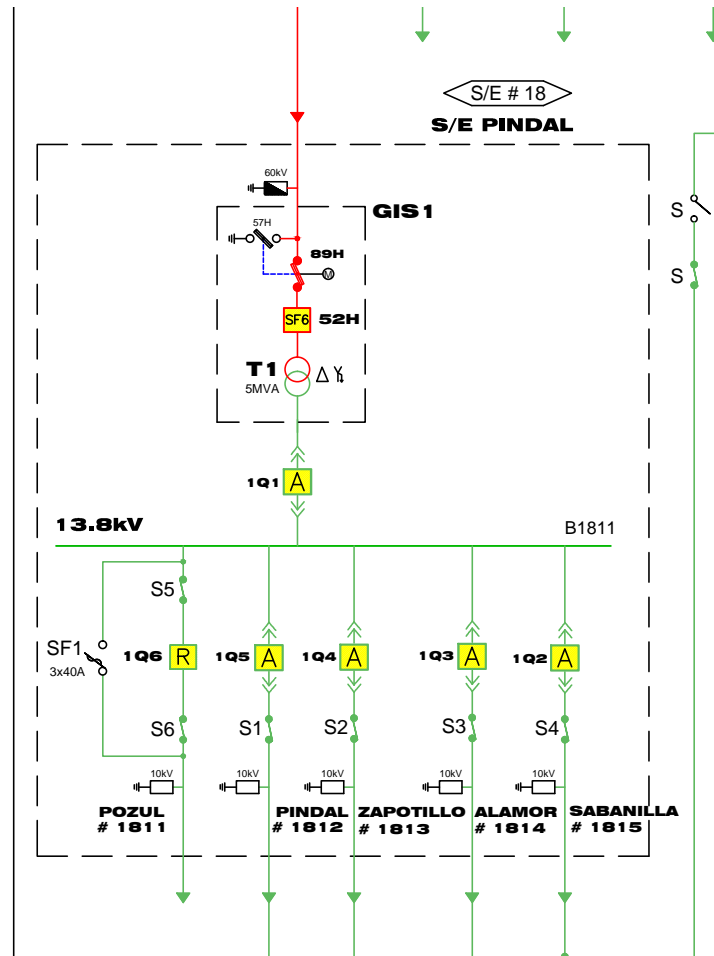


Figura 4.1: Diagrama Unifilar subestación Pindal

4.2 Características Técnicas Alimentador Alamor

Como lo menciona [12] el alimentador primario Alamor pertenece a la subestación Pindal y presta sus servicios a la ciudad de Alamor y a la mayor parte de sus parroquias, así como a comunidades de Pindal y Zapotillo. El alimentador tiene una disposición radial que cubre un área aproximada de 860 km² y brinda servicio a 6492 clientes. En la Tabla 4.1 se describe los niveles de voltaje de salida del alimentador Alamor en el año 2022.

Tabla 4.1: Niveles de voltaje de salida del Alimentador Alamor

Fase	Voltaje Línea-Línea [kV]	Voltaje Línea-Neutro [kV]	Corriente [A]
Fase A	13.8	8	24.5
Fase B	13.8	8	20.5
Fase C	13.8	8	18.4

Para el estudio realizado se requiere conocer la cargabilidad del alimentador primario, en la Tabla 4.2 se describe la carga total del alimentador en los últimos 5 años.

Tabla 4.2: Cargabilidad del alimentador Alamor periodo 2018-2022

Año	Carga [kVA]	Factor de Potencia %
2018	1403.48	96.64
2019	1462.15	96.47
2020	1433.95	95.31
2021	1495.44	95.23
2022	1538.77	95.73

En base al análisis realizado en el capítulo 3, para el alimentador Alamor, se aplica el software para 25 barras, analizando que estas son las barras con un factor de potencia menor a 0.94, este análisis se realiza en base a las pérdidas de potencia activa y reactiva.

A continuación, en la Figura 4.2 se presenta el escenario del Alimentador primario Alamor usado en este proyecto junto con la ubicación correspondiente de los bancos de condensadores.

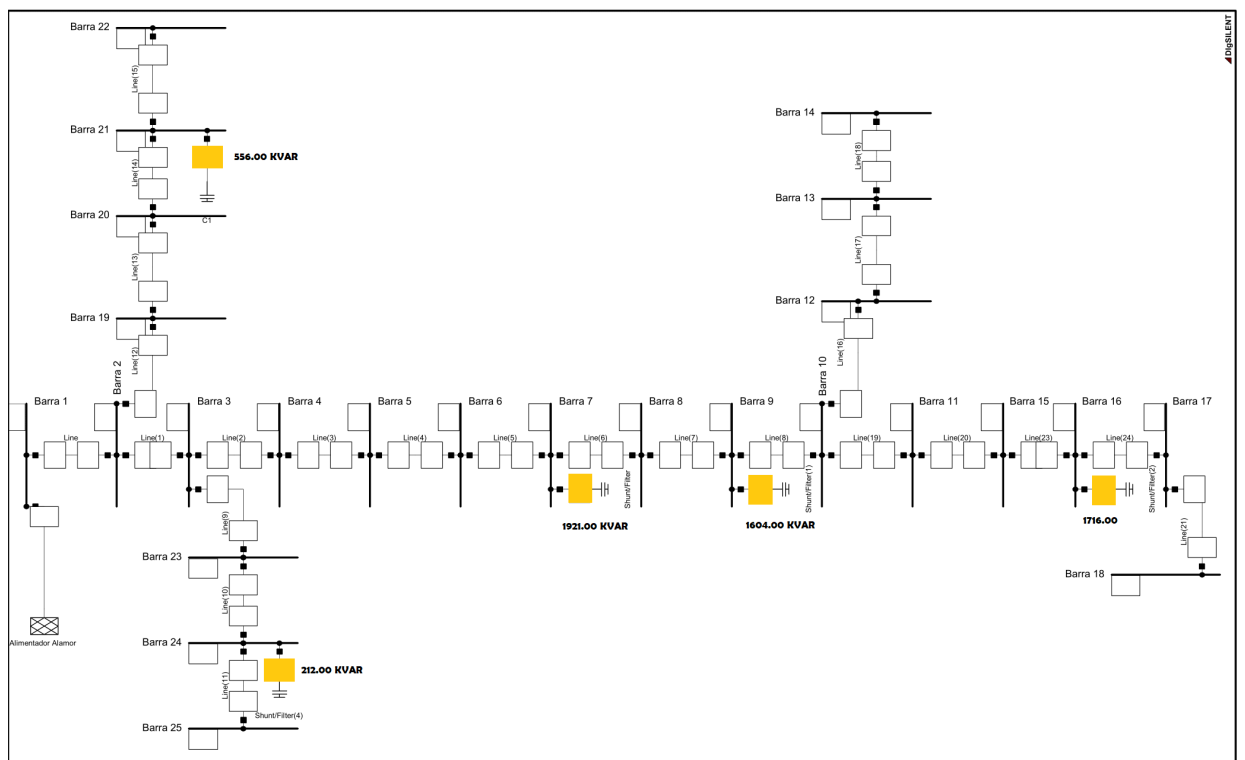


Figura 4.2: Perfiles de voltaje

Al finalizar las iteraciones, se obtienen las mejores posiciones de los capacitores y se muestra el resultado, incluyendo el perfil de voltaje antes y después del uso de PSO, las pérdidas de potencia activa y reactiva, y las capacidades de capacitancia óptimas por barra. Para este caso de estudio, el programa nos indica que se debe instalar una capacidad de banco de condensadores de 6009.00 kVAR, que deben ser ubicados en las barras 7, 9, 16 y 21 y 24, con una capacidad reactiva de 1921.00, 1604.00, 1716.00, 556.00 y 212.00 kVAR respectivamente.

Al inyectar esta potencia reactiva en el sistema se obtuvieron como resultado los voltajes que se describen a continuación:

N° de Barras	Voltaje antes de PSO (<i>p.u.</i>)	Voltaje después de PSO (<i>p.u.</i>)
1	1	1
2	0.99632	0.99737
3	0.99388	0.99630
4	0.98287	0.98803
5	0.97487	0.98146
6	0.95481	0.96553
7	0.94650	0.95913
8	0.92952	0.94417
9	0.89243	0.91199
10	0.85378	0.87663
11	0.84956	0.87131
12	0.84961	0.87258
13	0.84255	0.86571
14	0.83987	0.8631
15	0.84244	0.8676
16	0.83997	0.86583
17	0.8368	0.86276
18	0.83209	0.85819
19	0.98153	0.98328
20	0.98114	0.98298
21	0.98099	0.98297
22	0.98039	0.98237
23	0.99264	0.99511
24	0.99092	0.99354
25	0.9906	0.9322

La caída de voltaje se puede calcular utilizando la fórmula:

$$\text{Caída de voltaje (\%)} = \left(\frac{V_{\text{after}} - V_{\text{before}}}{V_{\text{before}}} \right) \cdot 100$$

En la imagen de las Figuras 4.3 y 4.4, se describe una comparación de voltajes y pérdidas de potencia activa y reactiva antes y después del uso de PSO.

Perfiles de Voltaje:

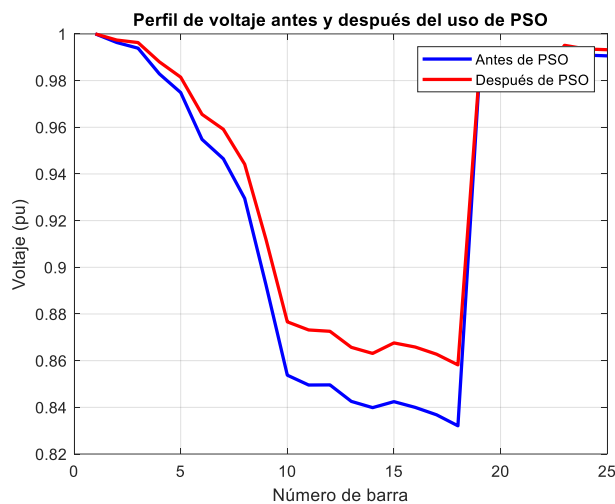


Figura 4.3: Perfiles de voltaje

Asimismo, siguiendo un enfoque similar al implementado en el sistema de 10 barras, se lleva a cabo un proceso de ajuste en los casos en que los voltajes caen por debajo del límite mínimo permitido o cuando las barras exhiben voltajes que superan el límite máximo permitido. Esta estrategia de ajuste tiene como objetivo fundamental asegurar que dichos valores se encuentren adecuadamente alineados dentro de los umbrales permitidos. Este enfoque no solo garantiza el cumplimiento de las especificaciones normativas, sino que también contribuye a la estabilidad y la confiabilidad del sistema eléctrico en cuestión. Este procedimiento de ajuste se enmarca en la búsqueda de una operación eficiente y segura de los sistemas eléctricos.

Pérdidas de Potencia:

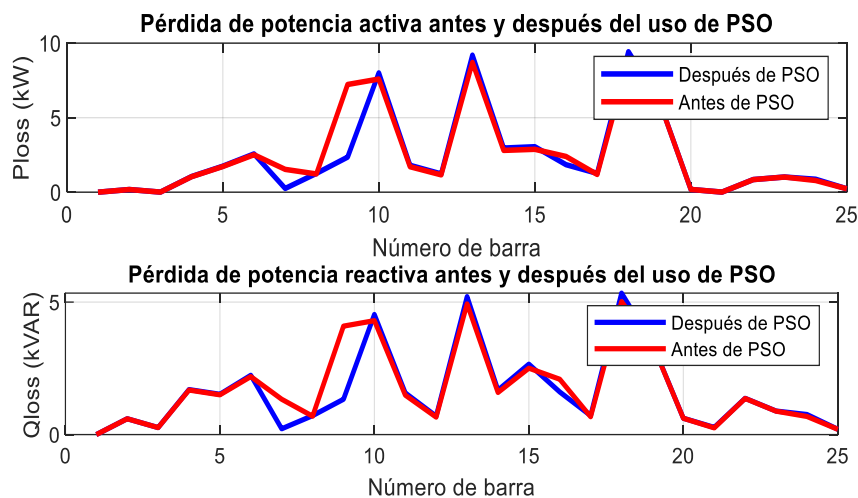


Figura 4.4: Pérdidas de potencia activa y reactiva

En la gráfica de las pérdidas de potencia tanto activa como reactiva se puede visualizar que en las barras en donde se ubicarán los bancos de capacitores estas disminuyen.

La interpretación detallada de la evolución de la potencia activa y reactiva en el alimentador Alamor está perfectamente delineada en la Tabla 4.4 y en la Tabla 4.3, estas tablas proporcionan una instantánea precisa de cómo se han modificado las magnitudes de potencia antes y después de la incorporación de los bancos de condensadores.

En el contexto de cada iteración que compone el proceso de optimización, se estima el error aproximado que implica la elección de la posición óptima junto con la capacidad idónea del banco de condensadores dentro del sistema, luego de realizar 500 iteraciones, este enfoque iterativo garantiza un nivel alto de exhaustividad en la búsqueda de la configuración más eficiente y efectiva para la instalación de los bancos de capacitores en el alimentador Alamor.

Tabla 4.3: Pérdidas de potencia activa antes y después del uso de PSO

N° de Barras	Potencia activa antes (kW)	Potencia activa después (kW)
1	0.000	0.000
2	0.17873	0.1783
3	0.00610	0.0060
4	1.05160	1.0406
5	1.7458	1.7225
6	2.5686	2.5119
7	0.2508	1.5305
8	1.2618	1.2229
9	2.3537	7.2265
10	81.0036	7.5917
11	1.8048	1.7086
12	1.2254	1.1617
13	9.1948	8.7095
14	2.9613	2.8040
15	3.0509	2.8765
16	1.8463	1.8000
17	1.2632	1.1884
18	9.4276	8.8629
19	6.0557	6.0342
20	0.1843	0.1836
21	0.0062	0.0058
22	0.8477	0.8443
23	1.0199	1.0148
24	0.8692	0.7849
25	0.2289	0.2277

Tabla 4.4: Pérdidas de potencia reactiva antes y después del uso de PSO

N° de Barras	Potencia reactiva antes ($kVAR$)	Potencia reactiva después ($kVAR$)
1	0.000	0.000
2	0.59822	0.5969
3	0.26392	0.2626
4	1.6979	1.6802
5	1.5209	1.5005
6	2.2377	2.1883
7	0.2184	0.2151
8	0.7146	0.6926
9	1.3331	1.3407
10	4.5331	4.2998
11	1.5721	1.4883
12	0.6940	0.6579
13	5.2078	4.9330
14	1.6772	1.5881
15	2.6578	2.5059
16	1.6083	1.5320
17	0.7154	0.6730
18	5.3397	5.0198
19	3.4298	3.4177
20	0.6168	0.6145
21	0.2708	0.2525
22	1.3688	1.3633
23	0.8884	0.8840
24	0.7572	0.6838
25	0.1994	0.1984

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

La aplicación del algoritmo PSO ha demostrado ser efectiva en la reducción de las pérdidas de potencia activa y reactiva en el sistema eléctrico. Esto ha contribuido a una mejora significativa en la eficiencia de la transmisión y distribución de energía, al minimizar las pérdidas en los conductores y equipos asociados.

Se observa un aumento en los niveles de voltaje en cada barra del alimentador eléctrico después de aplicar el algoritmo PSO. Esto ha mejorado la calidad del suministro eléctrico, asegurando que los equipos y dispositivos conectados al sistema reciban voltajes adecuados para su correcto funcionamiento.

Gracias a la optimización realizada por el algoritmo PSO, se ha logrado disminuir significativamente la caída de voltaje a lo largo del alimentador eléctrico. Esta reducción en las pérdidas de voltaje mejora la eficiencia y confiabilidad del sistema, evitando caídas de voltaje excesivas en las barras más alejadas de la fuente de energía.

La mejora en los perfiles de voltaje ha contribuido a una mayor estabilidad del sistema eléctrico de Alamor. La reducción de las pérdidas y la regulación de los niveles de voltaje minimizan las fluctuaciones y previenen situaciones de inestabilidad que podrían afectar la operación normal del sistema, esto también conlleva a una mejora en el factor de potencia del sistema, obteniendo un factor de

potencia de 0.956.

5.2 Recomendaciones

Continuar utilizando el algoritmo PSO periódicamente para mantener las pérdidas de potencia bajo control y optimizar la operación del sistema eléctrico.

Realizar estudios detallados de estabilidad de voltaje para garantizar que los valores de voltaje en cada barra se mantengan dentro de los límites aceptables y evitar problemas de sobretensión.

Monitorear continuamente las barras con mayores caídas de voltaje y considerar la instalación de dispositivos reguladores de voltaje en puntos estratégicos para mantener los niveles de voltaje estables y una mejora en el factor de potencia.

Realizar estudios de estabilidad de transitorios y estabilidad dinámica para asegurar que el sistema pueda hacer frente a perturbaciones y eventos imprevistos sin poner en riesgo su operación.

ANEXOS

ANEXO A

ANEXO 1: Datos referenciales del alimentador Alamor

Tabla A.1: Datos de voltaje en los nodos principales del alimentador Alamor.

LINE	BS	BLL	R	X
1	1	2	0.0157	0.134
2	2	3	0.0302	0.195
3	3	4	0.019	0.455
4	3	23	0.739	0.075
5	23	24	1.983	1.125
6	24	25	0.012	0.062
7	2	19	2.055	1.333
8	19	20	4.323	2.716
9	20	21	5.153	3.187
10	21	22	0.015	0.152
11	4	5	3.26	1.010
12	5	6	4.795	2.145
13	6	7	5.153	3.017
14	7	8	0.033	1.128
15	8	9	0.014	0.187
16	9	10	2.156	1.096
17	10	11	4.716	3.100
18	10	12	3.026	2.024
19	12	13	0.250	0.113
20	13	14	0.630	0.060
21	11	15	1.983	1.132
22	15	16	0.905	0.010
23	16	17	1.264	1.105
24	17	18	4.891	3.179

Tabla A.2: Datos potencia activa y reactiva en las barras seleccionadas del alimentador Alamor

Barra	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAR)
1	1356.90	182.500
2	910.30	360.100
3	1354.60	1181.400
4	1401.10	124.500
5	1341.50	676.500
6	1610.30	600.00
7	780.30	131.200
8	1150.50	79.500
9	975.70	68.300
10	1358.10	198.000
11	980.70	190.100
12	1269.60	80.900
13	1128.10	193.200
14	1220.50	191.500
15	995.10	60.100
16	115.10	105.300
17	700.90	198.600
18	345.60	104.500
19	950.00	187.400
20	1289.00	65.500
21	918.10	101.700
22	1318.00	70.700
23	1149.90	141.000
24	947.70	147.900
25	1079.40	52.000

Tabla A.3: Nodos seleccionados como caso de estudio alimentador Alamor

Nodo	Alimentador	Tramo
1	ALIM-1800180T14	146174_MTA
2	ALIM-1800180T14	146175_MTA
3	ALIM-1800180T14	146176_MTA
4	ALIM-1800180T14	146177_MTA
5	ALIM-1800180T14	146178_MTA
6	ALIM-1800180T14	146179_MTA
7	ALIM-1800180T14	146977_MTA
8	ALIM-1800180T14	148563_MTA
9	ALIM-1800180T14	148564_MTA
10	ALIM-1800180T14	146207_MTA
11	ALIM-1800180T14	146208_MTA
12	ALIM-1800180T14	146187_MTA
13	ALIM-1800180T14	146188_MTA
14	ALIM-1800180T14	146189_MTA
15	ALIM-1800180T14	523763_MTA
16	ALIM-1800180T14	146191_MTA
17	ALIM-1800180T14	146192_MTA
18	ALIM-1800180T14	146476_MTA
19	ALIM-1800180T14	146477_MTA
20	ALIM-1800180T14	146983_MTA
21	ALIM-1800180T14	146501_MTA
22	ALIM-1800180T14	146502_MTA
23	ALIM-1800180T14	146503_MTA
24	ALIM-1800180T14	146504_MTA

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Y. Peña, L. R. Rodríguez, J. Ramírez-Bient, y P. García-León, “Monitoreo, control y diagnóstico en bancos de capacitores automáticos en baja tensión,” *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 26, no. 1, pp. 28–42, Mar. 2018. [En línea]. Recuperable: <https://doi.org/10.4067/s0718-33052018000100028>
- [2] A. A. Abou El-Ela, M. T. Mouwafi, y A. A. Elbaset, *Ubicación óptima del condensador para reducir la pérdida de energía y mejorar el perfil de voltaje*. Cham: Springer, 2020. [En línea]. Recuperable: <https://ohdbks.overdrive.com/ohdbks-clermont/content/media/9250810>
- [3] EERSSA, “Normas técnicas para el diseño de redes eléctricas urbanas y rurales pdf,” 2012. [En línea]. Recuperable: <https://es.scribd.com/document/364337540/Normas-tecnicas-para-el-diseno-de-redes-electricas-urbanas-y-rurales-pdf>
- [4] S. Singh y A. Rao, “Optimal allocation of capacitors in distribution systems using particle swarm optimization,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 1267–1275, Dec. 2012. [En línea]. Recuperable: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.06.059>
- [5] L. Ma, L. Wang, y Z. Liu, “Topology identification of distribution networks using a split-EM based data-driven approach,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 2019–2031, May 2022. [En línea]. Recuperable: <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2021.3119649>
- [6] C. D. P. ECUATORIANO y C. INEN, “Instituto ecuatoriano de normalización,” *NTE INEN*, vol. 1996, 1898. [En línea]. Recuperable: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/reglamentos/RTE-057-2R.pdf>
- [7] J. D. Glover, M. S. Sarma, y T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, 5th ed. Boston, MA: Cengage Learning, 2012. [En línea]. Recuperable:

- https://web.nit.ac.ir/~shahabi.m/M.Sc%20and%20PhD%20materials/Power%20System%20Transient%20Analysis%20Course/Books/Power%20System%20Analysis%20and%20Design%20by%20Glover%20and%20Sarma_6thEdition.pdf
- [8] D. A. Arboleda Guerrero, “Diseño de sistema para la gestión de mantenimiento de subestaciones para la empresa eléctrica regional del sur *s.a.*,” B.S. thesis, 2013. [En línea]. Recuperable: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/4333/1/UPS-CT002624.pdf>
- [9] F. S. Pinos Vergara, “Reconfiguración óptima de redes de distribución eléctricas para mejorar los perfiles de voltaje utilizando la información proporcionada por unidades de medición fasorial pmus,” Master’s thesis, 2022. [En línea]. Recuperable: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23700>
- [10] A. G. Peralta, “Planning of FiWi networks to support communications infrastructure of SG and SC,” in *Broadband Communications Networks - Recent Advances and Lessons from Practice*. InTech, Sep. 2018. [En línea]. Recuperable: <https://doi.org/10.5772/intechopen.71781>
- [11] R. ARCERNNR-013/20202021, “Capítulo ii: Calidad del producto,” *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos No Renovables*, 2022. [En línea]. Recuperable: https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/09/resolucion_nro._arcernnr-013-2021ed.pdf
- [12] L. Rojas, “Generación distribuida en alimentadores radiales,” *Universidad Nacional de Loja*, 2022. [En línea]. Recuperable: https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25518/1/LuisGabriel_RojasVivanco.pdf