

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

ÓPTIMO AJUSTE DE LA POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR LA VARIACIÓN DE TAPS EN ELEMENTOS ESTÁTICOS USANDO EL ALGORITMO DE MAPEO MEDIA-VARIANZA MVMO

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

AUTOR: DIEGO RAFAEL CEVALLOS SALINAS TUTOR: CARLOS ANDRÉS BARRERA SINGAÑA

> Quito -Ecuador 2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Rafael Cevallos Salinas con documento de identificación Nº 1726790205 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, 19 de marzo del año 2025

Atentamente,

Diego Rafael Cevallos Salinas 1726790205

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

Yo, Diego Rafael Cevallos Salinas con documento de identificación No. 1726790205, 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: "Óptimo ajuste de la potencia reactiva en sistemas de transmisión por la variación de taps en elementos estáticos usando el algoritmo de Mapeo Media-Varianza MVMO", 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, 19 de marzo del año 2025

Atentamente,

Diego Rafael Cevallos Salinas 1726790205

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Carlos Andrés Barrera Singaña con documento de identificación N° 0503503336, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ÓPTIMO AJUSTE DE LA POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN POR LA VARIACIÓN DE TAPS EN ELEMENTOS ESTÁTICOS USANDO EL ALGORITMO DE MAPEO MEDIA-VARIANZA MVMO, realizado por Diego Rafael Cevallos Salinas con documento de identificación N° 1726790205, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de marzo del año 2025

Atentamente,

Ing. Carlos Andrés Barrera Singaña, MSc 0503503336

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción					
2	Trabajos Relacionados					
3	3 Marco teórico					
	3.1 Control de potencia Reactiva y voltaje					
	3.2	Gen	eración y Consumo de Potencia Reactiva	7		
	3.2.	1	Transformadores Regulables y su impacto en el sistema eléctrico	7		
	3.2.	2	Taps	9		
	3.2.	3	Cambiadores de taps	9		
	3.3	Mét	odos de Control de Voltaje	10		
	3.3.	1	Capacitores shunt	10		
	3.3.	2	Compensadores estáticos	11		
	3.3.	3	Compensadores sincrónicos	12		
	3.3.	4	Compensadores tipo STATCOM	13		
	3.4	Efec	ctos de los sistemas con compensación	14		
	3.4.	1	Curva QV	14		
	3.5	Téci	nicas de Optimización Heurísticas	15		
4	Met	todolo	ogía y Formulación del Problema	16		
	4.1	Des	cripción del método de optimización MVMO	16		
	4.2	Fun	ción objetivo y restricciones matemáticas	18		
	4.2.	1	Restricciones matemáticas	19		
	4.3	Form	nulación del problema	20		
	4.3.	1	Pseudocódigo para el OAPR usando MVMO	21		
	4.3.	2	Configuración del algoritmo MVMO Y PSO	22		
	4.4	Case	o base de estudio	23		
	4.4.	1	Sistema de 39 barras del IEEE.	23		
	4.4.	2	Voltajes iniciales caso base	23		
	4.4.	3	Estudio de caso 1	23		
	4.4.	4	Estudio de caso 2	24		
5	Ana	álisis o	de Resultados	24		
	5.1	Aná	lisis del caso de estudio 1	24		
	5.1.	1	Compensadores estáticos de 6 Mvar.	24		
	5.1.	2	Compensadores estáticos de 10 Mvar	28		
	5.2	Aná	lisis del estudio de caso 2	31		
6	Cor	nclusi	ones	33		

7	Tral	bajos futuros	.34	
8	Ref	erencias	.34	
9	Ane	Anexos		
	9.1	Matriz de Estado del Arte	41	
	9.2	Resumen de Indicadores	48	

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática del OAPR	4
Figura 2. Gráfica de un transformador de dos devanados ajustable	8
Figura 3. Modelo pi de un transformador	8
Figura 4. Gráfica de un cambiador de taps con n posiciones funcionando bajo carga	10
Figura 5. Banco de capacitores shunt	11
Figura 6. Esquema de un compensador SVC	11
Figura 7. Sistema de compensación estática ideal.	12
Figura 8. Curvas características y zonas de operación de un SVC.	12
Figura 9. SVC con n niveles de ajuste en Mvar.	12
Figura 10. Curva característica de un STATCOM	14
Figura 11. Generador conectado a compensación serie y paralelo	14
Figura 12. Comparación de la curva de voltaje con y sin compensación reactiva	14
Figura 13. Representación de la curva QV y su influencia en la estabilidad de voltaje	15
Figura 14. Distribución del espacio de búsqueda en el proceso de optimización	15
Figura 15. Estrategia de exploración en distintas regiones del espacio de solución	16
Figura 16. Esquema de generación de descendencia en base al algoritmo MVMO	16
Figura 17. Flujograma del algoritmo MVMO	17
Figura 18. Sistema de referencia IEEE de 39 nodos	23
Figura 19. Voltajes iniciales caso base	23
Figura 20. Diagrama con compensadores estáticos caso de estudio 1	24
Figura 21. Diagrama con compensadores estáticos caso de estudio 2	24
Figura 22. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 6 Mvar	25
Figura 23. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 6 Mvar	26
Figura 24. Cargabilidad de los generadores con 6 Mvar	28
Figura 25. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 10 Mvar	28
Figura 26. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 10 Mvar.	29
Figura 27. Cargabilidad de los generadores con 10 Mvar	31
Figura 28. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 2 Mvar	31
Figura 29. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 2 Mvar	32
Figura 30. Cargabilidad de los generadores con 2 Mvar	33
Figura 31. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte	48
Figura 32. Indicador de formulación del problema - Estado del arte	49
Figura 33. Indicador de solución - Estado del arte	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Pseudocódigo para el óptimo ajuste de potencia reactiva (OAPR) con el MVMO	. 22
Tabla 2. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO IEEE 39 buses con 6 Mvar	. 25
Tabla 3. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 6 Mvar	. 27
Tabla 4. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 6 Mvar	. 28
Tabla 5. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO IEEE 39 buses con 10 Mvar	. 29
Tabla 6. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 10 Mvar	. 30
Tabla 7. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 10 Mvar	. 30
Tabla 8. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO IEEE 39 buses con 2 Mvar	31
Tabla 9. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 2 Mvar	. 32
Tabla 10. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 2 Mvar	. 32
Tabla 11. Generadores del sistema eléctrico	. 38
Tabla 12. Demanda del sistema eléctrico	. 39
Tabla 13. Datos en p.u transformadores sistema IEEE 39 buses.	. 40

Resumen

Este trabajo aborda la optimización de los sistemas eléctricos de potencia por sus siglas (SEP), centrándose en el óptimo ajuste de la potencia reactiva por sus siglas (OAPR) con el objetivo de reducir las pérdidas de potencia activa, mejorar el perfil de voltaje y disminuir la cargabilidad de las unidades generadoras de energía, todas estas son cruciales para poder garantizar la eficiencia y la confiabilidad operativa en los SEP.

La metodología propuesta se basa en la comparación de dos algoritmos metaheurísticos como lo son el Mapeo de Media-Varianza por sus siglas (MVMO) y la Optimización por Enjambre de Partículas conocida por sus siglas (PSO).

Ambos algoritmos fueron programados en MATLAB utilizando el toolbox conocido como MATPOWER para realizar el análisis de flujo de potencia y así poder simular el sistema base bajo diferentes casos de estudio, el análisis se realizó en el sistema de prueba del IEEE de 39 barras, considerando restricciones técnicas, condiciones operativas reales y configuraciones de taps de 21 posiciones transformadores en y compensadores estáticos. todos estos trabajando en conjunto con el fin de realizar los ajustes precisos que el sistema requiere.

Los resultados muestran que ambos métodos son efectivos para lograr reducir pérdidas de potencia activa, mejorar los niveles de voltaje y también reducir la cargabilidad de las unidades generadoras. MVMO destacó por su

Abstract

This work addresses the optimization of electrical power systems (EPS), focusing on the optimal reactive power adjustment (ORPA) to reduce active power losses, improve voltage profiles, and decrease the loading of generating units. These factors are crucial to ensuring efficiency and operational reliability in power systems.

The proposed methodology is based on the comparison of two metaheuristic algorithms: the Mean-Variance Mapping Optimization (MVMO) and Particle Swarm Optimization (PSO).

Both algorithms were implemented in MATLAB using the MATPOWER toolbox to perform power flow analysis and simulate the base system under different case studies. The analysis was conducted on the IEEE 39-bus test system, considering technical constraints, real operating conditions, and 21-position tap settings for transformers and static compensators. These components work together to achieve the precise adjustments required by the system.

The results show that both methods effectively reduce active power losses, improve voltage levels, and decrease generator loading. MVMO demonstrated a strong exploration capability, whereas PSO convergence. exhibited rapid This comparative analysis provides valuable insights for selecting optimization techniques in power system design and operation.

capacidad de exploración detallada, mientras Keywords: Electrical system que PSO presentó una rápida convergencia. Este análisis comparativo aporta información útil para la selección de técnicas de optimización en el diseño y operación de los SEP.

simulation, IEEE power systems, MATLAB, Metaheuristics, Optimization methods, Power flow analysis, Reactive power control, Voltage control.

Palabras Clave: Análisis de flujo de potencia, control de potencia reactiva, Control de voltaje, MATLAB, Metaheurísticos, Métodos de optimización, Simulación de sistemas eléctricos, Sistemas eléctricos IEEE.

1 Introducción

En los SEP modernos, la compensación de potencia reactiva es muy importante con el fin de mantener la estabilidad del voltaje y con ello reducir las pérdidas energéticas, la creciente complejidad de estos SEP actuales caracterizados por redes que son altamente interconectadas y que además poseen cargas variables, demanda un control el cual debe ser coordinado y eficiente de los dispositivos de compensación tales como los capacitores y transformadores con cambiadores de tap.

Un método eficaz para mejorar la gestión OAPR de utiliza el teorema de superposición de matrices, que facilita el modelado de las interacciones eléctricas entre nodos y optimiza la distribución de energía reactiva tanto a nivel local como global [1]. Este tipo de control coordinado ayuda a reducir las operaciones innecesarias dispositivos de compensación, en manteniendo los voltajes dentro de límites seguros y minimizando el riesgo de sobrecompensación y la frecuencia de conmutación de los equipos.

El control de voltaje y de potencia reactiva ha sido extensamente estudiado. Por ejemplo, en la referencia [2], analiza las características de control de voltaje local mediante capacitores en derivación como una opción rentable para regular la magnitud de voltaje. En [3], se propone un método óptimo en línea para la distribución de capacitores, mientras que en [4] establece reglas de control de capacitores en el área local con el objetivo de reducir tiempos de respuesta. También en [5] se plantea un problema de control óptimo de voltaje y potencia reactiva en una red radial, abordando la operación coordinada de bancos de capacitores en derivación y cambiadores de tomas en subestaciones y alimentadores. A medida que los sistemas eléctricos crecen en capacidad y complejidad, el OAPR se enfrenta a la necesidad de combinar estrategias de control centralizado y disperso para contrarrestar las limitaciones de ambos enfoques [2]-[5].

voltaje La estabilidad de y la anticipación a perturbaciones mediante estrategias como el deslastre de carga y el uso de compensadores estáticos de VAR (SVC) han sido también evaluadas en [6]. En este contexto, diversos algoritmos incluyendo algoritmos avanzados. genéticos, PSO y más recientemente el algoritmo de Mapeo Media-Varianza (MVMO), se han empleado para ajustar la potencia reactiva de manera eficiente, logrando soluciones óptimas que minimizan pérdidas de potencia y reducen costos de ajuste de dispositivos [7], [8]. En el OAPR, los objetivos centrales incluyen reducir las pérdidas de potencia activa y optimizar el perfil de voltaje, utilizando estrategias multiobjetivo que equilibran la seguridad del sistema y la eficiencia económica [9], [10]. Esta selección de algoritmos para el OAPR es un desafió constante ya que los métodos tradicionales de optimización como los son las técnicas lineales y no lineales mencionadas en [11], compiten con otros métodos como los son los basados en la inteligencia artificial conocida como IA, así como también los algoritmos genéticos, búsqueda tabú y también por el algoritmo PSO [12].

El MVMO se ha consolidado en un recurso destacado para abordar el OAPR, eficiencia mejorando así la en -la distribución de energía reactiva y con ello también reduciendo las pérdidas energéticas como se menciona en [13]. Esta implementación permite reducir

significativamente las pérdidas de potencia en el SEP y mantener el nivel de voltaje dentro de los parámetros óptimos.

A continuación, en la figura 1 se ilustra cómo funciona el OAPR que va desde el operador central del sistema eléctrico el cual se encarga de actuar a los taps tanto de los transformadores, así como los de los compensadores estáticos para que el sistema minimice pérdidas y se mejore los perfiles de voltaje hasta llegar a su última etapa que es el usuario final.



Figura 1. Representación esquemática del OAPR.

El presente artículo se organiza en las siguientes secciones: Sección I: Introducción. Sección II: Trabajos relacionados. Sección III: Marco teórico. Sección IV: Metodología y formulación del Sección V: problema. Análisis de resultados. Sección VI: Conclusiones.

Sección VII: Trabajos futuros. Sección VIII: Referencias. Sección IX: Anexos.

2 Trabajos Relacionados

En referencia [14] la Aborda la minimización de pérdidas de potencia activa en lo que respecta a un sistema híbrido de energía en las islas Santa Cruz y Baltra mediante la implementación de algoritmos de optimización entre ellos el PSO y su variante modificada, en este estudio se demuestra la efectividad del PSO para poder resolver problemas no lineales y optimizando los elementos de mixtos. los reguladores control como son automáticos de voltaje por sus siglas (AVR), posiciones de taps en transformadores y bancos de capacitores.

En esta investigación se da a conocer como la reducción de pérdidas contribuye no solamente a la eficiencia operativa del sistema eléctrico sino también a un impacto positivo al lograr disminuir el consumo de combustibles fósiles, dicha investigación es relevante para sistemas de energía en las que se combinen fuentes convencionales y renovables por lo que presenta similitudes con el OAPR utilizando algoritmos metaheurísticos como lo es el MVMO y el PSO.

Por otro lado en la referencia [15] se explora también la aplicación de algoritmos metaheurísticos como lo son el PSO y el MVMO para poder optimizar ciertos parámetros operativos del sistema como lo son el voltaje, la potencia activa y la potencia reactiva que los controladores deben mantener o alcanzar en redes HVDC, en este estudio se implementaron los algoritmos en un sistema de prueba mediante el uso de software especializado con el fin de modelar y poder analizar la red, estos resultados muestran que estas técnicas son eficaces para lograr reducir pérdidas de potencia activa en redes HVDC logrando una disminución de aproximadamente el 6.35% en lo que respecta a las pérdidas iniciales, con este estudio se puede afirmar que la optimización del perfil de voltaje es clave para poder mejorar la eficiencia operativa del SEP, similar a los objetivos planteado en el presente trabajo de titulación.

En [16] aborda el problema del despacho óptimo de potencia reactiva integrando fuentes renovables como turbinas eólicas dispositivos junto con FACTS, específicamente compensadores estáticos de VAR (SVC). Los sistemas de prueba usados para esta investigación son del sistema del IEEE de 9 y 57 barras; el trabajo como la participación demuestra coordinada de los parques eólicos y los SVC en lo que se refiere al control de potencia reactiva voltaie v reduce significativamente las pérdidas de potencia activa, especialmente en redes con líneas de transmisión de larga distancia; con ello se da a conocer la importancia de estrategias automáticas de control para mejorar la confiabilidad y la eficiencia operativa del sistema.

En [5] se da a conocer la optimización multiobjetivo en redes de distribución mediante el control conocido como Volt-VAR, en donde se propone un algoritmo basado en la ubicación óptima de banco de capacitores, enfocándose principalmente en minimizar las pérdidas de potencia activa y los costos de inversión, este estudio se desarrolla en el sistema IEEE de 39 barras como modelo de prueba, esta investigación demuestra como la instalación óptima de dispositivos de compensación reactiva mejora significativamente los perfiles de voltaje y la eficiencia energética del sistema, reduciendo las pérdidas y aumentando la confiabilidad.

Por último, en la referencia [17] se presenta un modelo matemático para el despacho óptimo de potencia reactiva donde se integra restricciones operativas en el transcurso del tiempo que limitan las maniobras en taps de transformadores y bancos de capacitores con el fin de preservar su vida útil, la metodología emplea la metaheurística de optimización por MVMO y es validada en lo que refiere a su desempeño en el sistema del IEEE de 30 barras. los resultados de esta investigación destacan una mejora en la gestión de potencia reactiva y perfiles de voltaje junto con una reducción significativa en pérdidas de potencia activa y las maniobras de los dispositivos de control.

Los trabajos mencionados anteriormente proporcionan una base fundamental para la elaboración del presente artículo, ya que se toman en cuenta valores como los de los bancos de capacitores, utilizando como modelo de prueba el mismo sistema implementado en este estudio, así como las ubicaciones propuestas en dichas investigaciones. Esto tiene el propósito de evaluar el desempeño del algoritmo desarrollado en este trabajo. Es importante destacar que este estudio no se centra en la ubicación óptima de los dispositivos SVC ni mucho menos el dimensionamiento de los compensadores, sino en analizar cómo el ajuste óptimo de estos, basado en las investigaciones previas, puede proporcionar la potencia reactiva necesaria para el sistema. Para ello, se emplean los taps tanto de los transformadores como los taps de los compensadores estáticos, con el objetivo de lograr un ajuste preciso y coordinado cumpliendo con los objetivos de esta investigación.

3 Marco teórico

El marco teórico proporciona los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan la presente investigación. En esta sección se abordan los principios relacionados con el control de potencia reactiva y voltaje, los dispositivos y métodos utilizados en el SEP junto con las técnicas de optimización heurísticas

aplicadas. Todos estos elementos permiten comprender las bases del problema y su relación con el OAPR mediante algoritmos como lo es el MVMO y el PSO.

3.1 Control de potencia Reactiva y voltaje

Para asegurar la operación de los SEP de manera eficiente y confiable, es esencial controlar la potencia reactiva y el voltaje con los siguientes objetivos como lo menciona la referencia [18]:

- Mantener los voltajes en todos los equipos dentro de límites seguros, ya que están diseñados para funcionar a voltajes específicos.
- Aumentar la estabilidad del sistema, maximizando el uso de la transmisión, dado que la potencia reactiva y el voltaje influyen en la estabilidad.
- Minimizar el flujo de potencia reactiva para con ello lograr reducir las pérdidas energéticas.

El control de voltaje se complica debido a la variabilidad de las demandas eléctricas presentes en el sistema, así como a la limitación de la potencia reactiva a distancias cortas. lo que exige la implementación de dispositivos especializados distribuidos en toda la red. Un ejemplo de esto se encuentra en la referencia [19], donde se propone una estrategia para el control coordinado de la potencia reactiva y el voltaje en una granja eólica. Esta estrategia utiliza STATCOMS ubicados en paralelo, que serán analizados en detalle más adelante. El enfoque combina diversos métodos de control para estabilizar el voltaje en el nodo de conexión común. Además, aprovecha la rápida respuesta del STATCOM para mejorar la gestión de las reservas de potencia reactiva.

Por otro lado ,la referencia [20] detalla un método de control diseñado para regular tanto el voltaje como la potencia reactiva en sistemas fotovoltaicos conectados a redes de bajo voltaje, la estrategia ajusta de manera automática los taps del transformador y los dispositivos de compensación reactiva con el objetivo de estabilizar el voltaje y así mejorar la calidad de la energía suministrada. En [21] en cambio se propone una estrategia de control integrado para el ajuste de voltaje y la potencia reactiva, en donde se detecta datos anómalos mediante el aprendizaje profundo coordinado dispositivos de de v compensación reactiva dinámica, con este enfoque se logra mejorar la seguridad y la eficacia del control optimizando así la respuesta del sistema ante fluctuaciones de carga y reduciendo las pérdidas energéticas.

3.2 Generación y Consumo de Potencia Reactiva

Los generadores sincrónicos pueden generar o absorber potencia reactiva según el nivel de excitación aplicado. Cuando están sobreexcitados, generan potencia reactiva; mientras que, al ser subexcitados, la absorben. No obstante, la capacidad para poder realizar lo que son estas funciones de una manera continua se ve restringida debido a la corriente de campo, así como también a la corriente de armadura y a los limites térmicos de los terminales, estos generadores suelen estar equipados con AVR que modifican la excitación v controlan el voltaje de armadura para rendimiento garantizar un óptimo [18],[22].

En [23] se presenta una estrategia para asegurar el control estable en un generador síncrono de imanes permanentes en el

sistemas contexto de eólicos. dicha estrategia permite tener un control efectivo sobre la velocidad del rotor, el voltaje del enlace de la corriente continua y la potencia activa sin generar intercambios de potencia reactiva con la red, finalmente en la referencia [24] se presenta una metodología que permite evaluar la disponibilidad de reservas de potencia reactiva en redes de transmisión, particularmente importante en el proceso de cambio hacia recursos de energía renovable, con este método se facilita la identificación de situaciones de déficit o exceso de potencia reactiva, tanto en la producción como en la absorción, abordando su impacto en el perfil de voltaje y en la seguridad del sistema.

3.2.1 Transformadores Regulables y su impacto en el sistema eléctrico

Los transformadores absorben potencia reactiva en todo momento sin importar su nivel de carga. En condiciones de carga nula la reactancia magnetizante es la que predomina; mientras que al alcanzar la carga total, la inductancia de acoplamiento en serie tiene un impacto más significativo [18],[22].

Para ello en este artículo, se utiliza la representación de un transformador ajustable, con sus taps y cambiadores de taps, dado que el sistema contempla transformadores con 21 posiciones, esta elección será explicada más adelante.

Se dice que un transformador es regulable o también se lo conoce como regulante ya que transformador diseñado es un específicamente para modificar y también gestionar los niveles de voltaje en la red eléctrica, su objetivo principal es dar una estabilidad en el voltaje además de mejorar la calidad del suministro eléctrico junto con aspectos críticos en las redes de transmisión y distribución a lo que se refiere a gran transformadores escala. Estos logran regular el voltaje mediante ajustes que poseen en su devanado gracias a un dispositivo que se lo conoce como cambiador de derivaciones o tap changer en inglés el mismo que permite alterar la relación de transformación según requiera el sistema como se ilustra a continuación en la figura 2.

Existen transformadores regulables que no solo ajustan la magnitud del voltaje que por lo general es en un margen alrededor del ± 10 % sino también pueden variar su ángulo de fase, estas dos propiedades resulta muy útil cuando se tiene cargas variables o también las distancias de transmisión son muy extensas con lo que podría causar caídas de voltaje muy considerables, realizando dichos ajustes mientras el transformador se encuentra desenergizado, por ello este dispositivo se convierte en un mecanismo muy efectivo para poder controlar el voltaje y mantener el flujo de potencia reactiva y con ello mejorar la operación y estabilidad de los SEP [25].



Figura 2. Gráfica de un transformador de dos devanados ajustable.

La ecuación matemática que modela a este transformador es la siguiente:

$$\frac{V_1 - I_1 \times Z_1}{n_1} = \frac{V_2 - I_2 \times Z_2}{n_2}$$
 (1)

Donde:

 V_1 : Voltaje en el lado primario del transformador

- V_2 : Voltaje en el lado secundario del transformador I_1 : Corriente en el lado primario del transformador I_2 : Corriente en el lado secundario del transformador Z_1 : Impedancia del lado primario del transformador Z_2 : Impedancia del lado secundario del transformador n_1 : Relación de transformación en el lado primario n_2 : Relación de transformación en
- el lado secundario

El modelo pi de este tipo de transformador se muestra a continuación en la figura 3 tomado de la referencia [26].



Figura 3. Modelo pi de un transformador.

Mediante la resolución de nodos y mallas se puede encontrar la corriente como indican las ecuaciones (2) y (3)

Donde:

 I_1 : Corriente en el lado primario del transformador

*I*₂: Corriente en el lado secundario del transformador

 n_1 : Relación de transformación del lado primario

 n_2 : Relación de transformación del lado secundario

 V_1 : Voltaje en el nodo primario

 V_2 : Voltaje en el nodo secundario

Y: Admitancia del transformador

3.2.2 Taps

En la referencia [22] se examina a fondo los en los transformadores taps V su importancia en lo que respecta a la regulación de voltaje dentro de los SEP, específicamente en la transmisión y distribución, estos dispositivos lo que hacen es ajustar la relación de transformación en el transformador para poder compensar las fluctuaciones de voltaje lo que permite a mantener la estabilidad y el rendimiento de los SEP, este ajuste es fundamental para la operación eficiente del sistema bajo condiciones de carga variables.

Además, en [22] también se analiza el funcionamiento de los transformadores de cambio de tap bajo carga por sus siglas en inglés OLTC (On Load Tap Changer) los mismos que permiten realizar ajustes en tiempo real y sin interrumpir el servicio lo cual facilita una regulación continua de voltaje frente a variaciones en la carga. También se da a conocer la importancia del control automático de estos dispositivos y su modelado en los estudios de estabilidad, los OLTC son entonces elementos clave tanto para el análisis de flujo de carga como para la estabilidad transitoria en redes eléctricas. Los taps de un transformador ajustan la relación de voltaje entre los devanados primario y secundario y con ello se consigue mantener el voltaje de salida estable o dentro de los valores requeridos; existen dos tipos principales de ajuste, por un lado se tiene los taps sin carga, utilizados en transformadores que no necesitan ajustes de voltaje frecuentes como por ejemplo los empleados en unidades generadoras y por otro lado se tiene los taps con carga que se utilizan en aplicaciones donde la carga fluctúa a lo largo del día, lo que requiere ajustes constantes para adaptarse a los cambios en la demanda.

3.2.3 Cambiadores de taps

Los cambiadores de taps se utilizan en transformadores para regular el voltaje de salida ante fluctuaciones de corriente o cambios en el voltaje de entrada, ajustando la relación de transformación según sea necesario. Existen dos tipos principales: por un lado, el tipo de cambiador de taps sin carga. Para ajustar este tipo de cambiador, es necesario que el transformador esté desconectado de la carga, ya que sus están diseñados contactos no para interrumpir la corriente, incluso con carga baja, intentar dicho ajuste bajo condiciones de operación es decir bajo carga puede llegar a provocar arcos eléctricos los cuales dañarían tanto al tap como al mismo transformador.

Este tipo de cambiador es común en aplicaciones con sistemas fotovoltaicos y eólicos [27].

Por otro lado, se tiene al cambiador de taps tipo OLTC, el cual permite ajustar el voltaje sin la necesidad de desconectar el transformador, lo que es muy útil en operaciones bajo carga o en operaciones continuas. Generalmente, se ubica en la sección de mayor voltaje del transformador, donde las corrientes son menores, lo que facilita un diseño más compacto y económico. Además, el mayor número de espiras en el devanado de alto voltaje facilita un control de voltaje más preciso. La Figura 4 muestra cómo se realizan las conexiones de un cambiador de taps en carga, operando en la sección de mayor voltaje.



Figura 4. Gráfica de un cambiador de taps con n posiciones funcionando bajo carga.

3.3 Métodos de Control de Voltaje

Se dice que el control de los niveles de voltaje va conjuntamente de la mano con la regulación de la producción, absorción y flujo de potencia reactiva en todas las partes del sistema, las unidades de generación se encargan de proporcionar el control de voltaje básico y los AVR se encargan de ajustar la excitación de campo con el fin de mantener el nivel de voltaje dentro de los parámetros en los terminales del generador sin embargo, por lo general se requieren medios adicionales para poder gestionar el voltaje a lo largo del sistema.

Los dispositivos empleados para este fin se clasifican en:

Fuentes o sumideros de potencia reactiva, compensadores de reactancia en línea, transformadores reguladores [22],[28].

3.3.1 Capacitores shunt

Los capacitores shunt, reactores y capacitores en serie ofrecen una compensación pasiva. Pueden conectarse de forma permanente al sistema de transmisión y distribución o a través de interruptores, y contribuven al control de voltaie al modificar las características de la red [18],[22]. Los primeros capacitores shunt se empezaron a utilizar alrededor de los años de 1910 con el objetivo de mejorar el factor de potencia. Estos capacitores empleaban aceite dieléctrico, pero debido a características como su tamaño, peso y elevado costo, su uso estaba restringido en esa época. Sin embargo, para mediados del año de 1930 con la aparición de nuevos materiales dieléctricos, junto con avances en su diseño y fabricación, permitió reducir considerablemente tanto su tamaño como su peso. Desde entonces, la utilización de capacitores shunt ha aumentado significativamente [18].

En la referencia [29] se analiza la importancia conjuntamente con el funcionamiento de los bancos de capacitores shunt en los SEP, destacando su importancia en la regulación del voltaje mejorando así la calidad de potencia y reducción de pérdidas, por otro lado en [30] se menciona que los capacitores tipo shunt son relativamente económicos de instalar así como de mantener además de que su implementación en áreas de carga o en puntos específicos donde se requiera ayuda para estabilizar el nivel de voltaje.

No obstante, los capacitores shunt presentan la desventaja de una regulación limitada del voltaje, y más allá de un nivel particular de compensación, no pueden sostener un punto de operación estable.

A continuación, se muestra en la figura 5 una ilustración de un banco de capacitores tipo shunt.



Figura 5. Banco de capacitores shunt.

3.3.2 Compensadores estáticos

Los compensadores estáticos de VAR (Voltio Amperio Reactivo) por sus siglas en ingles SVC (Static Var Compensation) son dispositivos que no poseen partes móviles que se conectan en paralelo al SEP y pueden regular la potencia reactiva mediante el control de parámetros específicos del sistema, a diferencia de los compensadores sincrónicos los SVC no poseen componentes rotativos por ello el uso del término estático o Static en inglés, en otras palabras un SVC consiste en un generador estático de VAR o un dispositivo de absorción, junto con un sistema de control adecuado [22].

Según la referencia [31] el empleo de SVC permite regular el voltaje y mejorar la calidad de potencia en el SEP, mediante la modulación de la potencia reactiva, los SVC ayudan a mantener un perfil de voltaje estable además de que contribuyen a la estabilidad del sistema bajo condiciones de carga variables. El SVC es un equipo de electrónica de potencia que controla el flujo de energía y contribuye a la optimización de la estabilidad transitoria en las redes eléctricas.

Su función central es ajustar el voltaje en el nodo donde está instalado, modificando la cantidad de potencia reactiva que inyecta o extrae del sistema. Cuando el voltaje disminuye, el SVC suministra potencia reactiva, y cuando aumenta, absorbe esta potencia para estabilizar el voltaje. Este control se realiza mediante capacitores e inductores conectados al secundario de un transformador de acoplamiento. Cada banco de capacitores o inductores se conecta o se desconecta del sistema mediante los conocidos interruptores controlados por tiristores lo que permite regular la potencia reactiva ajustando el ángulo de disparo de estos tiristores; una de las principales aplicaciones del SVC es poder regular el voltaje manteniendo así el mismo dentro de sus niveles permisibles y responder rápidamente así poder а contingencias y fenómenos transitorios, uno de los elementos más importantes de un SVC es el capacitor conmutado por tiristores abreviado como TSC o también las bobinas conmutadas conocidas como TSR todos estos elementos son controlados por tiristores gracias a la implementación de la electrónica de potencia.

En la figura 6 se presenta un esquema simplificado de un SVC que incluye estos componentes esenciales [32].



Figura 6. Esquema de un compensador SVC.

Se sabe que un sistema de compensación estática está compuesto por un capacitor y un reactor estos dos se encuentran conectados en una conexión en paralelo adaptándose al requerimiento de potencia reactiva del SEP por lo que se puede decir que teóricamente este sistema debería ser capaz de absorber o suministrar potencia reactiva sin restricciones, con lo que se facilita el mantenimiento de un voltaje estable en el nodo de conexión y una respuesta inmediata a cualquier fluctuación de voltaje. También, es relevante señalar que este tipo de sistema exhibe una relación lineal entre el voltaje y la corriente, como se muestra en la figura 7 a continuación.



Figura 7. Sistema de compensación estática ideal.

Un sistema de compensación práctico muestra líneas con inclinación cambiante de acuerdo con los límites superiores e capacidad inferiores de de cada componente: $L_{máxima}$ y $L_{mínima}$ para los elementos inductivos, y C_{máxima} y C_{minima} para los elementos capacitivos. La figura 8 ilustra las gráficas distintivas de un sistema de compensación estática, el cual incorpora un regulador adaptable, va sea de tipo inductivo o capacitivo, generando tres zonas operativas: una región exclusivamente inductiva, una región predominantemente capacitiva y una zona central que combina ambas características. Cuando el voltaje en la barra de conexión es elevado, el regulador estático absorbe potencia reactiva y, por el contrario, si el voltaje es bajo el regulador suministra potencia reactiva hasta lograr el valor de voltaje requerido, que es el propósito de este estudio.



Figura 8. Curvas características y zonas de operación de un SVC.

Para aumentar el límite máximo de compensación reactiva en un SVC, es necesario instalar bancos de capacitores conmutables en paralelo, los cuales se activan o desactivan según las necesidades del sistema eléctrico. Esto se ilustra en la figura 9, que muestra un compensador estático con n niveles de ajuste en Mvar.



Figura 9. SVC con n niveles de ajuste en Mvar.

Como se observó en la figura anterior, un SVC puede modelarse como un equivalente funcional de un tap en el contexto del ajuste de voltaje y potencia reactiva en los SEP. Aunque existen diferencias en su diseño y funcionamiento, ambos dispositivos comparten el objetivo principal de regular el perfil de voltaje y mejorar la estabilidad y eficiencia operativa del sistema. Por esta razón, en este trabajo se considera la operación conjunta de ambos elementos, maximizando su capacidad para reducir las pérdidas de potencia y optimizar el desempeño del sistema.

3.3.3 Compensadores sincrónicos

Un compensador sincrónico es una máquina sincrónica que opera sin motor primario ni carga mecánica. Mediante el control de la excitación de su campo, puede configurarse para generar o absorber potencia reactiva. Con la implementación de un AVR, es posible ajustar automáticamente la salida de potencia reactiva para mantener el voltaje de los terminales constante. Para poder compensar las pérdidas se toma una pequeña cantidad de potencia reactiva del SEP.

Los compensadores sincrónicos han venido siendo utilizados desde la década de 1930 con el fin de controlar la potencia reactiva tanto en sistemas de transmisión como de subtransmisión y por lo general estos se conectan en el tercer devanado de los transformadores, dichos dispositivos se clasifican como compensadores activos de derivación y poseen costos de operación y de compra muy elevados por lo que los compensadores estáticos los han venido reemplazando en gran medida sin embargo, estos ofrecen algunas ventajas sobre los compensadores estáticos ya que contribuyen a la capacidad de corriente de cortocircuito además de que durante las oscilaciones de potencia se intercambia energía cinética con el SEP, en estas condiciones un compensador sincrónico puede suministrar hasta el doble de su capacidad nominal en lo que respecta a potencia reactiva además de que cuentan con una capacidad de sobrecarga del 10 al 20 % durante periodos de tiempo de hasta media hora es decir 30 minutos a diferencia métodos de compensación de otros [25],[28].

Por ejemplo en [33] se describe el uso de un compensador sincrónico estático en serie por sus siglas (SSSC) con el fin de mejorar la estabilidad transitoria de una planta hidroeléctrica al aumentar el espacio de salida de potencia el SSSC se instala en líneas de transmisión de 500 kV y su control de corriente ayuda a reducir las oscilaciones del rotor y mejorar el perfil de voltaje durante perturbaciones. Esto permite aumentar la potencia de salida máxima de la red sin necesidad de refuerzos adicionales en el sistema.

3.3.4 Compensadores tipo STATCOM Los inicios del STATCOM empezaron en el año de 1976 en Japón por las empresas Kansai Electric Co.LTD. y Mitsubishi Electric como un esfuerzo para poder superar las limitaciones de los SVC tradicionales en cuanto a capacidad de compensación de corriente y también el tamaño del equipos, el primer prototipo fue desarrollado en el año de 1980 con una potencia de 20 Mvar (Mega Voltios Amperios Reactivos) y un voltaje de 77 KV mediante el uso de tiristores junto con complejos circuitos que se los denomina circuitos de conmutación forzada sin embargo las bajas capacidades de dichos dispositivos de conmutación de esa época limitaron su aplicación por lo que retrasó su desarrollo, para el año de 1992 el primer STATCOM operativo fue instalado en una subestación de Inuyama en Japón con una potencia de 80 Mvar, para el año de 1995 un STATCOM de ±100 Mvar fue implementado en Estados Unidos en la subestación de Sullivan, con estos avances se consolidó al STATCOM como una alternativa eficiente para la compensación de potencia reactiva en SEP de alta demanda [34].

Un STATCOM se lo puede definir como un dispositivo que gracias a la electrónica de potencia es capaz de mejorar la estabilidad y la calidad del suministro eléctrico en sistemas de transmisión y distribución, su principal función es compensar la potencia reactiva y con ello ayuda a corregir problemas de voltaje y a mantener la estabilidad en el sistema eléctrico, este dispositivo permite generar un voltaje con los valores deseados de amplitud, frecuencia y ángulo de fase, gestionando la potencia reactiva a través de la entrega o absorción de reactivos.

El STATCOM puede ofrecer o absorber reactivos dentro de los límites de sus componentes semiconductores, sin depender del voltaje terminal. A diferencia de un SVC, su curva característica permite la entrega de corriente reactiva incluso en voltajes bajos, como se observa en la figura 10.



Figura 10. Curva característica de un STATCOM.

3.4 Efectos de los sistemas con compensación

Los controles del sistema impactan significativamente en la estabilidad de voltaje. En la figura 11, se presenta un ejemplo de compensación en serie y en paralelo aplicada a un generador. Este tipo de compensación puede implementarse a través de dispositivos como compensación shunt, SVC o STATCOM, mencionados anteriormente. Es importante señalar que la compensación serie influve en principalmente en la potencia activa y en el ángulo del sistema, mientras que la paralelo compensación impacta en especialmente el voltaje, ya que permite la generación local de potencia reactiva [35].



Figura 11. Generador conectado a compensación serie y paralelo.

Mediante la figura 12 se representa el impacto de la compensación mediante la

conexión en paralelo con la curva QV la misma que se la conoce como la curva de la nariz, se observa que el punto de máxima capacidad de carga se desplaza a valores mucho más altos de potencia demandada donde se mueve del punto C al punto D, además el voltaje se mantiene muy cerca al valor de 1 en p.u pese al incremento en el consumo de potencia reactiva y el colapso de voltaje ocurre ahora a niveles mucho más elevados [32].



Figura 12. Comparación de la curva de voltaje con y sin compensación reactiva.

3.4.1 Curva QV

Una forma efectiva de visualizar los puntos de colapso de voltaje es a través de la curva QV, también conocida como la curva de la nariz. En esta representación, se grafican distintos valores de potencia activa o reactiva frente potencia al voltaje. generando curva característica. una ilustrada en la figura 13. Cuando la demanda del sistema es baja, es decir, cuando PQ tiende a cero, el voltaje se mantiene cercano a 1 en por unidad. Sin embargo, al aumentar la demanda, el voltaje disminuye progresivamente hasta alcanzar el punto C, donde ocurre un colapso de voltaje y no es posible obtener puntos de operación factibles para potencias superiores a este valor. La distancia desde el estado operativo actual (P1, Q1) hasta el punto de colapso de voltaje representa un índice de estabilidad de voltaje. Es importante destacar que, en un punto de operación particular como P1, Q1, pueden observarse dos valores de voltaje posibles,

correspondientes a los puntos A y B en la gráfica. No obstante, estos puntos poseen características opuestas: el punto A es estable, mientras que el punto B es inestable [35].



Figura 13. Representación de la curva QV y su influencia en la estabilidad de voltaje.

3.5 Técnicas de Optimización Heurísticas

Se puede decir que el término heurístico se refiere a los métodos donde se emplean un conocimiento específico para poder hallar soluciones óptimas a problemas, pueden ser estos en el ámbito de la ingeniería eléctrica como es el caso del presente artículo, centrándose en la calidad de los resultados y el uso eficiente de todos los recursos que se tengan disponibles, en los últimos años ha surgido algunas técnicas heurísticas como por ejemplo la computación evolutiva, búsqueda tabú, el algoritmo del PSO y el mapeo de media varianza (MVMO), estas dos últimas son las que se emplean para el desarrollo de este trabajo; estas técnicas ofrecen una ventaja sobre los métodos tradicionales como por ejemplo mejor tiempo de desarrollo y una mayor resistencia ante el ruido o pérdida de información. Dichas heurísticas buscan maximizar o minimizar una función la misma que se la conoce como función objetivo al evaluar distintos estados dentro de un espacio de búsqueda, estas técnicas van a orientar el proceso hacia soluciones óptimas o cercanas a lo óptimo que se lo conoce como cuasi-óptimas y van desde

simples exploraciones hasta complejos procesos de aprendizaje donde se evita ciclos infinitos y áreas restringidas en el espacio de búsqueda [26], [36].

Para poder obtener las soluciones mencionadas anteriormente como óptimas en estos algoritmos de búsqueda es esencial equilibrar adecuadamente dos características de estos métodos; como se ilustra en la Figura 14 una de ellas se la conoce como la intensificación que no es más que el esfuerzo concentrado en explorar la región actual del espacio de búsqueda o también se la conoce como la explotación de dicho espacio.



Figura 14. Distribución del espacio de búsqueda en el proceso de optimización.

Por otro lado, se tiene a la segunda característica fundamental que se la conoce como diversificación que no es más que el esfuerzo destinado a explotar áreas que se encuentran alejadas del espacio de búsqueda actual, este concepto se lo ilustra y se puede apreciar en la Figura 15 donde también se lo conoce como exploración de las regiones distintas.



Figura 15. Estrategia de exploración en distintas regiones del espacio de solución.

4 Metodología y Formulación del Problema

El algoritmo MVMO se utiliza en este trabajo para abordar el problema del OAPR, centrándose en minimizar las pérdidas de potencia activa en un sistema IEEE de 39 barras mediante la variación de taps tanto en transformadores, así como también en taps de compensadores estáticos por lo tanto es importante describir cómo funciona la metodología de este algoritmo como se indica en el siguiente apartado.

4.1 Descripción del método de optimización MVMO

En 2010, el investigador István Erlich introdujo y perfeccionó el algoritmo MVMO, el cual se clasifica como una técnica de optimización estocástica basada en una población, dicho algoritmo lo que hace es utilizar los principios de selección , mutación y finalmente cruce para poder encontrar soluciones óptimas, sin embargo este algoritmo se diferencia de otros métodos al aplicar una transformación estratégica que se enfoca en calcular la media y la varianza de la mejor población dinámica registrada hasta entonces.

Según Erlich, para que el MVMO funcione correctamente, se deben seguir

varios pasos clave. Primero, se realiza una inicialización y normalización, definiendo el tamaño de la población dinámica y ajustando las variables de optimización a un rango normalizado entre 0 y 1, necesario para su evaluación. Dichas variables se van reconfigurando en el proceso de cada iteración para poder adaptarse a los cambios de la población, la población dinámica del algoritmo MVMO se estructura o compone de los mejores individuos en los cuales su promedio y varianza se calculan para cada dimensión permitiendo así que el algoritmo ajuste todos sus parámetros de búsqueda conforme vayan evolucionando los valores de la población promoviendo así una búsqueda dinámica la cual ajusta la exploración y explotación mencionadas anteriormente en función del tamaño de la población.

Después se seleccionan ciertas variables de la solución para poder someterlas a una llamada "mutación" utilizando una función de transformación que toma en cuenta la media y la varianza de la población en su totalidad, esta función se la conoce como función de mapeo la cual asegura que las soluciones generadas se mantengan en el rango que va desde [0,1] ajustando así la intensidad de búsqueda cerca de los valores medios y concentrando el enfoque en áreas prometedoras del espacio de solución.

A continuación, en la figura 16 se explica gráficamente como se crea la descendencia del algoritmo MVMO.



Figura 16. Esquema de generación de descendencia en base al algoritmo MVMO.

El algoritmo finaliza cuando se alcanza un número especifico de iteraciones en este caso para este trabajo son de 300 o también cuando se cumple un nivel de aptitud deseado o en el caso de que no se observen mejoras significativas tras varias iteraciones se detiene, el algoritmo MVMO ha demostrado ser muy efectivo en pruebas estándar encontrando soluciones cercanas al óptimo con facilidad de implementación convirtiéndose en una opción con gran potencial para problemas de optimización en escenarios reales, como el problema del despacho de potencia reactiva conocido por sus siglas como (ORPD) [2],[37].

El MVMO representa una muy innovadora metodología de optimización que puede ser aplicada al análisis de los SEP, cuya distinción principal reside en su función de mapeo mencionada anteriormente; este método se fundamenta en la mutación de descendientes junto con la integración de la media y la varianza de los mejores individuos de una población de n elementos [8],[37].

El diagrama de flujo del MVMO, ilustrado en la figura 17, comienza con una etapa de inicialización, seguida de iteraciones en las que se evalúa la función de aptitud donde en su última fase se generan nuevas soluciones potenciales y finalmente el criterio de finalización es comparable al del algoritmo PSO [3].

Se puede decir de que una las particularidades de MVMO con respecto a otros métodos de optimización se halla o radica en la restricción del rango de búsqueda para todas las variables las cuales se limitan entre 0 y 1; condición requerida en la función de mapeo sin embargo, la función objetivo siempre se evalúa con valores reales como por ejemplo los límites permisibles en el voltaje del sistema; a diferencia del método por PSO MVMO trabaja sobre una única solución en cada iteración y su actualización se logra a través de una base de conocimiento o también conocida como memoria adaptativa la misma que almacena y utiliza información de las iteraciones previas con el fin de identificar la solución más óptima dentro del espacio de búsqueda [3], [38].

También se puede decir que una de las características únicas del MVMO es su enfoque en el espacio de búsqueda global con especial atención en las mejores soluciones individuales según su aptitud como se menciona en [3],[8], [37],[38].



Figura 17. Flujograma del algoritmo MVMO.

El proceso para identificar la solución óptima hasta el momento emplea las ecuaciones (4), (5) y (6), que calculan la media ,varianza y el factor de forma, respectivamente [3].

$$\bar{x}_{i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n} x_{i}(j)$$
⁽⁴⁾

$$v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i(j) - \bar{x}_i)^2$$
⁽⁵⁾

$$S_i = -\ln(v_i) \times f_s \tag{6}$$

Donde:

 \bar{x}_i = Media de los n-mejores en la evaluación del algoritmo i n = dimensión de la población v_i = Varianza de los n-mejores en la evaluación del algoritmo i S_i = factor de forma f_s = factor de escalamiento $0.9 \le f_s \le 1.0$

4.2 Función objetivo y restricciones matemáticas

Por lo general un problema no lineal se formula de la siguiente manera:

$$\min f(x,y) \tag{7}$$

Sujeto a:

$$h(x, y) = 0$$
$$g(x, y) \le 0$$

Entonces se puede decir que las variables xe y representan el conjunto de variables de la optimización las cuales pueden ser continuas o discretas mientras que por otro lado f(x, y), h(x, y) y g(x, y) vienen a ser la función objetivo y las condiciones de igualdad e inecuación, y por lo general, se recurre a métodos como la programación matemática para solucionar estos problemas y dentro de ella se tiene la programación lineal, no lineal, entera-mixta, entre otros con el fin de resolver estas formulaciones aproximadas y poder garantizar el óptimo global de este tipo de problemas no obstante la complejidad del caso de estudio o del modelo limita la definición y el cálculo de una expresión analítica mediante métodos clásicos de optimización.

Otra alternativa para poder abordar problemas no lineales y no convexos es el desarrollo de técnicas metaheurísticas las mismas que permiten obtener una solución de calidad aunque por supuesto no necesariamente óptima, se sabe que los métodos convencionales por lo general suelen encontrar una solución óptima en menos tiempo para problemas difíciles en comparación técnicas con las metaheurísticas sin embargo estas últimas logran una solución muy aceptable en un tiempo razonable y con una considerable reducción en el esfuerzo del modelado matemático.

Según la referencia [4] el presente problema de optimización se clasifica como un problema no lineal de números enteros mixtos por lo que matemáticamente este problema se puede expresar de la siguiente manera con la siguiente función objetivo:

$$\min\{f(x, y)\}$$

$$= \sum_{n} \sum_{m} G_{nm} [V_n^2 + V_m^2 - 2V_n V_m \cos(\theta_{nm})]$$
(8)

Donde:

 G_{nm} : Conductancia entre los nodos n y m

 $V_n \ y \ V_m$: voltajes en los nodos n y m respectivamente θ_{nm} : diferencia de fase entre los voltajes $V_n \ y \ V_m \ en \ los \ nodos \ n \ y \ m$

Esta ecuación (8) refleja las pérdidas activas en cada línea de transmisión debido a la resistencia de la red y a las diferencias de fase entre los voltajes de los nodos conectados.

Para simplificar la ecuación, se presenta una versión resumida en la ecuación (9):

$$min: P_{Loss} = \sum_{i=1}^{n} P_{Loss_i}$$
⁽⁹⁾

En esta forma simplificada, P_{Loss} representa la suma total de las pérdidas de potencia activa en toda la red, mientras que P_{Loss_i} son las pérdidas individuales en cada rama i de la red, que pueden estar relacionadas con las características eléctricas de las líneas propias del sistema.

4.2.1 Restricciones matemáticas

a. Restricción de balance de potencia

Para el balance de potencia activa, así como también la potencia reactiva se considera el flujo de potencia en un nodo a otro. Las ecuaciones de restricción (10) y (11) aseguran que el balance de potencia nodal se mantenga.

$$P_{g_i} - P_{d_i} - P_{nm} (V_n, \theta_{nm}) = 0 \quad \forall i \qquad (10)$$

$$\in n$$

$$Q_{g_i} - Q_{d_i} - Q_{nm} (V_n, \theta_{nm}) \qquad (11)$$

$$= 0 \quad \forall i \quad \in n$$

Donde:

n: número totales de barras.

 Pg_i : Potencia activa producida por el generador i

 Qg_i : Potencia reactiva producida por el Generador i

 P_{nm} : Flujo de potencia activa en el punto nm.

 Q_{nm} :Flujo de Potencia reactiva en el punto nm.

 P_{d_i} : Potencia activa consumida por la barra i

 Q_{d_i} : Potencia reactiva consumida por la barra i

 V_n : Voltaje de la barra n

 θ_{nm} : Diferencia angular entre n y m.

b. <u>Restricciones en las líneas de</u> <u>transmisión.</u>

La ecuación (12) lo que hace es limitar el flujo de potencia en las líneas de transmisión.

$$S_{nm} \leq S_{nm}^{max} \forall m \in n$$
 (12)

Donde:

 S_{nm} : Flujo de potencia en el nodo nm. *n*: número totales de barras.

c. <u>Restricciones de límites de</u> <u>generación</u>

las ecuaciones (13) y (14) controlan la capacidad de los generadores tomando en cuenta que los generadores no deben sobrepasar sus límites máximos de producción.

$$Pg_i^{\min} \le Pg_i \le Pg_i^{\max} \forall i \in n$$
⁽¹³⁾

$$Qg_i^{\min} \le Qg_i \le Qg_i^{\max} \ \forall \ i \ \in n$$
⁽¹⁴⁾

Donde:

n: número totales de barras. Pg_i : Potencia activa producida por el generador i Qg_i : Potencia reactiva producida por el Generador i

d. <u>Restricciones en los ajustes de taps</u>

las ecuaciones (15) y (16) se encargan de modelar los ajustes de cambiadores de taps en los transformadores y los compensadores estáticos respectivamente.

$$T_k^{min} \le T_k \le T_k^{max} \forall k$$

$$\in (n,m), \forall T \in \varepsilon$$
(15)

$$\begin{aligned} Qc_j^{min} &\leq Qc_j \leq Qc_j^{max} \forall j \\ &\in n \forall Qc \in \varsigma \end{aligned}$$
(16)

Donde:

n: número totales de barras.

 T_k :Posición del tap en el transformador k Qc_j : Compensador estático conectado a la barra j.

 ε : Conjunto de transformadores con cambiador de taps.

 ς : Conjunto de compensadores estáticos.

e. Restricción de límites de voltaje

la ecuación (17) se encarga de imponer los límites de voltaje en cada nodo con el fin de que el sistema opere de manera estable se considera los siguientes límites de voltaje máximos y mínimos.

$$V_n^{min} \le V_n \le V_n^{max} \tag{17}$$

Donde:

 V_n : Voltaje de la barra n n: número totales de barras.

4.3 Formulación del problema

Como se ha ido mencionando a lo largo del presente artículo, en los SEP la gestión eficiente del OAPR es una clave fundamental para poder garantizar la estabilidad del voltaje y poder minimizar las pérdidas de energía, en estos SEP modernos cuenta con redes altamente se interconectadas además de demandas variables donde se enfrentan a desafíos crecientes en la operación eficiente de dispositivos como los son los cambiadores de taps tanto en transformadores y compensadores estáticos. un ajuste inapropiado de estos dispositivos puede aumentar las pérdidas de potencia activa, desequilibrar los niveles de voltaje e impactar negativamente en la confiabilidad del sistema. Este trabajo se centra en superar todas estas limitaciones mediante un enfoque de optimización que ajusta las posiciones de los taps y los valores de compensación reactiva con el fin de mejorar el desempeño global del sistema.

El objetivo principal de este estudio es minimizar las pérdidas de potencia activa, optimizar los perfiles de voltaje y determinar el nivel adecuado de potencia reactiva que el sistema requiere por lo que se puede decir que las variables para el presente problema de optimización son y = $\{T_k, \forall T \in \varepsilon, Qc_i, \forall Q \in \varsigma\}$

considerando a todas como variables discretas. El objetivo se aborda utilizando el software MATLAB en combinación con el toolbox conocido como MATPOWER el cual permite realizar análisis de flujo de potencia junto con simulaciones avanzadas. Las variables de decisión incluyen las posiciones de los taps en los transformadores junto con los valores de compensación reactiva de los compensadores estáticos, ambos han sido restringidos a 21 posiciones discretas como se ha explicado anteriormente las mismas que van en el rango desde -10 a 10, estas variables trabajan de forma coordinada para realizar el ajuste de las configuraciones del sistema y alcanzar el estado operativo óptimo.

Es importante señalar, como se explicó en la sección de los trabajos relacionados, que este estudio no se centra en el dimensionamiento ni en la ubicación óptima de los compensadores estáticos sino más bien se basa en las investigaciones previas que ya establecieron estas configuraciones en el sistema de referencia del IEEE de 39 barras y que a partir de estos parámetros fijos, este trabajo evalúa y determina las posiciones adecuadas de los taps y compensadores para poder lograr el OAPR.

En esta sección detalla el se funcionamiento del pseudocódigo desarrollado para abordar este problema, así como las configuraciones específicas de los algoritmos MVMO y PSO utilizados. Además, se presentan las características del caso base de estudio y los escenarios correspondientes a los casos de análisis, configuraciones destacando las y parámetros empleados en cada uno.

4.3.1 Pseudocódigo para el OAPR usando MVMO

El pseudocódigo presentado en la tabla 1, describe el método utilizado en este trabajo para el OAPR en un SEP mediante el algoritmo MVMO, el objetivo principal es el de minimizar las pérdidas de potencia activa ajustando de manera óptima los taps de los transformadores junto con los capacitores estáticos mientras se respetan las restricciones operativas del sistema, como son los límites de voltaje, potencia y capacidad de los generadores.

El proceso comienza definiendo las variables del sistema y los parámetros incluyendo los límites iniciales de operación y datos del flujo de potencia, luego se asignan valores iniciales para las variables de decisión y se realiza un flujo de potencia para calcular las pérdidas iniciales. En el núcleo del algoritmo se genera una población de soluciones y se evalúa su calidad calculando las pérdidas y cumplimiento verificando el de las restricciones asignadas, posteriormente mediante el mapeo de media varianza, las soluciones se ajustan hacia valores óptimos en cada iteración donde su máximo permitido fue de 300 iteraciones.

Finalmente, los mejores resultados como las configuraciones de taps, así como de capacitores las cuales minimizan las pérdidas, se almacenan y se exportan, permitiendo el análisis detallado del desempeño del sistema.

Tabla 1. Pseudocódigo para el óptimo ajuste de potencia reactiva (OAPR) con el MVMO.

Pseudocódigo para el Óptimo Ajuste de Potencia Reactiva usando MVMO

Paso 1: Inicio

Paso 2: Ingreso de datos

- Cargar caso base (red eléctrica inicial).

- Configurar generadores, bancos de capacitores, taps de transformadores

- Definir partículas iniciales para el algoritmo MVMO.

- Introducir datos de cargas y líneas de transmisión

- Número máximo de iteraciones (maxIter)

Paso 3: Definición de variables, función objetivo y restricciones $F_1 P_{ii} Q_{ii} P_{loss} P_a Q_a, V^{min}, V^{max}, T_k^{min}, T_k^{max}, Q_c^{min}, Q_c^{max}$

Paso 4: Definición del modelo matemático como el OAPR con MVMO

Pase 5: Optimizar OAPR minimizando F. R_{F1}= Minimizar F₁ usando MATPOWER $\min(F_1) = R_{F1}$

Paso 6: Determinación de n soluciones a encontra

Inicializar soluciones[j] para j = 1, ..., n

for i = 1: maxIter
Calcular:
$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_i(j)$$

 $v_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_i(j) - \bar{x}_i)^2$ $S_i = -\ln(v_i) \times f_s$

for i = 1: n if Evaluar(soluciones[j], S_i) = Mejorar then soluciones[j] = Actualizar_solución(soluciones[j], S_i) end if end for

if Criterio_de_convergencia(soluciones) = Verdadero then break

end if end for

return Mejores soluciones(soluciones)

Paso 7: Visualizar Resultados

F1, Mejores soluciones, Plore, Voltajes, taps, banco de capacitores Paso 8: Exportar resultados

Paso 9: FIN

4.3.2 Configuración del algoritmo **MVMO Y PSO**

El algoritmo MVMO fue configurado con una población de 10 partículas, un máximo de 300 iteraciones y un rango normalizado que va de [0,1] para las variables de control, con ello se permite tener una exploración más dinámica en el espacio de búsqueda mediante la función de mapeo que optimiza las mejores soluciones individuales.

Por otro lado, el algoritmo del PSO se configuró con los parámetros $c_1 = c_2 = 2$ y $w_{max} = 0.9$ y $w_{min} = 0.5$. Para el algoritmo MVMO, se estableció un rango de manera $0.9 \le fs \le 1$, en el cual el factor de escalamiento (f_s) se incrementa en cada iteración para lograr un control más gradual. Esto también permite que el factor de forma (S_i) varíe en cada iteración, reduciendo el riesgo de estancamiento en valores extremos y facilitando la obtención de soluciones óptimas.

Las variables de control incluyen las posiciones de los taps en los transformadores y los taps los en compensadores estáticos limitadas como se explicó previamente con 21 pasos discretos donde las restricciones consideradas son:

- Balance de potencia activa y • reactiva.
- Límites de voltaje en las barras.
- Capacidad máxima de los dispositivos de control.

Una vez descrito el algoritmo MVMO, se procede a su implementación en el sistema IEEE de 39 barras, con el objetivo de validar su eficacia para el ajuste óptimo de la potencia reactiva para ello se describe el caso base de estudio, el sistema a desarrollar y los casos de estudios.

4.4 Caso base de estudio

Para comprobar la eficacia del algoritmo PSO y MVMO propuesto en el presente artículo se ha implementado las diferentes simulaciones mediante el software de Matlab R2024b en un sistema con un Intel Core i7 8550U de 8 núcleos a 2.00 GHz y 8 GB de RAM.

4.4.1 Sistema de 39 barras del IEEE. Para el presente análisis se considera el sistema eléctrico IEEE de 39 barras, el cual

está conformado por 10 unidades generadoras, 12 transformadores y 34 líneas de transmisión, como se observa en la figura 18.

Este sistema fue seleccionado como modelo representativo por su complejidad y aplicabilidad en problemas reales. Se definieron las condiciones iniciales del sistema, incluyendo los límites de voltaje (0.9-1.1 p.u.), demanda y capacidades de generación.

Los datos de líneas, reactancias, así como también los datos de los transformadores capacidad de generadores y demanda del sistema eléctrico se encuentran en el apartado de anexos presentes en la sección IX.



Figura 18. Sistema de referencia IEEE de 39 nodos.

4.4.2 Voltajes iniciales caso base

Como caso base en el sistema propuesto se tienen los siguientes voltajes mostrados a continuación en la figura 19.



Figura 19. Voltajes iniciales caso base.

4.4.3 Estudio de caso 1

Para el primer caso de estudio, se propone la implementación de 14 capacitores en las barras 4, 9, 12, 14, 21, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 34, 37, 39, con valores de 6 y 10 Mvar respectivamente. Estos valores de compensación reactiva, así como también ubicaciones sus fueron seleccionadas tomando como base а los trabajos relacionados descritos en la sección correspondiente en específico en la referencia [5], donde se plantea esta configuración en dichas barras como una solución efectiva para el mismo sistema base que se está trabajando en el presente artículo.

Además, tanto los compensadores, así como los taps de los transformadores fueron configurados con 21 pasos. Este número de posiciones fue elegido con base a los resultados obtenidos durante las simulaciones realizadas, las cuales demostraron que un mayor número de pasos permite ajustes más precisos en los parámetros del sistema, cabe destacar que esta configuración de 21 pasos es coherente en aplicaciones prácticas en sistemas reales por lo que se refuerza su viabilidad técnica. Este nivel de precisión es fundamental para poder lograr una distribución eficiente de la potencia reactiva, optimizar los niveles de voltaje y reducir significativamente las pérdidas de potencia activa, contribuyendo así al cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

El diagrama del sistema con los compensadores estáticos se muestra a continuación en la figura 20.



Figura 20. Diagrama con compensadores estáticos caso de estudio 1.

4.4.4 Estudio de caso 2

Para el caso de estudio número 2, se propone la colocación de compensadores en las barras 15, 16, 18, 19 y 20, cada uno con una potencia de 2 Mvar, siguiendo la configuración planteada en la referencia [1]. Al igual que en el caso de estudio número 1, tanto los valores como las ubicaciones de los compensadores se seleccionaron con base en este mismo caso de referencia. Además, los taps de los transformadores y los compensadores fueron configurados con 21 posiciones, lo que permite un ajuste preciso y consistente con los resultados obtenidos en las simulaciones. А continuación, en la figura 21 se presenta el

diagrama del sistema con los compensadores implementados.



Figura 21. Diagrama con compensadores estáticos caso de estudio 2.

5 Análisis de Resultados

Para el caso de estudio uno con 6 y 10 Mvar se considera 26 variables de control de las cuales 12 son las variables que corresponden а los taps de los transformadores 14 у variables que corresponden los taps a de los compensadores estáticos todas estas variables son discretas.

5.1 Análisis del caso de estudio 1

5.1.1 Compensadores estáticos de 6 Mvar.

En este estudio, la Figura 22 presenta los resultados de las pérdidas de potencia obtenidas mediante los algoritmos PSO y MVMO. Como se observa, el algoritmo PSO converge en aproximadamente las primeras 100 iteraciones, mientras que el MVMO alcanza la convergencia alrededor de la iteración 180. No obstante, el MVMO inicia con valores de pérdidas menores en comparación con el PSO.

Este comportamiento se explica por las características particulares de cada

algoritmo. El PSO tiende a converger rápidamente en las primeras iteraciones, gracias a su enfoque en la actualización de la velocidad de cada partícula y en la información la mejor posición de encontrada. Esto le permite alcanzar soluciones aceptables en menos tiempo, aunque puede provocar valores iniciales de pérdidas más altos. Cabe mencionar que ambos algoritmos inician con una población de 10 partículas. En contraste, el MVMO emplea una estrategia de búsqueda más equilibrada y conservadora, que permite obtener valores iniciales de pérdidas más cercanos al óptimo, aunque a expensas de una mayor cantidad de iteraciones para alcanzar la convergencia completa.



Figura 22. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 6 Mvar.

En la tabla 2 se puede observar que el PSO necesita un tiempo ligeramente mayor al MVMO para poder completar todas sus iteraciones con una diferencia de aproximadamente de 22 segundos sin embargo como se muestra en la figura 22 el PSO converge de manera mucho más rápida alcanzando niveles de pérdidas ligeramente inferiores al del MVMO con una diferencia de 0.0486 MW, esta diferencia aunque pequeña se debe a la capacidad del PSO para explotar rápidamente las áreas que son las más prometedoras del espacio de búsqueda y también a la influencia de las

mejores posiciones encontradas por las partículas por lo que le permite al PSO ajustar las variables de optimización como son en este caso los taps de los transformadores y los capacitores para poder reducir las pérdidas de potencia de una manera mucho más efectiva.

Tabla 2. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO IEEE 39 buses con 6 Mvar.

Algoritmo	Pérdidas (MW)	Tiempo (s)
PSO	42.5363	57.27
MVMO	42.5849	35.20

En la figura 23 se presentan los resultados de los voltajes obtenidos en todos los nodos de la red, comparando el caso base con el caso de estudio 1, en el cual se implementaron 6 Mvar de compensación reactiva.

De acuerdo con la figura 22, los voltajes cumplen con el rango definido en la programación, en el caso del PSO el voltaje más bajo se registra en la barra 20 exactamente con un valor de 0.9871 p.u en cambio el más alto en la barra 29 con un valor de 1.0834 p.u ;por otro lado con el método MVMO el voltaje mínimo se encuentra en la barra 20 con 0.9456 p.u mientras que el valor máximo se registra en la barra 22 con un valor de 1.0844 p.u.

A pesar de estas variaciones, se cumplen todas las restricciones de nivel de voltaje establecidas. Es importante señalar que en el caso base, los voltajes desde el nodo 30 hasta el 39 se mantienen sin cambios, así como en los resultados de PSO y MVMO, Esto sugiere que la compensación reactiva ha tenido un efecto de elevación en los niveles de voltaje en comparación con el caso base.



Figura 23. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 6 Mvar.

Los resultados de las posiciones de los taps de los transformadores y los compensadores estáticos, evaluados mediante ambos métodos y considerando 21 posiciones, se presentan en las tablas 3 y 4. En la tabla 3 se evidencia que el método PSO suele mantener los taps de la mayoría de los transformadores en su valor más alto. incluyen de Ejemplos esto los transformadores T2537, T2938, T2235, T1112 y T1213, con solo el T2034 en la posición 0. En contraste, el método MVMO también coloca varios transformadores en la posición máxima, pero ajusta otros a posiciones más bajas, incluso a valores negativos, como en el caso de los

transformadores T230 y T2034. Esto indica que MVMO realiza un ajuste más fino en los taps, buscando una solución más precisa.

Este comportamiento queda igualmente reflejado en la figura 22, la cual muestra las pérdidas de potencia correspondientes a cada algoritmo. En ella se observa que MVMO converge de manera más lenta que PSO, lo cual sugiere que explora un mayor rango de soluciones. Como resultado, MVMO utiliza una variedad de posiciones en los taps de los transformadores, lo que le permite obtener un control más detallado y equilibrado en el ajuste del perfil de voltaje del sistema.

Transformador	PSO-Taps	PSO-Posición Taps	MVMO- Taps	MVMO-Posición Taps
T2537	1.068	10	1.068	10
T230	1.046	7	0.932	-10
T2938	1.064	10	1.068	10
T2235	1.068	10	1.068	10
T1112	1.068	10	1.018	3
T1213	1.068	10	0.999	0
T631	1.068	10	1.068	10
T1920	1.068	10	1.068	10
T1933	1.068	10	1.068	10
T2034	1.00	0	0.932	-10
T2336	1.041	6	1.068	10
T1032	1.068	10	1.068	10

Tabla 3. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 6 Mvar.

La tabla 4 por otro lado muestra los resultados que se obtuvieron para los valores en posiciones de los capacitores del sistema para ambos métodos implementados en este trabajo, se puede apreciar que el MVMO presenta una mayor variabilidad en las posiciones de los capacitores empleando un rango más amplio de valores donde se incluye posiciones altas y bajas e incluso extremos negativos esto sugiere que el MVMO se encarga de buscar de manera más precisa cada posición de los capacitores buscando minimizar las pérdidas de potencia y mejorar las condiciones del perfil de voltaje en el sistema.

Aunque esta exploración adicional conlleva una convergencia más lenta, permite al MVMO alcanzar soluciones más ajustadas y específicas, explorando configuraciones que el PSO no llega a considerar.

Compensador	PSO- Mvar	PSO-posición Tap	MVMO- Mvar	MVMO- posición Tap
Bus 9	1.68	-4	1.69	-4
Bus 14	3.32	1	3.38	1
Bus 27	2.53	-2	5.27	8
Bus 28	3.22	1	2.13	-3
Bus 37	3.41	1	2.36	-2
Bus 39	1.98	-3	6	10
Bus 4	2.67	-1	4.66	6
Bus 12	1.24	-6	3.02	0
Bus 21	4.13	4	4.63	5
Bus 25	1.87	-4	2.35	-2
Bus 26	3.09	0	4.95	7
Bus 29	2.55	-1	1.91	-4
Bus 31	4.26	4	0.82	-7
Bus 34	3.20	1	3.51	2

Tabla 4. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 6 Mvar.

La figura 24 indica la cargabilidad del grupo de los generadores antes y después de la optimización donde se puede apreciar que con 6 Mvar se logró reducir al grupo de generadores con 99.1 Mvar, es decir que hubo una reducción del 7.773% en la cargabilidad de los generadores con la implementación de compensadores estáticos de 6 Mvar.



Figura 24. Cargabilidad de los generadores con 6 Mvar.

5.1.2 Compensadores estáticos de 10 Mvar

Para el caso de estudio donde ahora se considera los compensadores un valor de 10 Mvar se obtuvo las siguientes pérdidas en potencia activa que se muestran en la figura 25 tanto del método por PSO y MVMO de igual manera que en la figura 22 se puede observar que ambos métodos convergen alrededor de las 100 a 150 primeras iteraciones.



Figura 25. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 10 Mvar.

La tabla 5 en cambio muestra los resultados comparativos de los dos métodos en lo que

respecta a tiempos de ejecución junto con pérdidas de potencia activa, ambos utilizando un conjunto de 10 partículas; los datos indican que el método PSO logra una optimización adicional de 0.0422 MW con respecto al MVMO sin embargo en el MVMO se destaca por su mayor rapidez en alcanzar valores muy cercanos al óptimo.

Tabla 5. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO IEEE 39 buses con 10 Mvar.

Algoritmo	Pérdidas (MW)	Tiempo (s)
PSO	42.4578	53.14
MVMO	42.50	34.72

En la figura 26 se presenta los niveles de voltaje obtenidos para cada nodo del sistema para el caso base y también para el estudio de caso 1 en el mismo que se implementa una compensación de 10 Mvar de compensación reactiva, se observa además que el método MVMO registra el voltaje más bajo en la barra 8 con un valor de 0.9615 p.u mientras que en el PSO el menor valor registrado en la barra 20 con un valor de 0.9877 p.u; a diferencia de la compensación con 6 Mvar esta configuración muestra una mejora notable en los niveles de voltaje, especialmente en el bus 20.

Además, se observa que los voltajes en ambos métodos son muy similares bajo esta compensación.



Figura 26. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 10 Mvar.

Los resultados relacionados con las posiciones de los taps de los transformadores y de los sistemas de compensación estática se detallan en las tablas 6 y 7. En la Tabla 6, se observa que, al igual que en casos anteriores, el método PSO tiende a ubicar la mayoría de los taps de los transformadores en su posición máxima. En contraste, el método MVMO realiza una exploración más exhaustiva, generando resultados más variados. Un ejemplo notable es el tap del transformador T631, que MVMO sitúa en su posición mínima. Esta diferencia sugiere que MVMO adopta un enfoque de optimización más detallado, evaluando una gama más amplia de posiciones en los taps para mejorar el desempeño del sistema.

Transformador	PSO-Taps	PSO-Posición Taps	MVMO- Taps	MVMO-Posición Taps
T2537	1.066	10	1.068	10
T230	1.04	6	1.068	10
T2938	1.06	9	1.059	9
T2235	1.068	10	1.068	10
T1112	1.067	10	1.068	10
T1213	1.068	10	1.068	10
T631	1.068	10	0.932	-10
T1920	1.068	10	1.037	6
T1933	1.068	10	1.068	10
T2034	1.00	0	1.068	10
T2336	1.039	6	1.068	10
T1032	1.068	10	1.068	10

Tabla 6. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 10 Mvar.

En la tabla 7 se detalla los valores obtenidos para los compensadores y sus correspondientes posiciones. Se observa claramente que el método MVMO proporciona soluciones con valores más altos en los capacitores, como en el caso del bus 4, donde alcanza un valor de 8.80 Mvar en la posición 8. En comparación, el método PSO registra su valor máximo en los buses 12 y 31, con un valor de 6.72 Mvar en la posición 3.

Compensador	PSO- Mvar	PSO-posición Tap	MVMO- Mvar	MVMO- posición Tap
Bus 9	4.43	-1	6.47	3
Bus 14	5.83	2	6.37	3
Bus 27	5.87	2	4.69	-1
Bus 28	5.32	1	5.84	2
Bus 37	4.65	-1	6.55	3
Bus 39	3.26	-3	3.31	-3
Bus 4	6.23	2	8.80	8
Bus 12	6.72	3	8.05	6
Bus 21	5.62	1	4.27	-1
Bus 25	4.14	-2	6.07	2
Bus 26	5.24	0	2.35	-5
Bus 29	6.10	2	2.35	-5
Bus 31	6.62	3	5.28	1
Bus 34	4.38	-1	5.73	1

Tabla 7. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 10 Mvar.

En la figura 27 se indica la cargabilidad de los generadores para este caso donde se obtuvo una reducción del 11.436% en la carga de los generadores con respecto al caso base.



Figura 27. Cargabilidad de los generadores con 10 Mvar.

5.2 Análisis del estudio de caso 2

Para el estudio de caso 2 se tiene una compensación de 2 Mvar donde se considera un total de 17 variables de control de las cuales 12 variables corresponden a los taps de los transformadores junto con 5 variables en los compensadores, todas discretas ubicadas en las barras 15,16,18,19 y 20 tal como se indica en la figura 20.

La figura 28 muestra claramente que en el método PSO las pérdidas iniciales son de 46.36 MW mientras que en el MVMO comienzan en 45.64 MW con una diferencia de 0.72 MW entre ambos métodos; a diferencia del estudio previo en el caso de compensadores de 6 y 10 Mvar las pérdidas iniciales disminuyeron significativamente alcanzando un valor de 5.91 MW por el PSO y 3.33 MW en el caso del MVMO.

Además, se aprecia que PSO converge rápidamente, mientras que MVMO alcanza

la convergencia alrededor de la iteración 150.



Figura 28. Pérdidas de potencia PSO y MVMO con compensadores de 2 Mvar.

La tabla 8 presenta los tiempos de ejecución y la potencia optimizada alcanzada por cada algoritmo. Similar al caso de estudio anterior, se observa que el método MVMO es significativamente más rápido en resolver la optimización, logrando valores de potencia optimizada muy cercanos a los obtenidos por el método PSO, con una diferencia de solo 0.034 MW.

 Tabla 8. Resultados de las pérdidas en PSO y MVMO

 IEEE 39 buses con 2 Mvar.

Algoritmo	Pérdidas	Tiempo (s)
	(MW)	
PSO	42.615	63.76
MVMO	42.649	40.62

La figura 29 muestra los voltajes de todos los buses del sistema, evidenciando una mejora significativa en el perfil de voltaje con esta implementación. Ambos métodos obtienen valores muy similares en la mayoría de los buses, con excepción del bus 12, donde PSO alcanzó un valor de 1.0695 p.u , mientras que MVMO registró un voltaje de 1.029 p.u. Esta diferencia refleja un ajuste óptimo de la potencia reactiva en el sistema, contribuyendo a la mejora del perfil de voltaje general.



Figura 29. Perfil de voltaje en el sistema IEEE 39 con compensación reactiva de 2 Mvar.

La tabla 9 y 10 muestran los resultados obtenidos en los taps de los transformadores y los compensadores, así como la óptima posición de estos.

Transformador	PSO-Taps	PSO-Posición Taps	MVMO- Taps	MVMO-Posición Taps
T2537	1.055	8	1.046	7
T230	1.033	5	1.048	7
T2938	1.068	10	1.068	10
T2235	1.067	10	1.068	10
T1112	1.068	10	1.010	2
T1213	1.068	10	1.068	10
T631	1.068	10	1.068	10
T1920	0.990	-1	0.932	-10
T1933	1.068	10	1.068	10
T2034	1.068	10	1.068	10
T2336	1.068	10	1.068	10
T1032	1.068	10	1.048	7

Tabla 9. Taps en transformadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 2 Mvar.

Tabla 10. Compensadores en PSO y MVMO IEEE 39 buses 2 Mvar.

Compensador	PSO- Mvar	PSO-posición Tap	MVMO- Mvar	MVMO- posición Tap
Bus 15	0.97	0	1.968	10
Bus 16	0.67	-3	2	10
Bus 18	1.52	5	2	10
Bus 19	1.25	3	0.03	-10
Bus 20	1.33	3	1.97	10

Para este último caso en la cargabilidad de los generadores se obtuvo una reducción del 4.776% como se indica en la figura 30.



Figura 30. Cargabilidad de los generadores con 2 Mvar.

6 Conclusiones

En el presente trabajo se evaluó el impacto de la implementación de taps en compensadores y transformadores en el sistema IEEE de 39 barras, empleando los algoritmos MVMO y PSO en el OAPR. A continuación, se indican las principales conclusiones obtenidas:

Los resultados que se obtuvieron demuestran que tanto ambos métodos de optimización como lo es el MVMO y el PSO son eficaces al momento de optimizar el ajuste de potencia reactiva en los SEP, sin embargo, MVMO demostró una capacidad superior al explorar soluciones un poco más diversas ajustando en un mayor rango las posiciones tanto de los taps y los compensadores.

Se logró una reducción en cuanto a pérdidas de potencia activa al implementar estos métodos confirmando así su capacidad para poder resolver problemas no lineales y complejos como lo es el OAPR en el sistema IEEE de 39 barras donde por un lado PSO tuvo una convergencia más rápida mientras que MVMO obtuvo mayor diversidad y con ello estabilidad en los resultados finales.

Los compensadores estáticos contribuyeron significativamente a la reducción de las pérdidas de potencia activa, para el caso de los compensadores con una capacidad de 6 Mvar se logró una reducción del 7.77 % en lo que respecta a la cargabilidad de los generadores con lo que se refleja una disminución efectiva en las pérdidas y un alivio en la carga del sistema. Para los compensadores de 10 Mvar se observó una mejora adicional, con pérdidas finales de potencia activa cercanas a 42.46 Mw utilizando el PSO y 42.50 Mw con el MVMO confirmando así su utilidad en la optimización del sistema.

Los resultados de esta investigación demostraron que la regulación de voltaje fue efectiva para mantener los niveles dentro de los rangos permisibles los cuales fueron establecidos en la simulación de 0.9 a 1.1 en p.u. Por ejemplo, en el caso con los compensadores de 6 Mvar, los voltajes en todas las barras se mantuvieron dentro del especificado sobresaliendo rango un incremento notable en los niveles mínimos de voltaje como el observado en la barra 20 con valores iniciales menores a 0.95 p.u a niveles superiores luego de la optimización. Con 10 Mvar se logró una mejora adicional en la estabilidad de los perfiles de voltaje con valores máximos cercanos a 1.08 p.u en varias barras críticas del sistema.

La combinación de los taps de los compensadores y los taps de los transformadores demostró ser una estrategia válida y eficiente para reducir las pérdidas de potencia activa y mejorar la estabilidad del sistema. La exploración más detallada del algoritmo MVMO permitió ajustes más precisos en los taps mientras que el PSO logró una convergencia más rápida hacia soluciones óptimas, en ambos casos, los resultados demuestran que la contribución de ambos taps es técnica y operativamente justificable.

7 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos en esta investigación pueden sentar las bases para el desarrollo de nuevos casos de estudio y simulaciones en el campo de:

Poder evaluar los algoritmos MVMO junto con PSO en sistemas de potencia con mayor escala o también con características específicas como lo son las redes de distribución con un enfoque en la integración de energías renovables.

Explorar una optimización que ahora integre múltiples objetivos, como lo es la reducción de pérdidas de potencia activa, mejorar el perfil de voltaje y además la minimización de costos operativos.

Realizar un estudio detallado que evalúe el impacto económico de las soluciones propuestas en este trabajo donde se consideren la reducción de pérdidas, la vida útil de los equipos y también el ahorro en los costos de operación.

Realizar un análisis y estudio en un sistema que incorpore la variabilidad de la carga a lo largo del tiempo, considerando períodos de mínima, media y máxima carga. El objetivo será determinar la posición óptima de los taps en cada escenario, minimizando los costos operativos y evaluando el impacto en la vida útil de los equipos involucrados.

8 Referencias

- W. Li, H. Bao, S. Wang, and R. Wang, "A method of reactive power compensation dispatch based on matrix superposition theorem," 2008 *China Int. Conf. Electr. Distrib. CICED 2008*, pp. 1–7, 2008, doi: 10.1109/CICED.2008.5211800.
- [2] J. L. Rueda and I. Erlich, "Optimal dispatch of reactive power sources by using MVMOs optimization," *IEEE Symp. Comput. Intell. Appl. Smart Grid, CIASG*, vol. 0, no. 1, pp. 29–36, 2013, doi: 10.1109/CIASG.2013.6611495.
- [3] J. L. Rueda and I. Erlich,
 "Evaluation of the mean-variance mapping optimization for solving multimodal problems," *Proc. 2013 IEEE Symp. Swarm Intell. SIS 2013* - 2013 *IEEE Symp. Ser. Comput. Intell. SSCI 2013*, pp. 7–14, 2013, doi: 10.1109/SIS.2013.6615153.
- [4] H. Yoshida, K. Kawata, Y. Fukuyama, S. Takayama, and Y. Nakanishi, "A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment," *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. WINTER MEETING, p. 498, 2001, doi: 10.1541/ieejpes1990.119.12 1462.
- [5] J. Trujillos, "Optimización Multiobjetivo De Flujos De Potencia En Redes DeDistribución Basado En El Control Volt-Var," 2019.
- [6] K. Ramadhan, K. Yonathan, I. M. Ardita, F. H. Jufri, and A. R. Utomo, "Voltage stability improvement using load shedding and static VAR compensator (SVC): Study case of senayan-sambas

power system," 2nd IEEE Int. Conf. Innov. Res. Dev. ICIRD 2019, 2019, doi:

10.1109/ICIRD47319.2019.907475.

- [7] S. Abdel-Fatah, M. Ebeed, S. Kamel, and J. Yu, "Reactive Power Dispatch Solution with Optimal Installation of Renewable Energy Resources Considering Uncertainties," *IEEE Conf. Power Electron. Renew. Energy, CPERE* 2019, pp. 118–122, 2019, doi: 10.1109/CPERE45374.2019.898005 6.
- [8] T. H. Khoa, P. M. Vasant, M. S. B. Singh, and V. N. Dieu, "Swarm based mean-variance mapping optimization (MVMOs) for economic dispatch problem with valve-Point effects," *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, vol. 2015-Janua, pp. 59–63, 2014, doi: 10.1109/IEEM.2014.7058600.
- [9] Q. Wu and J. Ma, "Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 3, pp. 1243–1249, 1995, doi: 10.1109/59.466531.
- [10] M. De and S. K. Goswami,
 "Optimal reactive power procurement with voltage stability consideration in deregulated power system," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2078–2086, 2014, doi:

10.1109/TPWRS.2014.2308304.

- [11] M. Liu, S. K. Tso, and Y. Cheng, "An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactivepower optimization of large-scale power systems with discrete control variables," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 4, pp. 982–991, 2002, doi: 10.1109/TPWRS.2002.804922.
- [12] J. Dang, F. Tang, J. Wang, X. Yu,

and H. Deng, "A Differentiated Dynamic Reactive Power Compensation Scheme for the Suppression of Transient Voltage Dips in Distribution Systems," *Sustain.*, vol. 15, no. 18, 2023, doi: 10.3390/su151813816.

- [13] N. M. Saad, M. Z. Sujod, M. I. M. Ridzuan, and M. F. Abas,
 "Optimization for Distributed Generation Planning in Radial Distribution Network using MVMO-SH," *ICSGRC 2019 - 2019 IEEE 10th Control Syst. Grad. Res. Colloquium, Proceeding*, no. August, pp. 115–120, 2019, doi: 10.1109/ICSGRC.2019.8837082.
- [14] A. F. Porras-Ortiz, J. Layedra, and H. Arcos, "Active power loss minimization in the Santa Cruz and Baltra hybrid energy system using particle swarm optimization," 2015 *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. ISGT LATAM* 2015, pp. 429–434, 2016, doi: 10.1109/ISGT-LA.2015.7381193.
- [15] C. Barrera-Singana, A. F. Porras-Ortiz, A. Valenzuela, H. Arcos, and W. Pavon, "Minimization of Active Power Losses in a Multi-Terminal HVDC Grid: Alternative Approach Using Meta-Heuristics Algorithms," 2022 IEEE Glob. Conf. Comput. Power Commun. Technol. GlobConPT 2022, pp. 25–30, 2022, doi: 10.1109/GlobConPT57482.2022.99 38322.
- [16] V. I. Zakutsky and M. G. Gadzhiev, "Coordinated Voltage and Reactive Power Control of Power System with Wind Farms and SVCs as the ORPD problem," *Proc. 2022 4th Int. Youth Conf. Radio Electron. Electr. Power Eng. REEPE 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/REEPE53907.2022.973149 1.

- [17] D. C. L. Tamayo, W. M. Villa-Acevedo, and J. M. López-Lezama, "Despacho óptimo de potencia reactiva considerando un abordaje multiperíodo," *Inf. tecnológica*, vol. 32, no. 6, pp. 179–190, 2021, doi: 10.4067/s0718-07642021000600179.
- [18] F. M. Gonzalez-Longatt, "Control de Voltaje y Potencia Reactiva,"
 [Manuscrito técnico o documento académico interno], no. edición especificada, pp. 1–36, 2004.
 [Accedido: Dic. 27, 2024].
- [19] L. Xu, T. Chen, L. Yang, J. Chen, L. Du, and H. Zhong, "Reactive Power and Voltage Coordinated Control of Wind Farm for Parallel Running STATCOM," 2019 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Asia, ISGT 2019, pp. 1414–1418, 2019, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8880872.
- [20] D. Sun *et al.*, "Research on Voltage Reactive Power Control of Distributed PV Which Access to Distribution Network," 2023 IEEE 5th Int. Conf. Power, Intell. Comput. Syst. ICPICS 2023, pp. 1130–1135, 2023, doi: 10.1109/ICPICS58376.2023.102357 08.
- [21] L. Yaoyun, "Research on Voltage and Reactive Power Control Strategy Based on Intelligent Detection of Abnormal Data and Coordinated Control of Dynamic Reactive Power," 2022 IEEE 5th Int. Conf. Autom. Electron. Electr. Eng. AUTEEE 2022, pp. 71–76, 2022, doi: 10.1109/AUTEEE56487.2022.9994 561.
- [22] P. Kundur, "Power System Stability and Control - Prabha Kundur -McGraw-Hill Education." p. 1176, 1994. [Online]. Available:

https://www.mheducation.co.in/html /9780070635159.html

- [23] Z. Ren, Z. Yin, and W. Bao,
 "Control strategy and simulation of permanent magnet synchronous wind power generator," 2009 Int. Conf. Energy Environ. Technol. ICEET 2009, vol. 1, pp. 568–571, 2009, doi: 10.1109/ICEET.2009.144.
- [24] E. Davoodi, F. Capitanescu, and L. Wehenkel, "A Methodology to Evaluate Reactive Power Reserves Scarcity During the Energy Transition," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 5, pp. 4355–4368, 2023, doi: 10.1109/TPWRS.2022.3216639.
- [25] J. J. Grainger y W. D. Stevenson, Análisis de Sistemas de Potencia, traducción al español, Pearson Education, 1995. [Accedido: Dic. 27, 2024].
- [26] J. L. García Ortega, "Despacho Óptimo de Potencia Reactiva Utilizando Enjambre de Partículas para Reducción de Pérdidas en Sistemas de Potencia," Trabajo de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, diciembre 2021.
- [27] J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, "Power Systems Analysis and Design 4th Edition." p. 768, 2007. [Online]. Available: http://www.amazon.com/dp/053454 8849
- [28] F. M. Gonzalez-Longatt, "Control de Potencia Reactiva - Voltaje," p. 52, 2004.
- [29] Y. Lin, J. Gan, and Z. Wang, "On-Line Monitoring of Shunt Capacitor Bank Based on Relay Protection Device," *Energies*, vol. 16, no. 4, 2023, doi: 10.3390/en16041615.
- [30] A. Sode-Yome and N. Mithulananthan, "Comparison of shunt capacitor, SVC and

STATCOM in static voltage stability margin enhancement," *Int. J. Electr. Eng. Educ.*, vol. 41, no. 2, pp. 158–171, 2004, doi: 10.7227/IJEEE.41.2.7.

- [31] G. Quintana de Basterra, J. A. González-Cueto, and Z. Garcia Sánchez, "Implementación de modelos de control de los SVC en el programa PSX TT -Implementation of SVC models in programs PSX," *Ing. Energética*, vol. 36, no. 1, pp. 61–71, 2015, [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script =sci_arttext&pid=S1815-59012015000100007&lang=es%0A http://scielo.sld.cu/pdf/rie/v36n1/rie 07115.pdf
- [32] C. Jos and C. Gonz, "Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)," *Compensador Estatico Potencia React. Svc*, 2003.
- [33] S. V. Smolovik, V. S. Chudny, A. S. Liamov, I. E. Ryndina, and A. I. Denisenko, "Application of a Static Synchronous Series Compensator to Increase the Transient Stability of a Powerful HPP," *Proc. 2021 IEEE Conf. Russ. Young Res. Electr. Electron. Eng. ElConRus 2021*, pp. 1562–1565, 2021, doi: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396 305.
- [34] J. Yang, "Compensador estático síncrono STATCOM modelado y simulación," *Glob. Shad. Africa Neoliberal World Order*, vol. 44, no. 2, pp. 8–10, 2006.
- [35] A. Garcés Ruiz, W. J. Gil González, and O. D. Montoya Giraldo, *Introducción a la estabilidad de* sistemas eléctricos de potencia, no. December. 2023. doi: 10.22517/9789587228960.
- [36] S. G. Constante Flores, "Ubicación y dimensionamiento óptimos de

compensación reactiva utilizando optimización por enjambre de partículas (PSO)," Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, Feb. 2016.

- [37] I. Erlich, G. K. Venayagamoorthy, and N. Worawat, "A Mean-Variance Optimization algorithm," 2010 IEEE World Congr. Comput. Intell. WCCI 2010 - 2010 IEEE Congr. Evol. Comput. CEC 2010, pp. 1–6, 2010, doi: 10.1109/CEC.2010.5586027.
- [38] C. J. López-Salgado, O. Añó, D. M. Ojeda-Esteybar, and F. Porras, "Joint optimization of energy and reserve in deregulated power markets: Alternative approach using Mean Variance Mapping Optimization," 19th Power Syst. Comput. Conf. PSCC 2016, 2016, doi: 10.1109/PSCC.2016.7540934.
- [39] S. Curillo, W.; Espinosa,
 "Ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución," *Tesis*, pp. 1–100, 2013, [Online]. Available: http://dspace.ups.edu.ec/handle/123 456789/13224%0Ahttp://dspace.ups .edu.ec/bitstream/123456789/5081/1 /UPS-CYT00109.pdf

9 Anexos

La información sobre los diferentes componentes del sistema de 39 barras se presenta en las tablas 11, 12 y 13 que se muestran a continuación tomadas de la referencia [39].

	Tubla 11. Ochera		0.
Generador	Ubicación	Tipo de Barra	Potencia
			(MW)
G1	Barra 39	PV	1000
G2	Barra 31	Slack	0
G3	Barra 32	PV	650
G4	Barra 33	PV	632
G5	Barra 34	PV	508
G6	Barra 35	PV	650
G7	Barra 36	PV	560
G8	Barra 37	PV	540
G9	Barra 38	PV	830
G10	Barra 30	PV	250

Tabla 11. Generadores del sistema eléctrico.

Carga	I Ibicación	P (MW)	O(Myar)
	Dama 2	1(WW)	$Q(1v_1v_{a1})$
L 3	Barra 3	322	2.4
L 4	Barra 4	500	184
L 7	Barra 7	233.8	94
L 8	Barra 8	522	176
L 12	Barra 12	7.5	88
L 15	Barra 15	320	153
L 16	Barra 16	329	32.3
L 18	Barra 18	158	30
L 20	Barra 20	628	103
L 21	Barra 21	274	115
L 23	Barra 23	247	94.6
L 24	Barra 24	309	92.2
L 25	Barra 25	224	47.2
L 26	Barra 26	139	17
L 27	Barra 27	291	75.5
L 28	Barra 28	206	27.6
L 29	Barra 29	283	26.9
L 31	Barra 31	9.2	4.6
L 39	Barra 39	1104	250

Para la tabla 13 se toma en cuenta una potencia base de 100 MVA los valores mostrados se encuentran en por unidad (p.u)

Trafo	Ubicación	R (p.u)	X (p.u)
Tr 1	Barra 11	0.0016	0.0435
Tr 2	Barra 13	0.0016	0.0435
Tr 3	Barra 31	0.0000	0.0250
Tr 4	Barra 32	0.0000	0.0200
Tr 5	Barra 33	0.0007	0.0142
Tr 6	Barra 34	0.0009	0.0180
Tr 7	Barra 35	0.0000	0.0143
Tr 8	Barra 36	0.0005	0.0272
Tr 9	Barra 37	0.0006	0.0232
Tr 10	Barra 30	0.0000	0.0181
Tr 11	Barra 38	0.0008	0.0156
Tr 12	Barra 20	0.0007	0.0138

Tabla 13. Datos en p.u transformadores sistema IEEE 39 buses.

9.1 Matriz de Estado del Arte

	ÓPTIN	ARTÍCULO ARTÍCU																							
		DATOS			TF	EMÁTIO	CA		FORM	MULAC	ION DI	EL PROB	LEMA	REST PI	TRICCI DEL ROBLEI	ONES MA	Al O	LGOI PTIM	RITM IIZAO	O DE CIÓN		SC PR	LUCIÓ OPUES	ON STA	
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
1	2008	A method of reactive power compensation dispatch based on matrix superposition theorem	1	¥	¥			æ		₩	₩			₩	æ					¥			×		
2	2019	Voltage stability improvement using load shedding and static VAR compensator (SVC)	3			×	¥		æ	₩		₩		₩		¥			₩		×			×	
3	2019	Reactive Power Dispatch Solution with Optimal Installation of Renewable Energy Resources Considering Uncertainties	8	₩		¥			₩		₩									₩				₩	
4	2015	Swarm based mean-variance mapping optimization (MVMOs) for economic dispatch problem with valve- Point effects	3	æ	₩		₩		₩		¥	¥	¥			₩	₩			æ				₩	₩
5	1995	Power system optimal reactive power dispatch using evolutionary programming	260	æ			æ	₩		¥		¥								₩		×			₩
6	2014	Optimal reactive power procurement with voltage stability consideration in deregulated power system	59	æ	æ					₩	æ					æ			₩			æ		×	

		DATOS			TF	EMÁTIO	CA			FORM Pl	ULACIO ROBLE	ON DEI MA	L	REST PF	TRICCI DEL ROBLEI	ONES MA	AL Ol	LGOR PTIM	ITMO IZAC) DE IÓN		S Pl	OLUC ROPUI	(ÓN ESTA	
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
7	2002	An extended nonlinear primal-dual interior-point algorithm for reactive-power optimization of large-scale power systems with discrete control variables	130	¥			æ			¥	Æ					¥				麼		Æ			
8	2023	A Differentiated Dynamic Reactive Power Compensation Scheme for the Suppression of Transient Voltage Dips in Distribution Systems	2	₩															₩						₩
9	2019	Optimization for Distributed Generation Planning in Radial Distribution Network using MVMO-SH	2					¥				₩	₩				₩		₩					¥	æ
10	2015	Active power loss minimization in the Santa Cruz and Baltra hybrid energy system using particle swarm optimization	4	₩	Æ	æ	æ		₩	¥			₩		¥	¥		æ		墢	¥	Ð			
11	2022	Minimization of Active Power Losses in a Multi- Terminal HVDC Grid: Alternative Approach Using Meta-Heuristics Algorithms	0				₩			×									¥		æ		₩		
12	2022	Coordinated Voltage and Reactive Power Control of Power System with Wind Farms and SVCs as the ORPD problem	3			₩			¥						¥				₩			¥			₩

		DATOS			TE	MÁTIC	A			FORM PI	ULACI ROBLE	ON DEI MA	L	REST PI	FRICCI DEL ROBLE	ONES MA	ALC OP	GORI TIMI	TMO ZACI	DE ÓN		SO PR	OLUCIÓ OPUES	DN STA	
ITEM	AŇO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones itorativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
13	2016	Joint optimization of energy and reserve in deregulated power markets: Alternative approach using Mean Variance Mapping Optimization	1				¥						₩				₩								
14	2021	Despacho óptimo de potencia reactiva considerando un abordaje multiperíodo	4	×			Æ																		
15	2022	Control potencia Reactiva y Voltaje	0	×	×					¥	¥					×									×
16	2019	Reactive Power and Voltage Coordinated Control of Wind Farm for Parallel Running STATCOM	5	æ	æ			₩	æ		₩				₩					₩					₩
17	2023	Research on Voltage Reactive Power Control of Distributed PV Which Access to Distribution Network	2	×	æ			æ			₩		₩			₩								æ	
18	2022	Research on Voltage and Reactive Power Control Strategy Based on Intelligent Detection of Abnormal Data and Coordinated Control of Dynamic Reactive Power	0	æ	¥								¥			¥				¥		¥		¥	

		DATOS			TE	CMÁTIO	CA			FORM P	ULACIO ROBLE	ON DEI MA	_	REST PI	TRICCI DEL ROBLEI	ONES MA	AL OI	GOR PTIM	ITMO IZACI	DE IÓN		S(PR)LUCIÓ OPUES	ÓN STA	
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
19	1994	Power System Stability and Control - Prabha Kundur - McGraw-Hill Education.	36485		æ			Æ		¥															¥
20	2009	Control strategy and simulation of permanent magnet synchronous wind power generator.	0					Æ	×							₩								æ	
21	2023	A Methodology to Evaluate Reactive Power Reserves Scarcity During the Energy Transition	4	¥				¥					æ						₽				₽	₽	
22	2001	J. J. GRAINGER and W. D. STEVENSON jr., "Análisis de Sistemas de Potencia "	2983	¥	æ			æ				æ													æ
23	2021	Despacho Óptimo de Potencia Reactiva Utilizando Enjambre de Partículas para Reducción de Pérdidas en Sistemas de Potencia	0	¥		æ			¥				Æ	₩	¥			₩			₩			₩	
24	2007	J. D. Glover, M. S. Sarma, and T. Overbye, "Power Systems Analysis and Design 4th Edition."	197	×	¥			¥				¥													₩

		DATOS			TF	EMÁTIO	CA			FORM Pl	ULACI ROBLE	ON DEI MA	L	REST PI	TRICCI DEL ROBLEI	ONES MA	AI Ol	LGOR PTIM	ITM IZAC	O DE CIÓN		SO PRO	LUCIÓ OPUES	'N TA	
ITEM	AŇO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
25	2004	F. M. Gonzalez-Longatt, "Control de Potencia Reactiva - Voltaje	0	æ	æ						₩			æ											
26	2023	On-Line Monitoring of Shunt Capacitor Bank Based on Relay Protection Device	3	æ	æ			₩					₩	æ	Ŧ				æ	₩	₽	Æ			
27	2004	Comparison of shunt capacitors, SVC and STATCOM in static voltage stability margin enhancement	151		æ	*			æ					æ	Ð				æ				₩	₩	
28	2015	Implementation of SVC models in programs PSX	0		×	×							×		¥				×	¥		¥			
29	2003	Compensadores Estáticos de Potencia Reactiva (SVC)	14	₩		₩			₽				₩	æ							₽				
30	2021	Application of a Static Synchronous Series Compensator to Increase the Transient Stability of a Powerful HPP	2	*		×	₩		₩	×			¥	₩	¥		₩	₩	₩		₩			₩	₩

		DATOS			TE	MÁTIC	ĊA			FORM F	IULAC 'ROBL	ION DE EMA	L	REST PH	RICCI DEL ROBLEI	ONES MA	AI Ol	.GOR PTIM	RITM IIZAC	O DE CIÓN		SO PR	OLUCIÓ OPUES	N TA	
ITEM	AŇO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dismositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Método de Enjambre de Partículas (PSO)	Optimización basada en heurísticas	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
31	2006	Compensador estático síncrono STATCOM modelado y simulación	3			₩			¥				₩		Ŧ				₩			Æ	₩		
32	2023	Introducción a la estabilidad de sistemas eléctricos de potencia	0	×		₩																			¥
33	2016	Ubicación y dimensionamiento óptimos de compensación reactiva utilizando optimización por enjambre de partículas (PSO)	4			¥		¥	¥	¥						¥		₩				¥			
34	2010	A Mean-Variance Optimization algorithm	101					×					¥				₩								×
35	2013	Optimal dispatch of reactive power sources by using MVMOs optimization	31	æ				æ				×	₩				æ								×
36	2013	Evaluation of the mean-variance mapping optimization for solving multimodal problems	19					₩					æ				₽								

		DATOS			TE	MÁTIC	CA			FORM PI	ULACI ROBLE	ON DEL MA	4	REST PH	TRICCI DEL ROBLEI	ONES MA	ALC OP	ORIT TIMIZ	'MO DE ACIÓN		SO PRO	LUCIÓ OPUES	N TA	
ITEM	AŇO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Optimización de potencia reactiva en sistemas de transmisión	Control de voltaje en redes de transmisión	Uso de dispositivos estáticos en el control de sistemas eléctricos	Aplicación de algoritmos heurísticos en redes eléctricas	Minimización de costos operativos en SEP	Determinación del ajuste óptimo de dispositivos estáticos	Reducción de pérdidas de potencia activa en líneas de transmisión	Ajuste de parámetros dentro de límites operativos aceptables	Impacto de la configuración óptima en la estabilidad del sistema	Uso de funciones objetivo multiobjetivo	Límites de operación de los transformadores (taps)	Capacidad máxima de los capacitores	Niveles de voltaje permitidos en las barras	Mapeo de Media-Varianza (MVMO)	Metodo de Enjambre de Farticulas (FSU) Outimistration homena	Validación mediante simulaciones iterativas	Optimización conjunta de taps y capacitores	Reducción de pérdidas y mejora del perfil de voltaje	Propuesta de modelos matemáticos y algoritmos robustos	Implementación práctica en sistemas de referencia (IEEE)	Contribución a la operación eficiente de sistemas eléctricos
37	2001	A particle swarm optimization for reactive power and voltage control considering voltage security assessment	21	₽	¥								₩			₩		EI I			₩			
38	2019	Optimización Multiobjetivo De Flujos De Potencia En Redes De Distribución Basado En El Control Volt-Var	0		¥			₩					¥			¥			¥		¥			
39	2013	Ubicación óptima de generación distribuida en el sistema de distribución	0			₩						₩	¥					N	8					₩
			CANTIDAD:	1	2	1	0	1	0	0	0	1	3	0	0	2	0	1	1 1	0	2	0	0	1

9.2 Resumen de Indicadores



Figura 31. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte



Figura 32. Indicador de formulación del problema - Estado del arte



Figura 33. Indicador de solución - Estado del arte