

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA PARA LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE
TRANSMISIÓN CONSIDERANDO REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS MEDIANTE
OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE

QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**PLANIFICACIÓN ÓPTIMA PARA LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE
TRANSMISIÓN CONSIDERANDO REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS MEDIANTE
OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.**

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

AUTOR: DAVID SEBASTIÁN MENDIETA RODAS
TUTOR: DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA.

Quito -Ecuador

2023

David Sebastián Mendieta Rodas

PLANIFICACIÓN ÓPTIMA PARA LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023
Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



David Sebastián Mendieta Rodas (Y'2000). Realizó sus estudios de segundo nivel en la Institución Educativa Colegio San Gabriel, se graduó de Bachiller en Ciencias en la ciudad de Quito. Cursando el último ciclo de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el análisis para planificación óptima de la expansión de un sistema de transmisión, utilizando algoritmos optimizadores basados en el Enjambre de Partículas.

dmendietar@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Diego Francisco Carrión Galarza (Y'1981). Doctor y Máster en Ingeniería por la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia, Máster en Energías Renovables por la Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí – Ecuador, Ingeniero Eléctrico por la Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador. Profesor e investigador de la Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador. En la actualidad es miembro del grupo de investigación Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI).

dcarrion@est.ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, David Sebastián Mendieta Rodas con documento de identificación N° 1723002273 manifiesto que:

Soy el autor 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.

Quito, 16 de octubre del año 2023

Atentamente,



David Sebastián Mendieta Rodas
1723002273

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

Yo, David Sebastián Mendieta Rodas con documento de identificación No. 1723002273, 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 autor del Artículo Académico: “Planificación óptima para la expansión del sistema de transmisión considerando reducción de pérdidas mediante Optimización de Enjambre de Partículas”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En 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.

Quito, 16 de octubre del año 2023

Atentamente,



David Sebastián Mendieta Rodas

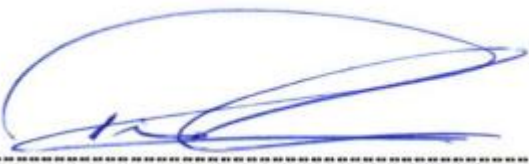
1723002273

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza con documento de identificación N° 1713703062, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: PLANIFICACIÓN ÓPTIMA PARA LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS, realizado por David Sebastián Mendieta Rodas con documento de identificación N° 1723002273, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 16 de octubre del año 2023

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke at the end, positioned above a dashed horizontal line.

Ing. Diego Francisco Carrión Galarza, MSc
1713703062

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Planificación de los Sistemas de Potencia.	5
	2.1 Planificación de la expansión del Sistema de Transmisión (TEP).....	5
	2.2 Algoritmo de Enjambre de Partículas.	6
3	Formulación del problema.	7
	3.1 Metodología de Enjambre de Partículas.....	7
	3.2 Procedimiento de Resolución.....	9
	3.3 Casos de Estudio	9
4	Análisis de resultados.....	9
	4.1 Sistema de Prueba 39 Barras Caso Base	9
	4.2 Sistema de Prueba 39 Barras Caso 1	10
	4.3 Sistema de Prueba 39 Barras Caso 2.....	11
	4.4 Resultados Sistema de 39 Barras	13
	4.5 Sistema de Prueba 118 Barras Caso Base	14
	4.6 Sistema de Prueba de 118 Barras Caso 1	15
	4.7 Sistema de Prueba de 118 Barras Caso 2	16
	4.8 Resultados Sistema de 118 Barras	18
	4.9 Expansión del Sistema de 39 Barras	19
	4.10 Expansión del Sistema de 118 Barras	20
	4.11 Despachos de los Generadores.....	22
	4.11.1 Sistema de 39 Barras Casos de Estudio	22
	4.11.2 Sistema de 118 Barras Casos de Estudio	22
	4.11.3 Expansión del Sistema de 39 Barras	24
	4.11.4 Expansión del Sistema de 118 Barras	24
5	Conclusiones	26
6	Trabajos Futuros.....	27
7	Bibliografía	27
	7.1 Matriz de Estado del Arte.....	32
	7.2 Resumen de Indicadores.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estudios de la planificación de los Sistemas de Potencia.....	5
Figura 2, Diagrama de Flujo del PSO	6
Figura 3. Niveles de Voltaje en Matlab - 39 Barras.....	9
Figura 4. Pérdidas de Potencia en Matlab – 39 Barras.....	10
Figura 5. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 1 – 39 Barras.	10
Figura 6. Sistema Optimizado Caso 1 – 39 Barras	11
Figura 7. Planteamiento de líneas nuevas – 39 Barras.....	12
Figura 8. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 2 – 39 Barras.	12
Figura 9. Sistema Optimizado Caso 2 – 39 Barras	13
Figura 10. Niveles de Voltaje – 39 Barras	13
Figura 11. Pérdidas de Potencia Activa – 39 Barras	14
Figura 12. Pérdidas de Potencia Reactiva – 39 Barras.....	14
Figura 13. Niveles de Voltaje en Matlab - 118 Barras.....	14
Figura 14. Pérdidas de Potencia en Matlab – 39 Barras.....	15
Figura 15. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 1 – 118 Barras.....	15
Figura 16. Sistema Optimizado Caso 1 – 118 Barras	16
Figura 17. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 2 – 118 Barras.....	16
Figura 18. Planteamiento de líneas nuevas – 118 Barras.....	17
Figura 19. Sistema Optimizado Caso 2 – 118 Barras	18
Figura 20. Niveles de Voltaje – 118 Barras	18
Figura 21. Pérdidas de Potencia Activa – 118 Barras.....	19
Figura 22. Pérdidas de Potencia Reactiva – 118 Barras.....	19
Figura 23. Expansión anual del Sistema de 39 Barras.	20
Figura 24. Expansión anual del Sistema de 118 Barras.	21
Figura 25. Despacho de Potencia Activa del Sistema de 39 Barras.....	22
Figura 26. Despacho de Potencia Reactiva del Sistema de 39 Barras.	22
Figura 27. Despacho de Potencia Activa del Sistema de 118 Barras.....	23
Figura 28. Despacho de Potencia Reactiva del Sistema de 118 Barra	23
Figura 29. Despacho anual de potencia Activa – 39 Barras.....	24

Figura 30. Despacho anual de potencia reactiva – 39 Barras.....	24
Figura 31. Despacho anual de Potencia Activa – 118 Barras	25
Figura 32. Despacho anual de Potencia Reactiva – 118 Barras	25
Figura 33. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	35
Figura 34. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	36
Figura 35. Indicador de solución - Estado del arte.....	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura del código	8
Tabla 2. Descripción de Algoritmo de expansión Óptima	8
Tabla 3. Líneas conectadas Caso 1 – 39 Barras	11
Tabla 4. Líneas conectadas Caso 2 – 39 Barras	13
Tabla 5. Líneas conectadas Caso 1 – 118 Barras	15
Tabla 6. Líneas conectadas Caso 2 – 118 Barras	17
Tabla 7. Conexión de enlaces por año – 39 Barras	20
Tabla 8. Reducción de pérdidas anual en [MW] – 39 Barras	20
Tabla 9. Conexión de enlaces por año – 118 Barras	21
Tabla 10. Reducción de pérdidas anual [MW] – 118 Barras	21
Tabla 11: Matriz de estado del arte.	32

PLANIFICACIÓN ÓPTIMA PARA LA EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS MEDIANTE OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.

Resumen

En los sistemas eléctricos de potencia, es indispensable poseer una correcta planeación de expansión del sistema de transmisión, tomando en cuenta restricciones de las líneas, para un buen diseño del sistema. Se presenta un análisis de reforzamiento de los sistemas de potencia mediante un algoritmo de optimización, el cual permita ver las líneas candidatas que necesiten aumentar los sistemas analizados. Para este estudio se implementó una optimización basada en el enjambre de partículas, considerando restricciones de las líneas de transmisión y costos de instalación, aplicado a un análisis estático para un año en específico donde busca encontrar la mejor configuración posible para reducir las pérdidas del sistema. El planteamiento de las líneas se dividió en dos escenarios donde el primero se basó en el reforzamiento de las líneas existentes en los sistemas, el segundo escenario sumaba el reforzamiento con el planteamiento de nuevas conexiones entre barras que presentaron un nivel de voltaje bajo y fueron consideradas un punto crítico para la reducción de pérdidas. Finalmente se realizó un análisis comparativo entre los sistemas originales y los optimizados mostrando los niveles de voltaje, las líneas conectadas y un análisis de porcentajes de la reducción de pérdidas de los sistemas.

Palabras Clave: Sistema de Potencia, Medición de pérdidas, Líneas de Transmisión, Enjambre de Partículas, Planificación de expansión de la transmisión.

Abstract

In electrical power systems, it is essential to have a correct planning of transmission system expansion, taking into account line restrictions, for good system design. An analysis of power system reinforcement by means of an optimization algorithm, which allows to see the candidate lines that need to increase in the analyzed systems. For this study, an optimization based on particle swarming was implemented, considering transmission line restrictions and installation costs, applied to a static analysis for a specific year, where it seeks to find the best possible configuration to reduce system losses. The approach of the lines was divided into two scenarios where the first one was based on the reinforcement of the existing lines in the systems, the second scenario added the reinforcement with the approach of new connections between bars that presented a low voltage level and were considered a critical point for the reduction of losses. Finally, a comparative analysis was made between the original and optimized systems showing the voltage levels, the connected lines, and a percentage analysis of the loss reduction of the systems.

Keywords: Power system, Loss measurement, Transmission lines, Particle Swarm, Power Transmission Planning.

1 Introducción

Los sistemas eléctricos de potencia (SEP) son estructuras complejas, encargados de la generación, transmisión, subtransmisión y distribución de la energía, estos sistemas se estudian de forma dinámica debido al comportamiento de la carga, considerada estocástica y con un grado de incertidumbre con variación en el tiempo [1]–[3].

Al tener esto presente se debe analizar el sistema de transmisión por su estructura y número de elementos, el sistema posee diversas complejidades desde su diseño, enfocándose en la demanda que se plantea cubrir en el sistema [4]–[7]. Para su análisis se deben plantear las características que posea una línea, desde su modelamiento matemático hasta diversas problemáticas que se puedan presentar en su instalación y probabilidad a la falla [8]–[11].

Este sistema se puede estudiar mediante la planificación de la expansión del sistema de transmisión (TEP) clasificándolo de acuerdo con diversas estructuras medibles para una resolución en reconfiguración y expansión para una demanda futura [12].

Las líneas de transmisión cuentan con diversas características para tener en cuenta para su planeamiento, a lo largo del tiempo se han planteado diseños y modelos matemáticos para definir los parámetros de las líneas [13], [14], esto cobra mucha importancia para su aplicación en sistemas de potencia en estudios del carácter de flujos de potencia, fallas de las líneas, coordinación de protecciones, etc. [13].

Por otra parte, las pérdidas presentes en las líneas de transmisión son un factor importante al hablar del transporte de la energía eléctrica, las pérdidas por lo general no deben superar el 2 % de la energía total producida, tomando en cuenta que la mayor parte de las pérdidas son ocasionadas

directamente por los cables con sus características y la corriente que circula por los conductores [15].

Al hablar de pérdidas se deben clasificar en dos categorías amplias, las pérdidas del tipo técnicas son las asociadas directamente al flujo de la corriente eléctrica por el conductor y/o cable cuando se habla de la transmisión, su manifestación física es presentada en forma de calor disipando la energía presente [15].

También poseemos las pérdidas del tipo no técnicas, este es un apartado más pequeño debido a que es significativamente menor su probabilidad de ocurrencia, y como su nombre lo indica, son pérdidas medidas de acuerdo con problemáticas con temas de facturación, hurto del suministro eléctrico y fallos en el registro de clientes finales [15].

Retomando el control y disminución de las pérdidas técnicas, se toman en consideración aspectos importantes desde su diseño para la expansión de la red, teniendo presentes factores como: niveles de voltaje, considerando un mayor nivel para menor cantidad de pérdidas, pero aumentando el costo de instalación; longitud de la línea, buscando equilibrio entre el costo, pérdidas presentes y su capacidad total; conductor, seleccionado de acuerdo a una evaluación económica considerando expansión futura; transformadores, evaluando su eficiencia con respecto a su costo. [15].

Los factores antes mencionados se suman a la planificación de la expansión de la transmisión (TEP), la cual ha tenido gran importancia en el desarrollo de sistemas eficientes con diferentes restricciones, ya que la TEP permite analizar varias problemáticas de los sistemas de transmisión antes de plantear su expansión [12].

La TEP va de la mano con la algoritmia de optimización debido a que se plantea la minimización de una función objetivo

específica, esto ha dado lugar a trabajos como [11], [16]–[20] uniendo los estudios de flujos óptimos de potencia con algoritmos del tipo genéticos para la optimización de sistemas eléctricos de potencia.

Los estudios de TEP son utilizados para resolver problemáticas diversas, teniendo estudios preliminares en casos de estudio fijos [12] planteados por el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), resolviendo restricciones del tipo de minimización de funciones, teniendo como problemas costos de congestión, transmisión o inversión, consideraciones en contingencias (N-1), cumplimientos de criterios de seguridad, estabilidad y confiabilidad de los sistemas de transmisión, compensación reactiva mediante bancos de capacitores y arrastramiento de carga para sistemas como el de Garver de 6 barras[21].

También se puede destacar el amplio campo investigativo que posee la TEP, debido a su naturaleza puede en algunos casos ampliar su planificación a factores como la generación [22], para la creación de un sistema final más eficiente enfocado ya sea a la reducción de costos o pérdidas del SEP.

El análisis de un sistema eléctrico de potencia se lo puede realizar mediante un estudio matemático dirigido en flujos de potencia, los cuales entregan datos medibles que representarán el estado en el que se encuentra los elementos, estos estudios son caracterizados por su complejidad debido a la naturaleza no lineal del sistema, por lo que son examinados mediante la utilización de métodos iterativos [23].

Los métodos iterativos engloban un sin número de metodologías distintas que comparten su similitud de convergencia hacia un resultado esperado, pasando por estudios desde Gauss-Seidel [24], [25], enfocados a flujos de potencia para sistemas eléctricos, incluyendo estudios de generación y de carga. Hasta llegar a Newton Raphson, siendo un

método ampliamente utilizado en el campo de la ingeniería eléctrica, basando su estructura principal en el cálculo de variables de estado estable [26].

El uso del método de Newton Raphson se ha expandido a lo largo del tiempo teniendo aplicaciones en técnicas de procesamiento de datos [27], e incluso sigue en desarrollo en conjunto con diferentes análisis matemáticos [26].

Tomando en cuenta los datos que entregan los flujos de potencia para la comprensión de un sistema eléctrico, se acoplan a esta temática los algoritmos de optimización, caracterizados por su objetivo, maximizar o minimizar una función objetivo, en términos del sector eléctrico por lo general se busca la minimización de los costos para instalación de los elementos de un SEP, reducción de pérdidas de un sistema o mejoramiento de diferentes parámetros cuantificables en un sistema eléctrico.

Los algoritmos más utilizados en la actualidad son los catalogados como metaheurísticos, sirven para la implementación en diversos sistemas, en este proyecto se ha decidido utilizar el algoritmo de Enjambre de Partículas o también llamado PSO, debido a las ventajas que presenta para los sistemas eléctricos por su rápida convergencia y su habilidad de búsqueda hacia el resultado [28].

Este algoritmo como muchos otros se deriva de un análisis biológico para la búsqueda de optimización de diferentes tipos de funciones, este basándose en el comportamiento de grupos de aves para la búsqueda de alimento [29]. Al poseer un carácter sencillo de aplicación ha desarrollado diversas variantes aplicadas a diferentes campos de la ingeniería [28], [30].

Podemos encontrar estudios enfocados a la resolución de la problemática en despachos económicos de los sistemas eléctricos de potencia [28], [31]–[33], también en [34] se

encuentra un estudio utilizando el PSO Binario Híbrido utilizando la TEP, como estudio base para la expansión del sistema de transporte siguiendo lineamientos para mantener la seguridad del sistema, esto mediante el estudio de contingencias (N-1) durante cada etapa del proceso.

El desarrollo del PSO ha brindado trabajos enfocados a diversas áreas de la electricidad, por ejemplo [35], menciona el uso del PSO modificado de tipo híbrido para la resolución de un problema multietapa de TEP aplicado a un sistema de 24 barras del IEEE, para buscar la disminución de pérdidas en el sistema de transmisión y mantener un criterio de seguridad considerando contingencias (N-1) utilizando datos topológicos, teniendo como objetivo final la disminución de costos operacionales.

El crecimiento de los sistemas eléctricos y su curva de la demanda ha generado un grave problema de congestión en la transmisión, [36] plantea el uso del PSO original para la búsqueda de óptima localización de FACTS (Flexible AC Transmission Systems) para ayudar a la congestión de las redes de transmisión en su operación, utilizando la restricción para la variación de carga existente.

Diferentes artículos científicos han demostrado la variabilidad que posee el PSO con referente a la temática que se lo enfoque, como en [37], que plantea el análisis del costo total de construcción y su tiempo, por lo que modifica el algoritmo metaheurístico para configurarlo en una búsqueda bidireccional utilizando información geográfica basándose en modelos estandarizados, de tal manera que, la búsqueda se centre en la planificación óptima de redes de transmisión con un costo mínimo.

Este trabajo tiene un enfoque en la reducción de pérdidas de potencia, a diferencia de [38], el cual plantea la reducción de pérdidas utilizando el PSO para

buscar un óptimo despacho de potencia reactiva y control operacional de los niveles de voltaje, se utilizó el algoritmo mediante la herramienta MATPOWER de Matlab, planteándolo en sistemas de prueba del IEEE como el de 14 barras, demostrando la eficiencia del algoritmo para la reducción de pérdidas y sus aplicaciones en planeación de la expansión de la transmisión.

Este artículo se basa en el análisis del algoritmo de Enjambre de Partículas, aplicado para la disminución de pérdidas de potencia en los sistemas de transmisión, utilizando codificación mediante Matlab, se diferenciará de los trabajos mencionados al enfocar su función objetivo a la reducción de pérdidas y tener como restricciones adicionales los costos de instalación y características de las líneas de transmisión.

La metodología propuesta para la planificación de la expansión del sistema de transmisión (TEP) buscará determinar las rutas óptimas de reforzamiento y nuevas líneas de transmisión que se requieren en los sistemas de potencia ante el crecimiento de la demanda, nuevas centrales de generación y límites operativos del SEP.

El artículo tiene un enfoque directo hacia el análisis de la planificación de los sistemas de potencia, haciendo una breve reseña sobre la expansión de los sistemas de transmisión y el funcionamiento del algoritmo que se utilizará para la optimización de los sistemas propuestos del IEEE; el problema descrito, se basa en la expansión de los sistemas de transmisión de los casos de prueba planteados, teniendo en cuenta restricciones del tipo técnicas, y manteniendo valores adecuados para un correcto funcionamiento. Este análisis se ejecutará en dos sistemas diferentes, con el fin de demostrar la validez del código, por tal motivo, se utilizarán los sistemas de prueba del IEEE de 39 y 118 barras con dos casos de estudio, los cuales plantearán el reforzamiento y la

implementación de nuevas líneas para cada sistema.

2 Planificación de los Sistemas de Potencia.

La planificación energética integra diversos estudios como el estudio de la demanda, la planificación de la generación, las redes de transmisión y distribución, y la integración de la electrificación de diversos sectores que afectan directamente al SEP seleccionado [39].

Se puede entender la planificación en algunos casos como la identificación de diversos problemas operativos del sistema, por lo general, basando sus estudios en tiempos de mediano y largo plazo para aplicaciones de una nueva planta generacional o la añadidura de nuevas redes de transmisión basando sus restricciones para términos económicos y en búsqueda de un sistema eficiente [40].

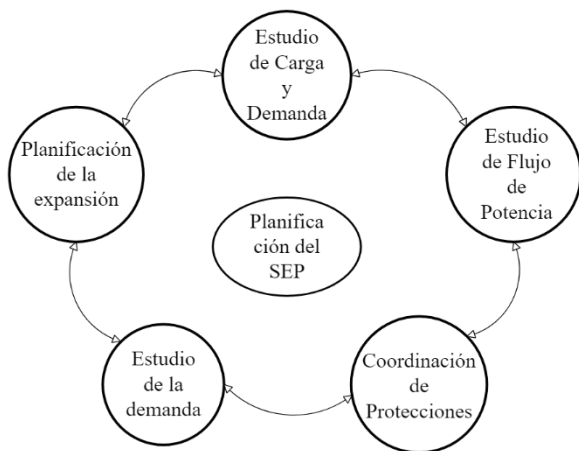


Figura 1. Estudios de la planificación de los Sistemas de Potencia

La planificación de los sistemas de potencia tiene un rol fundamental para mantener la disponibilidad del suministro eléctrico de manera ininterrumpida, mediante el cumplimiento de factores como la confiabilidad, calidad y resiliencia del SEP [39], el manejo adecuado de esta información

ayuda a la correcta integración de los nuevos sistemas de generación y transmisión, con estudios a largo plazo para la validación de su instalación y posterior justificación de los costos de inversión [39], [40].

2.1 Planificación de la expansión del Sistema de Transmisión (TEP).

La TEP se basa identificar la necesidad de un plan de construcción donde ingresen líneas nuevas, enfocado a un mínimo costo [16], [33], [41], [42]. Es de gran importancia en la operación y planificación de sistemas de potencia [43], [44].

El análisis de esta planificación brinda acceso a las configuraciones de red con consideraciones en el aumento de la demanda con el tiempo [43].

Este estudio es importante para los problemas de mercado de potencia, por lo que se lo suele resolver en conjunto con la planeación de la expansión de generación [22]. Para la solución del planteamiento se deben tomar consideraciones de seguridad del sistema con propósitos económicos [22], [43].

La TEP nace por la necesidad de optimizar la transferencia de energía, de la mano de la expansión de la generación y el crecimiento continuo de la demanda [21]. Al ser una problemática se lo plantea con resoluciones del tipo optimización con la aplicación de diversos algoritmos [21], [34].

Posee dos clasificaciones, estática cuando se busca las líneas necesarias para el estudio de un tiempo específico por lo general medido a lo largo de un año, también puede ser llamado estudio anualizado, por la individualidad del análisis para cada temporalidad. En cambio, en el estudio dinámico, se considera un rango de tiempo amplio, generándose una configuración de red diferente para cada etapa estudiada[34].

Para un estudio dinámico se deben plantear restricciones del carácter temporal, con la final de acoplar cada etapa hasta finalizar el tiempo de estudio [34].

La TEP es clasificado como un problema complejo, no lineal y de carácter combinatorio, por lo que se han optado por buscar soluciones a su problemática utilizando métodos heurísticos [21], [34], [45].

2.2 Algoritmo de Enjambre de Partículas.

El enjambre de partículas es un algoritmo metaheurístico el cual posee ventajas sobre otros, debido a su facilidad de implementación en problemas de optimización [28].

Su mayor ventaja es la convergencia rápida hacia el resultado por su buena habilidad de búsqueda, basada en la actualización de mejores posiciones o soluciones, en cada iteración [28]. Aparte de la robustez que ofrece y eficiencia [29].

El algoritmo se deriva directamente de análisis biológicos de comportamiento, como diversos sistemas en búsqueda de planificación de caminos y optimización de diversas funciones [29]. Este en específico basa su estructura en el comportamiento de grupos de aves en búsqueda de alimentos [29].

Debido a la simplicidad que posee para aplicarse a problemas de optimización, el algoritmo posee diversas variantes que han sido propuestas tales como: PSO auto adaptativo, adaptativo híbrido, multi agente, entre otros. [28].

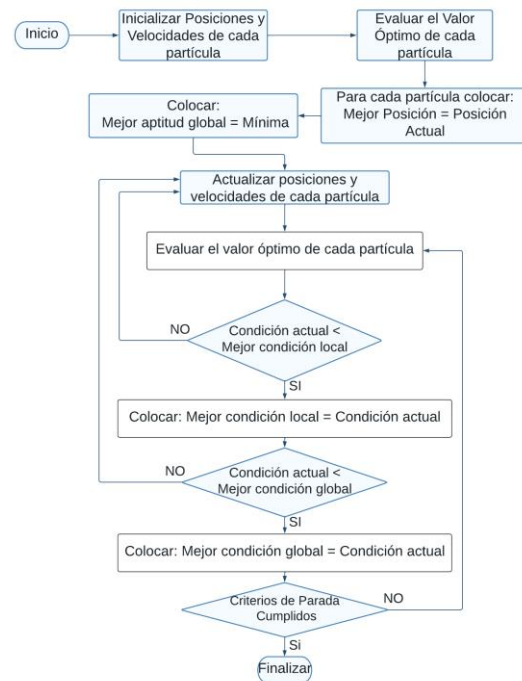


Figura 2, Diagrama de Flujo del PSO

Este algoritmo se basa en asumir un espacio muestral de estudio de una dimensión específica, esta poseerá una cantidad de partículas caracterizadas por una velocidad que se actualizará con cada iteración del código [30].

Cada partícula posee una posición única que es expresada como [46]:

$$x_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD} \quad (1)$$

Donde:

x_i : Posición de la partícula i

D : dimensión en cantidad de partículas

La velocidad de igual forma se expresa de manera única para cada partícula [46]:

$$V_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD} \quad (2)$$

Donde:

V_i : Velocidad de la partícula i

El comportamiento de la velocidad está descrito mediante la siguiente ecuación:

$$V_i = wV_i + c_1r_1(p_{best} - x_i) + c_2r_2(g_{best} - x_i) \quad (3)$$

Se puede entender p_{best} en (3) como la mejor posición histórica de una partícula, mientras que g_{best} es la posición óptima del enjambre de partículas [46].

Las constantes utilizadas como c_1, c_2 son valores no negativos considerados factores de aprendizaje. Mientras que r_1, r_2 son números aleatorios entre 0 y 1 [46].

La variable w es considerada el peso de inercia para el cálculo iterativo, por lo general tomando valores entre 0.1 y 0.9 [46].

$$X_i = X_i + V_i \quad (4)$$

Donde:

X_i : Posición de la partícula

V_i : Velocidad de la partícula

2.3 Formulación del problema.

El presente trabajo propone el estudio de la TEP, mediante la optimización del SEP enfocado en el sistema de transmisión, esta problemática basa su estudio en la definición de dónde y cuándo será necesario la instalación de nueva arquitectura eléctrica para el suministro energético, tomando en cuenta el crecimiento de la demanda eléctrica, los costos de instalación, y sujeto a condiciones financieras, eléctricas, económicas y sociales.

La TEP no solo considera el reforzamiento de las líneas, también envuelve cambios directos a la topología de la red eléctrica debido a la creación de nuevas conexiones entre barras que se encontraban aisladas, aumentando al sistema carga o nuevos nodos de generación.

La planificación de estos sistemas puede ser clasificada como estática o dinámica, este

trabajo se enfocará inicialmente en la primera, es decir, se buscarán los circuitos adicionales determinados de manera óptima para un año fijo en un horizonte de tiempo, esto ignorará el tiempo de instalación de las nuevas líneas, y enfocará su resolución en encontrar la estructura final óptima de la red eléctrica para una situación determinada. Luego se realizará un análisis en el tiempo con actualizaciones anuales par a un horizonte de tiempo de 5 años con crecimiento de la demanda del 1.5 % anual.

3.1 Metodología de Enjambre de Partículas

Para el desarrollo de la optimización del sistema de transmisión se utilizará el algoritmo PSO considerando una función objetivo con sus restricciones sujetas a las características de las líneas.

$$FO: \min P_{loss} = \sum_i^N \sum_j^N G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos \theta_{ij}) \quad (5)$$

Donde:

N: Número Total de Barras del SEP

G_{ij} : Conductancia

V_i : Voltaje en la barra i

V_j : Voltaje en la barra j

θ_{ij} : Diferencia de ángulos de los voltajes de las barras i a la j

Sujeto a las restricciones de:

$$P_{gi} - P_{di} - \sum_{j \in N_B} G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_iV_j \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (6)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} - \sum_{j \in N_B} -B_{ii}(V_i^2 + V_j^2) - B_{ij}(V_i^2 + V_j^2) - 2V_i V_j \cos \theta_{ij} = 0 \quad (7)$$

Donde:

B_{ij} : Susceptancia

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad (8)$$

$$|P_k^2 + Q_k^2| \leq S_k^{max} \quad (9)$$

$$PG_g^{min} \leq PG_g \leq PG_g^{max} \quad (10)$$

$$QG_g^{min} \leq QG_g \leq QG_g^{max} \quad (11)$$

Tabla 1. Nomenclatura del código

Variable	Descripción
Pbest	Mejor posición local
Gbest	Mejor posición global
Itermax	Máximo número de iteraciones
Case	Casos de estudio modificados con las nuevas líneas apagadas
Por_Perd	Porcentaje de pérdidas a reducir con respecto a cada línea conectada
Pesos	Variable de peso a cada probabilidad de conexión de línea, valor variable entre un refuerzo y una línea nueva

El algoritmo utilizado posee la misma estructura que el PSO tradicional, se realizaron algunos cambios para aplicarlo a los sistemas planteados y variar las restricciones. Al inicio del código se inicializarán las variables necesarias para un PSO tradicional, tales como el tamaño de la población, la dimensión del enjambre, y carga del sistema de potencia con todas sus componentes, una vez realizado esto, se determinan variables necesarias para el cálculo de optimización, como las mejores posiciones locales y globales que se actualizarán en cada iteración, el número de iteraciones totales donde se detendrá el

algoritmo y el caso de estudio donde se deben haber ingresado las líneas candidatas.

Tabla 2. Descripción de Algoritmo de expansión Óptima

Algoritmo PSO: TEP Reducción de Pérdidas

Inicio

Paso 1: *Inicializar:*
Tamaño de Población y Dimensión del Enjambre
Sistema: Generadores, líneas, nodos, cargas, líneas candidatas

Paso 2: *Determinación de Parámetros de Simulación:*

Pbest
Gbest
Itermax
Case
Por_Perd

Paso 3: *Expansión de la Transmisión usando PSO:*

While Iter < Itermax

Iter=Iter+1

OF: min Ploss

$$P_{loss} = \sum_i \sum_j G_{ij} (V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos \theta_{ij})$$

For i=1

For j=1

Considerando:
 V_{ij} , Pesos

Determinación: Matriz de Conexiones (Sist.branch)

End

Paso 4: *Mostrar resultados:*

Iter, Ploss, Sist.branch, Vij

Fin

El bucle del PSO iniciará con el cálculo de los coeficientes de ponderación, en este caso con variables aleatorias, y el cálculo de la inercia, inicia el primer bucle que actualizará la variable de velocidad mediante la ecuación (3), luego se realizará una carga nueva del sistema original, y tomará en cuenta solo las primeas conexiones del sistema que se encuentran apagadas, para realizar un barrido de opciones conectando las líneas candidatas, la condición se cumple mediante una función a minimizar (6), y restricciones (7) (8) el

condicional utilizado para la validación de nuevas posiciones y resultados se basa en un análisis porcentual, es decir, si la reducción de pérdidas en porcentaje es mayor a la variable “Por_perd”, se actualizarán los valores y continuará con la siguiente iteración hasta llegar a converger en una configuración óptima de reducción de pérdidas.

3.2 Procedimiento de Resolución

Para la resolución del problema planteado de la TEP se usa el software computacional Matlab, con ayuda de la herramienta MATPOWER, este permite realizar la programación de diversos casos de estudio, para la solución de optimizaciones de sistemas y los análisis de los flujos óptimos a ser evaluados en cada uno de los sistemas de prueba que se van a analizar

3.3 Casos de Estudio

Las simulaciones para la obtención de resultados se realizarán sobre los sistemas del IEEE de 39 Barras y 118 Barras. Para cada sistema se tendrán un caso base para validación de las condiciones iniciales y 2 casos de estudio de tal forma que se distribuyan como:

Caso Base: Flujo Óptimo de Potencia.

Caso 1: Minimización de Pérdidas con reforzamiento de líneas.

Caso 2: Minimización de Pérdidas con reforzamiento de líneas e inclusión de nuevas conexiones.

Caso de Expansión: Planteamiento de reforzamiento de líneas en un horizonte de tiempo de 5 años, con crecimiento de la demanda de

El caso base se utilizará para validar las condiciones iniciales del sistema mediante la simulación del flujo óptimo del SEP. El caso de estudio 1 y 2 se programará mediante la herramienta Matlab, utilizando el paquete adicional MATPOWER, donde se

programará el algoritmo de optimización PSO, el cual como función objetivo (5) tendrá la reducción de pérdidas en el SEP, se diferencian en que el primer caso solo tendrá en cuenta el reforzamiento de las líneas de transmisión existentes, en cambio el segundo caso de estudio simulará diferentes planteamientos de conexiones nuevas para la mejora en zonas con déficit.

3 Análisis de resultados.

Para la ejecución del algoritmo optimizador realizado en este artículo, se utilizó un computador portátil el cual cuenta con un procesador Intel® Core™ i7-10875H CPU @ 2.30GHz, con 32 GB de memoria RAM, y una tarjeta gráfica NVIDIA GeForce RTX 2070 Super with Max-Q Design.

El Software utilizado para la optimización es la herramienta Matlab, con su paquete adicional MATPOWER para el modelamiento de sistemas de potencia y análisis de flujos.

3.1 Sistema de Prueba 39 Barras Caso Base

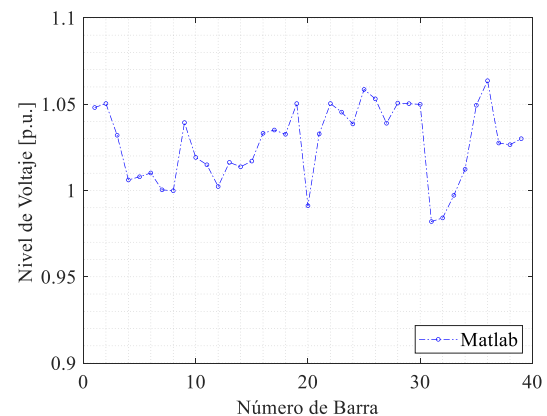


Figura 3. Niveles de Voltaje en Matlab - 39 Barras.

Para analizar las condiciones iniciales de los sistemas se realizó la modelación y simulación en Matlab, como se aprecia en la figura 3 los niveles de voltaje se mantienen dentro de los

límites planteados por la herramienta MATPOWER, considerando voltajes en por unidad con valores oscilantes entre 0.94 a 1.06 como valores máximos y mínimos.

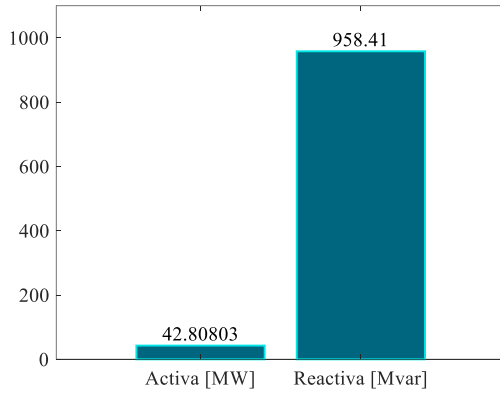


Figura 4. Pérdidas de Potencia en Matlab – 39 Barras.

En la figura 4 se observa en condiciones iniciales la cantidad de pérdidas de potencia activa y reactiva que presenta el sistema, el algoritmo se basará en la reducción de pérdidas de potencia activa mediante la implementación de conexiones entre barras, esto disminuirá también las pérdidas de potencia reactiva por una mejora en los flujos de potencia del SEP.

3.2 Sistema de Prueba 39 Barras Caso 1

El caso 1 es un análisis de expansión óptima del sistema de transmisión planteando un refuerzo en todas las conexiones existentes del sistema, esto se realiza para probar la capacidad del algoritmo de encontrar las mejores conexiones o refuerzos para una mejora del sistema para reducción de pérdidas.

Se plantea un refuerzo de todo el sistema para que el sistema optimizador pueda variar entre todos los refuerzos o conexiones posibles hasta encontrar una solución óptima, de esta forma se cubre una gran cantidad de posibles soluciones.

En la figura 5 se muestra el proceso de convergencia del algoritmo, llegando a un valor estable en la iteración número 64, con un tiempo de ejecución de 6 minutos con 54 segundos.

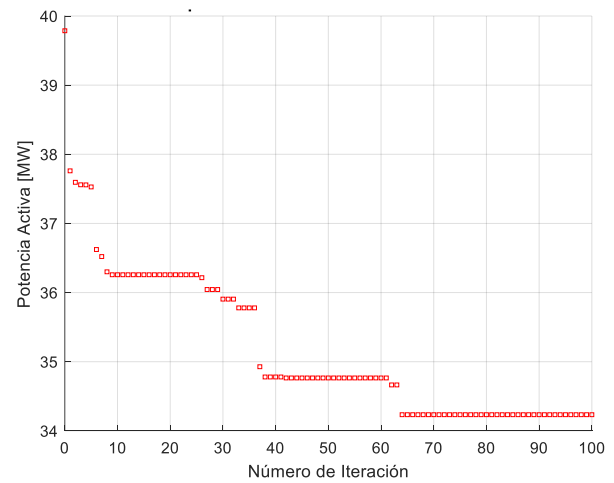


Figura 5. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 1 – 39 Barras.

En la figura 6 se observa el sistema de 39 barras después de la optimización donde se conectaron 5 líneas de refuerzo (Tabla 3), en todo el sistema cumpliendo la condición de reducir las pérdidas, mediante el algoritmo planteado.

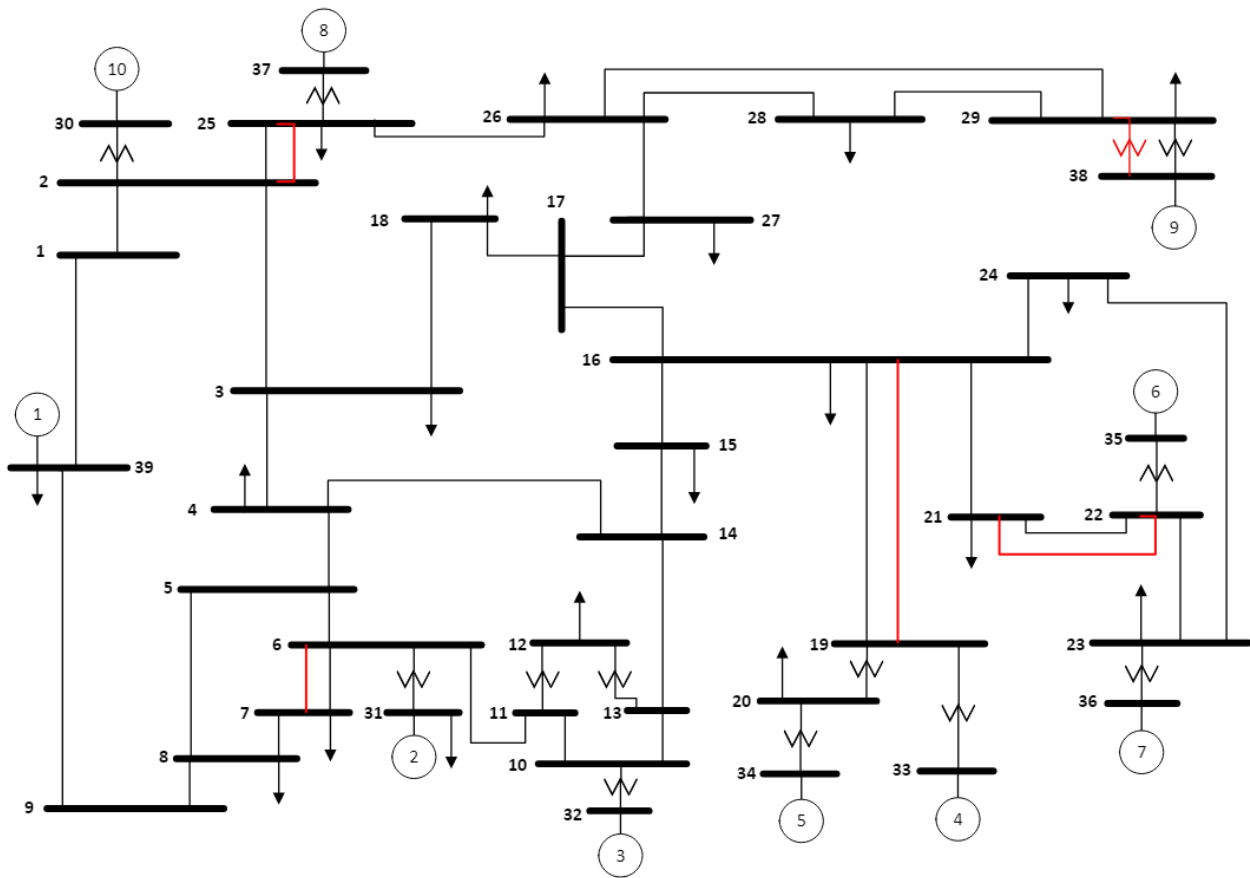


Figura 6. Sistema Optimizado Caso 1 – 39 Barras

3.3 Sistema de Prueba 39 Barras Caso 2

El caso 2 analiza la expansión óptima del sistema de transmisión considerando los refuerzos de las líneas existentes y el planteamiento de 5 líneas nuevas entre barras que no presentaban una conexión, basado en un cruce de información donde se consideraron barras con un nivel de voltaje ligeramente inferior a las demás, y ayudan a líneas existentes que presentan más pérdidas en el sistema. De esta forma mediante la optimización se pueden conseguir las mejores opciones de conexión de líneas planteadas en la figura 7.

Tabla 3. Líneas conectadas Caso 1 – 39 Barras

Barra i	Barra j	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]
2	25	0.007	0.0086
6	7	0.0006	0.0092
16	19	0.0016	0.0195
21	22	0.0008	0.014
29	38	0.0008	0.0156

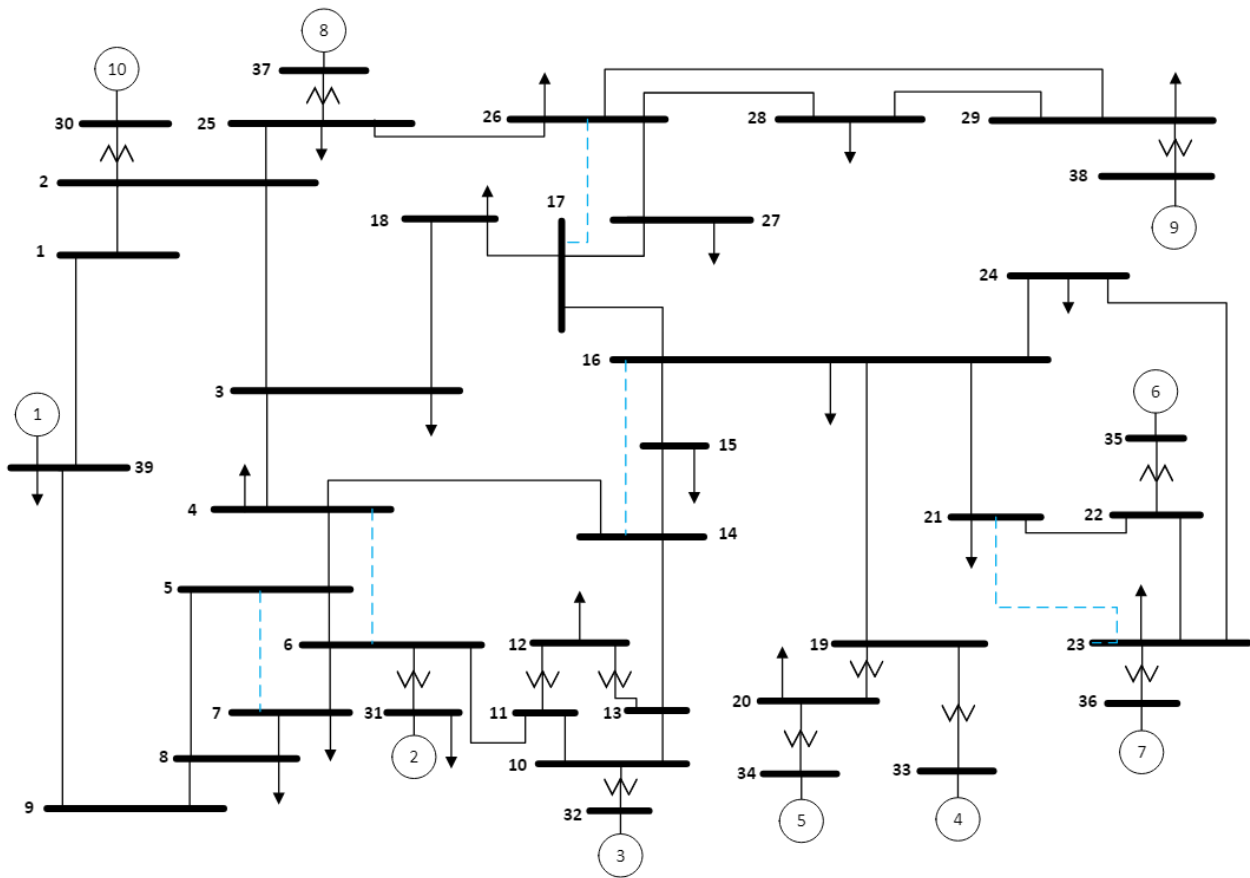


Figura 7. Planteamiento de líneas nuevas – 39 Barras.

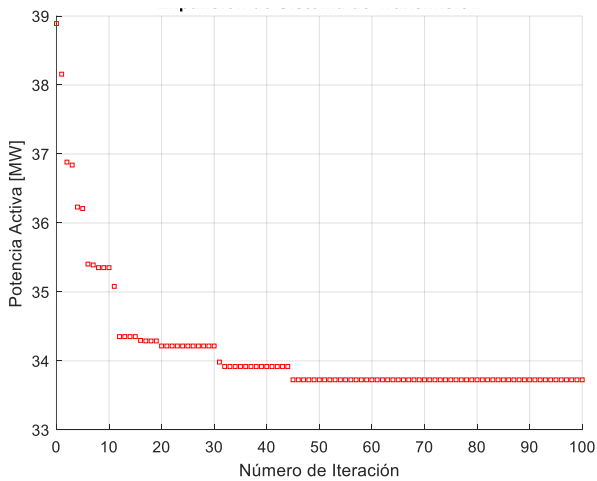


Figura 8. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 2 – 39 Barras.

En la figura 8 se señala la reducción de pérdidas que presenta este caso hasta llegar a un valor estable en la iteración número 45, con un tiempo de ejecución de 7 minutos con 31 segundos.

El caso optimizado como se presenta en la figura 9, expone la conexión de 6 líneas de transmisión, donde 5 líneas son refuerzos de conexiones existentes, y solo 1 línea nueva planteada fue considerada por el algoritmo.

La tabla 4 muestra las características de las líneas óptimas a conectar, y las divide en tipos, donde R se utilizará para reforzamiento y N para una conexión nueva.

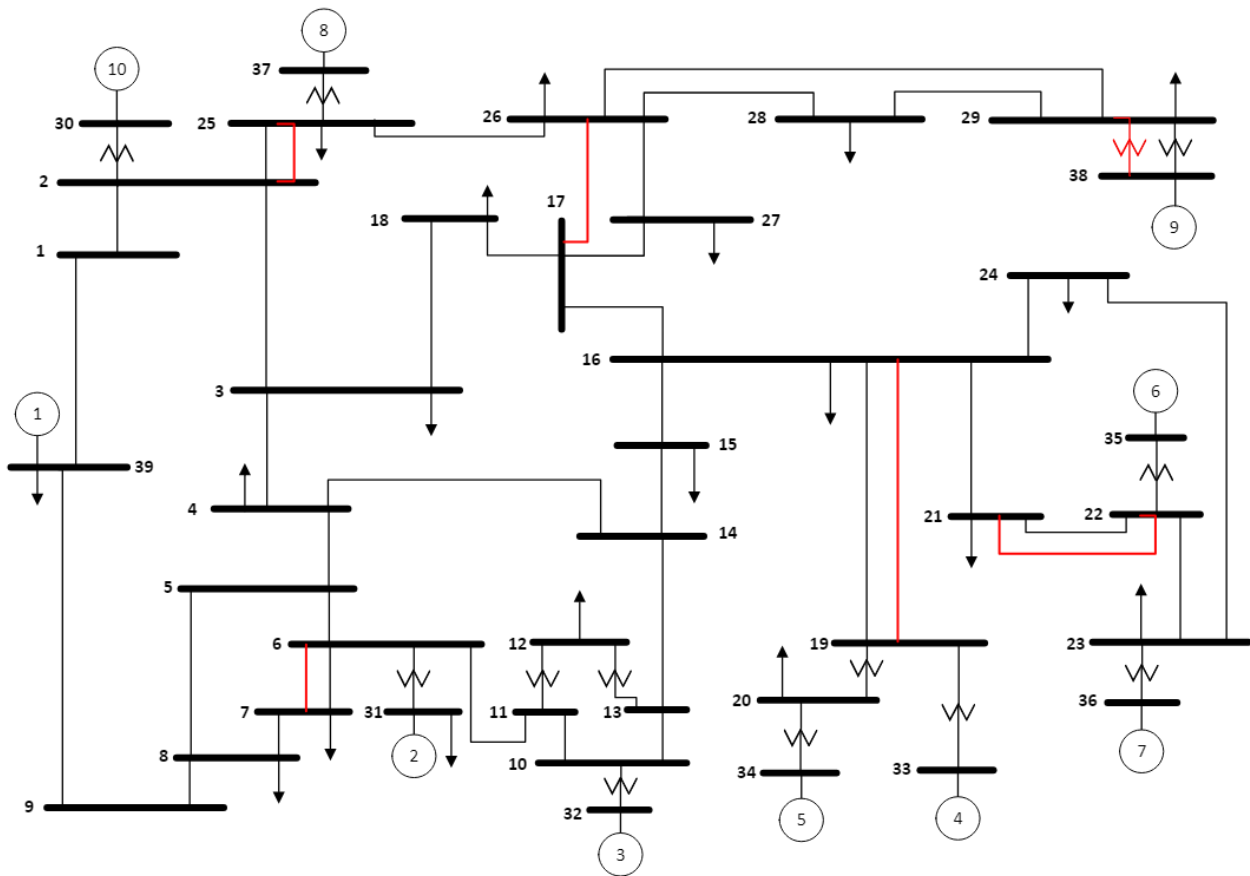


Figura 9. Sistema Optimizado Caso 2 – 39 Barras

Tabla 4. Líneas conectadas Caso 2 – 39 Barras

Barra i	Barra j	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]	Tipo
2	25	0.007	0.0086	R
6	7	0.0006	0.0092	R
16	19	0.0016	0.0195	R
21	22	0.0008	0.014	R
29	38	0.0008	0.0156	R
17	26	0.0027	0.032	N

3.4 Resultados Sistema de 39 Barras

Los sistemas optimizados del SEP de 39 barras muestran una elevación en el perfil de voltaje, como se señala en la figura 10.

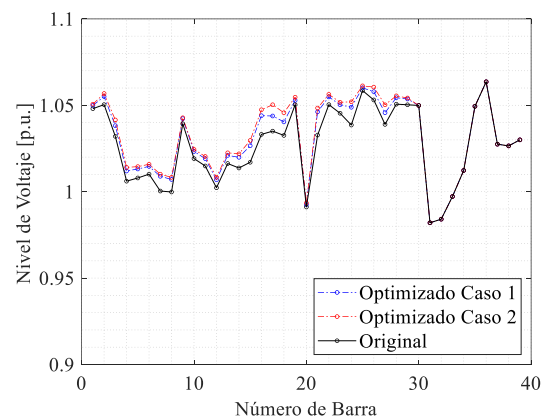


Figura 10. Niveles de Voltaje – 39 Barras

Debido a las conexiones realizadas de líneas reforzadas, y en el segundo caso de líneas nuevas, los perfiles de voltajes se

elevan manteniendo una restricción del 6 % de variabilidad.

La figura 11 muestra la mejora que realizó el algoritmo de optimización en ambos casos, reduciendo de las pérdidas originales de potencia activa con 42.8 [MW] hasta los valores de 34.23 [MW] para el primer caso, y 33.72 [MW] en el segundo.

Las pérdidas iniciales del sistema representaban un 0.68 % de la demanda total del SEP, al realizar la optimización se logró reducir a un nivel de 0.54 % y 0.53 % para el caso 1 y 2 respectivamente.

Al ser un sistema con un porcentaje de pérdidas bajo, su mejora no tendrá una gran representación con respecto a la demanda del sistema.

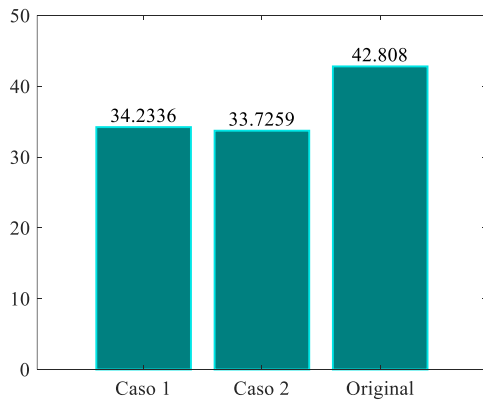


Figura 11. Pérdidas de Potencia Activa – 39 Barras

Las pérdidas de potencia reactiva también se redujeron mediante la optimización, bajando de un nivel de 958.41 [Mvar] hasta los 836.15 y 831.53 [Mvar], como se muestra en la figura 12.

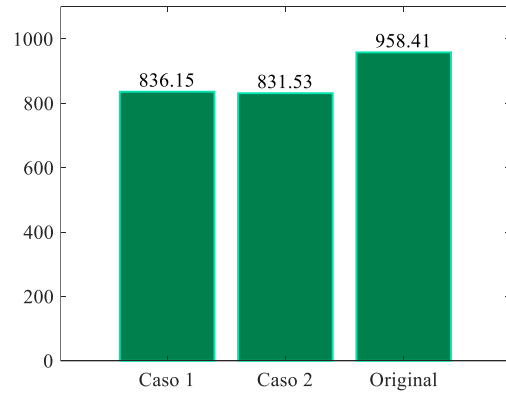


Figura 12. Pérdidas de Potencia Reactiva – 39 Barras

3.5 Sistema de Prueba 118 Barras Caso Base

De igual forma que para el anterior sistema, se realizó un análisis en condiciones iniciales del sistema, para validar los parámetros iniciales, como se puede observar en la figura 13 los voltajes se mantienen dentro de los límites establecidos con una variación máxima del 6 % en por unidad.

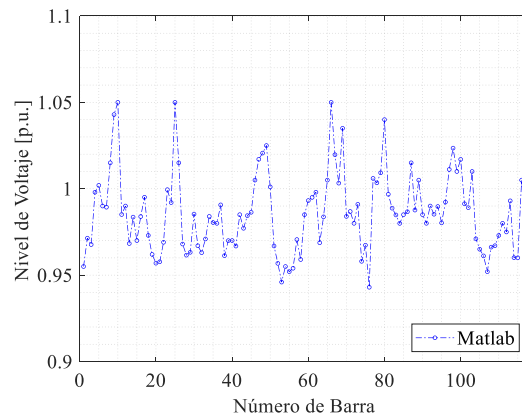


Figura 13. Niveles de Voltaje en Matlab - 118 Barras.

En la figura 14 se puede apreciar las pérdidas de potencia activa y reactiva del sistema de 118 barras, al igual que el caso anterior, la algoritmia aplicada al sistema se enfocará en disminuir las pérdidas de potencia activa del SEP.

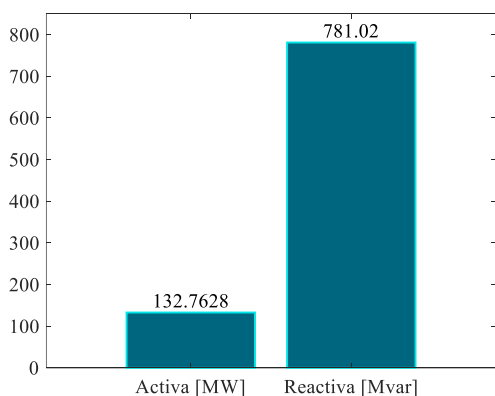


Figura 14. Pérdidas de Potencia en Matlab – 39 Barras.

3.6 Sistema de Prueba de 118 Barras Caso 1

El análisis para el caso 1 de este sistema es similar al aplicado al de 39 Barras, se plantea un reforzamiento de todas las líneas existentes en el SEP para la reducción de pérdidas totales del mismo.

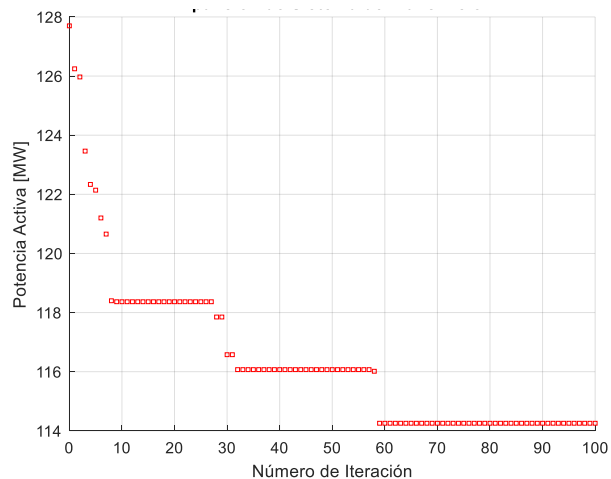


Figura 15. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 1 – 118 Barras

En la figura 15 se expone la convergencia de este algoritmo, logrando su convergencia en la iteración número 59, con un tiempo de ejecución de 12 minutos con 55 segundos.

La optimización del sistema expuso como resultado la conexión de 15 líneas, listadas en la tabla 5, las cuales corresponden al reforzamiento del sistema como muestra la figura 16, cumpliendo con la condición de reducir pérdidas en el sistema.

Tabla 5. Líneas conectadas Caso 1 – 118 Barras

Barra i	Barra j	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]
6	7	0.00459	0.0208
9	10	0.00258	0.0322
21	22	0.0209	0.097
26	30	0.00799	0.086
38	37	0	0.0375
42	49	0.0715	0.323
49	66	0.018	0.0919
55	59	0.04739	0.2158
69	70	0.03	0.127
77	78	0.00376	0.0124
77	80	0.017	0.0485
85	89	0.0239	0.173
92	100	0.0648	0.295
100	104	0.0451	0.204
110	112	0.0247	0.064

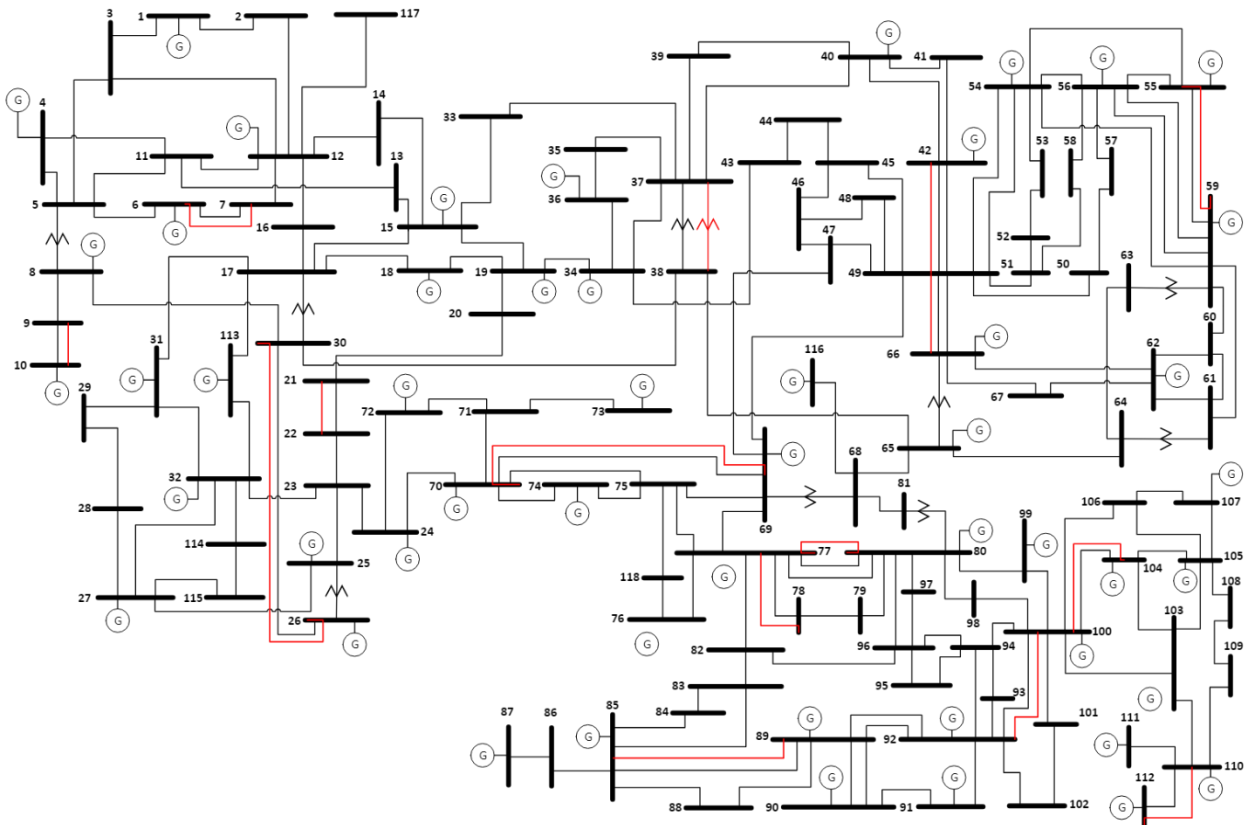


Figura 16. Sistema Optimizado Caso 1 – 118 Barras

3.7 Sistema de Prueba de 118 Barras Caso 2

El caso 2 tuvo un planteamiento adicional al reforzamiento de líneas existentes, se plantearon 15 conexiones nuevas como muestra la figura 18, entre barras que presentaban los niveles de voltaje más bajos del sistema, con el objetivo de realizar una optimización más eficiente en reducción de pérdidas.

En la figura 17 se observa el proceso de convergencia que tiene lugar en la iteración número 31, con un tiempo de ejecución de 13 minutos con 54 segundos.

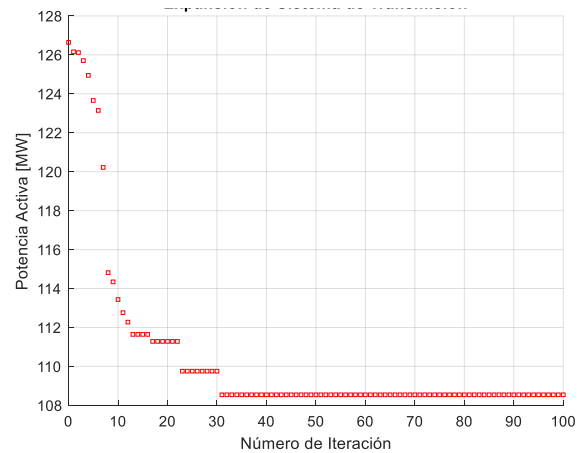


Figura 17. Pérdidas en MW por cada iteración, Caso 2 – 118 Barras

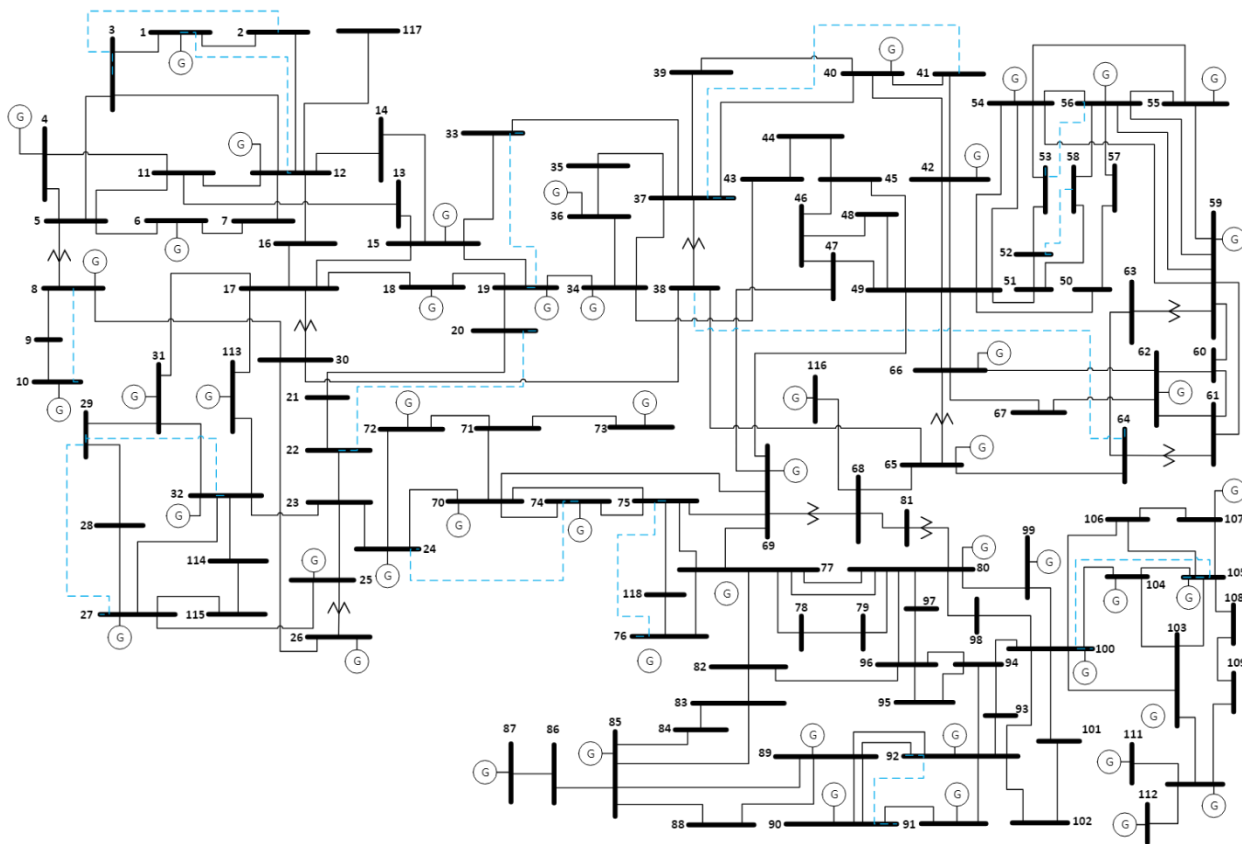


Figura 18. Planteamiento de líneas nuevas – 118 Barras

En la figura 19 se muestra el sistema optimizado con sus nuevas 19 conexiones, expuestas en la tabla 6, cabe destacar que el optimizador utilizó 4 conexiones nuevas, debido a esto las conexiones de reforzamiento variaron del caso 1, puesto que las nuevas líneas conectadas suplían la reducción de pérdidas en esos sectores.

Tabla 6. Líneas conectadas Caso 2 – 118 Barras

Barra i	Barra j	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]	Tipo
3	5	0.0241	0.108	R
15	17	0.0132	0.0437	R
23	32	0.0317	0.1153	R
26	30	0.00799	0.086	R

Barra i	Barra j	Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]	Tipo
38	65	0.00901	0.0986	R
47	69	0.0844	0.2778	R
49	54	0.073	0.289	R
60	62	0.0123	0.0561	R
63	59	0	0.0386	R
69	75	0.0405	0.122	R
82	96	0.0162	0.053	R
89	90	0.0518	0.188	R
92	94	0.0481	0.158	R
105	106	0.014	0.0547	R
110	112	0.0247	0.064	R
19	33	0.05	0.1638	N
8	10	0.00502	0.0627	N
52	58	0.0458	0.1307	N
100	105	0.05504	0.2418	N

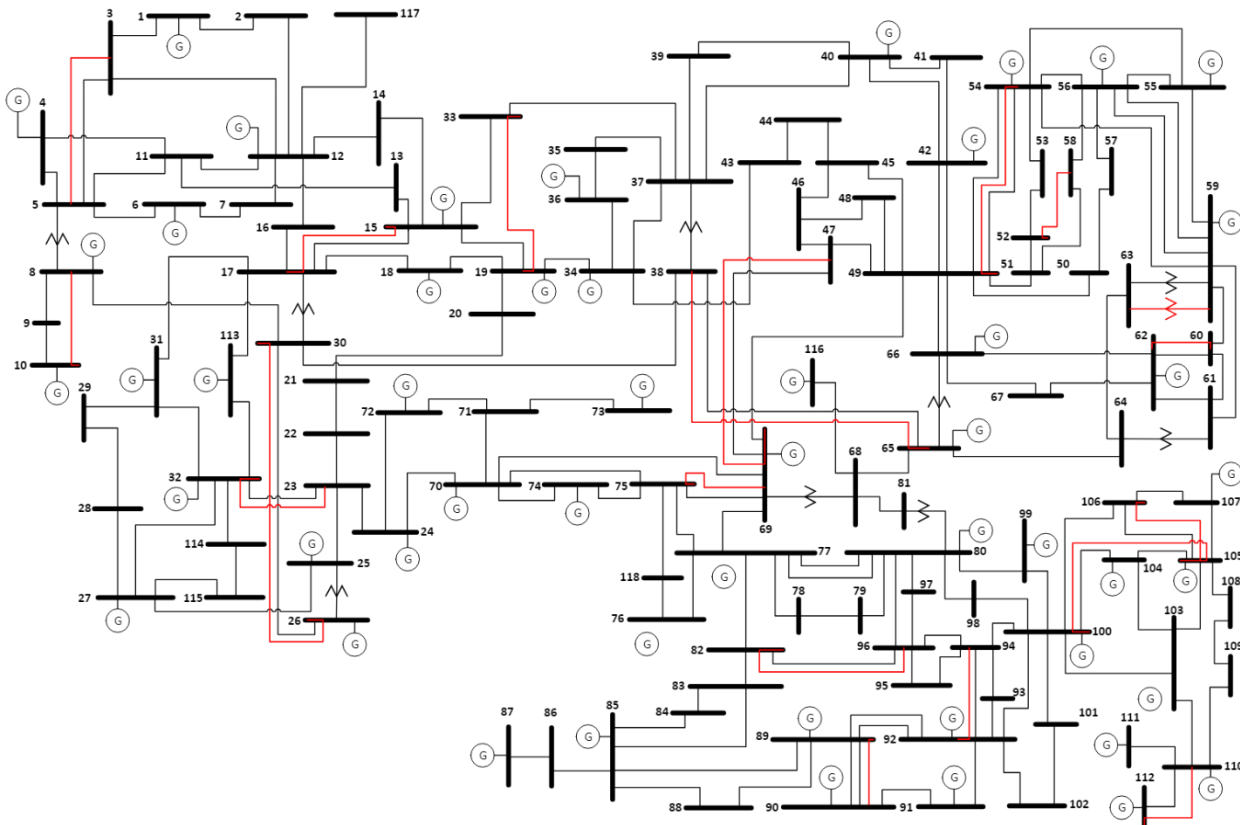


Figura 19. Sistema Optimizado Caso 2 – 118 Barras

3.8 Resultados Sistema de 118 Barras

La optimización del sistema de 118 Barras muestra un mejoramiento en sus perfiles de voltaje para los dos casos analizados, estos perfiles varían directamente en las barras donde se vieron involucradas las nuevas conexiones.

Estos niveles de voltaje se mantienen dentro de los rangos permitidos de 6 % de variabilidad.

Las pérdidas del sistema se ven reducidas con la optimización, en la figura 21 podemos observar que las pérdidas iniciales del sistema alcanzan los 132.76 [MW], mientras que en el primer caso de estudio se lo logra reducir a los 114.25 [MW], y con el estudio de las nuevas líneas hasta los 108.54 [MW].

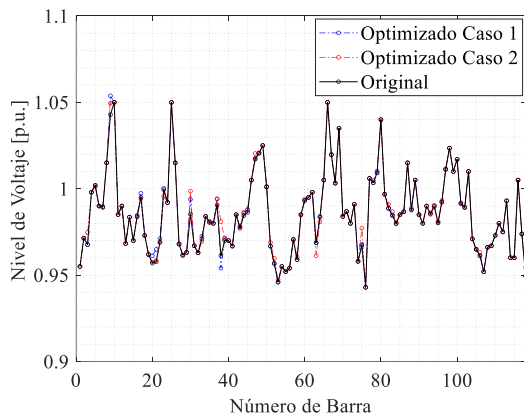


Figura 20. Niveles de Voltaje – 118 Barras

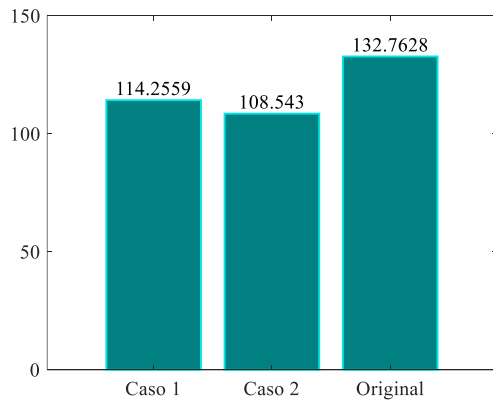


Figura 21. Pérdidas de Potencia Activa – 118 Barras

Inicialmente el sistema cuenta con un porcentaje de pérdidas con respecto a su demanda total del 3.12 %, valor esperado para un sistema de transmisión de esta magnitud. Al realizar la optimización del caso 1, se logra reducir este valor al 2.69 % de pérdidas, logrando un 0.43 % de mejora en el sistema de transmisión. Por otro lado, el caso 2 logra disminuir este porcentaje hasta los 2.55 %.

La diferencia de los dos casos llega a ser de un 0.13 % de mejora, sin embargo, esto a niveles de potencia podría llegar a ser un ahorro significativo en cuanto a pérdidas.

En la figura 22 se clasifican las pérdidas de potencia reactiva, donde su valor original se mantiene en los 781.02 [Mvar], y se lo logra disminuir hasta los 667.66 y 633.75 [Mvar] para los casos 1 y 2 respectivamente.

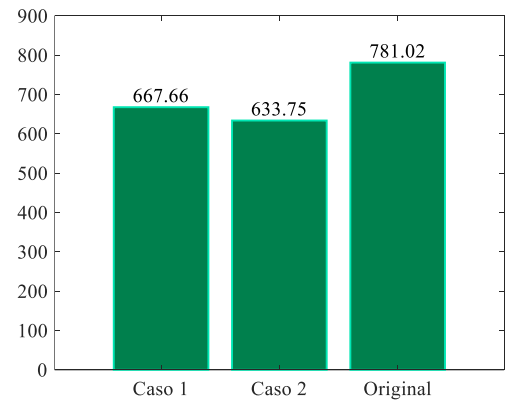


Figura 22. Pérdidas de Potencia Reactiva – 118 Barras

3.9 Expansión del Sistema de 39 Barras

Se realizó un estudio de expansión del sistema de transmisión para el sistema del IEEE de 39 barras, tomando en consideración un horizonte de tiempo de 5 años, con un crecimiento de la demanda del 1.5 %, contando con un año inicial donde se realizarán las primeras modificaciones.

Se realizó un primer flujo de potencia del cual se exportó la información de pérdidas por líneas y transformadores conectados en el sistema. Esta información se utilizó para plantear reforzamientos en el sistema tomando en cuenta los enlaces con mayor cantidad de pérdidas en estas.

Tomando esta forma de planteamiento, se añadieron 15 líneas desconectadas en cada año para que el algoritmo escoja la mejor configuración de estas teniendo como objetivo la reducción de pérdidas.

En la figura 23 se puede observar las líneas y transformadores que fueron añadidos para cada año, tabuladas en la tabla 7.

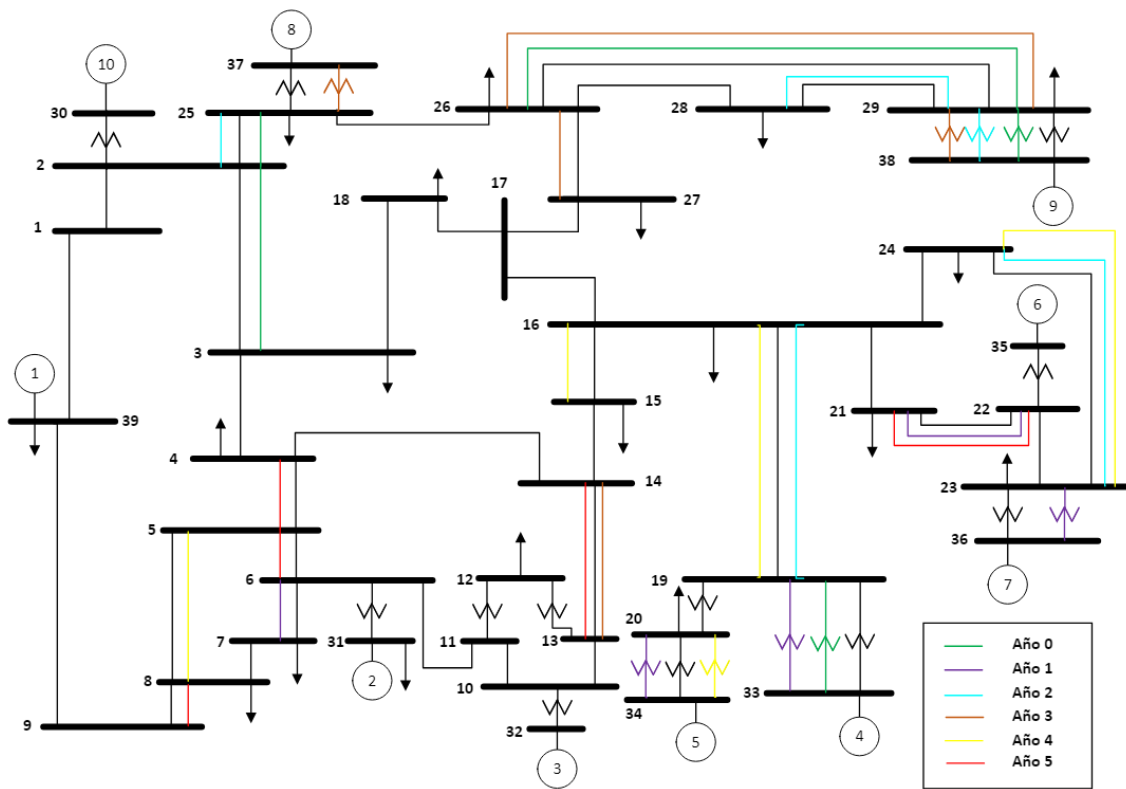


Figura 23. Expansión anual del Sistema de 39 Barras.

Tabla 7. Conexión de enlaces por año – 39 Barras

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
29-38	19-33	16-19	25-37	23-24	5-6
2-25	20-34	23-24	13-14	15-16	4-5
19-33	21-22	29-38	26-27	16-19	21-22
26-29	6-7	2-25	26-29	20-34	8-9
2-3	23-36	28-29	29-38	5-8	13-14

Las pérdidas en este sistema no se consideraban significativas con respecto a la demanda, sin embargo, se deseó poner a prueba la destreza del algoritmo para buscar configuraciones que reduzcan pérdidas en el SEP.

En la tabla 8 se puede apreciar la reducción de pérdidas en cada año evaluado con su nueva demanda.

Tabla 8. Reducción de pérdidas anual en [MW] – 39 Barras

Año	Original	Optimizado
0	42.808	34.9125
1	34.7946	29.8371
2	29.8223	25.2838
3	25.5983	22.9487
4	23.4027	21.2886
5	21.9788	19.8769

3.10 Expansión del Sistema de 118 Barras

De igual forma para el sistema de 118 barras, se realizó una consideración de tiempo de 5 años con crecimiento del 1.5 % en la demanda.

Tomando las mismas consideraciones que el sistema anterior, se plantearon 20 líneas por cada año, siendo estas las que presentaron la mayor cantidad de pérdidas en el flujo de potencia, cada optimización tendrá como

objetivo la conexión de 7 líneas de transmisión con el objetivo de bajar la cantidad de pérdidas de potencia activa.

Tabla 9. Conexión de enlaces por año – 118 Barras

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
69-75	25-27	49-51	69-75	8-9	25-27
8-9	9-10	100-103	69-70	49-66	69-77
26-30	69-70	15-17	103-110	26-30	64-65
38-65	100-106	42-49	89-90	26-30	49-66

Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
42-49	89-92	92-94	89-90	49-54	38-65
49-66	77-80	45-49	49-54	42-49	89-92
89-90	49-66	110-112	3-5	5-11	8-9

La tabla 9 muestra las conexiones de líneas de transmisión obtenidas por el algoritmo para reducir las pérdidas presentes en cada año con la nueva demanda.

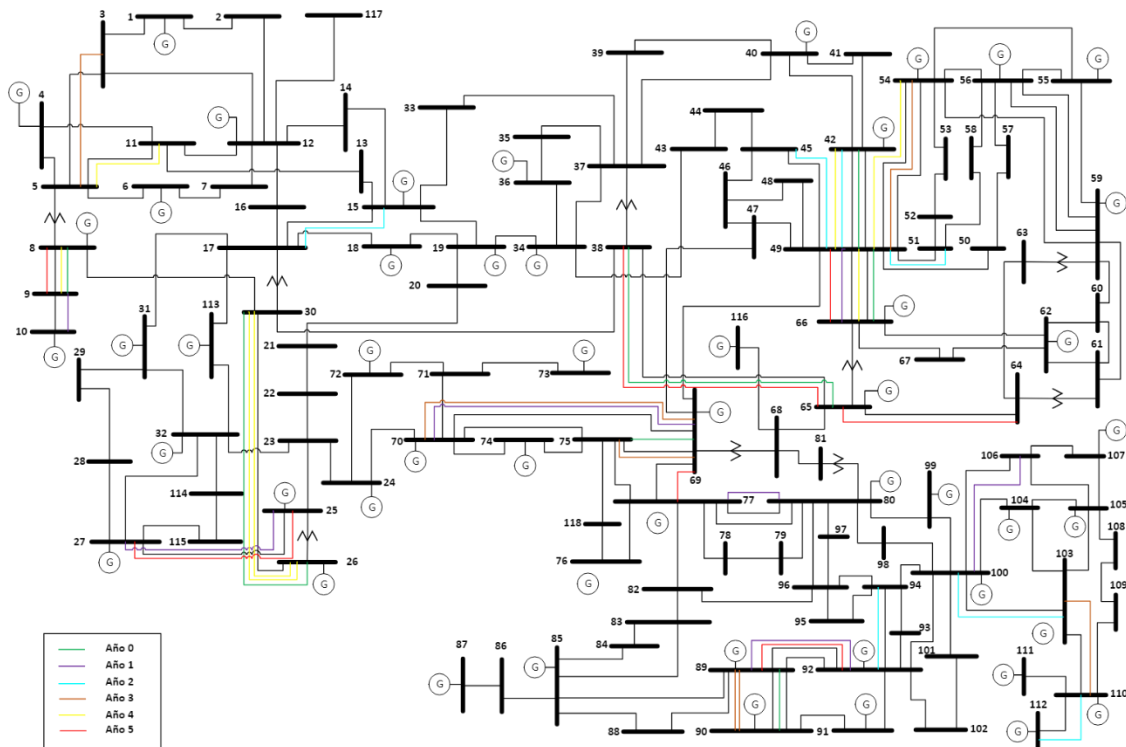


Figura 24. Expansión anual del Sistema de 118 Barras.

Tabla 10. Reducción de pérdidas anual [MW] – 118 Barras

Año	Original	Optimizado
0	132.7628	114.8124
1	118.3653	108.6804
2	112.3007	105.8211
3	109.7378	103.7718
4	107.7432	102.0271
5	106.3338	101.0477

Las pérdidas con respecto al optimizado del año anterior aumentarán debido al incremento de demanda ingresado al sistema.

Se buscará la reducción de pérdidas en el sistema mediante el ingreso de nuevas líneas.

Se debe tomar en consideración que en cada año la reducción de pérdidas es menor, por lo que llega a ser inviable el ingreso de líneas de transmisión debido a que no resultaría económicamente correcto la conexión de nuevos enlaces para esta leve mejora.

3.11 Despachos de los Generadores

El análisis de los despachos de generadores se realizó en por unidad, considerando una base de 100 [MVA] para los dos sistemas, con el fin de analizar de manera puntual el comportamiento y variación de la potencia despachada o consumida.

3.11.1 Sistema de 39 Barras Casos de Estudio

En la figura 25 se puede apreciar una ligera disminución en los despachos de los generadores para ambos casos, esta corta reducción se debe a las pérdidas que se minimizaron para ambos casos de optimización.

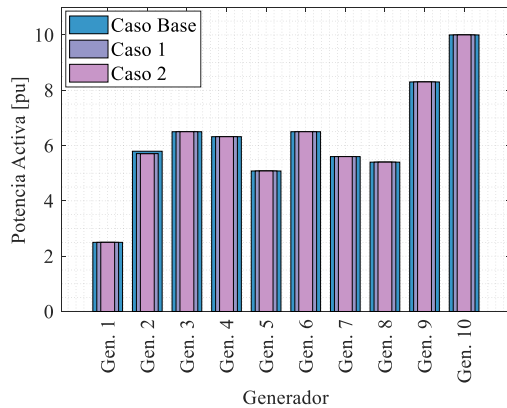


Figura 25. Despacho de Potencia Activa del Sistema de 39 Barras.

En la Figura 26 se expone el despacho de Potencia Reactiva según el caso de estudios, para todos los generadores se disminuyó el

valor original con respecto al Caso Base, y para los generadores 8 y 9 aumentó su consumo de reactivos para equilibrio del sistema.

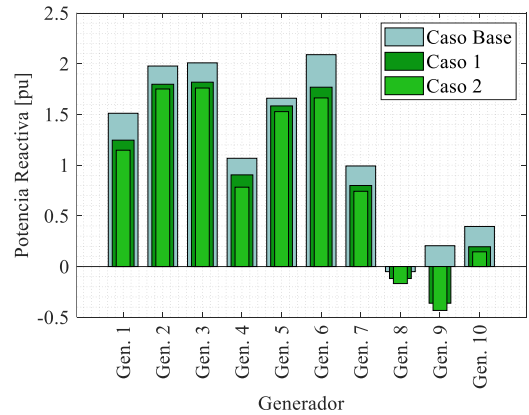


Figura 26. Despacho de Potencia Reactiva del Sistema de 39 Barras.

3.11.2 Sistema de 118 Barras Casos de Estudio

La variación en el despacho de potencia activa para el sistema de prueba de 118 barras es de igual forma ligero, apreciándose que el generador que más disminuyó su producción fue el número 30.

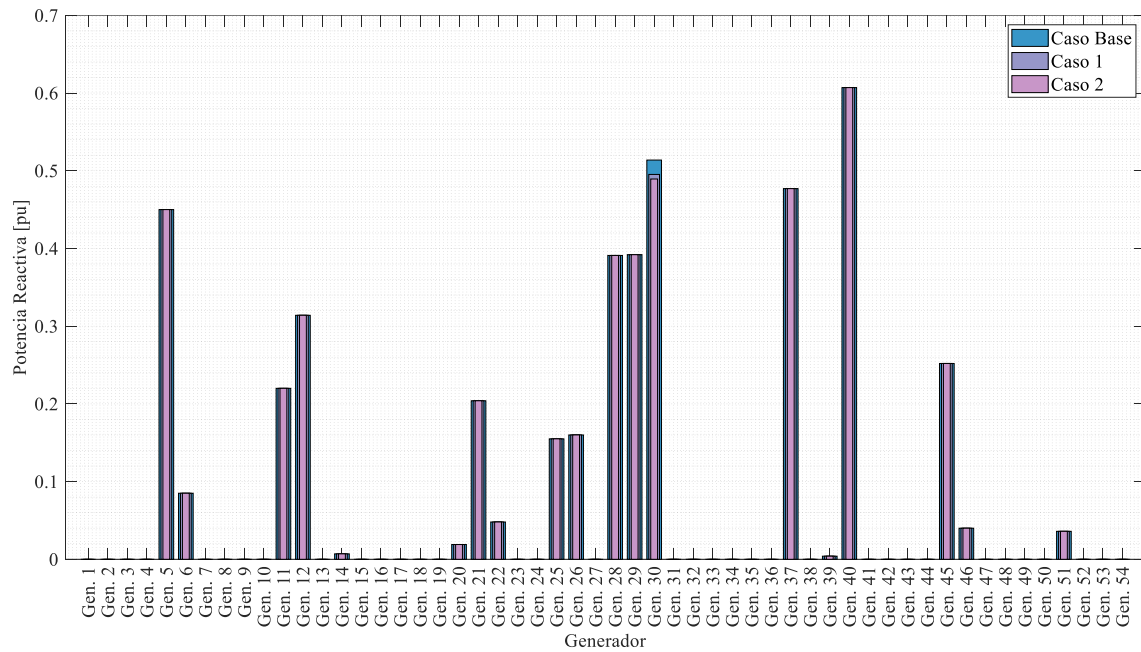


Figura 27. Despacho de Potencia Activa del Sistema de 118 Barras

Sin embargo, para el análisis de despacho de reactivos, la variación fue significativa en la mayoría de los generadores, teniendo, así como se aprecia en la figura 28, generadores

como el 4, 7, 12, 31 y 36 que pasaron de producir a consumir reactivos, manteniendo los flujos de potencia y los valores de voltaje estables

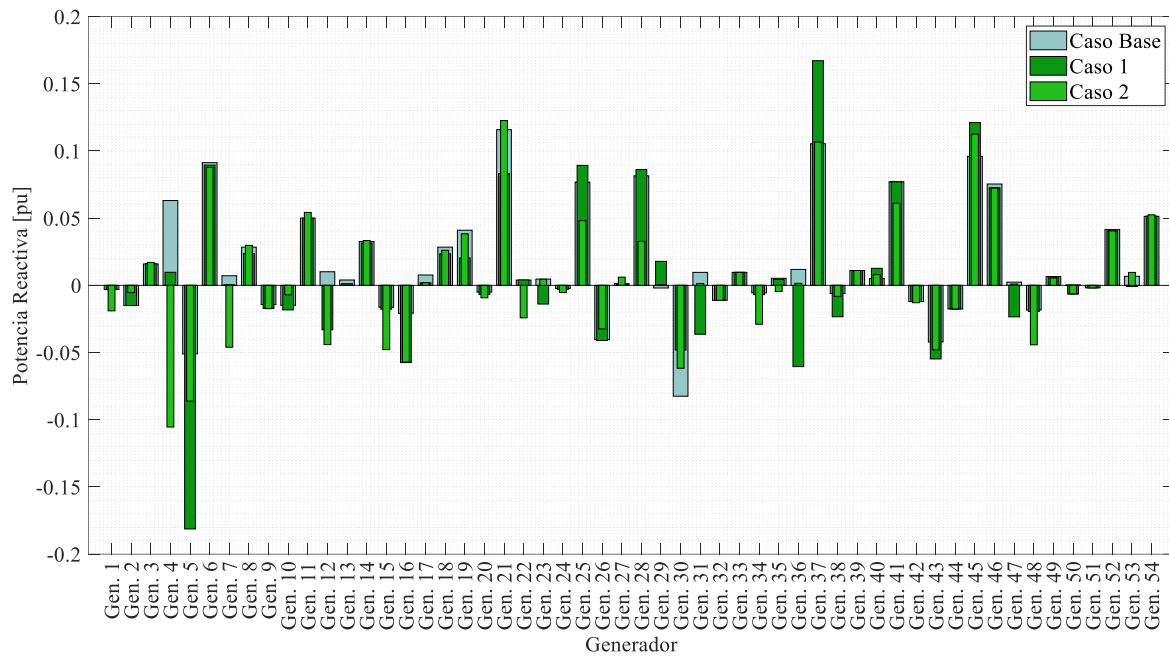


Figura 28. Despacho de Potencia Reactiva del Sistema de 118 Barra

3.11.3 Expansión del Sistema de 39 Barras

En el siguiente apartado se expone la variación de los despachos de los generadores de acuerdo con el crecimiento anual de la demanda.

En la figura 29 se puede observar un crecimiento similar de los despachos de los generadores 1, 3, 9 y 10, los cuales se están encargando de cubrir la nueva demanda añadida para cada período.

Estos despachos fueron simulados con las configuraciones (reforzamientos) añadidos del año anterior; es decir, siendo el año 0 el caso original de despacho, el año 1 posee la optimización del año 0 y la demanda del nuevo período, y así sucesivamente.

Se puede observar que no existe una variabilidad significativa para el resto de los generadores, exceptuando el 6, que posee un crecimiento para los primeros 3 años, sin embargo, en el año 4 su crecimiento se detuvo. El resto de los generadores no elevó su despacho debido a que la demanda ya era cubierta por la potencia activa disponible.

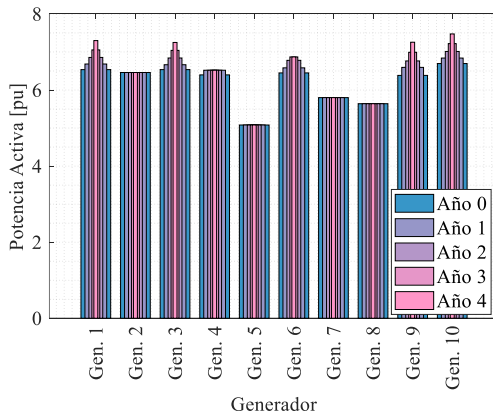


Figura 29. Despacho anual de potencia Activa – 39 Barras

El despacho de potencia Reactiva, si tuvo una variabilidad significativa, teniendo grandes cambios para los generadores 3, 4, 5 y 6, los cuales disminuyeron la generación de potencia reactiva con el pasar de los años.

Un caso particular sería el del generador 7, el cual incrementó su despacho de reactivos en los primeros 3 años, sin embargo, para los años finales su despacho disminuyó hasta incluso por debajo de su valor original.

En la figura 30 también se puede observar como el generador 9 después de la primera configuración se mantuvo estable en su consumo de reactivos para los años siguientes.

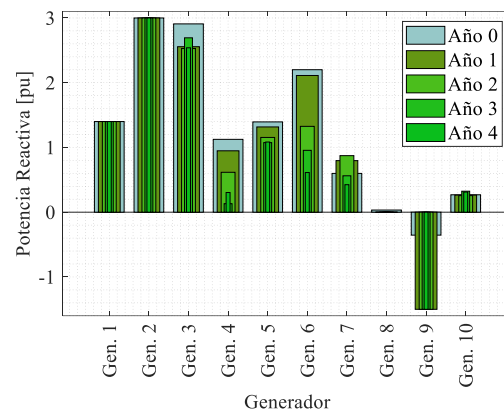


Figura 30. Despacho anual de potencia reactiva – 39 Barras

3.11.4 Expansión del Sistema de 118 Barras

Al igual que el caso anterior, los despachos de potencia activa en el sistema de 118 Barras, aumentaron de la mano de la demanda, teniendo picos significativos de incremento en los generadores 5, 28, 29, 30, 37 y 40, los cuales fueron los principales encargados de cubrir los niveles de demanda en el SEP.

Algunos generadores disminuyeron sus despachos como el caso del 7, 13, 15, 19 y 34. Esto se explica por el hecho de incremento de líneas anual, permitiendo que otros generadores tengan un transporte de energía óptimo, ayudando a que se equilibren los niveles de flujos en el sistema, para abastecimiento de la demanda.

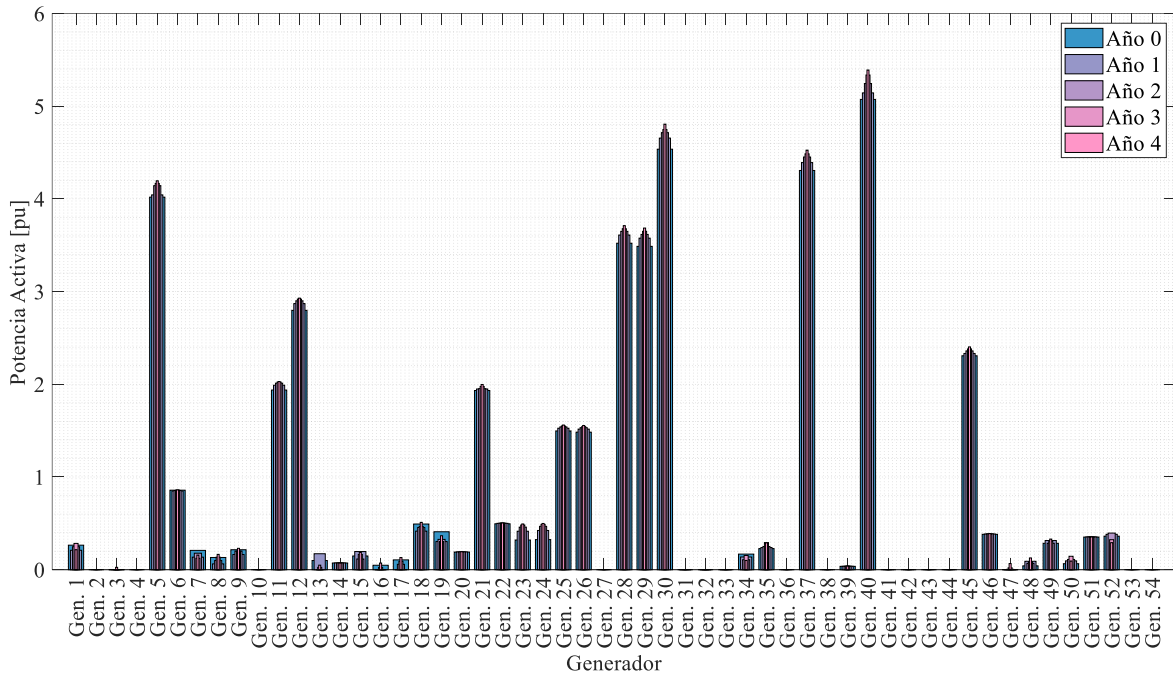


Figura 31. Despacho anual de Potencia Activa – 118 Barras

Las variaciones de potencia activa se pueden evidenciar en la figura 31, donde se

categorizan los despachos mediante un código de colores.

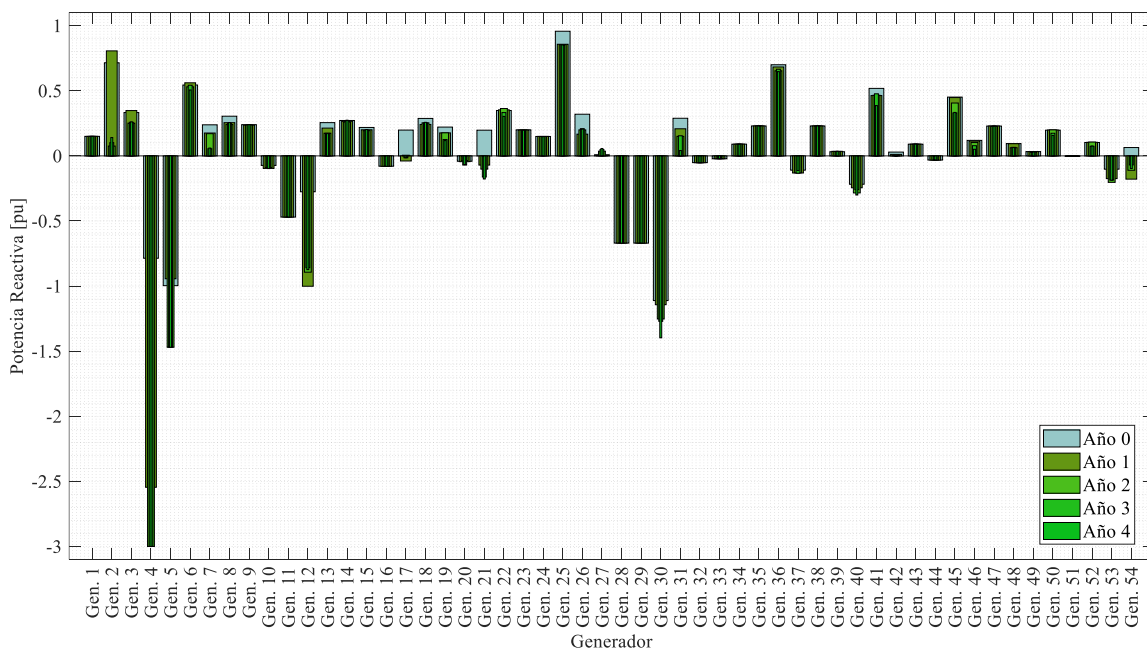


Figura 32. Despacho anual de Potencia Reactiva – 118 Barras

En la figura 32 se puede evidenciar el cambio que sufrió el sistema en términos de

potencia reactiva. Algo a destacar en el estudio, es que un tercio de los generadores

no variaron su despacho de reactivos, mientras que 7 generadores aumentaron su consumo de manera significativa, siendo los más representativos los generadores 4, 5, 12 y 30, en algunos casos hasta duplicando su valor original de consumo.

El resto de los generadores disminuyó su despacho de potencia reactiva, en algunos casos cambiando su estado de despacho hacia consumo, para acomodarse a las características del SEP.

4 Conclusiones

En la presente investigación se logró la optimización de dos sistemas del IEEE siendo los de 39 y 118 barras respectivamente, se analizó las condiciones iniciales del sistema mediante flujos de potencia en el software de Matlab, con este análisis se planteó líneas de transmisión nuevas considerando reducción de pérdidas mediante optimización de Enjambre de Partículas.

En comparación a estudios de algoritmos optimizadores para la TEP, solo aplican su algoritmia en sistemas pequeños como el de Garver de 6 barras y sistemas de Prueba del IEEE como el de 24 barras, este artículo busca aportar un análisis de optimización en sistemas de mayor magnitud debido a esto se seleccionaron los sistemas de Prueba del IEEE de 39 y 118 barras.

Para el modelo óptimo de expansión se utilizó el algoritmo de enjambre de partículas para los sistemas del IEEE, dando como resultados sistemas más robustos donde las conexiones nuevas brindan una reducción de pérdidas significativas con respecto a sus valores originales medidos, considerando restricciones de las características de las líneas a instalar y valoración de prioridades para la representación de costos de instalación.

Se logró la reducción de pérdidas en los sistemas planteados del IEEE, donde sus valores originales con respecto a la demanda eran del 0.68 y 3.12 % para los sistemas de 39 y 118 barra respectivamente. El primer sistema logró reducir al 0.54 y 0.53 % las pérdidas para cada caso de estudio. El segundo sistema con valores más reales de análisis logró reducir las pérdidas en su primer caso de estudio a 2.69 %, mientras que, con el planteamiento de nuevas líneas de conexión, el sistema logró llegar a un 2.55 % de pérdidas con respecto a la demanda. El estudio de la TEP aplicando la algoritmia, pudo realizar mejoras en los sistemas, mediante la conexión de líneas de reforzamiento y nuevas conexiones entre barras que presentaban un bajo nivel de voltaje y se consideraban puntos críticos para las pérdidas del sistema.

Los sistemas analizados para expansión de la transmisión lograron la reducción de pérdidas en todos los años, para el sistema de 39 barras, la optimización inicial redujo un 18 % de pérdidas con respecto al valor original, sin embargo, este valor fue disminuyendo hasta el año 5, donde la reducción cayó hasta 9.56 %, mostrando la inviabilidad de seguir agregando líneas al sistema para la poca cantidad que se logra reducir. Para el sistema de 118 Barras se aprecia una situación similar, con una primera disminución del 13.52 % en las pérdidas, finalizando con un valor en el año 5 el cual cayó a 4.97 % con respecto al valor original.

Estos resultados demuestran la utilidad del algoritmo para buscar las mejores soluciones para cumplir el objetivo de reducir pérdidas, sin embargo, si se realiza un estudio anual con incremento de la demanda, la optimización se verá disminuida para cada año. Se puede tomar la información total de la optimización anual para unir enlaces expuestos como futuros, para que conexiones que presentaron más de dos reforzamientos a lo largo de los

años, puedan ser construidos como un único enlace con mejores características de transporte.

5 Trabajos Futuros

El estudio de expansión óptima del sistema de transmisión en forma estática se ve limitada a un diagrama donde se busca una configuración del sistema para un año en específico, sin embargo, se podría aplicar un estudio dinámico a la misma algoritmia como se expresa en la expansión de los dos sistemas mencionados, para añadir un estudio adicional, a este horizonte de tiempo se le podría añadir diversas restricciones, como costos de congestión, costos de generación, despachos óptimos de energía, entre otros.

6 Bibliografía

- [1] Jing Ma, *Power System Wide-Area Stability Analysis and Control*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2018. Accessed: Jan. 03, 2023. [Online]. Available: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:2708/lib/upsal/detail.action?docID=5391739&query=power+system>
- [2] J. Salazar and D. Carrión, “Aplicación de reactivos para el control del desequilibrio del sistema eléctrico de potencia por incertidumbre de la demanda,” *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao.*, vol. E43, pp. 484–500, 2021.
- [3] D. Carrión, E. Correa, and E. M. Garcia, “Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo,” *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologias de Informacao.*, no. E30, p. 241–527, 2019, doi: 10.17013/risti.n.pi-pf.
- [4] J. Zhao *et al.*, “Power System Dynamic State Estimation: Motivations, Definitions, Methodologies, and Future Work,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 34, no. 4, pp. 3188–3198, Jul. 2019, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2894769.
- [5] A. Lemus, D. Carrión, E. Aguire, and J. W. Gonz, “Location of distributed resources in rural-urban marginal power grids considering the voltage collapse prediction index,” *Ingenius*, vol. 28, pp. 25–33, 2022, doi: <https://doi.org/10.17163/ings.n28.2022.02>.
- [6] D. Carrión, “Energy saving model through lighting management systems for residences,” in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013, pp. 0–5. doi: 10.1109/PEPQA.2013.6614955.
- [7] E. Inga, D. Carrión, A. Aguila, E. García, R. Hincapié, and J. W. González, “Minimal Deployment and Routing Geographic of PMUs on Electrical Power System based on MST Algorithm,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 5, pp. 2264–2270, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7530422.
- [8] Grainger Jhon and Stevenson William, *Análisis de Sistemas de Potencia*, 1st ed., vol. 1. Estado de México: UNAM, 2001. Accessed: Feb. 17, 2023. [Online]. Available: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/sep/wp-content/uploads/sites/20/2020/03/An%C3%A1lisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson.pdf>
- [9] G. Salazar and D. Carrión, “Characterization and Modeling of the Efficiency of Photovoltaic Systems,”

- IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 8, pp. 2580–2586, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7332135.
- [10] D. Carrión, J. W. González, I. A. Isaac, and G. J. López, “Optimal Fault Location in Transmission Lines Using Hybrid Method,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference*, Quito: Ieee, 2017, p. 6. doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126757.
- [11] P. V. Escudero and D. F. Carrión, “Modelo de Expansión de un sistema de transmisión basado en linealización de flujos de potencia óptimos AC.,” p. 34, 2018, doi: 10.20868/UPM.thesis.39079.
- [12] S. Mutlu and E. Şenyiğit, “Literature review of transmission expansion planning problem test systems: detailed analysis of IEEE-24,” *Electric Power Systems Research*, vol. 201, p. 107543, Dec. 2021, doi: 10.1016/J.EPSR.2021.107543.
- [13] Z. Wu *et al.*, “A transmission line selection method for parameter measurement based on its impacts on power flow sensitivity and static voltage stability,” *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration: Connecting the Grids Towards a Low-Carbon High-Efficiency Energy System, EI2 2020*, pp. 3339–3344, Oct. 2020, doi: 10.1109/EI250167.2020.9346807.
- [14] A. Aguila, D. Carrión, and L. Ortiz, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [15] Gracia Rafael, “La Eficiencia en las Redes: Niveles de Pérdidas y Reducción de Fraude Energético,” in *La Eficiencia en las Redes*, vol. 1, Thomson-Civitas, Ed., Panamá: Energía y Regulación en Iberoamérica, 2008, pp. 221–236.
- [16] W. Wiwechpaisankul, O. Rattananatthawon, S. Sirisumrannukul, and Noppatee. Sabpayakom, “Transmission System Expansion Planning Using Optimal Power Flow and Genetic Algorithm,” *2022 International Conference on Power, Energy and Innovations (ICPEI)*, pp. 1–4, Oct. 2022, doi: 10.1109/ICPEI55293.2022.9987016.
- [17] P. Escudero and D. Carrión, “Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC Expansion of a transmission system using LOPF-AC,” *INGE CUC*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018, doi: 10.17981/ingecuc.14.2.2018.11.
- [18] J. Palacios and D. F. Carrión Galarza, “Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 1–8, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.2.2835.
- [19] F. Mosquera, “Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020.
- [20] D. Carrión, E. García, J. W. González, I. A. Isaac, G. J. López, and R. Hincapié, “Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución,” *Revista T*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [21] A. A. El-Ela, M. Mouwafi, and W. Al-Zahar, “Optimal Transmission System Expansion Planning Via Binary Bat Algorithm,” *2019 21st International Middle East Power Systems Conference, MEPCON 2019* -

- Proceedings*, pp. 238–243, Dec. 2019, doi: 10.1109/MEPCON47431.2019.9008022.
- [22] M. Z. Jahromi, M. Tajdinian, and M. H. M. Jahromi, “A Novel Optimal Planning Between Generation and Transmission Expansion Planning Considering Security Constraint,” *34th International Power System Conference, PSC 2019*, pp. 241–249, Dec. 2019, doi: 10.1109/PSC49016.2019.9081547.
- [23] S. Gao *et al.*, “Fast Decoupled Power Flow Calculation with Complementary Constraints of Reactive Power Generation and Node Voltage,” in *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281974.
- [24] A. M. Palani, H. Wu, and M. M. Morcos, “A Fast Penalty-Based Gauss-Seidel Method for Stochastic Unit Commitment with Uncertain Load and Wind Generation,” *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, vol. 8, pp. 211–222, 2021, doi: 10.1109/OAJPE.2021.3079150.
- [25] T. Marinovic, M. Kupresak, R. Maaskant, and G. A. E. Vandenbosch, “On the convergence of the iterative gauss-seidel-based electric field algorithm for the solution of antenna array mutual coupling,” *2020 International Symposium on Antennas and Propagation, ISAP 2020*, pp. 271–272, Jan. 2021, doi: 10.23919/ISAP47053.2021.9391478.
- [26] M. Abokrishna, A. Diaa, A. Selim, and S. Kamel, “Development of Newton-raphson power-flow method based on second order multiplier,” *2017 19th International Middle-East Power Systems Conference, MEPCON 2017 - Proceedings*, vol. 2018-February, pp. 976–980, Feb. 2018, doi: 10.1109/MEPCON.2017.8301299.
- [27] A. Ahmadi, M. C. Smith, E. R. Collins, V. Dargahi, and S. Jin, “Fast Newton-Raphson Power Flow Analysis Based on Sparse Techniques and Parallel Processing,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 37, no. 3, pp. 1695–1705, May 2022, doi: 10.1109/TPWRS.2021.3116182.
- [28] N. Chen and H. Zhou, “A Comparison Study of PSO with Different Update Equations in Solving Economic Dispatch Problem,” *Chinese Control Conference, CCC*, vol. 2020-July, pp. 6028–6032, Jul. 2020, doi: 10.23919/CCC50068.2020.9189202.
- [29] M. Chen, Y. Wang, P. Li, and H. Fu, “Research on an improved PSO algorithm with dual self-adaptation and dual variation,” *2022 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, ICMA 2022*, pp. 646–650, 2022, doi: 10.1109/ICMA54519.2022.9856223.
- [30] S. Mahapatra, M. Badi, and S. Raj, “Implementation of PSO, it’s variants and Hybrid GWO-PSO for improving Reactive Power Planning,” *2019 Global Conference for Advancement in Technology, GCAT 2019*, Oct. 2019, doi: 10.1109/GCAT47503.2019.8978348.
- [31] J. Ramirez, D. Carrión, and E. Inga, “Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC,” *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. February, 2021, doi: 10.33412/idt.v17.1.2918.
- [32] J. Pilatásig Lasluisa and D. Carrión, “Resiliencia de Sistemas Eléctricos de

- Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión – Estado del arte,” *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020, doi: 10.33412/idt.v16.2.2834.
- [33] D. Carrion, A. Ayo, and J. W. Gonzalez, “Under Frequency Load Disconnection Scheme Based on Improvement to Semi-Adaptative Model,” *Proceedings - 2019 International Conference on Information Systems and Computer Science, INCISCOS 2019*, pp. 361–365, 2019, doi: 10.1109/INCISCOS49368.2019.00063.
- [34] L. F. Fuerte Ledezma and G. Gutierrez Alcaraz, “Hybrid Binary PSO for Transmission Expansion Planning Considering N-1 Security Criterion,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 3, pp. 545–553, Mar. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082726.
- [35] L. F. Fuerte Ledezma and G. Gutierrez Alcaraz, “Hybrid Binary PSO for Transmission Expansion Planning Considering N-1 Security Criterion,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 18, no. 3, pp. 545–553, Mar. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9082726.
- [36] T. Nireekshana, J. Bhavani, Y. Venu, and B. Phanisai Krishna, “Power Transmission Congestion Management by TCSC Using PSO,” *Proceedings of the 4th International Conference on Computing Methodologies and Communication, ICCMC 2020*, pp. 491–497, Mar. 2020, doi: 10.1109/ICCMC48092.2020.ICCMC-00092.
- [37] W. Liu, “The Planning Model of Transmission Line Using Bidirectional Particle Swarm Optimization Based on Time Series,” *Proceedings of the 2020 International Conference on Computer, Information and Telecommunication Systems, CITS 2020*, Oct. 2020, doi: 10.1109/CITS49457.2020.9232469.
- [38] F. R. Cabezas Soldevilla and F. Alfredo Cabezas Huerta, “Minimization of Losses in Power Systems by Reactive Power Dispatch using Particle Swarm Optimization,” *2019 54th International Universities Power Engineering Conference, UPEC 2019 - Proceedings*, Sep. 2019, doi: 10.1109/UPEC.2019.8893527.
- [39] P. Vithayasrichareon, “Integrated energy planning for resilient power systems,” pp. 164–178, Apr. 2022, doi: 10.1049/ICP.2021.2614.
- [40] J. Shen and X. Liu, “Power system model integration for EMS and planning,” *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol. 2020-August, Aug. 2020, doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281809.
- [41] D. Carrión, E. García, M. Jaramillo, and J. W. González, “A Novel Methodology for Optimal SVC Location Considering N-1 Contingencies and Reactive Power Flows Reconfiguration,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 20, pp. 1–17, 2021, doi: 10.3390/en14206652.
- [42] D. Carrión, A. Ayo, and J. W. González, “Alternative Under Frequency Load Disconnection Methodology Based on Semi-Adaptative Model,” *Enfoque UTE*, vol. 11, no. 1, pp. 96–107, 2020, doi: 10.29019/enfoque.v11n1.587.
- [43] T. Haripriya, B. Devulal, and M. Nagajyothi, “Optimal design of transmission system expansion planning in deregulated environment,” *Proceedings of the 3rd International Conference on Intelligent Sustainable*

- Systems, ICISS 2020*, pp. 1404–1407, Dec. 2020, doi: 10.1109/ICISS49785.2020.9316107.
- [44] M. D. Jaramillo, D. F. Carrión, and J. P. Muñoz, “A Novel Methodology for Strengthening Stability in Electrical Power Systems by Considering Fast Voltage Stability Index under N – 1 Scenarios,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 8, pp. 1–23, 2023, doi: 10.3390/en16083396.
- [45] L. Cruz, D. Carrión, and A. Riofrío, “Localización de fallas mediante la transformada de wavelet en líneas de transmisión,” *Revista Técnica “Energía,”* vol. 13, no. 1, p. 11, 2017.
- [46] W. Peng, Z. Yang, C. Liu, J. Xiu, and Z. Zhang, “An Improved PSO Algorithm for Battery Parameters Identification Optimization Based on Thevenin Battery Model,” *Proceedings of 2018 5th IEEE International Conference on Cloud Computing and Intelligence Systems, CCIS 2018*, pp. 295–298, Apr. 2019, doi: 10.1109/CCIS.2018.8691341.

6.2 Resumen de Indicadores

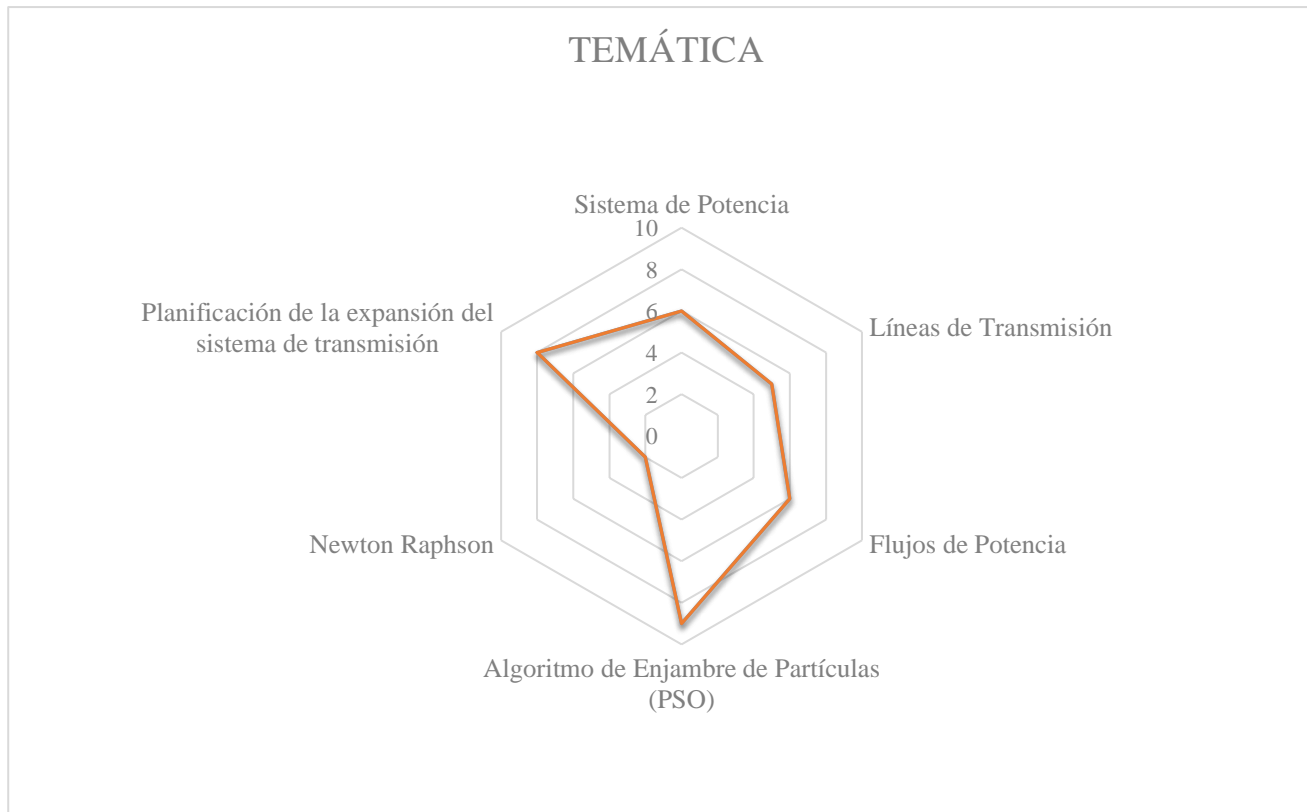


Figura 33. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

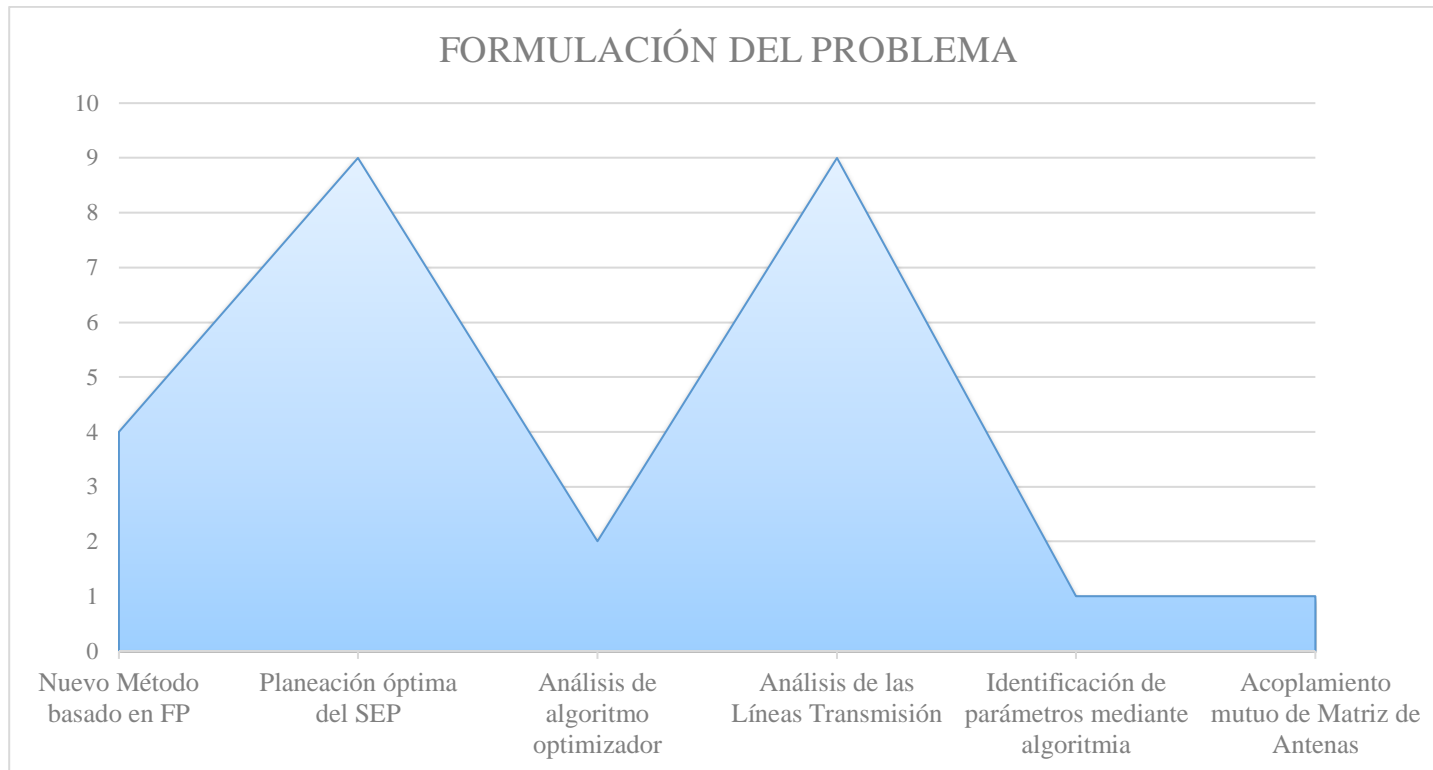


Figura 34. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

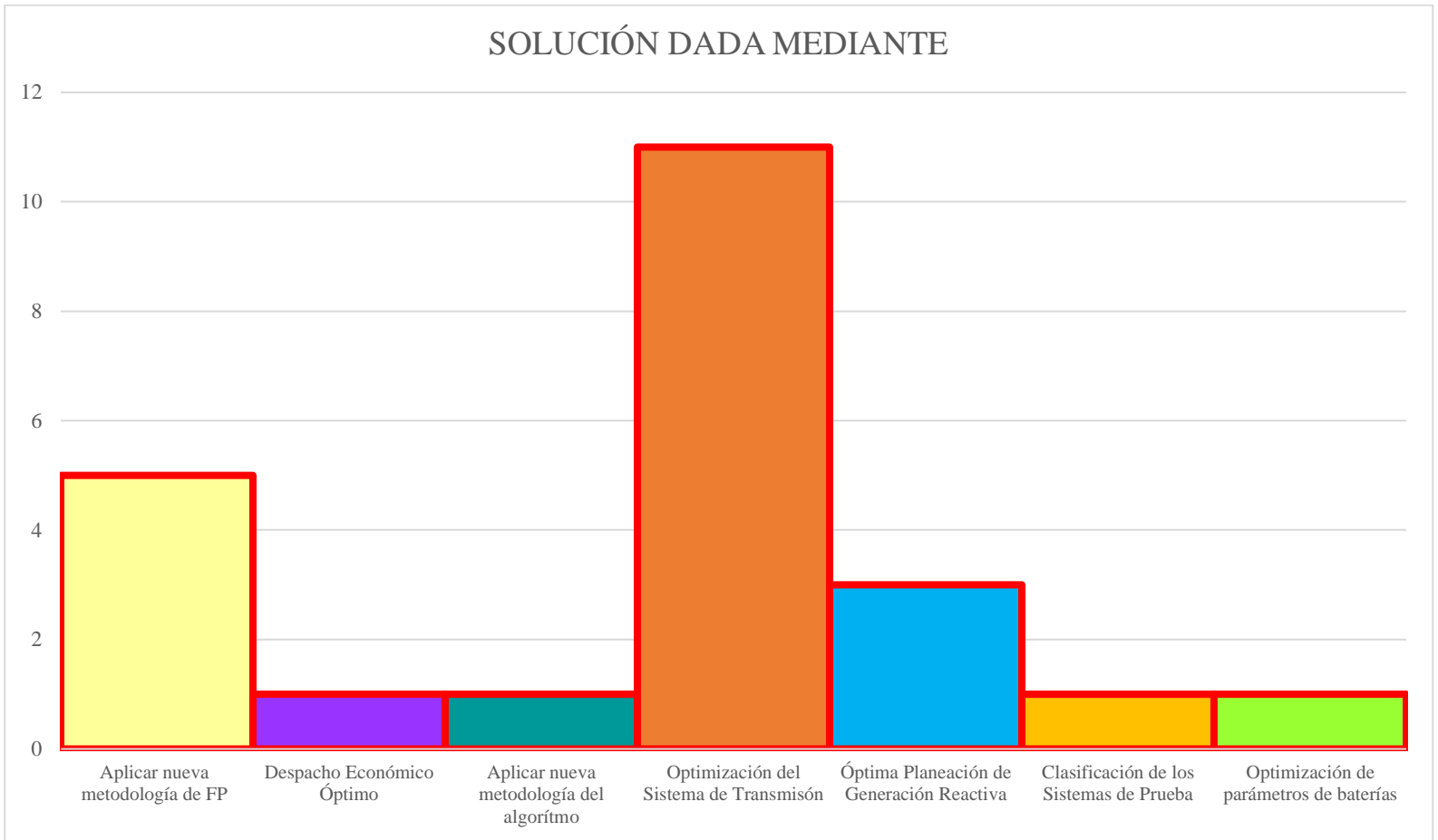


Figura 35. Indicador de solución - Estado del arte