

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL
Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Energía distribuida y ubicación óptima de compensadores reactivos para la mejora de la calidad de la energía

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Presentado por:

Diego Alberto Anchundia Rivera

Erick Abraham Chalco Zambrano

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

A Dios por darme fe y fuerzas necesarias para superar los obstáculos que se presentaron en el camino.

A mis padres, Abraham Chalco y Amaritza Zambrano que han sido mi apoyo incondicional y sustento en cada paso de mi vida como estudiante.

A mis hermanos Jerlyn y Alan, a mi novia Michelle, por depositar su confianza en mí y brindarme siempre su amor, cariño y apoyo sincero.

A mis amigos, compañeros y profesores, en especial a Diego Anchundia, por todo lo vivido en el transcurso de este trabajo y por las experiencias adquiridas en todos estos años que nunca olvidaré.

Erick Abraham Chalco Zambrano

DEDICATORIA

A Dios por darme sabiduría, paciencia y fuerzas para cumplir mis objetivos.

A mis padres, Jesús Anchundia y Marcelita Rivera que han sido mi apoyo incondicional y sustento en cada paso de mi vida como estudiante.

A mis hermanas Daniela y Michelle, a mi sobrina Valentina y mi cuñado Bismarck, por depositar su confianza en mí y brindarme siempre su amor, cariño y apoyo sincero.

A mis profesores, compañeros y amigos en especial a Erick Chalco, por todo lo vivido y compartido en el transcurso de nuestra carrera profesional y por las experiencias adquiridas en todos estos años que nunca olvidaré.

Diego Alberto Anchundia Rivera

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos al Ing. Manuel Álvarez Ph.D. y al Ing. Jimmy Córdova, tutores de este proyecto, quienes en todo momento nos guiaron y compartieron de sus conocimientos para lograr el mejor desempeño en este trabajo.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Diego Anchundia y Erick Chalco damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Diego Anchundia

Erick Chalco

EVALUADORES

.....
Ing. Fernando Vaca M.Sc.

PROFESOR DE LA MATERIA

.....
Ing. Manuel Álvarez Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En este documento se propone un algoritmo diseñado en base a la optimización por enjambre de partículas (PSO), cuyo objetivo es encontrar la combinación óptima de ubicación y capacidad de bancos de capacitores (BC) con el fin de reducir las pérdidas eléctricas en un sistema, a la vez que se tiene en cuenta puntos de energía distribuida (ED) que varían según la naturaleza de su comportamiento, considerando a su vez un perfil de carga anual, asimilando el caso de estudio a un sistema real. Se empleó el programa Matlab para el modelado de la metodología seleccionada y obtención de los perfiles anuales de generación eólica y fotovoltaica, a la vez que se utilizó la herramienta Matpower para adquirir los datos necesarios del flujo de potencia del caso de 118 barras de la IEEE. Los resultados obtenidos confirmaron la efectividad del algoritmo seleccionado generando una combinación óptima de BC que redujo las pérdidas en un 26 %, considerando ED y asegurando la calidad de la energía, demostrando que el algoritmo no solo es óptimo, además es viable y factible al mismo tiempo ya que genera un ahorro económico anual.

Palabras Clave: Energía distribuida, Banco de capacitores, Flujo de potencia, Pérdidas eléctricas.

ABSTRACT

The present document proposes an algorithm that has been designed based on the particle swarm optimization (PSO) which aims to find the optimum combination of location and capacity of the capacitor banks (CB). All of this, oriented on reducing electrical losses in a system and at the same time taking into consideration the distributed power points (ED) that vary according to the nature of their behavior, considering an annual electrical load profile, resembling the case study to a real system. The program Matlab used for the shaped one of the chosen methodology and securing of the annual profiles of wind and photovoltaic generation, simultaneously that used the tool Matpower to acquire the necessary information of the flow of potency of the case of 118 bars of the IEEE. The Matlab program was used for modelling the selected methodology and for obtaining the annual profiles of the wind power and photovoltaic generation. In addition, the Matpower tool was used for collecting the necessary data of the power flow of 118 bars of IEEE. The obtained results confirmed the effectiveness of the chosen algorithm generating an ideal combination of CB that reduced the losses in a 26 %, considering ED and assuring the quality of the energy, demonstrating that the algorithm is not only ideal but also plausible and feasible because it generates an economic annual savings..

Key Words: Distributed energy, Capacitor bank, Power flow, Electrical losses.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema.....	2
1.2 Justificación del problema.....	2
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Antecedentes.....	3
1.4.2 Sistema eléctrico de potencia.....	4
1.4.3 Tipos de sistemas de distribución.....	6
1.4.4 Tipo de barras.....	8
1.4.5 Alimentadores.....	9
1.4.6 Pérdidas.....	11
1.4.7 Métodos de optimización.....	13
CAPÍTULO 2.....	14
2. Metodología.....	14
2.1 Descripción de la metodología.....	14

2.2	Definición de parámetros iniciales	16
2.3	Algoritmo PSO implementado	17
2.3.1	Función Objetivo	20
2.3.2	Algoritmo.....	20
2.3.3	Interfaz Gráfica	22
CAPÍTULO 3.....		24
3.	Resultados Y ANÁLISIS	24
3.1	Descripción del sistema IEEE de 118 barras	24
3.2	Caso de estudio	24
3.3	Comportamiento final del sistema	28
3.4	Análisis económico.....	30
CAPÍTULO 4.....		32
4.	Conclusiones Y RECOMENDACIONES.....	32
	Conclusiones.....	32
	Recomendaciones.....	32
BIBLIOGRAFÍA.....		33
ANEXOS.....		36

ABREVIATURAS

- PSO Optimización por enjambre de partículas
- BC Banco de capacitores
- ED Energía distribuida
- IEEE Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
- USD United States Dollars

SIMBOLOGÍA

MW	Potencia activa
MVAr	Potencia reactiva
V	Voltaje
p.u.	Valor en por unidad
MWh	Energía
\$	Dólares
Slack	Barra infinita
PV	Barra de inyección de potencia activa y tensión fija
PQ	Barra de carga

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Sistema eléctrico de potencia.....	5
Figura 1.2 Sistema de distribución radial.....	7
Figura 1.3 Sistema de distribución en anillo	8
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología implementada.....	15
Figura 2.2 Variación de la velocidad del viento	16
Figura 2.3 Variación de la irradiación solar.....	17
Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo PSO implementado	19
Figura 3.1 Perfil horario de carga anual [23].....	25
Figura 3.2 Curva de generación eólica anual	25
Figura 3.3 Curva de generación fotovoltaica anual	26
Figura 3.4 Configuración final de sistema de 118 barras IEEE	27
Figura 3.5 Perfil de voltaje anual del sistema modificado.....	28
Figura 3.6 Perfil de carga anual del sistema modificado	29
Figura 3.7 Perfil de pérdidas anual del sistema inicial.....	30
Figura 3.8 Perfil de pérdidas anual del sistema modificado	30
Figura 4.1 Ventana de inicio de la interfaz elaborada.....	36
Figura 4.2 Ventana de ingreso de datos.....	36
Figura 4.3 Ventana de visualización de resultados del voltaje y carga.....	37
Figura 4.4 Ventana de visualización de resultado de pérdidas de energía	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Costos de capacidad comercial de capacitores [17].....	17
Tabla 3.1 Datos del sistema IEEE 118 barras [22].....	24
Tabla 3.2 BC disponibles en stock	26
Tabla 3.3 Combinación de energía distribuida instalada	26
Tabla 3.4 Combinación óptima de BC que mejoran el sistema	27

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La matriz energética del Ecuador tiene tendencia a aumentar la generación de energía eléctrica mediante recursos renovables, siendo la fuente más predominante la energía hidráulica, debido a la abundancia del recurso disponible en el país. Otras fuentes de energía renovables, como la energía eólica y energía fotovoltaica pueden ser aprovechadas por las ventajas que presentan al ser consideradas como generación distribuida, ya que al estar más próximo a los puntos de carga se obtiene una reducción en las pérdidas eléctricas de la red, a la vez que se mejora la confiabilidad y calidad de la energía eléctrica.

La implementación de generación distribuida a su vez presentan casos desfavorables en la red, esto es debido a la intermitencia provocada por el comportamiento de su naturaleza, ya que la velocidad del viento es impredecible, y la radiación solar es variable, la energía generada puede provocar cambios en el flujo de potencia, ocasionando modificaciones en el sistema eléctrico que desfavorece la operación fiable, para lo cual, es recomendable una compensación reactiva. [1]

La instalación de compensadores en el sistema eléctrico presenta ventajas fundamentales como la mejora en el perfil de voltaje, la reducción de pérdidas de potencia y la mejora del factor de potencia; donde la eficiencia depende de factores como la ubicación y la capacidad, para lo cual es necesario la implementación de herramientas que ayudan en la toma de decisiones de manera que se realice procedimientos que aseguren la optimización de las ventajas, junto con beneficios secundarios como el incremento en la capacidad de transferir corriente a través de los alimentadores, alivio de carga en los transformadores, disminución de los reactivos en la red, y por consiguiente, la mejora de la calidad de la energía alcanzando a su vez un beneficio económico. [2]

La ubicación óptima de compensadores junto con la capacidad óptima, de manera que asegure el alcance de los objetivos planteados, se lo denomina como un problema de ubicación de capacitores, el cual consiste en la determinación de ubicaciones, tipos y capacidad del banco de capacitores a instalar, así como la configuración del sistema de control para situaciones donde se presenten diferentes

casos de demanda según el perfil de carga [3]; para lo cual se plantea una función objetivo que considere estas variables junto con restricciones para obtener una optimización del problema planteado.

El uso de técnicas Metaheurísticas ante el planteamiento matemático de un problema presenta resultados óptimos, es por esto que, en este trabajo se emplea el método de optimización por enjambre de partículas, donde mediante el planteamiento de la función objetivo, considerando la minimización de las pérdidas eléctricas, se obtiene el dimensionamiento y ubicación de banco de capacitores óptimo, que junto con la generación distribuida mejora la calidad de la energía.

1.1 Descripción del problema

La problemática del proyecto se basa en encontrar un sitio óptimo para implementar bancos de capacitores, que mejoren la falta de una buena calidad de la energía en un sistema eléctrico debido a factores como: cargas elevadas, bajos voltajes en las barras, la necesidad de corregir el factor de potencia.

1.2 Justificación del problema

Con la aplicación de este proyecto se busca reducir las pérdidas en el sistema eléctrico por medio de bancos de capacitores y generación distribuida con el fin de mejorar el perfil de tensión del sistema, la ubicación óptima de dichos bancos será establecida mediante algoritmos que permitan un mejor resultado en relación de generación y pérdidas.

1.3 Objetivos

Con el fin de solucionar la problemática detallada, a continuación se detallan los objetivos del presente proyecto integrador.

1.3.1 Objetivo General

Implementar una herramienta capaz de buscar la ubicación óptima de compensadores reactivos en combinación con generación distribuida, que permitan mejorar la calidad de la energía y minimizar costos debido a pérdidas eléctricas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Implementar un código que simule técnicas heurísticas usando Matlab para lograr establecer la ubicación óptima de compensadores reactivos mediante algoritmos.
2. Realizar un estudio comparativo de la cronología del sistema estudiado para verificar la eficiencia de los compensadores reactivos en las ubicaciones obtenidas por nuestra herramienta.
3. Establecer el método heurístico y el tipo de compensador reactivo eficaz para aprovechar al máximo los beneficios que se obtendrán realizando comparaciones con las opciones disponibles

1.4 Marco teórico

En este apartado se hace revisión de la literatura sobre el tema de este proyecto integrador por lo que se describe antecedentes sobre el tema para una mejor comprensión, y se detallan conceptos bases que son necesarios para una mejor interpretación de los resultados.

1.4.1 Antecedentes

En la actualidad se tiene un crecimiento tanto de la población como de las empresas, por lo que se requiere brindar un mejor servicio eléctrico a cada uno de sus usuarios, lo que implica una repotenciación y crecimiento en los sistemas eléctricos de potencia. Las normas de calidad es otro factor que influyen a mejorar y controlar de manera eficiente el suministro de la energía eléctrica.[4]

Por estas razones las empresas encargadas de la distribución eléctrica se ven forzadas a realizar mejoras en el servicio, como lo es, la reducción de pérdidas tanto en potencia activa como en potencia reactiva, tener una mejora en el perfil de voltaje y corregir el factor de potencia.

Con lo mencionado anteriormente se pretende conseguir un incremento en la eficiencia eléctrica, mejorando así, la calidad de la energía entregada a los usuarios.[5]

Existen diversas maneras capaces de lograr una disminución de las pérdidas de potencias activas y reactivas, que a su vez contribuye con dos situaciones, una mejora tanto en el perfil de voltaje como en la calidad de la energía.[6]

La ubicación óptima de los bancos capacitores, una reestructuración en los sistemas de redes eléctricas, el ingreso de generadores distribuidos a la red, son métodos utilizados para reducir las pérdidas, para este trabajo se presentará el estudio de la incorporación de generación distribuida en conjunto con bancos de capacitores a un sistema de distribución de 118 barras.

En primer lugar, se realizará la ubicación óptima de los bancos de capacitores en stock tomando la mejor opción mediante un análisis computacional por medio de métodos heurísticos[7], se añadirán los puntos de generación distribuida que cubran como máximo el 30% de la potencia total requerida, esto debido a que puede generarse un mal funcionamiento del sistema con mayor cantidad de generación distribuida.

Bajo este contexto se pretende demostrar que una óptima combinación en cuanto a capacidad y localización de estos elementos, permite mejorar los aspectos técnico-operativos del sistema, como lo son las pérdidas de potencia activa y reactiva.[6]

1.4.2 Sistema eléctrico de potencia

El sistema eléctrico de potencia está definido como el trabajo en conjunto de máquinas eléctricas y elementos que convierten, transforman y conducen la energía eléctrica por líneas interconectadas y coordinadas entre si hasta un punto de carga.[8]

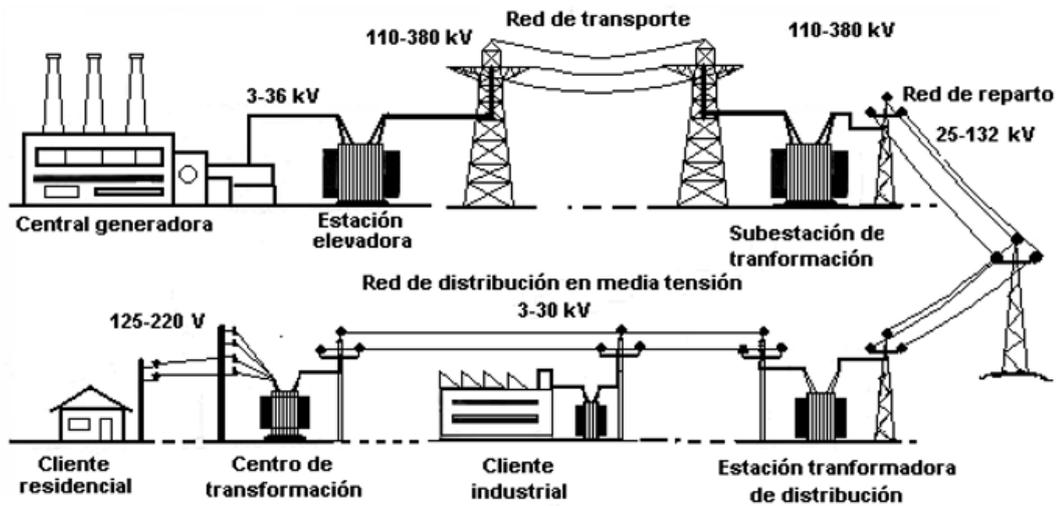


Figura 1.1 Sistema eléctrico de potencia

En la figura 1.1 se puede observar los principales componentes que forman un sistema eléctrico de potencia, parte desde la generación, puede ser esta por hidroeléctricas como de centrales a gas, esa energía producida se eleva mediante grandes transformadores a magnitudes de alto voltaje para lograr ser transportadas mediante las torres de transmisión.[5]

Las subestaciones eléctricas son las encargadas de reducir el voltaje a un nivel que pueda ser distribuido por las líneas aéreas o subterráneas hasta llegar al consumidor final, lo cual es el objetivo del sistema eléctrico de potencia.

Sistemas de generación

Para obtener la energía eléctrica existen sistemas que convierten y transforman la energía de otras fuentes como la cinética, térmica, solar, eólica, nuclear.

Para simplificar la generación eléctrica se la puede categorizar en:

- ❖ Energía no renovable
- ❖ Energía renovable

Nuestro país cuenta con generación eléctrica de ambos tipos de energía[8], entre las fuentes renovables se puede mencionar la energía eólica, fotovoltaica e hidráulica, que es nuestra mayor fuente de energía.

Sistema de distribución

Desde la salida de las subestaciones hasta llegar a los usuarios finales comprende lo que es la distribución eléctrica, dentro de este sistema existen diversos factores que afectan y muchas veces limitan el rendimiento de la calidad de la energía.[9]

- a) La energía producida debe ser entregada en el momento de ser generada, no puede almacenarse, lo que representa un problema al momento de tener una demanda máxima (horas pico), debido a esto se necesita dimensionar equipos que sean adecuados para estos momentos, teniendo en cuenta siempre los niveles de voltajes y frecuencia a los que operan las barras.
- b) El crecimiento de la demanda, las empresas y población están en un aumento constante, las empresas distribuidoras se ven forzadas a mejorar el sistema eléctrico, para esto se requiere de estudios en los cuales se toman en cuenta los tipos de clientes, la demanda, la localización geográfica. Por lo general antes de realizar una expansión del sistema de distribución se realiza una planificación considerando un incremento de carga alto.
- c) Localización geográfica, de la ubicación tanto de las centrales generadoras como de los consumidores, va a depender los valores en las planillas de los usuarios, debido a que existen pérdidas en potencia originadas por el transporte de la energía, además los costos de distribución van a variar dependiendo de la concentración de los usuarios ya que las inversiones en cuanto a líneas de distribución serán menores que teniendo usuarios esparcidos.

1.4.3 Tipos de sistemas de distribución

Como tipos principales de sistemas de distribución[8] se tiene:

- ❖ Sistema radial
- ❖ Sistema en anillo
- ❖ Sistema en malla

A continuación, se detalla brevemente el funcionamiento de cada uno:

Sistema radial

Este tipo de sistema consiste en que la potencia se distribuye desde un punto central hacia los demás circuitos en forma de ramificaciones, con el objetivo de proveer de servicios eléctricos individualmente hacia los clientes, como se muestra en la figura 1.2.

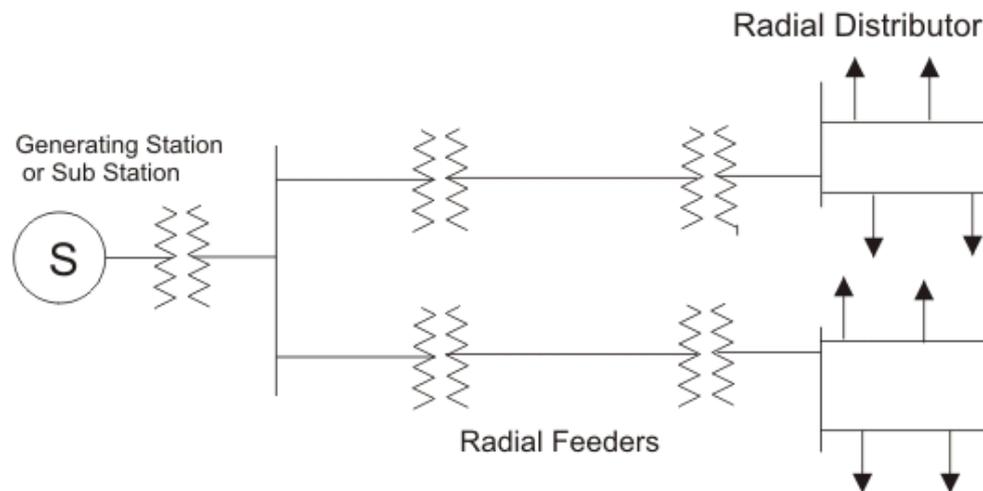


Figura 1.2 Sistema de distribución radial

En estos sistemas se tiene todo en una sola barra conectado, por lo cual su construcción y diseño son simples y económicos, pero presentan una gran desventaja, en casos de fallas en la barra principal o por mantenimientos al sistema, toda la red eléctrica se quedaría fuera de servicio, es decir, una interrupción en el alimentador primario del sistema perturba a toda carga

Sistema en anillo

Para este sistema se cuentan con dos alimentadores, como se presenta en la figura 1.3, cualquier falla que ocurra en uno de ellos, inmediatamente se puede suplir la demanda por medio del otro alimentador que se encuentra conectado a la red.

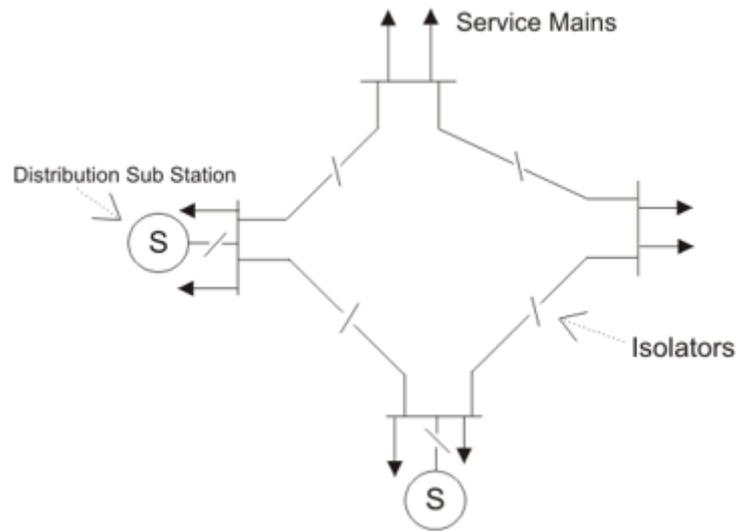


Figura 1.3 Sistema de distribución en anillo

La principal ventaja que presenta este sistema es la operación del sistema de forma continua, ya que posee dos vías para suministrar la alimentación, sus redes son más complejas tanto en construcción como en el sistema de protección que necesita con relación al tipo de sistema anterior por lo cual se vuelve económicamente más caro.

Sistema tipo malla

La diferencia de este sistema con el anterior es el aumento en el número de interconexiones que existen en la red, con la finalidad de incrementar la confiabilidad en el sistema, siendo el más costoso de todos los tipos.

1.4.4 Tipo de barras

Para simular un flujo de carga en los sistemas eléctricos de potencia [10], se debe tener en consideración los tipos de barras con los cuales se está trabajando, cada barra tiene asociado 4 tipos de variables, la potencia activa (P), la potencia reactiva (Q), el voltaje de la barra (V) y el ángulo de fase (δ) existen tres tipos de barras:

Barra PQ

Esta barra está caracterizada por poseer solo carga, que se representa como potencia constante. Estas barras tienen sus variables P y Q definidas siendo incógnitas el voltaje con su ángulo de fase.

Barra PV

Al contrario de las barras PQ, estas solo poseen generación o a su vez equipo que permitan el control de la potencia Q que es inyectada al sistema, las variables conocidas en este caso son la potencia activa (P) y el voltaje sometido a la barra (V).

Barra Slack

En los sistemas eléctricos de potencia solo se determina una barra como tipo slack [11], debido a que estas sirven de referencia para todo el sistema en cuanto a voltaje y ángulo de fase, esta barra suele definirse aquella con el generador con mayor capacidad de potencia.

1.4.5 Alimentadores

Los alimentadores de distribución [8] son de vital importancia en un sistema de potencia debido que nos permite la conexión entre los centros de generación, distribución con los consumidores finales. Por lo general las subestaciones cuentan con más de un alimentador.

Los elementos[5] que complementan un alimentador son:

- Alimentador principal trifásico
- Ramales monofásicos, trifásicos
- Transformadores de distribución
- Banco de capacitores
- Alimentadores secundarios
- Cargas monofásicas, trifásicas

Estos alimentadores pueden ser sometidos a diversos voltajes, en nuestra región se utiliza 13.2kV GRDY/ 7.6kV. En caso de existir consumidores especiales conectados a la red como las grandes empresas o industrias, son alimentados a este nivel de voltaje, por lo que requieren tener su propia subestación. Esto sucede debido a la carga conectada que poseen.

Para los consumidores residenciales el voltaje al cual son alimentados es menor a los 600 V, los circuitos monofásicos secundarios oscilan entre un valor de 240V/120V y 220V/110V.

Carga de un alimentador

La carga conectada a un alimentador [8] no es balanceada debido a las diversas cargas monofásicas desiguales que deben suplirse. Esta carga no se mantiene constante por lo que varía continuamente en el sistema, para entender estas variaciones se definen algunos términos:

- a) Demanda, es la carga promedio que se tiene en un determinado intervalo de tiempo, se la mide en kilovatios.
- b) Demanda máxima, establece la medición más alta de demanda que se ha tomado en un intervalo de tiempo, para estos intervalos generalmente se toma como referencia un día, ya que la conducta del consumidor suele ser repetitivo en los días de la semana.
- c) Demanda promedio, es el promedio de las demandas en un intervalo de tiempo, pueden ser estos años meses semanas o días.
- d) Factor de demanda, se define como la relación entre la máxima demanda que posee el sistema y la carga que se tiene conectada al mismo, siendo el factor máximo de demanda igual a 1.
- e) Factor de carga, se define como aquello que relaciona el promedio de la demanda de un usuario y su máxima demanda considerando un mismo intervalo.

1.4.6 Pérdidas

Es importante estudiar las pérdidas [5] que se tienen entre las fuentes y los nodos, estas pérdidas se registran y se categorizan en pérdidas técnicas y no técnicas [8], la manera principal de obtener estas pérdidas es mediante la diferencia entre la energía entregada menos la energía que se factura al o los usuarios.

- **Pérdidas no técnicas**

- a) Accidentales: son ocasionadas debido a fallas por eventos naturales, mala operación de los equipos del sistema eléctrico.
- b) Administrativas: son pérdidas que muchas veces son a causa de errores en las lecturas de los medidores, usuarios que no cuentan con medidores instalados (solicitud en proceso), errores en los equipos de medición, etc.
- c) Fraudulentas: hace referencia a aquella energía que es consumida pero que la empresa no puede contabilizarla, debido a la manipulación en los medidores de los usuarios o al consumo de energía sin un contrato previo, con el fin de evitar el pago por el consumo de la energía eléctrica por parte de los usuarios. Una de las maneras que se está tomando para evitar el consumo no autorizado de energía eléctrica se está utilizando el cable preensamblado. Comúnmente llamado conductor anti hurto [8].

- **Pérdidas técnicas**

Estas pérdidas [4] están conformadas por la energía que no es enviada hacia el usuario, pero que es necesaria para la operación del sistema, esta energía se disipa en los elementos de la red de distribución, como los equipos y en los alimentadores, que sirven para el transporte y la transformación de la energía. Este tipo de pérdidas es normal en los sistemas de distribución y no pueden ser eliminadas completamente [8] solo minimizarlas por medio de mejoras y compensaciones en la red.

Para obtener una mejor calidad de la energía reduciendo las pérdidas técnicas, se debe seguir el siguiente plan de análisis:

- Determinar el estado inicial del sistema
- Establecer una proyección de incremento en la carga
- Realizar un estudio de flujo de carga
- Definir la ubicación óptima de transformadores, capacitores, etc.
- Realizar un análisis de repotenciación de los alimentadores.

Banco de capacitores

Los bancos de capacitores [6] son una solución ideal para la compensación de la potencia reactiva en los alimentadores de distribución [8], estos elementos brindan beneficios como los siguientes:

- Corregir el factor de potencia
- Mejor estabilidad en el voltaje
- Mayor capacidad en la red
- Reducción de pérdidas, ahorro económico

La instalación de estos elementos no es compleja, ya que solo se requiere de un descargador de sobretensión y un fusible para su protección, por lo general estos elementos cubren las 2/3 partes de la distancia del alimentador, lo que permite reducir en gran manera las pérdidas y las caídas de tensión.

Las potencias que se comercializan unitariamente son: 33.3, 50, 83.3, 100, 167, 200, 250, 300, 400 kVAr, con los cuales se pueden diseñar bancos trifásicos: 100, 150, 250, 300, 500, 600, 750, 900 y 1200 kVAr [8]

La instalación de bancos de capacitores por parte de las empresas de distribución, benefician tanto al usuario como a la empresa distribuidora, ya que se brinda un mejor servicio para el usuario y se minimizan las pérdidas de la distribuidora. [5]

Por esta razón el enfoque principal de este trabajo es localizar la ubicación óptima de bancos de capacitores en un sistema eléctrico de potencia y considerando puntos de generación distribuida, mejorar la calidad de la energía suministrada.

1.4.7 Métodos de optimización

Para resolver la problemática de la localización de banco de capacitores se tienen muchos métodos [12] que pueden emplearse, se los describe brevemente a continuación:

Métodos analíticos

En este método, se emplea como función objetivo las pérdidas de energía, lo cual se busca reducir al máximo esta función [12], tomando en consideración el crecimiento de la demanda que se tiene, así como el costo por la generación de la energía.

Para las restricciones, tanto el nivel de voltaje como el flujo de potencia, se usan ecuaciones matemáticas, el costo de los capacitores también influyen en las restricciones.

Métodos heurísticos y métodos de inteligencia artificial

Para este método, se cuenta con las mismas restricciones del método anterior, pero por medio de los algoritmos utilizados se puede encontrar un resultado más óptimo, debido a que posee un análisis de sensibilidad que se evalúa en cada resultado[12], con el fin de llegar a la mejor respuesta global.

Métodos de lógica difusa y algoritmos genéticos

La principal diferencia que se tiene con este método es que, en el análisis de la sensibilidad, se tiene además un análisis de lógica difusa, se aplica en la desviación de voltaje, las pérdidas en las potencias. Una vez escogidos los nodos se emplea los operadores genéticos lo que ayuda a obtener el resultado óptimo de la función objetivo.

Optimización por enjambre de partículas (PSO)

Se lo define como un método de optimización por iteraciones, especializado para obtener soluciones ante problemas con forma no lineal, este método se fundamenta en la conducta social una población, en cada iteración actualiza la posición y velocidad [13] de cada individuo, hasta que el algoritmo llega a la mejor posición y velocidad de la partícula.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El uso del PSO como herramienta para minimizar las pérdidas eléctricas es una de las mejores opciones para obtener resultados óptimos. Tal como se detalla en [14], la metodología implementada al ser un proceso iterativo en el cual se realizan flujos de potencia, no puede ser resuelta de manera óptima por métodos matemáticos básicos o algoritmos de optimización exactos.

El uso de técnicas metaheurísticas, como como el PSO, nos da resultados aproximados, sin embargo, estos logran ser óptimos [15]. La metodología seleccionada para la solución es una técnica de computación evolutiva, la cual se basa en la implementación de mecanismos que cumplen la función de seleccionar las mejores soluciones, y al mismo tiempo formar soluciones nuevas a partir de las ya encontradas previamente, las cuales son evaluadas en una función objetivo definida [16].

El software Matlab® es seleccionado para la ejecución del proyecto debido a la sencillez que presenta al momento de diseñar algoritmos matemáticos y “su funcionalidad al integrar una plataforma de desarrollo interactiva” [7]. Otras razones por las cuales se seleccionó Matlab® es por diversas funciones, como el uso de la extensión Matpower® por medio de líneas de códigos, la cual incluye especificaciones a considerar para el flujo de potencia; y la opción de crear una interfaz para la presentación final de resultados, para el caso de estudio seleccionado siendo este el modelo IEEE de 118 barras.

2.1 Descripción de la metodología

La metodología propuesta para obtener la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores como compensadores reactivos, considerando a la vez puntos de energía distribuida, se presenta en la figura 2.1 .

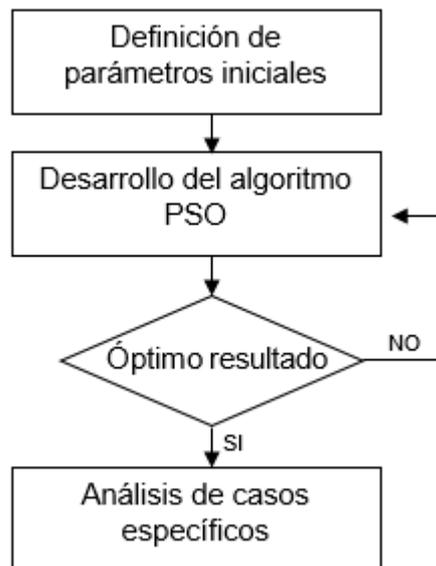


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología implementada

La primera etapa se basa en la configuración de parámetros iniciales, los cuales se tratan de la definición del sistema eléctrico a estudiar dependiendo del número de barras, el stock de banco de capacitores que se tiene a disposición y, los puntos y dimensionamiento de la energía distribuida.

La segunda etapa utiliza el algoritmo PSO implementado para determinar la combinación de ubicación y capacidad óptima de banco de capacitores, junto con la energía distribuida, considerando las restricciones pertinentes que aseguren la estabilidad y confiabilidad del sistema eléctrico; para lo cual se analiza las pérdidas eléctricas siendo la función objetivo del problema la minimización de estas, mejorando así la calidad de la energía a la vez que se obtienen beneficios económicos.

Tras finalizar el algoritmo de optimización, se procede a realizar un análisis para el caso de estudio propuesto, donde se analiza el total de pérdidas eléctricas obtenidas para un año, considerando la compensación reactiva junto con la energía distribuida y el estado previo a los cambios del sistema, haciendo un contraste de ambos casos sobre la mejora de la calidad de la energía, analizando a su vez el aspecto económico.

2.2 Definición de parámetros iniciales

La primera consideración que se tomó en cuenta fue la implementación de las fuentes de energías renovables y su ingreso al sistema eléctrico.

Como primer paso se realizó la distribución de la oferta total de energía entre los diversos puntos de generación a considerar para los dos tipos de energía renovables seleccionadas en este proyecto.

Se consideran puntos de energía distribuida eólica de 2.4 MW de capacidad, compuesto por 3 aerogeneradores de 800 kW de potencia; mientras que, para la energía distribuida fotovoltaica se consideran puntos de 1.5 MW de capacidad, compuesto por un total de 6 000 paneles solares, cada uno de 250 W.

Dentro de esta etapa del proyecto se planteó el despacho de los puntos de energía distribuida como un perfil de oferta horaria, debido a la intermitencia de los recursos de generación. Se optó por usar datos de variaciones estocásticas de la irradiación solar y la velocidad del viento obtenidos de una base de datos de la Empresa Eléctrica de Galápagos, para lo cual se presenta la variación de un día de la velocidad del viento y la irradiación solar en las figuras 2.2 y 2.3, respectivamente.

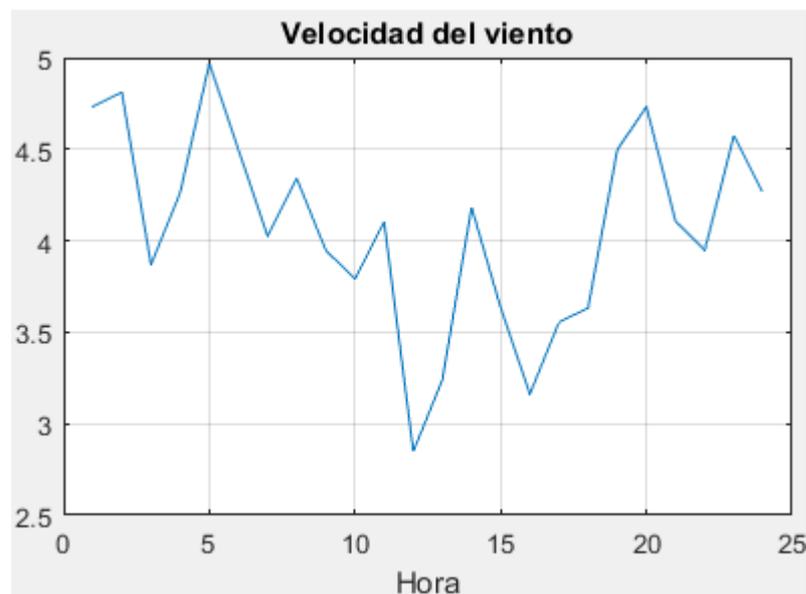


Figura 2.2 Variación de la velocidad del viento

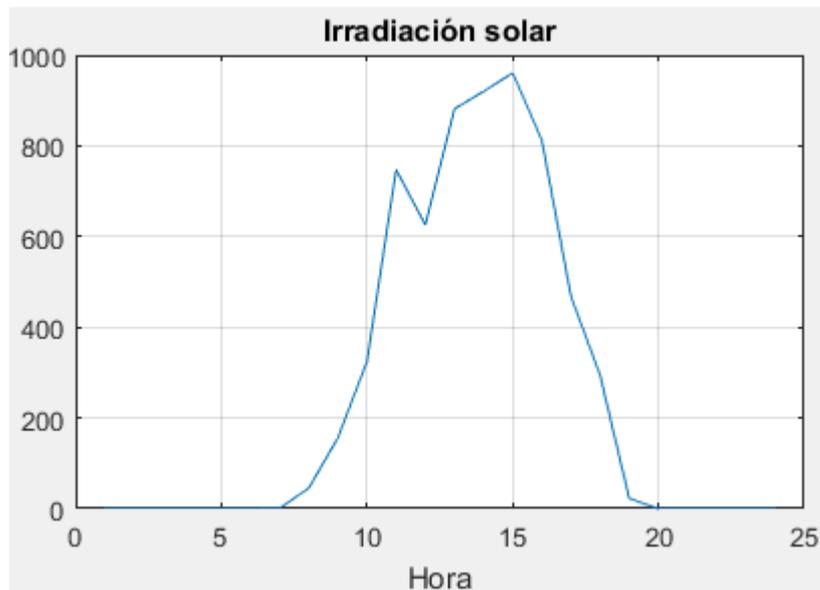


Figura 2.3 Variación de la irradiación solar

La segunda consideración para nuestro caso de estudio es que se dispone de un stock de banco de capacitores, trifásico, el cual es de relación de 15 unidades para 100 barras, por lo tanto el stock disponible es de 18 unidades, donde el límite máximo de capacidad es respecto al total de potencia reactiva en la demanda, que para nuestro sistema es de 1438 MVAR, para lo cual, considerando que el valor máximo es del 10% del valor total, el límite de capacidad sería de 150 MVAR, pero tomando en cuenta las capacidades comerciales, nuestro stock tendrá como máximo 120 MVAR. Las capacidades que se consideran en nuestro análisis y su valor económico se muestran en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Costos de capacidad comercial de capacitores [17]

Capacidad [MVAR]	10	20	50	100	120
Precio [k\$]	43.856	87.712	219.280	438.560	526.272

2.3 Algoritmo PSO implementado

El comportamiento de ciertos grupos de animales, explorando un espacio de búsqueda con el fin de encontrar una solución sirve de inspiración para la creación de modelos matemáticos [5], [18].

La implementación de este método se la realizó en base a lo especificado en [19], donde se plantea la versión original del método, el cual consiste en la simulación

gráfica de la coreografía de una bandada de pájaros, incorporando el emparejamiento y velocidades de sus vecinos más cercanos.

En cuanto al PSO, está diseñado para que genere de manera aleatoria un conjunto de partículas, las cuales representan tanto la ubicación y la potencia de compensación reactiva [16]. A su vez, a las partículas generadas se las considera un conjunto de soluciones [14], donde, dicho conjunto se lo denomina un conjunto poblacional, de donde destaca un óptimo local y un mejor global [4], siendo ambos fundamentales para determinar la solución óptima.

El desarrollo del algoritmo PSO implementado se lo presenta en la figura 2.4, donde la secuencia es planteada siguiendo el diagrama de flujo adjunto, según lo propuesto en [20].

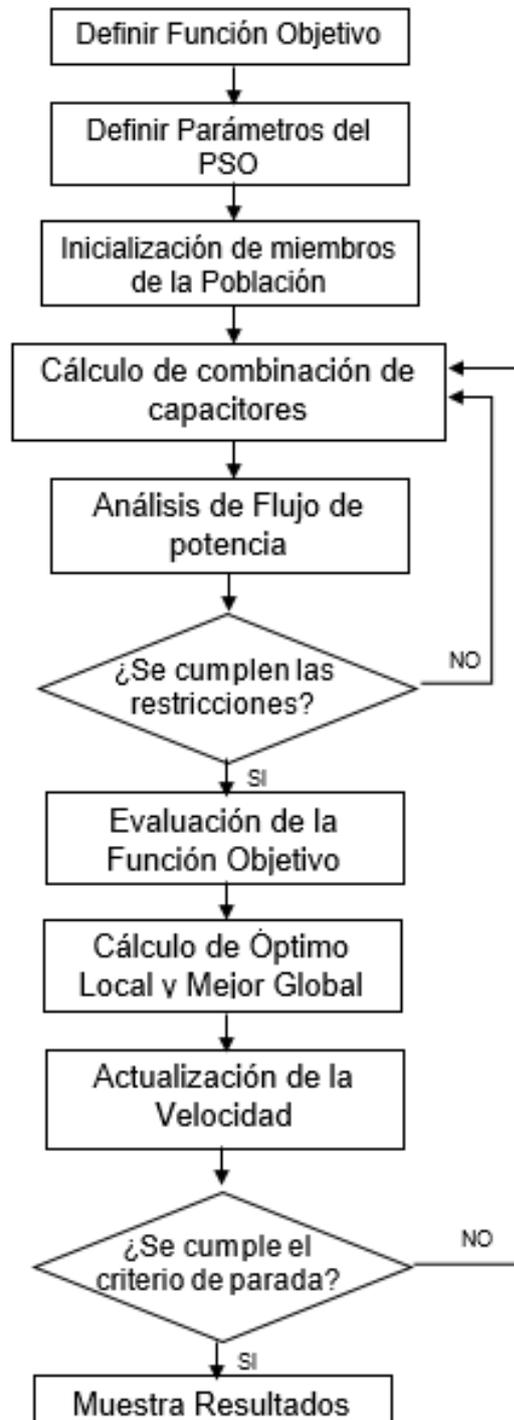


Figura 2.4 Diagrama de flujo del algoritmo PSO implementado

2.3.1 Función Objetivo

El objetivo principal del proyecto es mejorar la calidad de la energía mediante la implementación de compensadores reactivos y energía distribuida, métodos que ayudan a reducir las pérdidas eléctricas de un sistema eléctrico minimizando a su vez costos.

Es por esto que, la función objetivo se la plantea como la minimización de costos por pérdidas eléctricas en la ecuación 2.1, esto es:

$$Costos = Inversion + k \sum_{t=1}^n P_{losses}(t) \quad (2.1)$$

Donde:

K , costo de energía, en unidades \$/kwh.

P_{losses} , pérdidas eléctricas en energía.

La inversión representa el capital usado para la implementación de los bancos de capacitores y energía distribuida en el sistema eléctrico. A su vez, el factor k de costo es propuesto según lo estipulado en el pliego tarifario del costo de la energía [21], siendo este un valor referente al costo por generación de energía, mientras que las pérdidas eléctricas en términos de energía es obtenido considerando un perfil de demanda anual ingresado en el flujo de potencia usando Matpower®, obteniendo de esta manera los costos totales por pérdidas eléctricas.

2.3.2 Algoritmo

El Algoritmo PSO es basado en posiciones referentes a los ejes (Xx , Xy), para las cuales se relaciona una velocidad (Vx , Vy) [4], donde al grupo formado por ambas variables se lo denomina población, y cada elemento posición de la población se lo denomina partícula.

Una partícula representa una solución parcial dentro del espacio de búsqueda definido, donde sus valores se desplazan constantemente con el fin de encontrar una solución final del problema definido [16].

La velocidad asociada a cada partícula es determinada según la formula general del PSO [19], presentada en la ecuación 2.2, para lo cual se tiene en cuenta que se actualiza según lo requerido y definido por un máximo de población y de iteraciones.

$$v_{ij}(t + 1) = w * v_{ij}(t) + r_1 * c_1 * (P_{ij}(t) - X_{ij}(t)) + r_2 * c_2 * (g_i(t) - X_{ij}(t)) \quad (2.2)$$

Donde;

v = velocidad de la partícula,

x = Posición de la partícula,

w = Coeficiente de Inercia,

c = Coeficiente de aceleración,

r = Número random uniformemente distribuido [0-1],

P = Óptimo local,

g = Mejor global.

Una vez calculada la velocidad de la partícula, esta es usada para renovar la posición actual de cada partícula mediante la ecuación 2.3, esto es:

$$X_{ij}(t + 1) = X_{ij}(t) + v_{ij}(t + 1) \quad (2.3)$$

La posición inicial de nuestro algoritmo implementado corresponde a un vector random creado con una capacidad de potencia reactiva disponible de nuestro stock, donde cada posición del vector creado corresponde al número de barra del sistema y capacidad de potencia reactiva a instalar.

Una vez obtenido una combinación de capacitores, se procede a realizar el flujo de potencia usando la herramienta Matpower, obteniendo los datos de voltaje y corriente en por unidad, así como el total de pérdidas eléctricas resultantes del sistema, donde los resultados obtenidos de voltaje y corriente se proceden a analizar si son aceptables para el sistema de eléctrico propuesto de manera que se mantenga la confiabilidad y estabilidad.

El algoritmo implementado considera restricciones de nivel de voltaje en cada barra, así como la capacidad de corriente a través de cada línea, presentadas en las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente.

$$V^{max} \leq V_{bus} \leq V^{min} \quad (2.4)$$

$$I_{line} \leq I^{max} \quad (2.5)$$

Donde:

V = Voltaje en las barras del sistema,

I = Corriente a través de las barras del sistema.

Los valores de voltaje y corriente para que una combinación de capacitores sea considerada una solución aceptable deben estar entre, 0.95 en por unidad y 1.05 en por unidad para el voltaje en las barras, mientras que para la corriente se deben presentar valores por debajo del límite de transportación de corriente determinado por la capacidad del cable conductor.

Una vez comprobadas las restricciones que mantienen el sistema eléctrico estable, se evalúa la función objetivo obteniendo así el costo por pérdidas eléctricas obtenido por cada partícula de una población, donde para cada combinación de capacitores se obtiene un total de costos diferentes, los cuales se guardan en una variable que analiza el mejor personal de cada población denominándolo óptimo local, el cual es el valor de costo mínimo relacionado a una combinación de capacitores, de cada población.

Finalmente, al terminar el total de iteraciones se analiza el conjunto de óptimos locales, con el fin de obtener un mejor global, el cual va a ser la combinación de capacitores que junto con la energía distribuida genere un menor valor de costos por pérdidas eléctricas.

2.3.3 Interfaz Gráfica

Para este proyecto desarrolló una interfaz gráfica utilizando GUI, una herramienta de Matlab que nos permitió crear un entorno entre el usuario y el código del programa realizado de manera que la presentación de los resultados obtenidos sean mejor detallados.

En cuanto a los datos, se presenta las capacidades de los capacitores que se tienen en stock, junto con la configuración de energía distribuida en el sistema eléctrico, siendo esto las barras donde se instalan los puntos de generación y su capacidad.

Adicional a esto, se presenta el total de pérdidas eléctricas iniciales del sistema eléctrico y la reducción de estas después de modificar el sistema.

Los resultados se presentan gráficamente, de tal forma que se visualiza el comportamiento del voltaje, el perfil de carga y pérdidas del sistema mediante la implementación de la metodología planteada.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Con el fin de demostrar la efectividad de la metodología propuesta junto con las formulaciones matemáticas realizadas, se presenta el caso de estudio elaborado para este proyecto. El caso de estudio es el sistema de prueba IEEE de 118 barras para el cual se busca una combinación óptima de capacidad y ubicación para los BC, así como se plantea puntos de ED de manera que se logre reducir las pérdidas de potencia activa en el sistema.

3.1 Descripción del sistema IEEE de 118 barras

El sistema tiene un total de demanda de 4 242 MW. La configuración del sistema y sus elementos, que son presentados en la tabla 3.1, producen un total de pérdidas eléctricas de 132.863 MW.

Tabla 3.1 Datos del sistema IEEE 118 barras [22]

Barra Slack	Total de barras PV	Total de barras PQ	Transformadores	BC	Reactores	Líneas
1	53	64	9	12	2	177

La barra slack es la número 69, a un nivel de voltaje de 1.035 V, la cual tiene una potencia instalada de 513.86 MW.

3.2 Caso de estudio

Se varía la demanda total del sistema, lo cual se obtiene multiplicando los valores P y Q de cada nodo por el perfil de carga anual mostrado en la figura 3.1, el cual tiene un valor por debajo de 90% hasta antes del mes de noviembre, considerando el total de horas al año, mientras que en las horas correspondientes al mes de diciembre la cargabilidad llega a ser mayor, llegando incluso al 100% de su demanda máxima total.

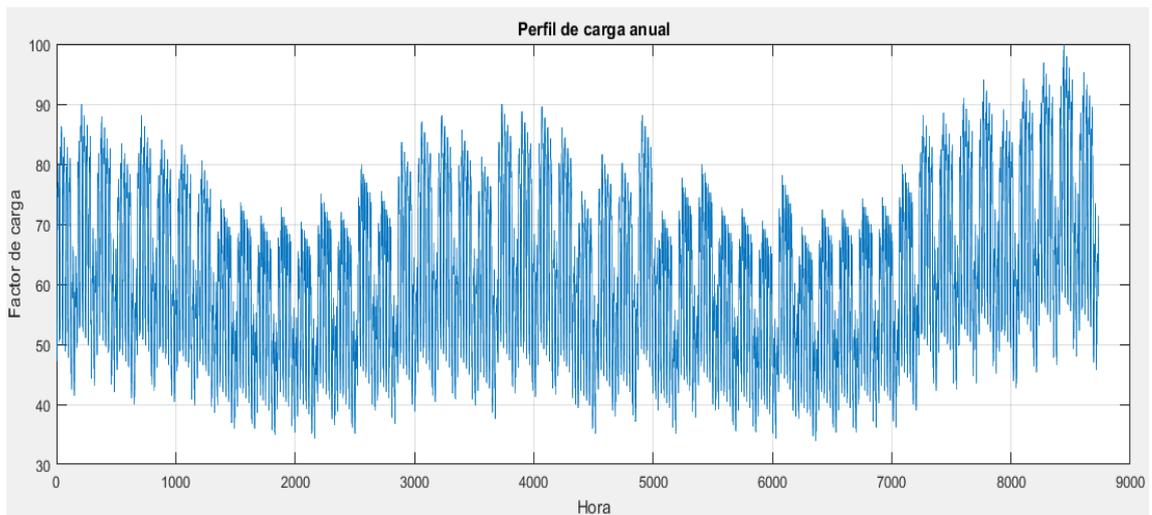


Figura 3.1 Perfil horario de carga anual [23]

Adicional se obtiene los perfiles de ED anual, tanto eólica como fotovoltaica son presentados en las figuras 3.2 y 3.3, respectivamente, donde el máximo de energía generada por la ED eólica durante el año es de 2.4 MW; mientras que la ED solar genera al año un máximo de 1.38 MW.

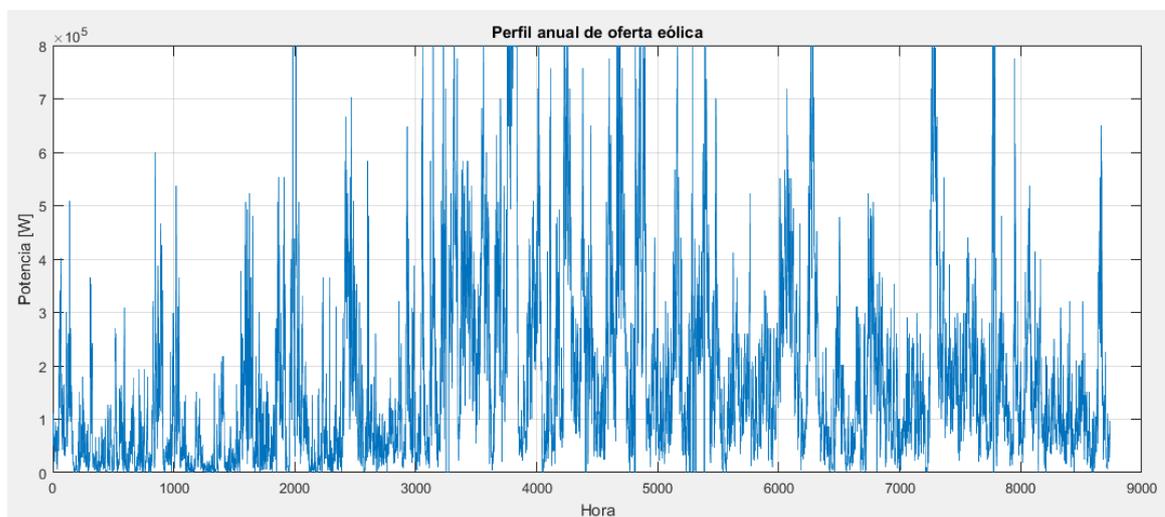


Figura 3.2 Curva de generación eólica anual

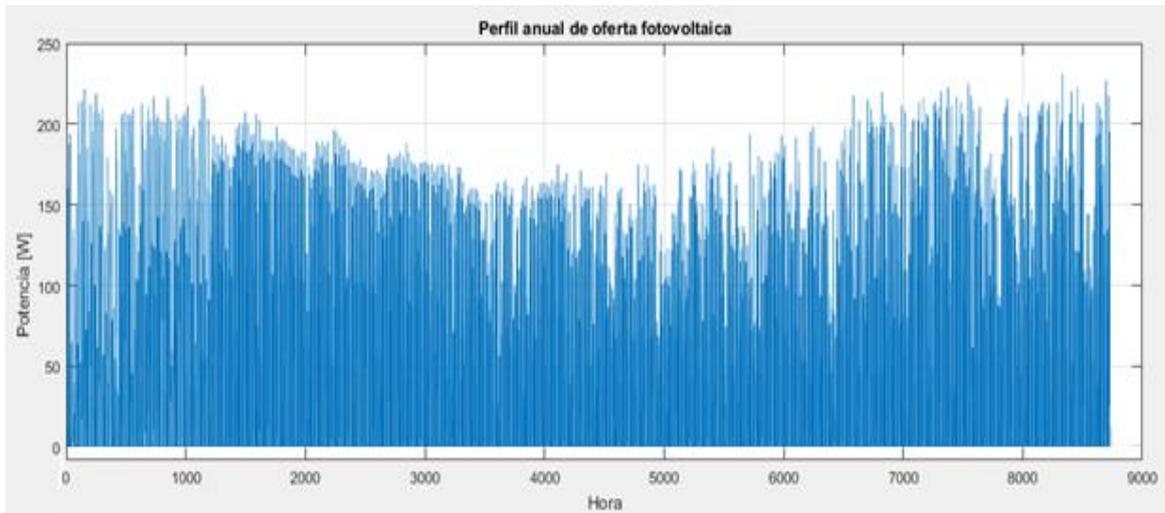


Figura 3.3 Curva de generación fotovoltaica anual

Por otra parte, el stock de BC a considerar es con todas las capacidades comerciales definidas en la tabla 2.1, la cantidad de cada BC seleccionada para el caso de estudio se muestra en la tabla 3.2, definiendo un total de 18 BC considerando el total de barras del sistema eléctrico seleccionado, donde la cantidad para cada capacidad es seleccionada de manera arbitraria.

Tabla 3.2 BC disponibles en stock

Capacidad [MVAR]	10	20	50	100	120
Stock (Unidades)	2	3	7	5	1

En cuanto a los puntos de ED a instalar, para este caso de estudio, son establecidos tomando como criterio las barras con mayor carga, considerando instalar un total de 5 puntos de ED. La combinación definida, así como las barras y su total de carga, son presentados en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Combinación de energía distribuida instalada

Tipo de energía	Capacidad instalada [MW]	Barra	Carga [MW]
Eólica	2,4	59	277
Eólica	2,4	116	184
Fotovoltaica	1,5	90	163
Fotovoltaica	1,5	80	130
Fotovoltaica	1,5	54	113

Finalmente, para la configuración del PSO se define una población de 50 partículas y 100 iteraciones de tal manera que la selección de capacidad y ubicación de los BC que optimiza el sistema se muestra en la tabla 3.4. Mientras que la ubicación óptima de los BC seleccionados mediante el PSO y los puntos de ED instalados que minimizan las pérdidas eléctricas del sistema se muestran en el esquemático presentado en la figura 3.4.

Tabla 3.4 Combinación óptima de BC que mejoran el sistema

Barra	18	19	34	36	40	49	54	55	59	69	74	76	110
Capacidad [MVAR]	20	50	50	50	100	100	100	50	10	50	100	50	50

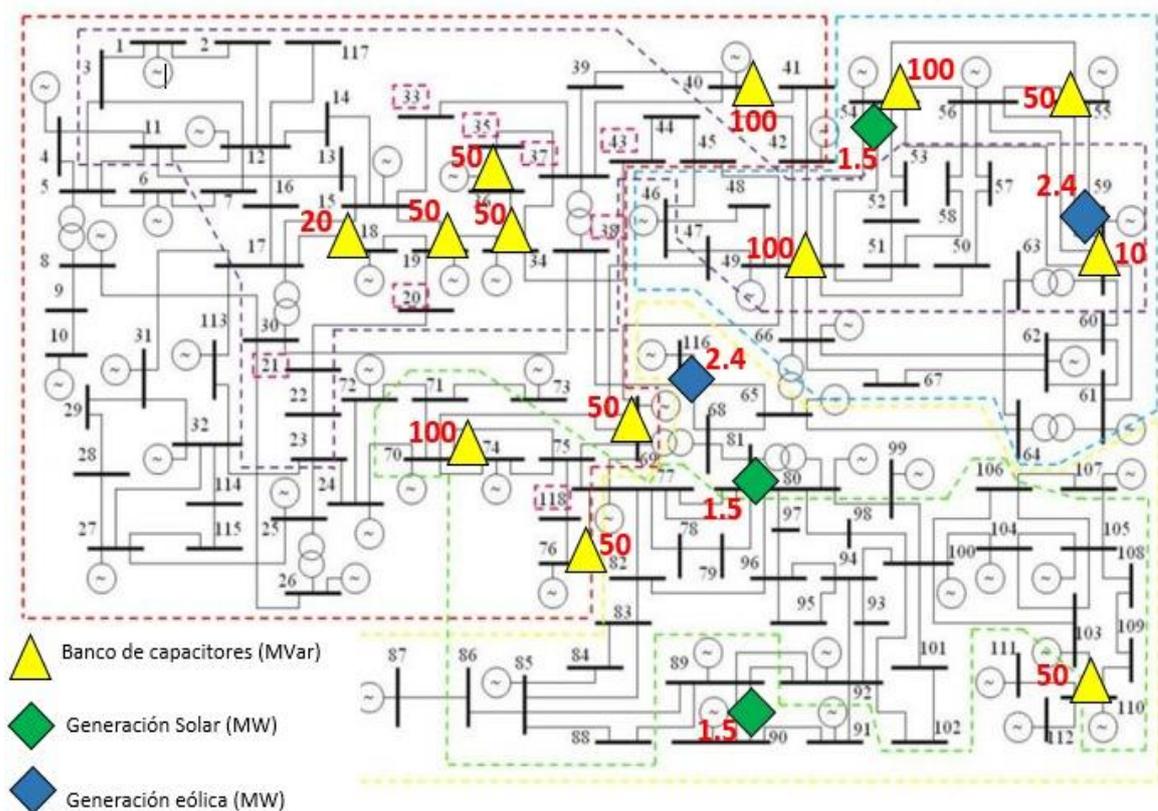


Figura 3.4 Configuración final de sistema de 118 barras IEEE

3.3 Comportamiento final del sistema

Como análisis principal se observa en la figura 3.4 que, en la barra 59 existe un punto de ED eólica y a su vez el algoritmo implementado nos propone como solución óptima la instalación de un BC de 10 MVAR en el mismo punto; algo similar ocurre en la barra 54, donde se tiene ED fotovoltaica y un BC de 100 MVAR, con lo cual se obtiene un total de pérdidas eléctricas de 98.3152 MW, lo cual representa una reducción del 26%, confirmando así que la solución propuesta optimiza el sistema. Comparando el perfil de voltaje en una de las barras del sistema y el perfil de cargabilidad, tomando como ejemplo la barra 54 donde se instala un BC, se nota la relación inversamente proporcional entre estas variables, ya que cuando se obtiene una reducción del valor de voltaje, existe un aumento del valor de demanda, esto es debido a que llega un momento en que la potencia activa inyectada en el sistema, en conjunto con la potencia reactiva instalada no es suficiente para abastecer la demanda correspondiente en ciertos momentos del año, esto se lo puede observar en las figuras 3.5 y 3.6, las cuales corresponden al perfil de voltaje luego de modificar el sistema con la instalación de ED y BC, y la variación anual de la demanda, respectivamente.

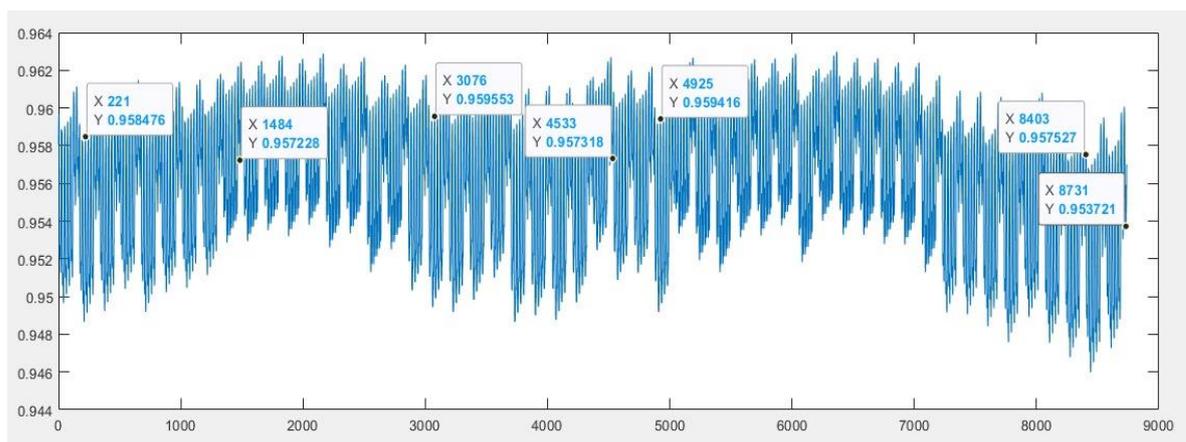


Figura 3.5 Perfil de voltaje anual del sistema modificado

Se observa en la figura 3.6, que la demanda varía desde un 35.36% de cargabilidad hasta un 87.22 % aproximadamente, durante los primeros periodos de hora al año, lo cual, observando la figura 3.5, se obtienen valores de voltaje entre 0.949 V y 0.963 V, en p.u., según el porcentaje de cargabilidad expresado, respectivamente.

Teniendo en cuenta el comportamiento decreciente del voltaje según aumenta la demanda, lo cual ocurre en las últimas horas del año, se observa en la figura 3.6 que se obtiene como voltaje mínimo un valor de 0.946 V en p.u. cuando la carga es máxima con un total de 113 MW.

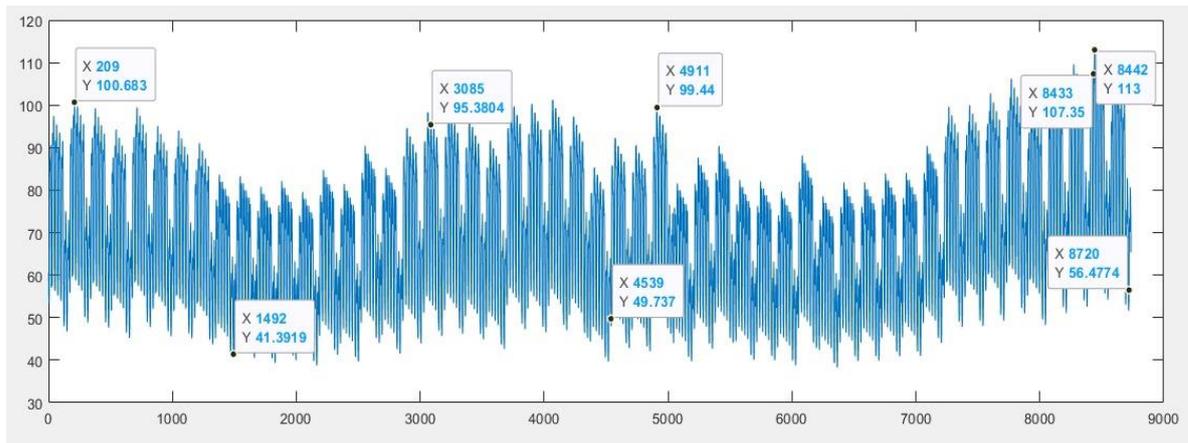


Figura 3.6 Perfil de carga anual del sistema modificado

En cuanto al análisis general de las pérdidas eléctricas, su comportamiento se presenta en las figuras 3.7 y 3.8, correspondiente a las pérdidas de energía anual del sistema inicial, y pérdidas de energía anual del sistema modificado, respectivamente, las cuales se reducen durante todo el año, manteniendo una diferencia alrededor de 10 MWh aproximadamente, a excepción del término del periodo anual, donde las pérdidas no varían mucho; inclusive en las horas 8442 y 8443, se evidencia que las pérdidas del sistema modificado son iguales que el sistema inicial, siendo este un total de 132.863 MW.

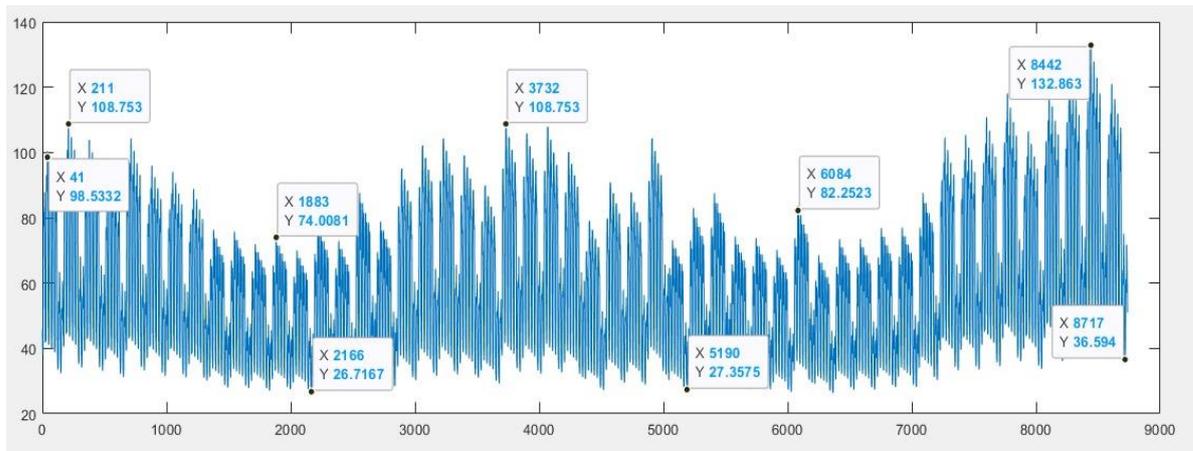


Figura 3.7 Perfil de pérdidas anual del sistema inicial

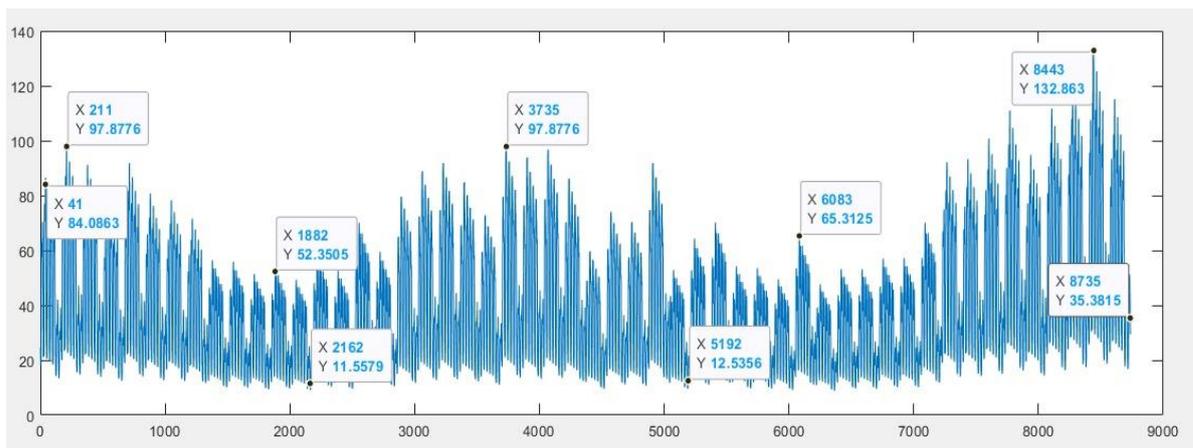


Figura 3.8 Perfil de pérdidas anual del sistema modificado

3.4 Análisis económico

El total de pérdidas eléctricas de energía anual, para el caso base de estudio es de 512 828 MWh, para lo cual, siendo el costo de energía \$ 0.09 USD/kWh [24], el valor por pérdidas de energía anual para el caso base es de \$ 46'154 520 USD.

Modificando el sistema de 118 barras de la IEEE realizando la instalación de BC y ED, el total de pérdidas eléctricas de energía anual es 340 641 MWh, considerando el costo de la energía, el valor por pérdidas de energía anual para el sistema modificado es de \$ 30'657 690 USD, es decir, anualmente se obtiene un ahorro de \$ 15'496 830 USD.

Ahora, considerando los términos de la función objetivo planteada para la minimización de pérdidas eléctricas se analiza la inversión total, que incluye los valores de costo de construcción de las ED, siendo un aproximado de \$ 10 millones USD para cada punto de energía eólica [25], un aproximado de \$ 7 millones USD para cada punto de energía fotovoltaica [26], y un total de \$ 3'420 768 USD por los BC utilizados [23]; el valor total de inversión resulta ser un aproximado de \$ 44'420 768 USD.

Siendo 8.9417 MWh el mínimo valor de pérdidas de energía al año y considerando el costo de la energía, el equivalente de pérdidas en USD que minimiza las pérdidas eléctricas del sistema es \$ 804.753 USD.

Dicho esto, el costo mínimo por reducción de pérdidas eléctricas es de \$ 44'421 572.75 USD aproximadamente.

Considerando el ahorro anual que es obtenido con la modificación del sistema mediante la instalación de BD y ED, y el costo por reducción de pérdidas eléctricas, se recupera la inversión al tercer año.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base a los resultados obtenidos se detallan las conclusiones y se plantean las siguientes recomendaciones.

Conclusiones

En base a lo obtenido en el capítulo 3 se concluye que el método de optimización implementado obtiene una óptima combinación de capacidad y ubicación de los BC que permite minimizar las pérdidas eléctricas, mejorando la calidad de la energía, a la vez que se consideran puntos de ED dentro del sistema, asegurando la confiabilidad del sistema eléctrico.

La decisión tomada por el PSO de instalar ED y BC conjuntamente en un mismo punto con el fin de regular tanto la potencia activa y reactiva que se inyecta al sistema, mejora la reducción de pérdidas, logrando que los resultados obtenidos sean mejores en comparación a otras simulaciones realizadas, asegurando así la efectividad de la metodología aplicada.

La solución propuesta en este documento al problema de calidad de un sistema eléctrico es viable y factible, debido a que es posible ejecutar la solución planteada con simplicidad, a la vez que es rentable económicamente, debido a que la inversión requerida se recupera a partir del tercer año.

Recomendaciones

Se puede obtener mejores resultados si se realizan cálculos y simulaciones en un sistema con un número de nodos pequeños, demostrando que los elementos que alteran la óptima ubicación de un banco de capacitores es la complejidad del sistema o el número de nodos que se desea conocer.

Automatizando el cálculo de reducción de demanda y considerando los perfiles de voltaje en los alimentadores se lograría obtener resultados aún más eficientes, puesto que un sistema de eléctrico no siempre tiene el mismo comportamiento en todo momento.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. Castillo, J. C. Muñoz, J. C. Hernández, M. Dávila, and L. N. Ballester, “Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de SVCs Usando Optimización por Enjambre de Partículas y Considerando Fuentes de Energía Intermitentes,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 39, no. 1, pp. 49–56, 2018.
- [2] G. E. Marco and R. R. Carlos, “Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de distribución mediante técnicas heurísticas,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 1, pp. 1–12, 2015.
- [3] M. E. Baran and F. F. Wu, “Optimal capacitor placement on radial distribution systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 1, pp. 725–734, 1989, doi: 10.1109/61.19265.
- [4] G. M. GUTIÉRREZ SERNA, “ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE BANCOS DE CAPACITORES USANDO COMPENSACIÓN VOLT-VAR EN MICRO-REDES ELÉCTRICAS,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
- [5] D. L. GONZÁLEZ SAMUEZA, “UBICACIÓN DE RECURSOS DISTRIBUIDOS BASADO EN FLUJOS DE POTENCIA USANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTÍCULAS,” UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, 2018.
- [6] O. Danilo, M. Giraldo, C. Alberto, R. Vanegas, and L. F. Grisales, “Localización y Dimensionamiento Óptimo de Generadores Distribuidos y Bancos de Condensadores en Sistemas de Distribución,” *Scientia Et Technica*, vol. 23, no. 3, pp. 308–314, 2018, doi: 10.22517/23447214.16691.
- [7] J. E. García Castellanos and D. Molina De la Rosa, “HERRAMIENTA SOFTWARE PARA DIMENSIONAMIENTO Y LOCALIZACIÓN DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA EN UNA MICRORRED,” UNIVERSIDAD DEL NORTE, 2019.
- [8] E. D. RUANO VEGA, “UBICACIÓN ÓPTIMA DE UN BANCO DE CAPACITORES, BASADO EN ALGORITMOS DE LÓGICA DIFUSA,” UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE, 2017.
- [9] L. F. Grisales, B. J. Restrepo, and F. Jaramillo, “Ubicación y dimensionamiento de generación distribuida : una revisión - Ciencia e Ingeniería Neogranadina,” *Ciencia*

e ingeniería neogranadina, 2017.

- [10] A. V. Uscategui, J. Patricio, I. Rivera, A. S. Oses, and R. A. E. González, “Desarrollo de simulador integrado de microrredes inteligentes,” no. 1110116, pp. 2–4, 17, 2014.
- [11] C. Huertas, “Preparadurías Sistemas de Potencia I: Flujos de Carga,” vol. 1, no. December, pp. 2–4, 2016, doi: 10.13140/RG.2.2.30038.86080.
- [12] S. Raúl and R. Rodríguez, “Estado del arte en la ubicación óptima de capacitores y estudio de optimización de la solución mediante búsqueda exhaustiva,” *Visión Electrónica*, vol. 1, no. 1, pp. 71–80, 2008.
- [13] G. M. GUTIÉRREZ SERNA, “Universidad Politécnica Salesiana.”
- [14] P. I. Toapanta, M. S. Alvarez-Alvarado, and F. Vaca-Urbano, “Optimización por Enjambre de Partículas Cuánticas para la Reducción de Pérdidas Eléctricas,” *Revista Tecnológica-ESPOL*, vol. 31, no. 1, pp. 86–96, 2018.
- [15] J. A. Jiménez-Builes, R. E. Arango-Sanchez, and L. D. Jiménez-Pinzón, “Métodos de búsqueda usando los algoritmos de enjambre de partículas y genético,” *Lámpsakos*, vol. 1, no. 16, p. 52, 2016, doi: 10.21501/21454086.1901.
- [16] W. Castillo, J. C. Muñoz, J. C. Hernández, M. Dávila, and L. N. Ballester, “Ubicación y Dimensionamiento Óptimo de SVCs Usando Optimización por Enjambre de Partículas y Considerando Fuentes de Energía Intermitentes,” *Ciencia e Ingeniería*, vol. 39, no. 1, pp. 49–56, 2018.
- [17] M. S. Alvarez-Alvarado and D. Jayaweera, “Smart maintenance model for operational planning of static synchronous compensators,” *2019 IEEE Milan PowerTech, PowerTech 2019*, pp. 1–6, 2019, doi: 10.1109/PTC.2019.8810830.
- [18] S. G. CONSTANTE FLORES, “UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMOS DE COMPENSACIÓN REACTIVA UTILIZANDO OPTIMIZACIÓN POR ENJAMBRE DE PARTICULAS (PSO),” ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, 2016.
- [19] R. C. Eberhart and Y. Shi, “Particle swarm optimization: Developments, applications and resources,” *Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC*, vol. 1, pp. 81–86, 2001, doi: 10.1109/cec.2001.934374.
- [20] H. Mostapha Kalami, “Particle Swarm Optimization (PSO) in MATLAB — Video Tutorial,” *Yarpiz*, 2016. <https://yarpiz.com/440/ytea101-particle-swarm->

optimization-pso-in-matlab-video-tutorial.

- [21] ARCONEL, “Pliego Tarifario Para Las Empresas Eléctricas de Distribución - Servicio Público de Energía Eléctrica. Periodo: Enero-Diciembre 2020,” *Resolución Nro. ARCONEL – 035/19*, vol. 19, p. 35, 2019.
- [22] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-sánchez, and R. J. Thomas, “MATPOWER : Steady-State Operations , Systems Research and Education,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 12–19, 2011.
- [23] M. S. Alvarez-Alvarado, C. D. Rodríguez-Gallegos, and D. Jayaweera, “Optimal planning and operation of static VAR compensators in a distribution system with non-linear loads,” *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 12, no. 15, pp. 3726–3735, 2018, doi: 10.1049/iet-gtd.2017.1747.
- [24] El Comercio (Ecuador), “La tarifa de electricidad se mantiene,” *pressreader*, 2020. <https://www.pressreader.com/ecuador/el-comercio-ecuador/20200112/281694026721677>.
- [25] Todo Logística & Comercio Exterior, “Parque Eólico San Cristóbal Orgullo del Ecuador.” <https://www.todologistica.com/index.php/megaindustria2/6756-parque-eolico-san-cristobal-orgullo-del-ecuador>.
- [26] Pv Magazine, “Ecuador: Correa inaugura central solar de 1,5 MW en Galápagos,” 23 *Diciembre*, 2014. <https://www.pv-magazine-latam.com/2014/12/23/ecuador-correa-inaugura-central-solar-de-1-5-mw-en-galpagos/>.

ANEXOS

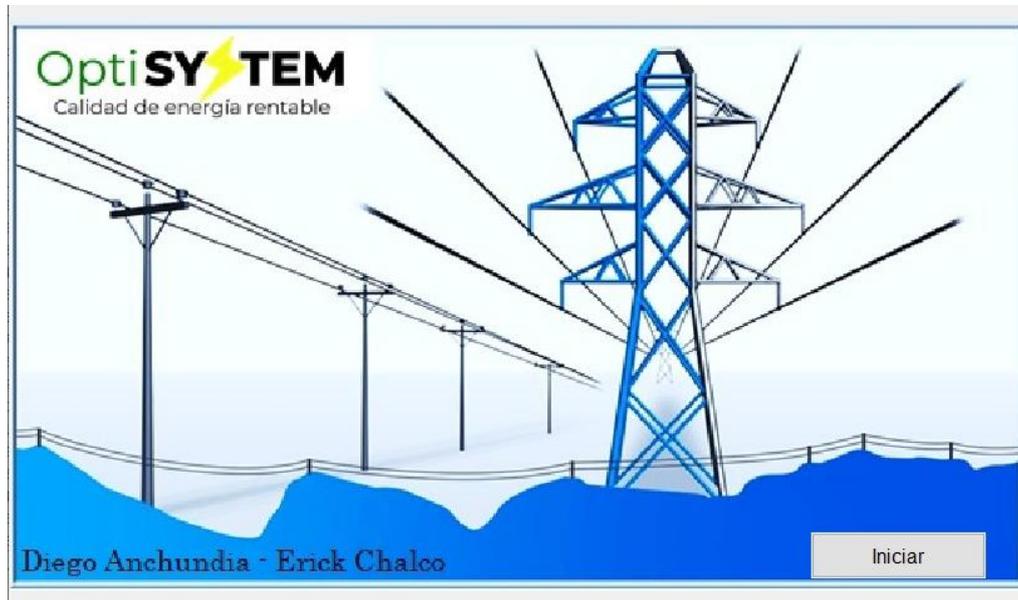


Figura 4.1 Ventana de inicio de la interfaz elaborada

Ubicación de bancos de capacitores y energía distribuida

Capacidad de bancos de capacitores (MVar)

10 20 50 100 120

Stock de bancos de capacitores

2 3 7 5 1

Barra a instalarse la energía distribuida

Eolica Solar

59 116 54 80 90

Capacidad a instalar (MW)

Eolica Solar

2.4 2.4 1.5 1.5 1.5

Calcular

Resultados

Bancos instalados en las barras (MVar)

Numero de barra	Banco instalado
18	20
19	50
34	50
36	50
40	100
49	100
54	100
55	50

Perdidas totales del sistema (MW)

Sin capacitores: 132.863

Con capacitores: 98.3152

Ir a graficas

Análisis de pérdidas

Salir

Figura 4.2 Ventana de ingreso de datos

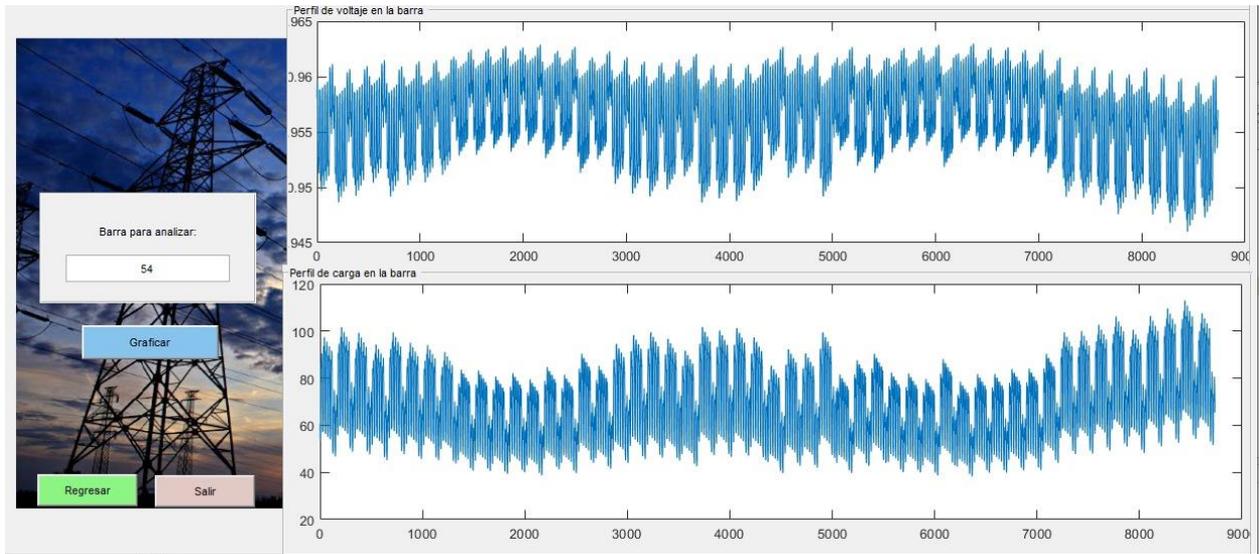


Figura 4.3 Ventana de visualización de resultados del voltaje y carga

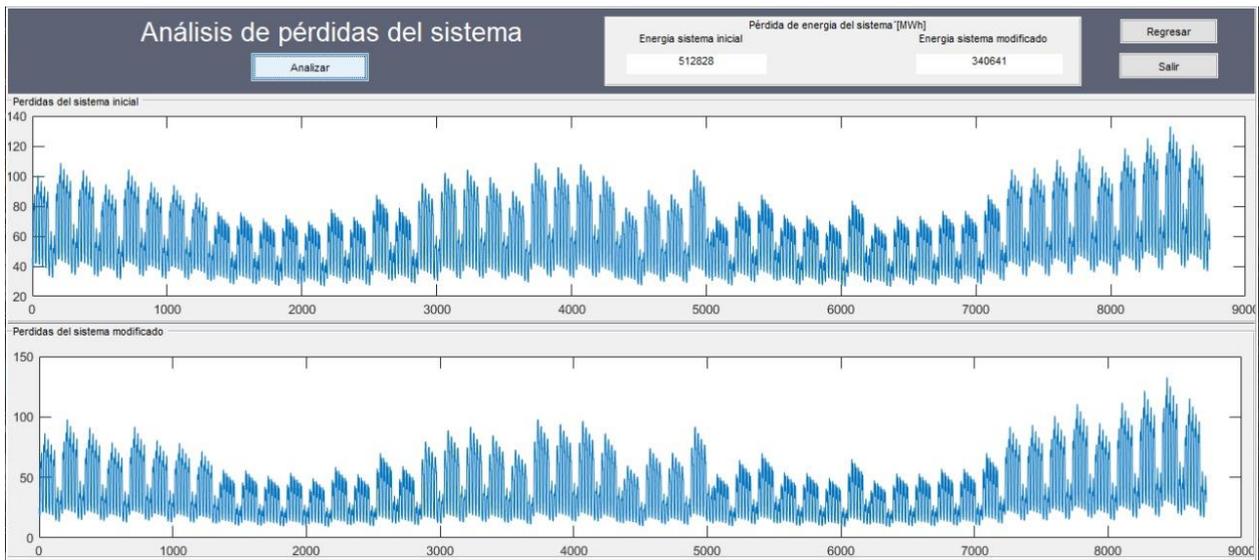


Figura 4.4 Ventana de visualización de resultado de pérdidas de energía