



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**UBICACIÓN ÓPTIMA DE STATCOM PARA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN
SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN.**

JAIME ESTEBAN RINCON BOLIVAR

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO

DIRECTOR:

VÍCTOR GARRIDO ARÉVALO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES**

FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA

PAMPLONA – COLOMBIA

2022

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres por los sacrificios realizados a lo largo de su vida ya que fueron ellos quienes me apoyaron y motivaron durante esta etapa de mi vida, y con sus esfuerzos me ayudaron para lograr culminar mis estudios universitarios.

También a mis profesores por las enseñanzas compartidas en clase.

Por últimos a mis amigos y compañeros quienes me acompañaron en este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, agradezco a Dios por la salud, por la vida y por la oportunidad de llegar hasta este punto de poder cursar los estudios de Ingeniería Eléctrica en tan digna universidad.

Total gratitud para mis padres Jaime Rincón, María Gladys Bolívar y a mis hermanas que siempre me han brindado su apoyo incondicional para poder cumplir con mis objetivos, ellos son los que con su cariño me han impulsado a perseguir mis metas.

A mis profesores y mi director de trabajo de grado les agradezco por transmitirme los conocimientos necesarios para hoy estar aquí.

RESUMEN

En los sistemas de distribución de energía eléctrica es típicamente de naturaleza radial, consta de una gran cantidad de ramas y nodos que eventualmente aumentan las pérdidas de energía y disminuyen el perfil de tensión de los sistemas. En este proyecto se investiga la ubicación y el dimensionamiento óptimos de STATCOM para un sistema de distribución, en este caso para la reducción de la pérdida de energía y la mejora del perfil de voltaje en las redes de distribución. El algoritmo de optimización de enjambre de partículas (PSO) se utiliza para encontrar la mejor ubicación. El análisis completo se lleva a cabo en los sistemas de distribución radial IEEE de 33 buses e IEEE de 69 buses. Cada sistema se considera por casos diferentes y los resultados comparativos obtenidos demostrarán la eficacia del método propuesto en lo que conlleva a la ubicación y la reducción de pérdidas de energía.

Palabras clave: Optimización de enjambre de partículas (PSO), IEEE, algoritmo, perdidas, potencia, distribución, STATCOM.

ABSTRACT

In electric power distribution systems it is typically radial in nature, consisting of a large number of branches and nodes that eventually increase energy losses and decrease the voltage profile of the systems. This project investigates the optimal placement and sizing of STATCOM for a distribution system, in this case for power loss reduction and voltage profile improvement in distribution networks. The particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to find the best location. The complete analysis is carried out on the IEEE 33-bus and IEEE 69-bus radial distribution systems. Each system is considered for different cases and the comparative results obtained will demonstrate the effectiveness of the proposed method in terms of location and energy loss reduction.

Keywords: Particle Swarm Optimization (PSO), IEEE, algorithm, losses, power, distribution, STATCOM.

TABLA DE CONTENIDO

1.	CAPÍTULO I.....	10
1.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	10
1.2.	OBJETIVOS	11
1.2.1.	Objetivo general.....	11
1.2.2.	Objetivos específicos.....	11
1.2.3.	Acotaciones	11
1.3.	MARCO TEÓRICO.....	12
1.3.1.	COMPENSADORES FACTS.....	13
1.3.2.	DISPOSITIVOS STATCOM	13
1.3.3.	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL STATCOM.....	15
1.4.	ESTADO DEL ARTE	18
1.4.1.	Técnica de búsqueda exhaustiva.....	18
1.4.2.	Técnica de algoritmo de búsqueda de la armonía	18
1.4.3.	Técnica de algoritmo $\text{Icos}(\Phi)$	19
1.4.4.	Técnica de algoritmo Least Mean Square (LMS)	19
1.4.5.	Técnica de algoritmo PSO.....	19
1.4.6.	Técnica descubrimiento de patrón	20
1.4.7.	Técnica de optimización multiverso.....	20
1.4.8.	Técnica de algoritmo genético Chu-Beasley	20
1.4.9.	Técnica de algoritmo de evolución diferencial modificada	21
1.4.10.	Técnica de Algoritmo basado en la optimización de Harris Hawks	21
1.4.11.	Técnica de algoritmo de polinización de flores.....	21
1.4.12.	Técnica de algoritmo de búsqueda basado en galaxias	22
2.	CAPÍTULO II.....	23
2.1.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA.....	23
2.1.1.	OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)	23
2.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PSO.	24
2.1.3.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL ALGORITMO	24

2.1.4.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO PSO.....	26
2.2.	CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES DE LA METODOLOGÍA	28
2.2.1.	Número de partículas.....	28
2.2.2.	Constantes de aceleración	28
2.2.3.	Factor de inercia.....	28
2.2.4.	Función adaptación	28
2.2.5.	Flujo de cargas.....	29
2.2.6.	Cálculos de potencia	29
2.2.7.	Función objetivo.....	30
2.2.8.	Cálculo de potencia para STATCOM.....	30
2.3.	DESCRIPCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO O SISTEMAS DE PRUEBA	31
2.3.1.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN IEEE DE 33 BARRAS	31
2.3.2.	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN IEEE DE 69 BARRAS	32
3.	CAPÍTULO III.....	33
3.1.	SISTEMA DE 33 BARRAS	33
3.1.1.	CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA IEEE DE 33 BARRAS.....	33
3.1.2.	INCLUSIÓN DE STATCOM PARA EL SISTEMA IEEE DE 33 BARRAS.	38
3.2.	SISTEMA DE 69 BARRAS	41
3.2.1.	CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS.....	41
3.2.2.	INCLUSIÓN DE STATCOM PARA EL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS	47
3.2.3.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL SISTEMA DE 33 BARRAS.	52
3.2.4.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS.....	52
3.3.	ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL TRABAJO DE GRADO	53
3.3.1.	IMPACTOS ECONÓMICOS.....	53
3.3.2.	IMPACTOS INVESTIGATIVOS.....	53
4.	CAPÍTULO IV	54
4.1.1.	CONCLUSIONES	54
4.1.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Principio de conexión de un STATCOM.....	14
Figura 2 fuentes conectadas a través de una impedancia.....	15
Figura 3 Modos de operación de STATCOM.	16
Figura 4 Configuración básica de un STATCOM.	17
Figura 5 Representación gráfica del movimiento de una partícula.	23
Figura 6 Partículas distribuidas aleatoriamente.	24
Figura 7 Diagrama de flujo del algoritmo PSO.	27
Figura 8 Diagrama unifilar del sistema IEEE de 33 barras.....	31
Figura 9 Diagrama unifilar del sistema IEEE de 69 barras.....	32
Figura 10 Tensiones del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales.	36
Figura 11 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales.....	37
Figura 12 Tensiones del sistema IEEE de 33 barras con inclusión de STATCOM.	39
Figura 13 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 33 barras con STATCOM.	39
Figura 14 Tensión bajo condiciones iniciales VS implementación de STATCOM.....	40
Figura 15 Tensiones para el sistema IEEE de 69 barras bajo condiciones iniciales.	46
Figura 16 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 69 barras en condiciones iniciales.....	46
Figura 17 Tensiones del sistema IEEE de 69 barras con inclusión de STATCOM.	49
Figura 18 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 69 barras con STATCOM.	49
Figura 19 Tensión bajo condiciones iniciales VS implementación de STATCOM.....	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operación básica de un STATCOM.....	17
Tabla 2 Datos para las líneas de un sistema IEEE de 33 barras.....	33
Tabla 3 Datos para las cargas de un sistema IEEE de 33 barras.....	34
Tabla 4 Datos del flujo de potencia en condiciones iniciales obtenidos en MATLAB.....	35
Tabla 5 Ubicación y compensación de STATCOM para sistema IEEE de 33 barras.	38
Tabla 6 Tensión del sistema IEEE de 33 barras con STATCOM.	38
Tabla 7 Pérdidas de potencia en el sistema IEEE de 33 barras.....	41
Tabla 8 Datos para las líneas del sistema IEEE de 69 barras.....	42
Tabla 9 Datos para las cargas del sistema IEEE de 69 barras.....	42
Tabla 10 Datos del flujo de potencia en condiciones iniciales obtenidos en MATLAB.....	45
Tabla 11 Ubicación y compensación de los STATCOM para el sistema IEEE de 69 barras.	48
Tabla 12 Tensión del sistema IEEE de 69 barras con STATCOM.	48
Tabla 13 Pérdidas de potencia en sistema IEEE de 69 barras.....	51
Tabla 14 Comparación de pérdidas para IEEE de 33 barras.	52
Tabla 15 Comparación de pérdidas para IEEE de 69 barras.	52

1. CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Debido a la posibilidad de cambios de tensión en los sistemas de distribución causados por la presencia de fallas eléctricas y la entrada o salida de una carga considerable, se ha vuelto necesaria la implementación de STATCOM.

STATCOM es un sistema diseñado para evitar los sobre impulsos de tensión (que no deberían superar el 5% según la práctica habitual) mediante la inyección o absorción de reactivos. Para lograr esto de manera efectiva, es necesaria la acción de control de STATCOM. (Panda Sidhartha, 2018)

Para resolver el problema de ubicación de STATCOM, primero se realiza el flujo de cargas. El objetivo de un cálculo de flujo de potencia es para obtener ángulos y magnitudes de voltaje, prácticamente información para cada bus en un sistema de potencia.

En la forma tradicional la sintonización de los controladores STATCOM se han implementado métodos clásicos para el control de su ajuste, como por ejemplo la ubicación de polos de Persson. Lo que se requiere es utilizar una técnica para un método de optimización y lograr obtener una acción de control más estable que se ajuste de la mejor manera a los requerimientos de la red. Para poder implementar el uso de la técnica seleccionada para el algoritmo de optimización se llevará a cabo mediante el uso de software especializado estas simulaciones para el análisis en los sistemas de distribución radial IEEE de 33 buses e IEEE de 69 buses. (Panda Sidhartha, 2018) (Rohouma & Balog, 2018)

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Identificar una técnica de ubicación óptima de los STATCOM para la compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución.

1.2.2. Objetivos específicos

- Seleccionar una técnica para la ubicación de los STATCOM en los sistemas de distribución.
- Simular la técnica seleccionada mediante el uso de software especializado.
- Comparar los resultados obtenidos con trabajos investigativos disponibles en la literatura.

1.2.3. Acotaciones

Para este trabajo solo se implementará el uso de MATLAB para llevar a cabo las simulaciones.

1.3. MARCO TEÓRICO

El crecimiento de los sistemas eléctricos de potencia están directamente relacionados con el crecimiento económico de un país y este crecimiento se refleja en el aumento de la carga, que en algunos puntos del sistema es desproporcionado, por lo que las empresas de generación, distribución y transmisión necesitan recubrir estos incremento de la demanda pero también haciendo cumplir con el marco regulatorio, la confiabilidad y criterios de seguridad, mediante el uso de tecnologías de protección. (Jabir, 2018)

Además, un esquema habitual en la funcionalidad del mercado eléctrico que en la mayoría de los casos muchas veces está des regularizado, conduce a un aumento de los acuerdos bilaterales que sostienen las empresas y los usuarios debido a la competencia que conlleva entre las empresas y si estos contratos no se encuentran controlados, algunas líneas en los sistemas se pueden sobrecargar porque estos sistemas no son capaces de transferir este aumento de potencia; y si a esto le sumamos la regulación medioambiental que restringen la elaboración de nuevos proyectos para las líneas, estos sistemas de potencia están bajo la condición de abastecer la demanda de manera oportuna. (Jabir, 2018)

De esta manera, los sistemas eléctricos de potencia se encuentran operando cerca de sus propias limitantes de estabilidad y cargabilidad, haciendo que las empresas inviertan un poco más en la operación y mantenimiento del sistema. En estas circunstancias, se pueden producir riesgos como un fallo en la tensión o una interrupción del servicio en este sistema.

Los sistemas eléctricos de potencia se vuelven cada vez más complejos debido a que las centrales de generación están en constante crecimiento por lo que las cargas hacen que las líneas de transmisión del sistema ahora tengan que soportar unas sobrecargas, por lo cual es en esta parte donde se debe seleccionar uno de los compensadores para dar óptima solución a estas expansiones de los sistemas de potencia. En estos tiempos gracias a la electrónica de potencia que compone a los dispositivos FACTS nos permiten controlar diferentes parámetros propios en los sistemas de potencia, como son los flujos óptimos de potencia. (Gaur, 2017)

Ahora, las técnicas más comunes para la ubicación de estos dispositivos tienen una clasificación por técnicas analíticas, de programación lineal y también de búsqueda por métodos heurísticos. Los problemas para un dimensionamiento óptimo se consideran de un análisis diverso y los métodos en búsquedas heurísticas serían las mejores herramientas para dichos problemas, ya que son efectivos, rápidos y mejor adecuados para los problemas reales en los sistemas eléctricos. (Gaur, 2017)

Esta implementación de los dispositivos FACTS en los sistemas eléctricos de potencia, es una de las soluciones escritas en la literatura científica para un mejor rendimiento y una buena estabilidad de los sistemas de distribución, tanto en una normal operación como en condiciones de planificación para la expansión siendo así que se escoge un rango para la estabilidad en los voltajes. (Gaur, 2017)

1.3.1. COMPENSADORES FACTS

Los “FACTS” o también llamados sistemas de potencia de transmisión de AC flexible, tienden a ser una muy buena ventaja para solucionar imprevistos que se encuentran en las “L/T” como lo son: la sobretensión de las líneas, la estabilidad de las cargas y flujos, etc. Para distintos requerimientos y parámetros en los que el sistema se encuentra, se logra mantener los niveles de tensión y de esta manera tener un mejor control de los flujos de potencia activa o reactiva, y también se controla de manera efectiva para que el rendimiento del sistema mejore considerablemente.

Se considera que estos dispositivos son utilizados para mejorar el rendimiento dinámico de los sistemas de distribución de la energía en términos de estabilidad de tensión y ángulo, mientras aumenta la capacidad en la transferencia de energía y el perfil cuando estos se encuentra ya en un estado estable, se debe mencionar que también existen dispositivos FACTS más avanzados que pueden controlar algunas condiciones en específico teniendo en cuenta las condiciones que presenta el sistema de potencia. (Gaurav, 2017)

Existen diferentes tipos de dispositivos FACTS:

- Los controladores o dispositivos en serie: Son aquellos que se conectan en serie a la “L/T”, para inyectar tensión y corriente en serie con el sistema de potencia.
- Los controladores o dispositivos en paralelo: estos dispositivos se conectan en paralelo a las líneas de transmisión, donde inyectan tensión y corriente en paralelo con el sistema de distribución.
- Controladores o dispositivos combinados serie - serie: Son dos dispositivos que se encuentran acoplados en serie a la “L/T”, donde se acoplan mediante el enlace de alimentación de la corriente continua para transmitir de una mejor manera la tensión, la corriente y la potencia.
- Controladores o dispositivos combinados serie - paralelo: son dos dispositivos donde se conecta uno en serie y el otro en paralelo, los dos controladores están acoplados mediante un sistema coordinado y un enlace de potencia para poder transmitir la tensión, la corriente y la potencia. (Gaurav, 2017)

1.3.2. DISPOSITIVOS STATCOM

STATCOM o Static Coordinated Compensator es un dispositivo de la electrónica de potencia que utiliza dispositivos de fuerza conmutada como IGBT, GTO, para lograr un mejor control para el flujo de potencia reactiva mediante una red eléctrica y por lo tanto aumenta la seguridad de la red eléctrica. (Castiblanco, Toro, & Giral, Optimal placement and sizing of d-statcom in radial and meshed distribution networks using a discrete-continuous version of the genetic algorithm, 2021)

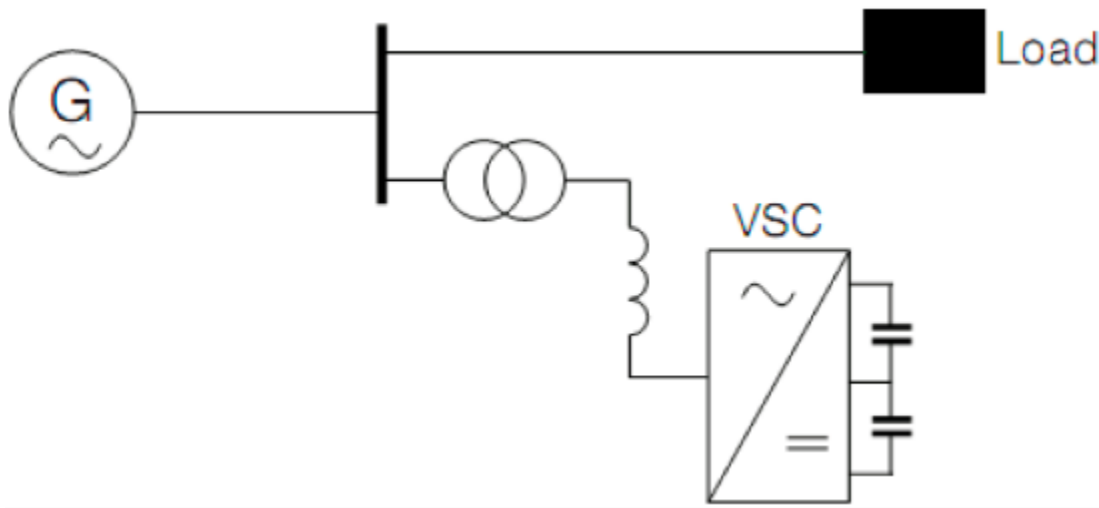
STATCOM es un componente en derivación, lo cual hace referencia a que se conectan en derivación con las líneas. Un compensador estático síncrono (STATCOM) que también es conocido por el nombre de compensador estático síncrono (STATCOM). Y pertenece a los miembros de la familia de dispositivos Flexible AC Transmission Framework. Síncrono en STATCOM significa que puede absorber o generar energía reactiva en sincronización con la demanda para estabilizar el voltaje de la red pública. (Shetty, 2017)

Los STATCOM son dispositivos de compensación síncrona conectados en paralelo y se acoplan a las líneas de transmisión, el principal objetivo del STATCOM es aumentar la compensación de los reactivos y la magnitud de la tensión en los sistema de potencia que trabajan en AC, estos controladores STATCOM también mejoran el FP, el balance de las cargas, la regulación en el voltaje y la propagación de los armónicos en los sistemas de potencia, y gracias a que incremente la capacidad en las líneas de transmisión se elimina la obligación de tener que construir nuevas líneas.

Los STATCOM principalmente poseen tres ventajas:

- Físicamente tienen un tamaño reducido en comparación a los otros dispositivos tipo FACTS.
- Son capaces de inyectar o absorber la corriente reactiva necesaria, incluso si se encuentran valores pequeños en la tensión de la barra.
- También se pueden utilizar para suministrar potencia activa a la red mediante la inclusión de nuevos abastecimientos de energía renovable en las barras. (Shetty, 2017)

Figura 1 Principio de conexión de un STATCOM.

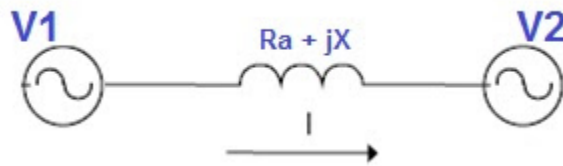


Tomada de: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/10/2851>

1.3.3. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL STATCOM

Primeramente, para lograr entender el principio de funcionamiento de un STATCOM se observa la ecuación de transferencia para la potencia reactiva. Se consideran 2 fuentes V1 y V2 que se encuentran conectadas a través de una impedancia $Z = R_a + jX$ como se muestra a continuación en la figura 2.

Figura 2 fuentes conectadas a través de una impedancia.



Tomado de: https://es.zddqelectric.com/statcom-working-principle-design-and-application_n76

Asumiendo $R_a=0$, la ecuación para la potencia reactiva quedaría:

$$Q = (V2/X) * (V1 * \cos \theta - V2) \quad (1)$$

Donde θ es el ángulo que esta entre V1 y V2, si se mantiene el valor de este ángulo cero, entonces la ecuación para la potencia reactiva queda:

$$Q = (V2/X) * (V1 - V2) \quad (2)$$

Y el flujo de potencia activa se convertirá en:

$$P = (V1 * V2 * \sin \theta / X) = 0 \quad (3)$$

Resumiendo, se puede decir que cuando el ángulo entre V1 y V2 está igualado a cero, entonces el flujo de potencia activa automáticamente se estaría convirtiendo en cero y el flujo para la potencia reactiva quedaría dependiendo entre V1 y V2. Por este motivo para el flujo de potencia reactiva quedan dos posibilidades:

- Si la magnitud de V_1 es mayor que V_2 , la potencia reactiva fluirá desde la fuente V_1 hasta V_2
- Si la magnitud de V_2 es mayor que V_1 , entonces la potencia reactiva fluirá desde la fuente V_2 hasta V_1 .

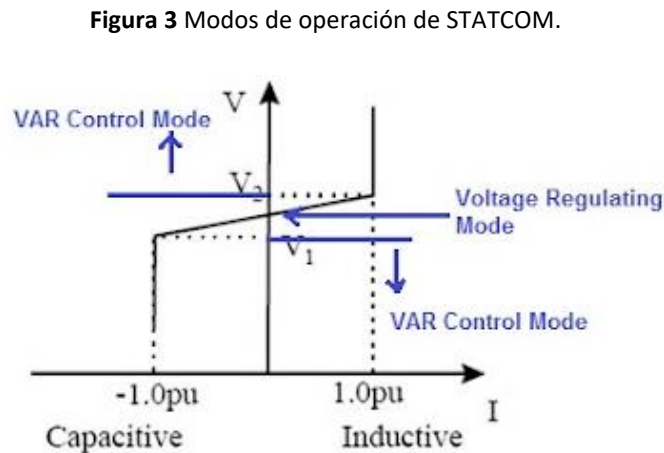
Bajo este principio se utiliza el STATCOM para el control de potencia reactiva.

El modo de operación explicado anteriormente se conoce como modo de regulación de tensión, pero como se sabe que cada equipo tiene ciertas limitantes, por lo que el dispositivo STATCOM por lo general también tiene sus propias limitaciones cuando se suministra o absorbe la potencia reactiva. Las limitaciones de STATCOM están impuestas por las capacidades de las cargas actuales que tienen los dispositivos de conmutación de fuerza como IGBT, GTO, entre otros, por estos motivos, cuando el funcionamiento de los STATCOM alcanzan su limitación, ya no se incrementa y tampoco disminuye más su tensión de salida, sino que por lo contrario este suministra o absorbe potencia reactiva estable igual al valor de su limitante de tensión y corriente fija, por lo que actúa como una fuente de corriente constante. Este modo de funcionamiento de STATCOM es llamado modo de control Var. (Liu, 2018)

Por lo tanto, la operación de los dispositivos STATCOM se pueden clasificar en dos modos:

- Modo de regulación de voltaje
- Modo de control Var

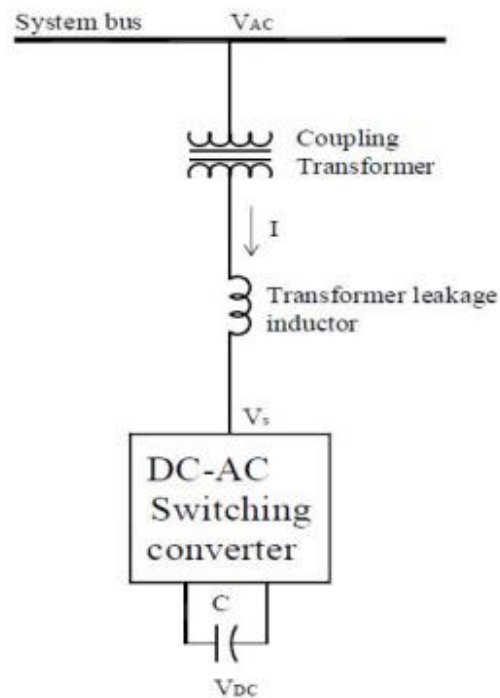
La siguiente figura explica los dos modos de operación del STATCOM.



Tomado de: https://es.zddqelectric.com/statcom-working-principle-design-and-application_n76

Para la potencia reactiva en el intercambio de la red eléctrica y el controlador STATCOM puede ser de manera capacitiva o inductiva, esto dependiendo entre la relación de la tensión del Vsc y la tensión de la barra en la red. (Liu, 2018)

Figura 4 Configuración básica de un STATCOM.



Tomado de: https://www.researchgate.net/figure/Basic-Configuration-of-a-STATCOM-STATCOM-is-a-member-of-FACTS-devices-used-for-voltage_fig1_323760334

A continuación, se detalla el modo de operación del STATCOM el cual obedece a la relación anteriormente mencionada; en donde se refiere al voltaje del nodo de la red como Vbus y al voltaje del Vsc como Vvsc. (Liu, 2018)

Tabla 1 Operación básica de un STATCOM.

Relación	Modo de operación
$V_{bus} > V_{Vsc}$	Capacitivo
$V_{bus} < V_{Vsc}$	Inductivo

Fuente: Elaborada por el autor.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Para los sistemas eléctricos de distribución por lo general se han tenido que maniobrar con los problemas producidos por algunos tipos de fallas o una elevada variación en las cargas, alterando de esta manera la calidad en el servicio suministrado a los usuarios que se encuentran conectados a estas redes.

Aunque gracias a los novedosos avances que se han encontrado en los dispositivos de la electrónica de potencia, se han hallado varias formas de mitigar estas perturbaciones, a través de la implementación de los STATCOM, ya que es un inversor DC/AC que cuenta con un controlador de tensión que se encarga de estabilizar el flujo de potencia reactiva desde el STATCOM hasta el sistema. (Sanam, Ganguly, & panda, 2017)

Sin embargo, la estabilidad de la tensión es uno de los principales inconvenientes en los sistemas de potencia. Por dicho motivo los profesionales como Ingenieros e investigadores tratan de fortalecer una mejor definición con respecto a la estabilidad en los voltajes, por lo cual se proponen técnicas y procedimiento para obtener un mejor análisis. Ya que la mayoría de estos métodos utilizados se enfocan en una búsqueda donde el punto del sistema jacobiano tiene un comportamiento atípico, este punto se denomina punto de ruptura de tensión o también como punto de máxima capacidad de carga. (Resener & Haffner, 2018)

1.4.1. Técnica de búsqueda exhaustiva

Esta técnica de búsqueda exhaustiva es una de las técnicas más antiguas, pero a su vez también es uno de los métodos más efectivos, por lo que se pueden aplicar en varios escenarios o problemas. El método está basado en generar de una manera ordenada distintas combinaciones posibles y se evalúan dentro de un campo de búsqueda viable. Esta es una técnica algo sencilla y muy practica para aquellos problemas llamados P, cuyo tiempo incrementa de manera polinomial. (Ni & Narimani, 2019)

1.4.2. Técnica de algoritmo de búsqueda de la armonía

El algoritmo (HSA) o también denominado como Búsqueda de la Armonía sale como reparo a los grandes problemas que se encuentran presentes en los métodos numéricos actuales. Los algoritmos heurísticos comúnmente intentan descubrir una muy buena solución en algunos problemas de

optimización por medio del método de prueba y error en un comprensible tiempo computacional. Los resultados obtenidos con estas técnicas heurísticas, tienden a ser óptimos locales o inclusive llegan a ser muy cercanas al óptimo global. (Yang & Tao, 2021)

1.4.3. Técnica de algoritmo $I_{cos}(\Phi)$

Es un método utilizado para generar corrientes de compensación, que, a través de un generador de pulsos, se controlan los estados del inversor. En el algoritmo ' $I_{cos}\emptyset$ ', el componente fundamental de la parte activa de la corriente de carga, es decir, $I_{cos}\emptyset$, se deduce de la corriente de carga en cada fase utilizando un filtro de paso bajo de segundo orden sintonizado a la frecuencia fundamental y circuitos de muestreo y retención. Esto da la amplitud de la corriente de red deseada en cada fase. Las tensiones de red trifásicas se utilizan como plantillas para generar ondas sinusoidales de amplitud unitaria en fase con las tensiones de red. Las corrientes de red deseadas se calculan luego como el producto de la amplitud ' $I_{cos}\emptyset$ ' y la onda sinusoidal unitaria para cada fase. (Mangaraj & Sabat, 2020)

1.4.4. Técnica de algoritmo Least Mean Square (LMS)

El algoritmo LMS, así denominado por Widrow y Hoff en 1960, es uno de los más importantes miembros de la familia de algoritmos de gradiente estocástico. La característica más importante de este algoritmo es la simplicidad, representada por una fácil implementación y una baja complejidad computacional. Además, no requiere conocimientos de estadística.

Esta técnica de control LMS se utiliza para aliviar los problemas relacionados con la calidad de la energía, generados por diferentes tipos de carga no lineal y también por equipos de estado sólido. (Ahmad & Sheeraz, 2022)

1.4.5. Técnica de algoritmo PSO

El algoritmo de optimización por cúmulo de partículas (Particle Swarm Optimization) es un subconjunto de la inteligencia de enjambre "Swarm Intelligence". El concepto básico del PSO es inspirado por el comportamiento social de las bandadas de aves y bancos de peces. Viendo esto de una manera matemática, se tiene que como una función objetivo en la cual se obtiene una función de "n" variables. Para dar inicio a este proceso iterativo, se tiene que para las variables se les asignan valores de una forma aleatoria para distribuir las por todo el campo de solución, para tener en la

función objetivo un vector el cual estará denominado nube y para cada elemento de este vector se le llamará como partícula, todo esto, pero teniendo en cuenta las limitaciones o restricciones de nuestro sistema. Luego se observa cuál de los resultados se encuentra más cercano al cero o al valor estimado, en el instante de evaluar todos los resultados, se selecciona el mejor resultado y se reasignan nuevamente los valores de estos vectores para una nueva iteración alrededor de esta. Este proceso se ejecuta hasta que se llegue a un punto estimado o se exceda de un límite de iteraciones que se impone durante problema. (Saxena, Gao, & Kumar, 2022)

1.4.6. Técnica descubrimiento de patrón

Para mejorar la identificación de los motivos de las fallas en un sistema de distribución, es primordial el uso en la aplicación de métodos avanzados computacionalmente, y reunidos bajo el nombre de técnicas de descubrimiento de patrones. Para determinar la identificación de perturbaciones se puede entender como una labor para clasificar que el operador de la línea trate de recategorizar dicha falla de acuerdo a diferentes clases predefinidas por sistemas avanzados. Los problemas de descubrimientos típicos extraen un modelo de un conjunto de información para entrenamiento de donde se definen las clases para categorizar futura información. (Xu, Dong, & Guan, 2018)

1.4.7. Técnica de optimización multiverso

Es una metodología de solución maestro-esclavo que combina un algoritmo de optimización basado en la teoría del multiverso (etapa maestra) y el método numérico de aproximación sucesiva (etapa esclava). La etapa maestra propone niveles de potencia a inyectar por cada barra en el sistema de distribución, y la etapa esclava evalúa el impacto de cada configuración de potencia (propuesta por la etapa maestra) sobre la función objetivo y el conjunto de restricciones que componen el problema. (Rosales, Grisales, Montano, & Montoya, 2021)

1.4.8. Técnica de algoritmo genético Chu-Beasley

El algoritmo genético Chu-Beasley aborda problemas de ubicación y dimensionamiento óptimo de los compensadores estáticos STATCOM, en las redes de distribución eléctrica. La parte discreta de la codificación determina los nodos donde se instalará el STATCOM. La parte continua de la codificación regula el tamaño. La función objetivo es considerada en cuanto a pérdidas de energía en STATCOM. Esta función objetivo está sujeta a las limitaciones clásicas del balance de potencia y las capacidades de los dispositivos. La versión discreta-continúa propuesta del algoritmo genético

resuelve el modelo de programación no lineal de enteros mixtos que genera el equilibrio de potencia clásico. (Castiblanco, Toro, & Giral, 2021)

1.4.9. Técnica de algoritmo de evolución diferencial modificada

El algoritmo MDE propuesto utiliza un nuevo operador de mutación DE/best3/1/bin para producir tres vectores mutantes temporales que se promedian para obtener el vector mutante. Por eso, los vectores de decisión de una generación se mueven simultáneamente hacia los tres mejores vectores de decisión de la población, por lo que se mantiene un mejor intercambio entre exploración y explotación. (Kar, Kumar, & Panigrahi, 2021)

1.4.10. Técnica de Algoritmo basado en la optimización de Harris Hawks

La optimización Harris Hawks recientemente desarrollada tiene un comportamiento virtuoso para encontrar la solución óptima en el espacio de búsqueda. Sin embargo, queda atrapado fácilmente en el espacio de búsqueda local para problemas de optimización de ingeniería restringidos. Con el fin de acelerar la fase de búsqueda global del optimizador Harris Hawks existente y sacarlo del espacio de búsqueda local, la investigación propuesta tiene como objetivo explorar la fase de exploración del optimizador existente, la variante híbrida del optimizador Harris Hawks se ha desarrollado utilizando algoritmo seno – coseno y denominado como Hybrid Harris Hawks - Sine Cosine Algorithm (hHHO-SCA) La efectividad del optimizador propuesto ha sido probada para varios problemas de diseño de ingeniería no lineales. (Wang, Liu, & Lin, 2022)

1.4.11. Técnica de algoritmo de polinización de flores

El algoritmo de polinización de flores (FPA) es una metaheurística de inteligencia computacional que toma su metáfora del papel de proliferación de flores en las plantas. El algoritmo realiza una reconfiguración cambiando las posiciones de las líneas seccionales y de enlace en el sistema de distribución. En el momento de la reconfiguración, el movimiento del nodo de carga a un conjunto de nodos de potencia asegura la estructura radial de la red. (Dhivya & Arul, 2021)

1.4.12. Técnica de algoritmo de búsqueda basado en galaxias

El algoritmo de búsqueda basado en galaxias o “GbSA” tiene una optimización que se lleva a cabo mediante una metaheurística inspirada en la naturaleza recientemente. El algoritmo GbSA se asemeja a los brazos espirales de algunas galaxias para buscar los umbrales óptimos. La GbSA también utiliza un algoritmo Hill Climbing modificado como búsqueda local. (Tolabi & Shakarami, 2018)

Después de la recopilación de información descrita para el estado de arte se llega a la conclusión de que para este trabajo se llevara a cabo la técnica del algoritmo de optimización por enjambre de partículas, para buscar una ubicación óptima de STATCOM para la compensación de reactivos y a su vez la mejora en los perfiles de tensión basados en los sistemas de la IEEE de 33 barras y la IEEE de 69 barras.

2. CAPÍTULO II

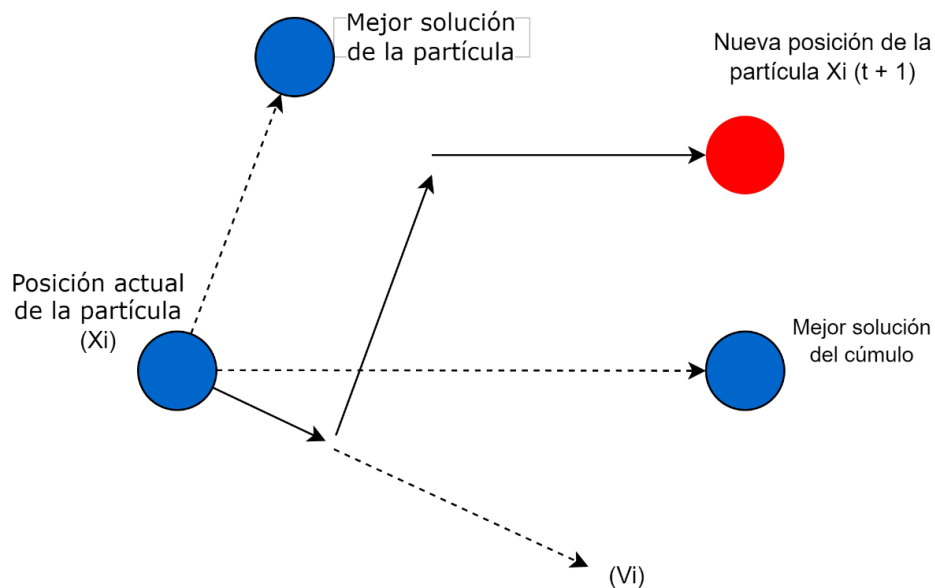
METODOLOGÍA

2.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA PARA RESOLVER EL PROBLEMA

2.1.1. OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS (PSO)

La optimización de enjambre de partículas (PSO) es un algoritmo de optimización estocástica basado en la población motivado por el comportamiento colectivo inteligente de algunos animales, como bandadas de pájaros o bancos de peces. Desde su presentación en 1995, ha experimentado una multitud de mejoras. A medida que los investigadores aprendieron sobre la técnica, derivaron nuevas versiones que apuntaban a diferentes demandas, desarrollaron nuevas aplicaciones en una gran cantidad de áreas, publicaron estudios teóricos de los efectos de los diversos parámetros y propusieron muchas variantes del algoritmo. (Marini & Walczak, 2018)

Figura 5 Representación gráfica del movimiento de una partícula.



Adaptado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2010000100003

2.1.2. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PSO.

Primeramente, se da inicio a la descripción del algoritmo por enjambre de partículas “PSO” estudiando la singularidad de las partículas. Como se mencionó con anterioridad una partícula está compuesta de tres vectores y también dos valores de aptitud (también conocida como adaptación, capacidad, adecuación o “fitness”). (Tuzikova, Tlusty, & Muller, 2018)

Vectores:

- I. Vector X_i : guarda la ubicación actual de la partícula.
- II. Vector G_{best} : guarda la ubicación de la mejor solución hallada por la partícula.
- III. Vector de velocidad V_i : guarda la dirección hacia donde se moverá la partícula.

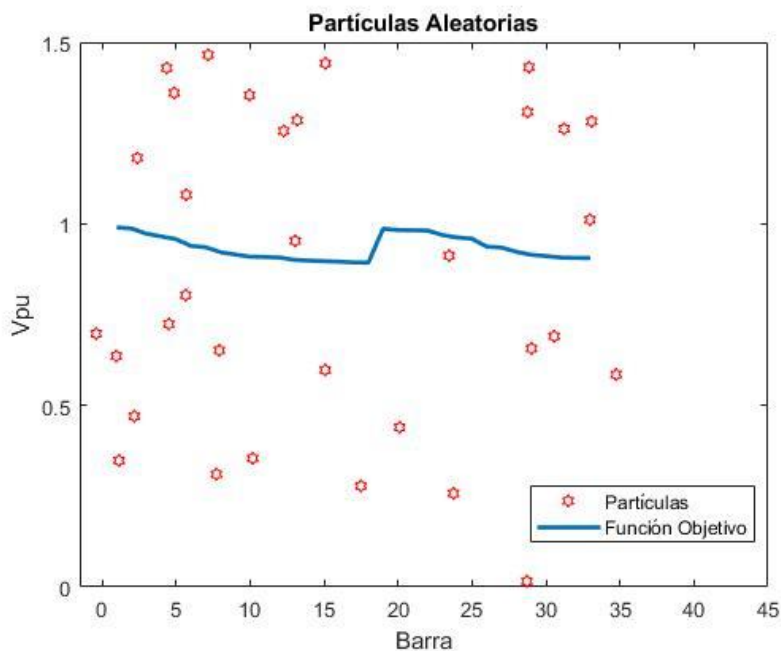
Valores de aptitud:

- I. Valor de la función adaptación: guarda el valor de adaptación de la ubicación actual, corresponde con la función objetivo
- II. Valor de P_{best} : guarda el valor de la adecuación de la partícula con la mejor solución local que se encuentra hasta ese instante.

2.1.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DEL ALGORITMO

1. Se da inicio a la nube generando las posiciones (de manera aleatoria, ajustada o una combinación de estas dos formas).

Figura 6 Partículas distribuidas aleatoriamente.



Fuente: Elaborada por el autor.

2. Ahora se generan las velocidades igualmente de una forma aleatoria estableciendo un intervalo entre $-V_{max}$ y V_{max} , y para este algoritmo no es conveniente dejarlas en cero.
3. En tercer lugar, se calcula la aptitud para cada partícula y se renuevan los valores de la función de adaptación y de Pbest.
4. Ahora las partículas se mueven por cada iteración desde una posición en el campo de búsqueda hasta otra posición. Para el vector en la posición de X_i se le agrega el vector de la velocidad V_i para registrar un nuevo vector X_i .
5. Con la posición nueva de la partícula se calcula y renueva la función de adaptación.
6. Cuando el nuevo valor de aptitud es el mejor valor hallado por la partícula “i” hasta el momento, se vuelven actualizar los valores de Gbest y Pbest.
7. Cuando el valor nuevo de Pbest es el mejor valor hallado por la nube de partículas (o por la comunidad de las partículas para el caso de PSO Local) hasta ese instante, se vuelven actualizar nuevamente el valor de la mejor ubicación de la nube (o del vecindario) Gbest y su Pbest.
8. Ahora para el vector de velocidad de cada partícula es renovado en cada iteración empleando la anterior velocidad.

La resultante del modelo matemático que representa el funcionamiento del algoritmo enjambre de partículas “PSO”, está representado por las siguientes ecuaciones:

$$V(t + 1) = W * V_i(t) + C1 * rand * (Pbest - X_i(t)) + C2 * rand * (Gbest - X_i(t)) \quad (4)$$

$$X_i(t + 1) = X_i(t) + V_i(t + 1) \quad (5)$$

Donde:

$X_i(t)$ = Vector posición de la partícula.

$V_i(t)$ = Vector velocidad de la partícula.

W = Factor de inercia

C1 y C2 = Constantes de aceleración.

Rand = Número aleatorio entre 0 y 1.

Pbest = Representa la mejor posición hallada de la partícula hasta el momento.

Gbest = Este valor representa la posición de la partícula con la mejor solución de la optimización de partículas.

Para las constantes de aceleración se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C1 = ((C1min - C1max/itermax) * (iter)) + C1max \quad (6)$$

$$C2 = ((C2max - C2min/itermax) * (iter)) + C2min \quad (7)$$

9. Cuando el nuevo valor de Gbest que pertenece a la mejor solución hallada por el cúmulo de partículas tiene un valor más bajo que un valor de tolerancia o que ya se halla cumplido cierto máximo número de iteraciones, entonces PARAR, en caso contrario regresar al paso cinco.

Para conseguir un mejor funcionamiento y eficiencia del algoritmo PSO el valor de la velocidad no debe llegar a ser muy grande durante la ejecución. Limitando la velocidad máxima de cada vector velocidad ($V_{m\acute{a}x}$) y reduciendo gradualmente su valor se consigue mejorar el rendimiento del algoritmo. Se propone una nueva función de adaptación para el factor de inercia con el tiempo para mejorar el rendimiento del algoritmo PSO. Esta adaptación dinámica del algoritmo PSO propone actualizar la relación de la velocidad de acuerdo con la siguiente ecuación.

$$W = [((Wmin - Wmax/itermax - 1) * (iter - 1))] + Wmax \quad (8)$$

Donde:

$Wmin$ = Factor de inercia inicial.

$Wmax$ = Factor de inercia final.

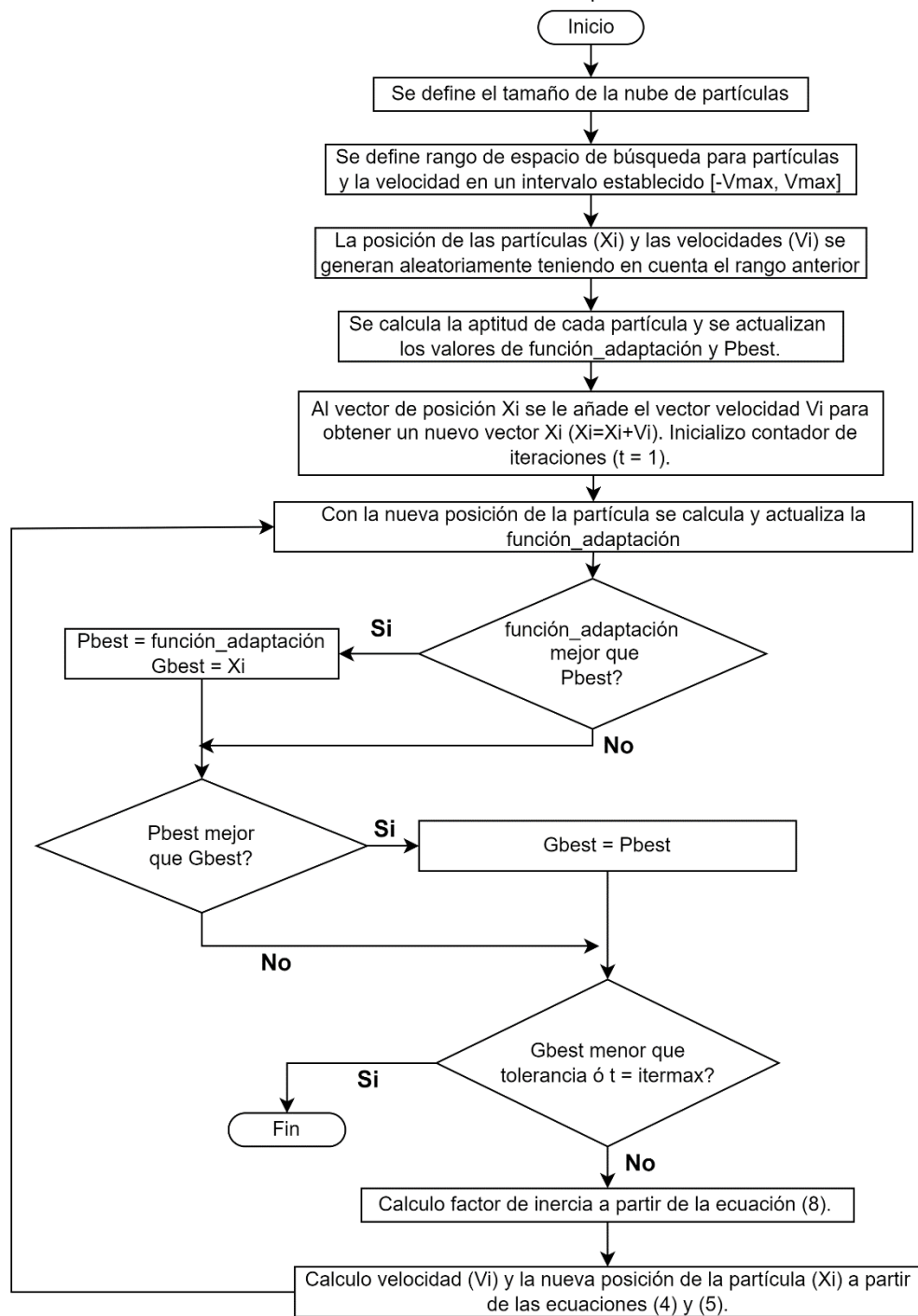
$Itermax$ = Número máximo de iteraciones.

$Iter$ = Número de iteración actual.

2.1.4. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO PSO

En la siguiente figura se evidencia el algoritmo para el diagrama de flujo de la optimización por enjambre de partículas (PSO).

Figura 7 Diagrama de flujo del algoritmo PSO.



Adaptada de: <https://docplayer.es/9209141-Determinacion-de-los-parametros-del-motor-de-induccion-utilizando-un-algoritmo-de-optimizacion-por-cumulo-de-particulas-psy.html>

2.2. CONSIDERACIONES Y RESTRICCIONES DE LA METODOLOGÍA

2.2.1. Número de partículas

El número de partículas puede variar al gusto del programador, pero para este trabajo se toma el número de partículas de la misma cantidad de barras del sistema:

Para el sistema IEEE de 33 barras el número de partículas será:

$$n = 33$$

y para el sistema IEEE de 69 barras el número de partículas será:

$$n = 69$$

2.2.2. Constantes de aceleración

Para las constantes de aceleración $C1$ y $C2$, es recomendable utilizar valores bajos. Esto según las consideraciones del algoritmo por enjambre de partículas (PSO).

$$C1 \text{ y } C2 \text{ mínimos} = 0.5$$

$$C1 \text{ y } C2 \text{ máximos} = 2.5$$

2.2.3. Factor de inercia

Igualmente, para la constante de factor de inercia el algoritmo por enjambre de partículas (PSO) propone trabajar con valores entre 0 y 1, de esta manera se escogieron los siguientes valores para el código:

$$W_{\min} = 0.4$$

$$W_{\max} = 0.9$$

2.2.4. Función adaptación

Para la función adaptación que es básicamente la misma función objetivo que se trabaja en el código viene dada por el flujo de cargas de los sistemas IEEE de 33 barras y el sistema IEEE de 69 barras.

2.2.5. Flujo de cargas

Para el análisis de flujo de cargas es de suma importancia para reconocer las condiciones iniciales del sistema a trabajar, por otra parte también es capaz de brindar información necesaria para aplicar los métodos que nos lleven a un mejoramiento en la operación y eficacia del mismo, en el caso de este trabajo de investigación el flujo de cargas analiza y facilita la implementación de los dispositivos STATCOM para tener una mejor compensación de reactivos, señalando de alguna forma con los datos obtenidos los mejores lugares más probables y óptimos para la ubicación de este dispositivo, y así para mejorar el rendimiento del sistema, ejecutando una regulación de tensión para disminuir las pérdidas. Estos estudios de flujos de carga dan a conocer como resultados la magnitud y el ángulo de fase de la tensión en cada una de las barras de la red, el flujo de potencia activa y reactiva, y las pérdidas en el sistema. (Kumarasamy & Raghavan, 2012)

2.2.6. Cálculos de potencia

De acuerdo con la matriz de admitancia resultante es posible calcular la potencia activa y la potencia reactiva, las cuales se obtienen con las siguientes ecuaciones:

$$P_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \cos \theta_{ij} + B_{ij} * \sin \theta_{ij}) \quad (9)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \sin \theta_{ij} - B_{ij} * \cos \theta_{ij}) \quad (10)$$

Donde:

P_i = Potencia activa inyectada en la barra

Q_i = Potencia reactiva inyectada en la barra

2.2.7. Función objetivo

Se tiene que como principal objetivo para la compensación de reactivos se propone realizar una minimización en las pérdidas activas, con la implementación del algoritmo por enjambre de partículas, se propone como la función objetivo en la ecuación (11) la cual se relaciona con la minimización de las pérdidas activas del sistema, teniendo en cuenta la potencia que absorbe o inyecta el STATCOM, ya que los flujos de carga son parte primordial para la ubicación de los STATCOM. (Rocha, Castro, & Jesus, 2018)

$$FO: P_{loss} = \sum_{i=1}^n P_{gi} - \sum_{j=1}^m (P_{dj} - P_{STAT}) \quad (11)$$

2.2.8. Cálculo de potencia para STATCOM

Por último, se implementan las siguientes ecuaciones para calcular la potencia activa y potencia reactiva que el STATCOM intercambiara con el sistema.

$$P_{STAT} = 0 \quad (12)$$

$$Q_{STAT} = \left[\left(V_j * V_{STAT} / X_{STAT} \right) * \cos(\theta_{STATj} - \theta_j) - V_j^2 / X_{STAT} \right] \quad (13)$$

Donde:

P_{STAT} = Potencia activa del STATCOM

Q_{STAT} = Potencia reactiva del STATCOM

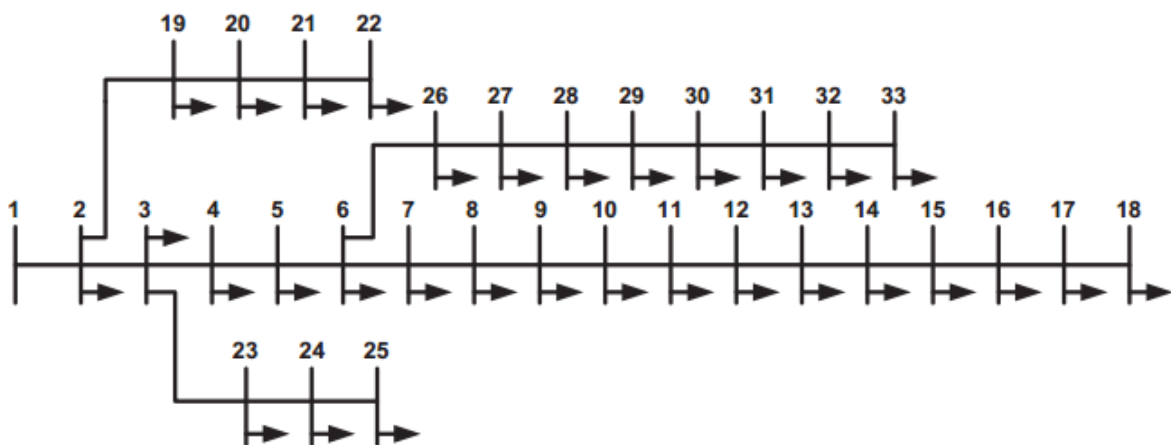
V_{STAT} = Voltaje del STATCOM

2.3. DESCRIPCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO O SISTEMAS DE PRUEBA

2.3.1. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN IEEE DE 33 BARRAS

Para los resultados del sistema con los datos iniciales son obtenidos a partir de un flujo de cargas óptimo simulado en MATLAB. En la siguiente figura se representa el diagrama unifilar de un sistema de distribución de la IEEE de 33 barras considerándolo como primer caso de estudio; el cual este sistema está conformado por barras, líneas de conexión y cargas, este sistema tiene un nivel de voltaje base de 12.6 Kv y una potencia base de 1 MVA.

Figura 8 Diagrama unifilar del sistema IEEE de 33 barras.

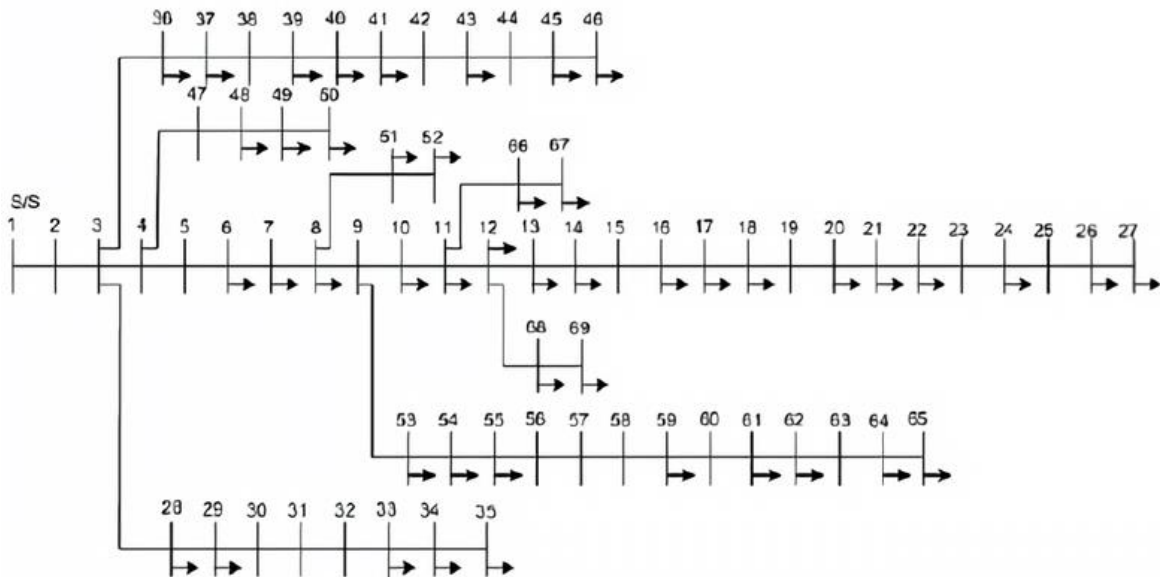


Tomada de: https://www.researchgate.net/figure/Figura-2-Sistema-teste-IEEE-33-barras_fig2_343485695

2.3.2. SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN IEEE DE 69 BARRAS

Al igual que en el caso anterior, para los datos del sistema en condiciones iniciales son obtenidos a partir de un flujo de cargas óptimo simulado en MATLAB y en la siguiente figura se representa el diagrama unifilar de un sistema de distribución de la IEEE de 69 barras considerado como segundo caso de estudio; el cual está conformado por barras, líneas de conexión y cargas, este sistema también tiene un nivel de voltaje base de 12.6 Kv y una potencia base de 1 MVA.

Figura 9 Diagrama unifilar del sistema IEEE de 69 barras.



Tomada de https://www.researchgate.net/figure/IEEE-69-bus-distribution-network_fig1_224089896

3. CAPÍTULO III

RESULTADOS

3.1. SISTEMA DE 33 BARRAS

Para resolver el algoritmo propuesto en el sistema IEEE de 33 barras se plantea el siguiente procedimiento.

PRIMER PASO:

Se ingresan los datos del sistema de distribución en por unidad: número de barras, datos de las líneas y datos de las barras. A continuación, en las siguientes tablas se encuentran los datos.

3.1.1. CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA IEEE DE 33 BARRAS

Para los resultados del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales se utilizan los siguientes datos de resistencia y reactancia de la línea:

Tabla 2 Datos para las líneas de un sistema IEEE de 33 barras.

Barra (i)	Barra (j)	RL (ohm)	XL (ohm)
1	2	0,0922	0,0477
2	3	0,493	0,2511
3	4	0,366	0,1864
4	5	0,3811	0,1941
5	6	0,819	0,707
6	7	0,1872	0,6188
7	8	1,7114	1,2351
8	9	1,03	0,74
9	10	1,044	0,74
10	11	0,1966	0,065
11	12	0,3744	0,1238
12	13	1,468	1,155
13	14	0,5416	0,7129
14	15	0,591	0,526
15	16	0,7463	0,545

16	17	1,289	1,721
17	18	0,732	0,574
2	19	0,164	0,1565
19	20	1,5042	1,3554
20	21	0,4095	0,4784
21	22	0,7089	0,9373
3	23	0,4512	0,3083
23	24	0,898	0,7091
24	25	0,896	0,7011
6	26	0,203	0,1034
26	27	0,2842	0,1449
27	28	1,059	0,9337
28	29	0,8042	0,7006
29	30	0,5075	0,2585
30	31	0,9744	0,936
31	32	0,3105	0,3619
32	33	0,341	0,5302

Fuente: Elaborada por el autor.

Y en la siguiente tabla la potencia activa y reactiva de cada barra:

Tabla 3 Datos para las cargas de un sistema IEEE de 33 barras.

Barra	P (Kw)	Q (Kvar)			
1	0	0	17	60	20
2	100	90	18	90	40
3	90	40	19	90	40
4	120	80	20	90	40
5	60	30	21	90	40
6	60	20	22	90	40
7	200	100	23	90	50
8	200	100	24	420	200
9	60	20	25	420	200
10	60	20	26	60	25
11	45	30	27	60	25
12	60	35	28	60	20
13	60	35	29	120	70
14	120	80	30	200	600
15	60	10	31	150	70
16	60	20	32	210	100
			33	60	40

Fuente: Elaborada por el autor.

SEGUNDO PASO:

Se asignan las variables de las magnitudes eléctricas:

V_{STAT} , P_g , P_{STAT} , Q_g , Q_{STAT} , P_{LOSS} .

TERCER PASO:

Inicialización de ángulos y magnitudes de voltaje para las barras y el STATCOM.

$$V_j = 0.99 \text{ Pu}$$

$$V_{STAT} = 0.99 \text{ Pu}$$

$$\Theta_j = 0$$

$$\Theta_{STAT} = 0$$

CUARTO PASO:

Se halla el flujo óptimo bajo las condiciones iniciales mediante las siguientes ecuaciones.

Minimización de pérdidas de la función objetivo:

$$FO: P_{loss} = \sum_{i=1}^n P_{gi} - \sum_{j=1}^m (P_{dj} - P_{STAT})$$

Balance de potencia activa:

$$P_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \cos \theta_{ij} + B_{ij} * \sin \theta_{ij})$$

Balance de potencia reactiva:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \sin \theta_{ij} - B_{ij} * \cos \theta_{ij})$$

Dando como resultado del flujo de cargas del sistema simulado en MATLAB, obteniendo los valores de tensión Y perdidas de potencia. Se obtienen los siguientes datos:

Tabla 4 Datos del flujo de potencia en condiciones iniciales obtenidos en MATLAB.

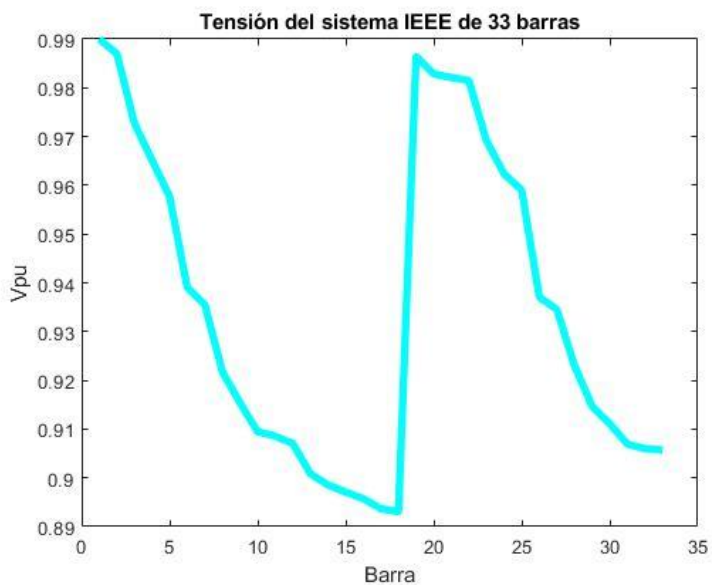
Barra	Perdidas (Kw)	perdidas (Kvar)	Tensión (Pu)
1	12,6136	6,5257	0,99
2	53,026	27,0078	0,987
3	20,3988	10,3889	0,9727
4	19,1705	9,7638	0,9651
5	39,2145	33,8518	0,9577
6	1,9911	6,5817	0,939
7	12,1506	8,769	0,9355
8	4,3664	3,137	0,9217
9	3,719	2,6361	0,9154
10	0,5782	0,1912	0,9094
11	0,9203	0,3043	0,9086
12	2,7854	2,1915	0,907
13	0,7619	1,0029	0,9008
14	0,3732	0,3322	0,8985
15	0,2942	0,2149	0,8971
16	0,2631	0,3512	0,8957

17	0,0555	0,0436	0,8937
18	0,1643	0,1568	0,8931
19	0,8494	0,7654	0,9864
20	0,1028	0,1201	0,9828
21	0,0445	0,0589	0,9821
22	3,2503	2,2209	0,9815
23	5,255	4,1496	0,9691
24	1,3154	1,0293	0,9624
25	2,6574	1,3536	0,959
26	3,4024	1,7347	0,9371
27	11,5535	10,1865	0,9345
28	8,0102	6,9783	0,923
29	3,9839	2,0292	0,9147
30	1,6322	1,5679	0,9111
31	0,2184	0,2545	0,9069
32	0,0135	0,021	0,906
33	215,1355	145,92	0,9057

Fuente: Elaborada por el autor.

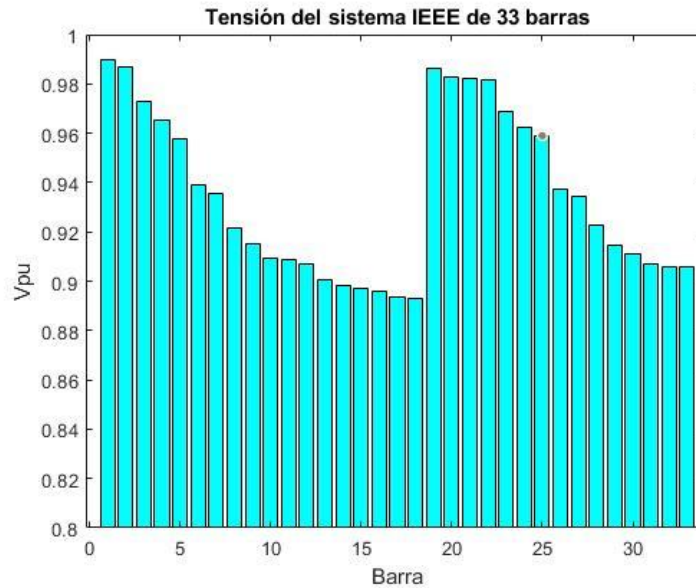
En la siguiente figura se representa el perfil de tensión en cada barra bajo las condiciones iniciales del sistema.

Figura 10 Tensiones del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales.



Fuente: Elaborada por el autor.

Figura 11 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales.



Fuente: Elaborada por el autor.

Se observa en la figura 11 que el perfil de tensión por lo general se encuentra en límites aceptables, pero en algunas barras la tensión se encuentra un poco reducido, por estos motivos es que resulta necesario la implementación de alguna estrategia para la compensación, y en el caso de este trabajo de investigación se encuentra factible la implementación de los dispositivos STATCOM mediante la ubicación óptima con el método de optimización por enjambre de partículas.

QUINTO PASO:

Se inicializa la potencia activa y reactiva para el STATCOM con las siguientes ecuaciones:

Potencia activa:

$$P_{STAT} = 0$$

Potencia reactiva:

$$Q_{STAT} = \left[\left(V_j * V_{STAT} / X_{STAT} \right) * \cos(\theta_{STATj} - \theta_j) - V_j^2 / X_{STAT} \right]$$

Y se establece un número máximo de STATCOM para incluir en el sistema.

3.1.2. INCLUSIÓN DE STATCOM PARA EL SISTEMA IEEE DE 33 BARRAS.

A través de la optimización resuelta por el algoritmo PSO, se obtiene una óptima ubicación de los STATCOM, los resultados obtenidos de la optimización muestran los valores de potencia reactiva que el STATCOM intercambia con el sistema, y en la siguiente tabla se evidencia la ubicación de las barras a compensar para el sistema.

Para la compensación de potencia reactiva el cual minimiza las pérdidas y mejora los perfiles de tensión se logra mediante la ubicación de 2 STATCOM que se localizan en las siguientes barras:

Tabla 5 Ubicación y compensación de STATCOM para sistema IEEE de 33 barras.

	Barra	Q (Kvar)
STATCOM 1	18	494
STATCOM 2	30	676

Fuente: Elaborada por el autor.

Con la optimización del método empleado se obtuvieron los siguientes resultados implementando los STATCOM en las ubicaciones de las barras correspondientes:

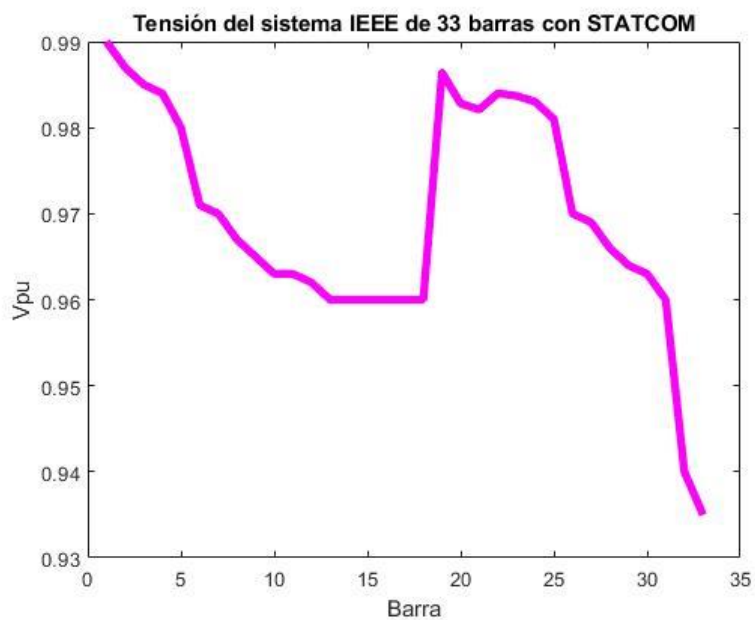
Tabla 6 Tensión del sistema IEEE de 33 barras con STATCOM.

Barra	Vpu		
1	0,99	17	0,96
2	0,987	18	0,96
3	0,985	19	0,9864
4	0,984	20	0,9828
5	0,98	21	0,9821
6	0,971	22	0,984
7	0,97	23	0,9837
8	0,967	24	0,983
9	0,965	25	0,981
10	0,963	26	0,97
11	0,963	27	0,969
12	0,962	28	0,966
13	0,96	29	0,964
14	0,96	30	0,963
15	0,96	31	0,96
16	0,96	32	0,94
		33	0,935

Fuente: Elaborada por el autor.

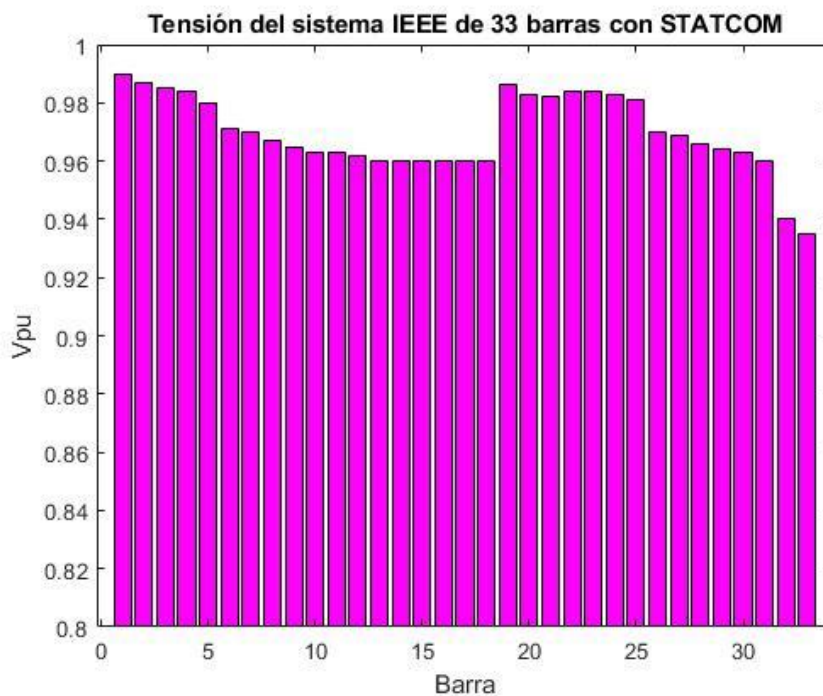
En la siguiente figura se puede apreciar el perfil de voltaje en cada barra después de la inclusión de STATCOM para el sistema IEEE de 33 barras.

Figura 12 Tensiones del sistema IEEE de 33 barras con inclusión de STATCOM.



Fuente: Elaborada por el autor.

Figura 13 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 33 barras con STATCOM.



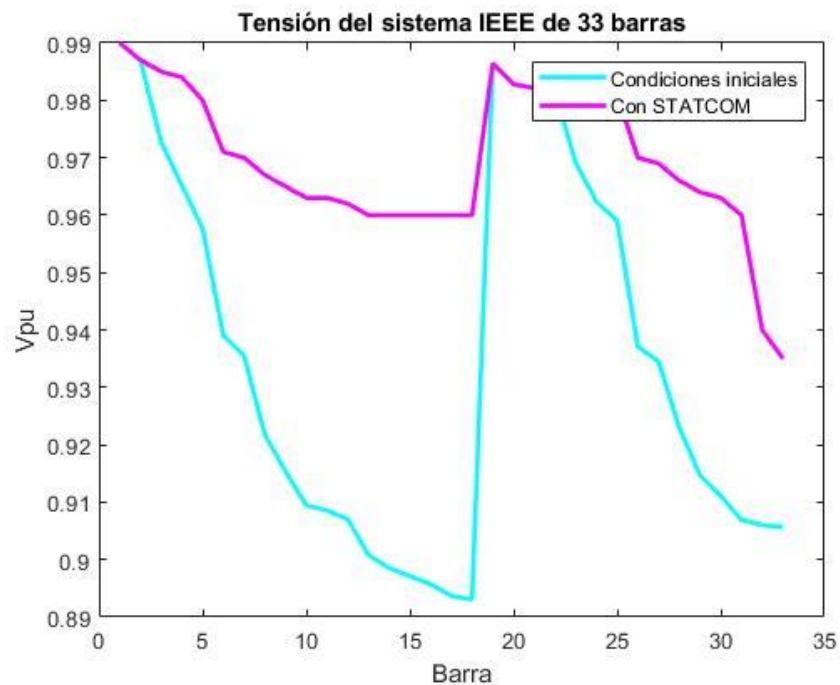
Fuente: Elaborada por el autor.

En la figura 12 y 13 gracias a la inclusión de los STATCOM en la barra 18 y en la barra 30, se logra observar una mejoría en los niveles de tensión del sistema de la IEEE de 33 barras. A continuación, en la siguiente gráfica se logra observar de una manera más detallada la diferencia de las tensiones en condiciones iniciales VS la inclusión de los STATCOM.

SEXTO PASO:

Comparación de los resultados de los voltajes y perdidas del sistema compensado y sin optimizar.

Figura 14 Tensión bajo condiciones iniciales VS implementación de STATCOM.



Fuente: Elaborada por el autor.

Por último, en la siguiente tabla se evidencian las pérdidas de potencia del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales y también bajo la inclusión de STATCOM.

Tabla 7 Perdidas de potencia en el sistema IEEE de 33 barras.

Condición	Perdidas (Kw)
Inicial	215
STATCOM	156

Fuente: Elaborada por el autor.

SÉPTIMO PASO: Fin.

3.2. SISTEMA DE 69 BARRAS

Igualmente, para resolver el algoritmo propuesto en el sistema IEEE de 69 barras se plantea el mismo procedimiento que en el sistema de 33 barras.

PRIMER PASO:

Se ingresan los datos del sistema de distribución en por unidad: número de barras, datos de las líneas y datos de las barras. A continuación, en las siguientes tablas se encuentran los datos.

3.2.1. CONDICIONES INICIALES DEL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS

Para los resultados del sistema IEEE de 69 barras en condiciones iniciales se utilizan los siguientes datos de resistencia y reactancia de la línea:

Tabla 8 Datos para las líneas del sistema IEEE de 69 barras.

Barra (i)	Barra (j)	RL (ohm)	XL (ohm)
1	2	0,0005	0,0012
2	3	0,0005	0,0012
3	4	0,0015	0,0036
4	5	0,0251	0,0294
5	6	0,366	0,1864
6	7	0,3811	0,1941
7	8	0,0922	0,047
8	9	0,0493	0,0251
9	10	0,819	0,2707
10	11	0,1872	0,0619
11	12	0,7114	0,2351
12	13	1,03	0,34
13	14	1,044	0,345
14	15	1,058	0,3496
15	16	0,1966	0,065
16	17	0,3744	0,1238
17	18	0,0047	0,0016
18	19	0,3276	0,1083
19	20	0,2106	0,069
20	21	0,3419	0,1129
21	22	0,014	0,0046
22	23	0,1591	0,0526
23	24	0,3463	0,1145
24	25	0,7488	0,2475
25	26	0,3089	0,1021
26	27	0,1732	0,0572
3	28	0,0044	0,0108
28	29	0,064	0,1565
29	30	0,3978	0,1315
30	31	0,0702	0,0232
31	32	0,351	0,116
32	33	0,839	0,2816
33	34	1,708	0,5646
34	35	1,474	0,4873
3	36	0,0044	0,0108
36	37	0,064	0,1565
37	38	0,1053	0,123
38	39	0,0304	0,0355
39	40	0,0018	0,0021
40	41	0,7283	0,8509
41	42	0,31	0,3623
42	43	0,041	0,0478
43	44	0,0092	0,0116
44	45	0,1089	0,1373
45	46	0,0009	0,0012
4	47	0,0034	0,0084
47	48	0,0851	0,2083
48	49	0,2898	0,7091
49	50	0,0822	0,2011
8	51	0,0928	0,0473
51	52	0,3319	0,114
9	53	0,174	0,0886
53	54	0,203	0,1034
54	55	0,2842	0,1447
55	56	0,2813	0,1433
56	57	1,59	0,5337
57	58	0,7837	0,263
58	59	0,3042	0,1006
59	60	0,3861	0,1172
60	61	0,5075	0,2585
61	62	0,0974	0,0496
62	63	0,145	0,0738
63	64	0,7105	0,3619
64	65	1,041	0,5302
11	66	0,2012	0,0611
66	67	0,0047	0,0014
12	68	0,7394	0,2444
68	69	0,0047	0,0016

Y en la siguiente tabla la potencia activa y reactiva de cada barra:

Tabla 9 Datos para las cargas del sistema IEEE de 69 barras.

Barra	P (Kw)	Q (Kvar)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0	0
5	0	0
6	2,6	2,2
7	40,4	30
8	75	54
9	30	22
10	28	19
11	145	104
12	145	104
13	8	5
14	8	5
15	0	0
16	45	30
17	60	35
18	60	35
19	0	0
20	1	0,6
21	114	81
22	5	3,5
23	0	0
24	28	20
25	0	0
26	14	10
27	14	10
28	26	18,6
29	26	18,6
30	0	0
31	0	0
32	0	0
33	10	10
34	14	14

35	4	4
36	26	18,55
37	26	18,55
38	0	0
39	24	17
40	24	17
41	102	1
42	0	0
43	6	4,3
44	0	0
45	39,22	26,3
46	39,22	26,3
47	0	0
48	79	56,4
49	384,7	274,5
50	384,7	274,5
51	40,5	28,3
52	3,6	2,7
53	4,35	3,5
54	26,4	19
55	24	17,2
56	0	0
57	0	0
58	0	0
59	100	72
60	0	0
61	1244	888
62	32	23
63	0	0
64	227	162
65	59	42
66	18	13
67	18	13
68	28	20
69	28	20

Fuente: Elaborada por el autor.

SEGUNDO PASO:

Se asignan las variables de las magnitudes eléctricas:

V_{STAT} , P_g , P_{STAT} , Q_g , Q_{STAT} , P_{LOSS} .

TERCER PASO:

Inicialización de ángulos y magnitudes de voltaje para las barras y el STATCOM.

$$V_j = 0.99 \text{ Pu}$$

$$V_{STAT} = 0.99 \text{ Pu}$$

$$\Theta_j = 0$$

$$\Theta_{STAT} = 0$$

CUARTO PASO:

Se halla el flujo optimo bajo las condiciones iniciales mediante las siguientes ecuaciones.

Minimización de pérdidas de la función objetivo:

$$FO: P_{loss} = \sum_{i=1}^n P_{gi} - \sum_{j=1}^m (P_{dj} - P_{STAT})$$

Balance de potencia activa:

$$P_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \cos \theta_{ij} + B_{ij} * \sin \theta_{ij})$$

Balance de potencia reactiva:

$$Q_i = \sum_{j=1}^m |V_i| * |V_j| * (G_{ij} * \sin \theta_{ij} - B_{ij} * \cos \theta_{ij})$$

Dando como resultado del flujo de cargas del sistema simulado en MATLAB, obteniendo los valores de tensión Y perdidas de potencia. Se obtienen los siguientes datos:

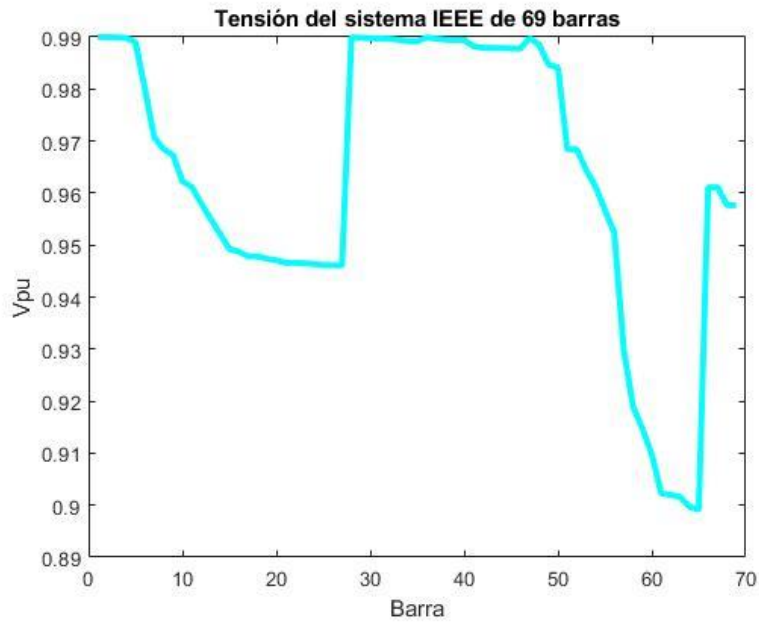
Tabla 10 Datos del flujo de potencia en condiciones iniciales obtenidos en MATLAB.

Barra	perdidas (Kw)	Perdidas (Kvar)	Tensión
1	0,0789	0,1893	0,99
2	0,0789	0,1893	0,99
3	0,1991	0,4778	0,9899
4	1,978	2,3169	0,9898
5	28,8427	14,6893	0,989
6	29,9741	15,2663	0,98
7	7,0415	3,5895	0,9707
8	3,447	1,7549	0,9684
9	4,8688	1,6093	0,9673
10	1,0341	0,342	0,9623
11	2,2321	0,7377	0,9612
12	1,3079	0,4317	0,958
13	1,2683	0,4191	0,9551
14	1,2282	0,4059	0,9521
15	0,2282	0,0755	0,9493
16	0,3274	0,1082	0,9487
17	0,0027	0,0009	0,9478
18	0,1064	0,0352	0,9478
19	0,0684	0,0224	0,9474
20	0,1098	0,0363	0,9471
21	0,0005	0,0002	0,9466
22	0,0053	0,0017	0,9466
23	0,0114	0,0038	0,9465
24	0,0062	0,002	0,9464
25	0,0025	0,0008	0,9462
26	0,0004	0,0001	0,9461
27	0,0003	0,0007	0,9461
28	0,0021	0,0051	0,9899
29	0,004	0,0013	0,9899
30	0,0007	0,0002	0,9898
31	0,0035	0,0012	0,9897
32	0,0084	0,0028	0,9897
33	0,0071	0,0023	0,9895
34	0,0003	0,0001	0,9892

35	0,0028	0,0068	0,9892
36	0,0327	0,08	0,9899
37	0,0426	0,0498	0,9897
38	0,0123	0,0144	0,9895
39	0,0006	0,0007	0,9894
40	0,1774	0,2073	0,9894
41	0,0206	0,024	0,9882
42	0,0027	0,0032	0,9879
43	0,0005	0,0007	0,9879
44	0,0062	0,0078	0,9879
45	0	0	0,9878
46	0,0238	0,0587	0,9878
47	0,5947	1,4558	0,9898
48	1,667	4,0789	0,9885
49	0,1183	0,2894	0,9847
50	0,0018	0,0009	0,9841
51	0	0	0,9684
52	5,9108	3,0097	0,9684
53	6,8618	3,4951	0,9645
54	9,3292	4,75	0,9612
55	8,9872	4,5783	0,9568
56	50,7989	17,0512	0,9524
57	25,0384	8,4026	0,93
58	9,7189	3,2141	0,9189
59	10,9105	3,3119	0,9147
60	14,341	7,3047	0,9097
61	0,1146	0,0583	0,9023
62	0,138	0,0702	0,902
63	0,676	0,3444	0,9016
64	0,0421	0,0215	0,8997
65	0,0027	0,0008	0,8991
66	0	0	0,9611
67	0,0238	0,0079	0,9611
68	0	0	0,9577
69	230,073	104,6185	0,9577

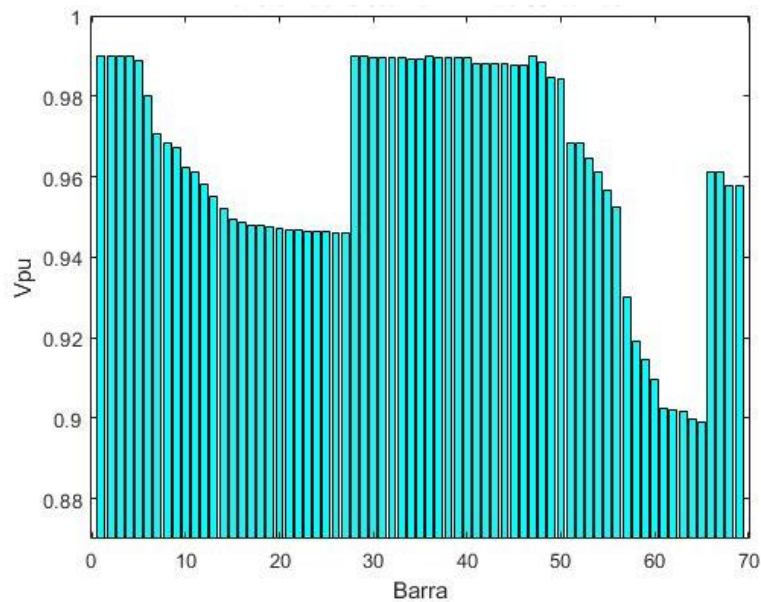
En la siguiente figura se representa el perfil de tensión en cada barra bajo las condiciones iniciales del sistema.

Figura 15 Tensiones para el sistema IEEE de 69 barras bajo condiciones iniciales.



Fuente: Elaborada por el autor.

Figura 16 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 69 barras en condiciones iniciales.



Fuente: Elaborada por el autor.

Se observa en la figura 15 y 16 donde se puede observar que el perfil de tensión por lo general se encuentra en límites aceptables, pero en algunas barras la tensión se encuentra un poco reducido, por estos motivos es que resulta necesario la implementación de alguna estrategia para la compensación, y en el caso de este trabajo de investigación se encuentra factible la implementación de los dispositivos STATCOM mediante la ubicación óptima con el método de optimización por enjambre de partículas.

QUINTO PASO:

Se inicializa la potencia activa y reactiva para el STATCOM con las siguientes ecuaciones:

Potencia activa:

$$P_{STAT} = 0$$

Potencia reactiva:

$$Q_{STAT} = \left[\left(V_j * V_{STAT} / X_{STAT} \right) * \cos(\theta_{STATj} - \theta_j) - V_j^2 / X_{STAT} \right]$$

Y se establece un número máximo de STATCOM para incluir en el sistema.

3.2.2. INCLUSIÓN DE STATCOM PARA EL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS

A través de la optimización resuelta por el algoritmo PSO se obtiene una óptima ubicación de los STATCOM, los resultados obtenidos de la optimización muestran los valores de potencia reactiva que el STATCOM intercambia con el sistema, y en la siguiente tabla se evidencia la ubicación de las barras a compensar para el sistema.

Para la compensación de potencia reactiva el cual minimiza las pérdidas y mejora los perfiles de tensión se logra mediante la ubicación de 2 STATCOM que se localizan en las siguientes barras:

Tabla 11 Ubicación y compensación de los STATCOM para el sistema IEEE de 69 barras.

	Barra	Q (Kvar)
STATCOM 1	56	970
STATCOM 2	63	1140

Fuente: Elaborada por el autor.

Con la optimización del método empleado se obtuvieron los siguientes resultados implementando los STATCOM en las ubicaciones de las barras correspondientes:

Tabla 12 Tensión del sistema IEEE de 69 barras con STATCOM.

Barra	Vpu		
1	0,99	22	0,964
2	0,99	23	0,965
3	0,9899	24	0,963
4	0,9898	25	0,962
5	0,989	26	0,962
6	0,98	27	0,96
7	0,977	28	0,9899
8	0,975	29	0,9899
9	0,975	30	0,9898
10	0,973	31	0,9897
11	0,971	32	0,9897
12	0,9707	33	0,9895
13	0,9704	34	0,9892
14	0,9702	35	0,9892
15	0,97	36	0,9899
16	0,969	37	0,9897
17	0,968	38	0,9895
18	0,967	39	0,9894
19	0,966	40	0,9894
20	0,966	41	0,9882
21	0,965	42	0,9879
		43	0,9879

44	0,9879
45	0,9898
46	0,9878
47	0,9876
48	0,9865
49	0,9847
50	0,9841
51	0,9686
52	0,9684
53	0,9687
54	0,968
55	0,9675
56	0,96

57	0,94
58	0,938
59	0,937
60	0,9378
61	0,9384
62	0,9374
63	0,9367
64	0,9355
65	0,9359
66	0,9611
67	0,9611
68	0,9577
69	0,9577

Fuente: Elaborada por el autor.

Y en la siguiente figura se puede apreciar el perfil de voltaje en cada barra después de la inclusión de STATCOM para el sistema IEEE de 69 barras.

Figura 17 Tensiones del sistema IEEE de 69 barras con inclusión de STATCOM.

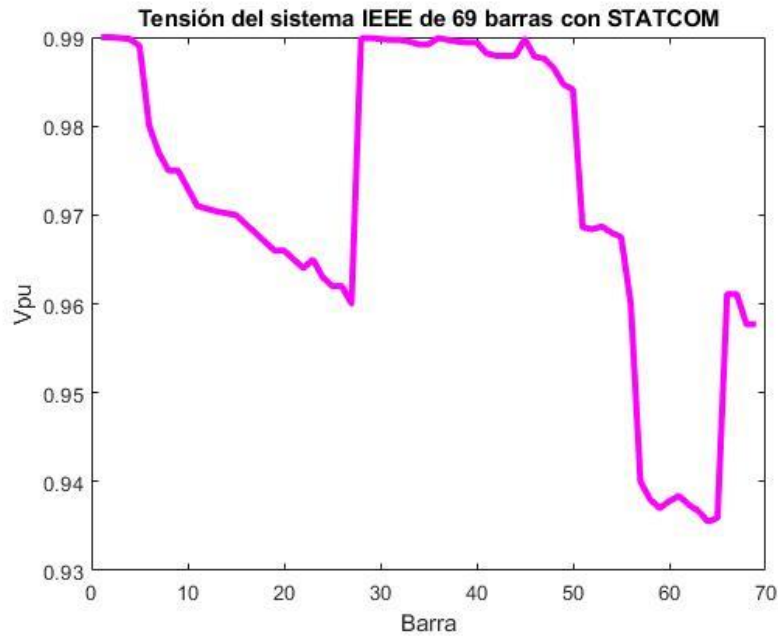
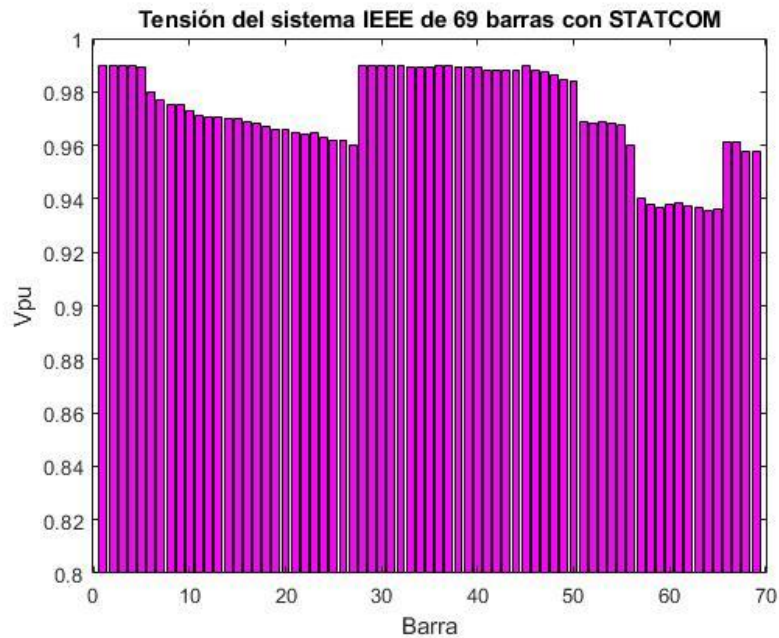


Figura 18 Diagrama de barras para las tensiones del sistema IEEE de 69 barras con STATCOM.



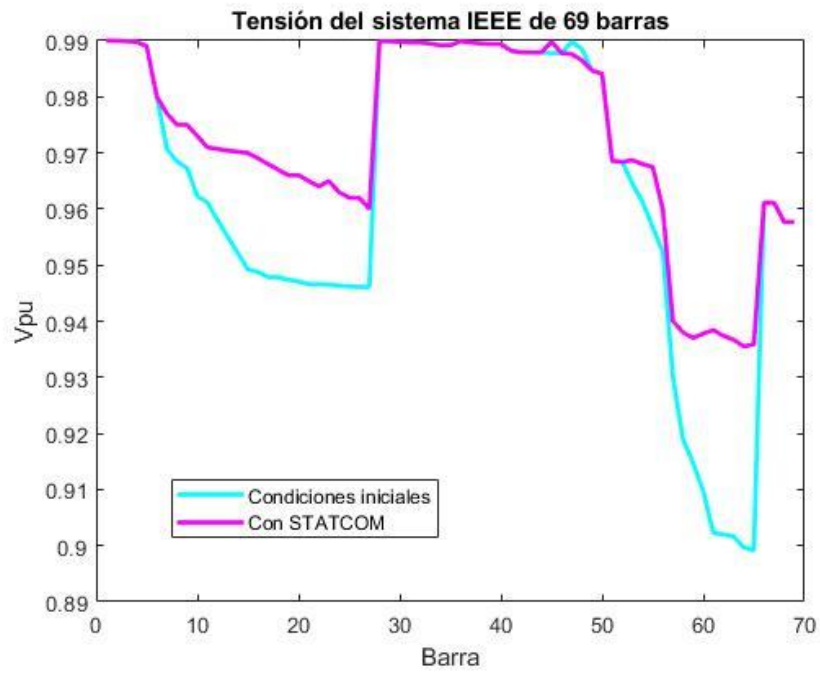
Fuente: Elaborada por el autor.

En la figura 17 y 18 gracias a la inclusión de los STATCOM en la barra 56 y en la barra 63, se logra observar una mejoría en los niveles de tensión del sistema de la IEEE de 69 barras. A continuación, en la siguiente gráfica se logra observar de una manera más detallada la diferencia de las tensiones en condiciones iniciales VS la inclusión de los STATCOM.

SEXTO PASO:

Comparación de los resultados de los voltajes y perdidas del sistema compensado y sin optimizar.

Figura 19 Tensión bajo condiciones iniciales VS implementación de STATCOM.



Fuente: Elaborada por el autor.

Por último, en la siguiente tabla se evidencian las pérdidas de potencia del sistema IEEE de 33 barras en condiciones iniciales y también bajo la inclusión de STATCOM.

Tabla 13 Pérdidas de potencia en sistema IEEE de 69 barras.

Condición	Pérdidas (Kw)
Inicial	230
STATCOM	173

Fuente: Elaborada por el autor.

SÉPTIMO PASO: Fin.

3.2.3. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL SISTEMA DE 33 BARRAS.

Para verificar los resultados obtenidos en el sistema IEEE de 33 barras mediante el uso de la técnica de optimización por enjambre de partículas, se realiza una comparación con otros trabajos investigativos donde aplican diferentes métodos de optimización.

Tabla 14 Comparación de pérdidas para IEEE de 33 barras.

Algoritmo	Perdidas (Kw)
HFPSO	151,34
BFOA	152,86
MOPSO	152,14
GA	153

Fuente: (Shafeeq & Ibrahim, 2022)

Como ya se mencionó anteriormente las pérdidas obtenidas en este trabajo de investigación fueron de aproximadamente 156 Kw, por lo que se puede decir que el método empleado es óptimo al compararlo con los métodos de la tabla 14.

3.2.4. COMPARACIÓN DE RESULTADOS PARA EL SISTEMA IEEE DE 69 BARRAS.

Igualmente se hace la comparación para el sistema de 69 barras teniendo en cuenta los siguientes valores de pérdidas de los distintos métodos de optimización.

Tabla 15 Comparación de pérdidas para IEEE de 69 barras.

Algoritmo	perdidas (Kw)
CSA	152,95
GA	167,9

Fuente: (Shafeeq & Ibrahim, 2022)

Para el sistema de 33 barras son muy escasos los métodos empleados, sin embargo, al comparar estos datos encontrados con las pérdidas obtenidas de este trabajo donde igualmente se mencionaron anteriormente que son de 173 Kw, se visualiza una óptima solución para la compensación del sistema.

3.3. ANÁLISIS DE IMPACTOS DEL TRABAJO DE GRADO

3.3.1. IMPACTOS ECONÓMICOS

Como ya se sabe la energía reactiva es la demanda extra de energía eléctrica que necesitan algunos componentes eléctricos para crear campos magnéticos y eléctricos necesarios para su funcionamiento, como son todos los equipos con bobina, motores de maquinarias, transformadores, etc. Por lo cual la compensación de energía reactiva teniendo en cuenta la implementación de STATCOM para este trabajo, conlleva grandes impactos económicos ya que la energía reactiva tiene sus penalizaciones al estar descompensados los sistemas de distribución.

La compensación de la energía reactiva tiene los siguientes beneficios:

- Disminuye las pérdidas de energía.
- Aumenta la capacidad de las líneas.
- Mejora la tensión en las redes.
- Consigue una gran reducción en el coste global de la energía

3.3.2. IMPACTOS INVESTIGATIVOS

El trabajo también contiene impactos investigativos, ya que los aspectos más destacados del trabajo propuesto son el dimensionamiento y ubicación óptima de STATCOM para la compensación de reactivos, mejorando el perfil de voltaje y su estabilidad. Por otra parte, los métodos implementados fueron los sistemas de la IEEE de 33 y 69 barras por lo que se tiene un amplio campo de investigación en cuanto concierne a la estabilidad de voltaje en las barras, incremento de cargas y también fallas y contingencias que conllevan a interrupciones de la red por el motivo de que los sistemas no se encuentran compensados.

Por lo mencionado anteriormente este trabajo esta basado en la investigación ya que contiene un método para la ubicación óptima de STATCOM para la compensación de reactivos en sistemas de distribución, pero al aplicar la técnica también mejora la estabilidad de voltaje en los sistemas utilizados, de esta manera dándole una solución a las contingencias que se encuentran es estos sistemas.

4. CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1.1. CONCLUSIONES

Al implementar el modelo de optimización matemática propuesto, se logra la compensación de potencia reactiva, se mejora el perfil de tensión y se reducen confortablemente las pérdidas de potencia activa del sistema; Usando este algoritmo, STATCOM es una muy buena solución para su ubicación y dimensionamiento. El modelo produce resultados que tienen en cuenta la ubicación de estos dispositivos electrónicos en las barras 18 y 30, minimizando las pérdidas activas en un 12,7% para el sistema de 33 barras y en un 16,68 % para el sistema de 69 barras en las barras 56 y 63.

La tensión para ambos casos de estudio se estableció entre 0.9 y 0.99pu, lo que incrementa una mejora en la estabilidad del sistema y por lo mismo mejora generalmente su eficiencia. El estudio consideró la implementación de un dispositivo de compensación "FACTS", para este trabajo de investigación el dispositivo STATCOM, porque mejora la compensación de potencia en los reactivos, a pesar de que también existen otras técnicas o estrategias que pueden solucionar el mismo problema, pero estos dispositivos tienen la capacidad de controlar la dinámica del sistema y mejorar el flujo de potencia ya que con esta acción le permite saber al STATCOM si necesita inyectar o absorber energía reactiva de la red, asegurando así una compensación óptima.

Al desarrollar el código PSO en MATLAB, se observó que la respuesta devuelta por este código variaba levemente con cada ejecución, lo que sugiere que el sistema ofrece múltiples soluciones, cada una con una pequeña variación, pero manteniendo una funcionalidad correcta en base a los resultados obtenidos de la simulación.

4.1.2. TRABAJOS FUTUROS

Se propone como estudio posterior a este trabajo mejorar el modelo de optimización propuesto de tal manera que se pueda modelar el STATCOM, considerando sus características de filtrado de armónicos.

Por otra parte, también como trabajo futuro se propone, plantear una función objetivo para el modelo de optimización, pero tendiendo en cuenta la minimización de costos para la implementación de los STATCOM.

REFERENCIAS

- Ahmad, M., & Sheeraz, K. (2022). Simulation and analysis of a grid integrated distribution system based on LMS algorithm for hybrid types of load. *Scopus*.
- Castiblanco, C., Toro, D., & Giral, D. (2021). Optimal placement and sizing of d-statcom in radial and meshed distribution networks using a discrete-continuous version of the genetic algorithm. *Scopus*.
- Castiblanco, C., Toro, D., & montoya, O. (2021). Optimal Placement and Sizing of D-STATCOM in Radial and. *Scopus*.
- Dhivya, S., & Arul, R. (2021). Improved flower pollination algorithm-based optimal placement and sizing of DG for practical indian 52 bus system. *Scopus*.
- Gaur, D. (2017). Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques. *IopScience*.
- Gaurav, T. (2017). A review on Reactive power compensation techniques using FACTS devices. *Indian Journals*.
- Jabir, H. J. (2018). Impacts of Demand-Side managment on Electrical power systems. *Energies*.
- Kar, M., Kumar, S., & Panigrahi, S. (2021). Reactive power management by using a modified differential evolution algorithm. *Scopus*.
- Kumarasamy, K., & Raghavan, R. (2012). Particle Swarm Optimization algorithm for voltage stability improvement using multiple STATCOM. *IEEE Explore*.
- Liu, F. (2018). The nonlinear internal control of STATCOM; theory and application . *ScienceDirect*.
- Mangaraj, M., & Sabat, J. (2020). Comparative analysis of both three fifth level based STATCOM using lcos technique . *Scopus*.
- Marini, F., & Walczak, B. (2018). Particle swarm optimization (PSO). A tutorial. *ScienceDirect*.
- Ni, Z., & Narimani, M. (2019). A new fast formulation of model predictive control for CHB STATCOM. *Scopus*.
- Panda Sidhartha, N. P. (2018). Optimal location and controller design of STATCOM for power system stability. *ScienceDirect*.
- Resener, M., & Haffner, S. (2018). Optimization techniques applied to planning of electric power distribution systems . *SpringerLink*.
- Rocha, L., Castro, R., & Jesus, J. M. (2018). An improved particle swarm optimization algorithm for optimal placement and sizing of STATCOM. *Electrical Energy Systems*.

- Rohouma, W., & Balog, R. S. (2018). Capacitor-Less D-STATCOM for Reactive Power . *Scopus*.
- Rosales, A., Grisales, L., Montano, J., & Montoya, O. (2021). Application of the multiverse optimization method to solve the optimal power flow problem in direct current electrical networks. *Scopus*.
- Sanam, J., Ganguly, S., & panda, A. (2017). Distribution STATCOM with optimal phase angle injection model. *Scopus*.
- Saxena, N. K., Gao, W. D., & Kumar, A. (2022). Frequency regulation for microgrid using genetic algorithm and particle swarm optimization tuned STATCOM. *Scopus*.
- Shafeeq, A. F., & Ibrahim, I. (2022). Simple Strategy for Finding Optimal Location and Size of Distributed Generators and SVC Devices in Radial Distribution Systems. *Scopus*.
- Shetty, D. (2017). Ziegler Nichols method based Robust reactive current controller for STATCOM. *ScienceDirect*.
- Tolabi, H., & Shakarami, M. (2018). Dynamic Modeling and Controller Design of DSTATCOM in a Microgrid Based on Combination of Fuzzy Set and Galaxy-based Search Algorithm. *Scopus*.
- Tuzikova, V., Tlustý, J., & Müller, Z. (2018). A Novel Power Losses Reduction Method Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm Using STATCOM. *Energies*.
- Wang, P., Liu, Y., & Lin, J. (2022). Harris Hawks Optimization-Based Algorithm for STATCOM Voltage Regulation of Offshore Wind Farm Grid. *Scopus*.
- Xu, Y., Dong, Z. Y., & Guan, L. (2018). Preventive Dynamic Security Control of Power Systems Based on Pattern Discovery Technique. *IEEE Xplore*.
- Yang, X., & Tao, H. (2021). Multi - Objective optimal allocation of STATCOM based on Harmony search algorithm. *Scopus*.