

MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO ANUAL EN REDES DE DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

CRISTHIAN EDUARDO MOLINA CELIS
JOHN CAMILO RAMIREZ VIDAL

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Bogotá D.C., Colombia
2021

MAXIMIZACIÓN DEL BENEFICIO ECONÓMICO ANUAL EN REDES DE DISTRIBUCIÓN A TRAVÉS DE LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA

CRISTHIAN EDUARDO MOLINA CELIS
JOHN CAMILO RAMIREZ VIDAL

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar por el título de:
Ingeniero Eléctrico

Modalidad: **Monografía**

Director:
I.E. EDWIN RIVAS TRUJILLO MSc. PhD.

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica
Bogotá D.C., Colombia
2021

Dedicatoria

El trabajo de grado está dedicado a mis hermanos y a mi novia porque gracias al apoyo y confianza que me brindaron pude superar las adversidades que se presentaron en el camino, pero en especial se lo dedico a mi mamá, ya que sin su esfuerzo esto no habría sido posible, esto es por ella y para ella.

Cristhian Molina

Este trabajo de grado está dedicado a mi a mis hermanos, a mi tía y abuela quienes siempre me brindaron un apoyo incondicional, pero sobre todo se lo dedico a mi papá y a mi mamá, quienes nunca dejaron de creer en mí; un logro que mas que propio, es de ellos y para ellos.

Camilo Ramírez.

Agradecimientos

En primer lugar agradecer a nuestro director de trabajo I.E., MSc. PhD. EDWIN RIVAS TRUJILLO por sus oportunas y prontas correcciones siempre con la mejor disposición.
A todos los docentes que hicieron parte de nuestro proceso formativo el cuál tiene como resultado final el presente trabajo de grado.
A nuestros amigos, familiares y compañeros que siempre nos dieron palabras de apoyo para seguir adelante y nos brindaron momentos de esparcimiento necesarios para hacer más llevadero el camino hasta este punto.

Resumen

Este trabajo de grado presenta la formulación e implementación de un algoritmo de Programación No Lineal Entero Mixto (MINLP) que optimiza la ubicación y tamaño de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica, minimizando las pérdidas de potencia de la red y maximizando su TCS anual.

En primera instancia se presenta una aproximación teórica sobre la inclusión óptima de diferentes tecnologías (BESS, GDs y FACTS) en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica, con el fin de obtener un panorama referente a los diferentes modelos de optimización implementados y los resultados obtenidos en cada línea de investigación. Además, se exponen los beneficios que se obtienen al incluir STATCOMs en redes de distribución y se plantean las bases teóricas que dieron cabida al desarrollo del proyecto.

Posteriormente se expuso la formulación matemática y estrategia de solución del modelo de optimización incluyendo sus restricciones y los dos escenarios planteados para la obtención de los resultados. Además, se definieron las redes de distribución radial IEEE-33 e IEEE-69 como sistemas de prueba y se exhibieron sus características.

Finalmente, el algoritmo de optimización fue implementado a los sistemas de prueba mediante el software de optimización GAMS. Se definieron dos casos base para la red IEEE-33 (A y B) y dos escenarios solución para ambos sistemas de prueba, con el fin de realizar una comparación veraz con los algoritmos IA y GHS propuestos en [1] y [2] respectivamente. La comparación se hizo a través de los resultados obtenidos referentes a la disminución de pérdidas de potencia, maximización del beneficio económico y corrección del perfil de tensión.

ABREVIACIONES

Z	Potencia activa que se pierde por las líneas.
Pg_i	Potencia activa generada en el nodo i.
Pd_i	Potencia activa demandada en el nodo i.
Qg_i	Potencia reactiva generada en el nodo i.
Qd_i	Potencia reactiva demandada en el nodo i.
V_i	Magnitud de tensión del nodo i.
V_j	Magnitud de tensión del nodo j.
δ_i	Ángulo de tensión del nodo i.
δ_j	Ángulo de tensión del nodo j.
Y_{ij}	Magnitud de admitancia entre los nodos i-j.
Θ_{ij}	Ángulo de admitancia entre los nodos i-j.
V_i^{min}	Límite inferior de las tensiones nodales.
V_i^{max}	Límite superior de las tensiones nodales.
$\#STATCOMs^{max}$	Número límite de dispositivos a ubicar.
X_i	Variable de decisión binaria.
Q_{gS}^{max}	Potencia reactiva máxima con la que puede dimensionarse el STATCOM.
Q_{gS}	Potencia reactiva óptima del STATCOM.
K_P	Costo por pérdidas de energía.
T	Horas totales por año.
$P_{sinSTATCOM}$	Potencia activa que se pierde antes de la instalación del STATCOM.
$P_{conSTATCOM}$	Potencia activa que se pierde después de la instalación del STATCOM.
K_C	Proporción de duración de tiempo.
$STATCOM_{Costo-Año}$	Costo anual de funcionamiento del dispositivo.
$STATCOM_{Costo-Total}$	Costo por dimensionamiento del dispositivo.
B	Tasa de rendimiento de los activos.
$N^{STATCOM}$	Vida útil del STATCOM.
TCS	Total Cost Savings.
GAMS	General Algebraic Modeling System.

CONTENIDO

RESUMEN III

ABREVIACIONES IV

CONTENIDO VI

Lista de figuras VIII

Lista de tablas X

1 INTRODUCCIÓN 1

1.1 Antecedentes . . . 2
1.2 Justificación . . . 2
1.3 Planteamiento del problema . . . 3
1.4 Objetivos . . . 7
1.4.1 Objetivo General . . . 7
1.4.2 Objetivos Específicos . . . 7

2 MARCO REFERENCIAL Y METODOLOGÍA 9

2.1 MARCO TEÓRICO . . . 9
2.1.1 Flujo de Potencia Óptimo (FPO) . . . 9
2.1.2 Limitaciones de los sistemas de potencia . . . 9
2.1.3 Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) . . . 10
2.1.4 Pérdidas de potencia . . . 10
2.1.5 Pérdidas de potencia técnicas . . . 10
2.1.5.1 Pérdidas Fijas . . . 10
2.1.5.2 Pérdidas Variables . . . 11
2.1.6 Pérdidas de potencia no técnicas . . . 11
2.1.7 Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS) . . . 11
2.1.8 Tipos de controladores FACTS . . . 12
2.1.8.1 Controladores Serie . . . 12
2.1.8.2 Controladores Paralelo . . . 12
2.1.8.3 Controladores Serie-Paralelo . . . 13

2.1.9 Static Synchronous Compensator (STATCOM) . . . 13
2.2 METODOLOGÍA . . . 14

3 FORMULACIÓN MATEMÁTICA y ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN 17
3.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA . . . 17
3.1.1 FPL . . . 17
3.1.2 FPO . . . 17
3.1.2.1 Escenario 1 . . . 18
3.1.2.2 Escenario 2 . . . 18
3.1.3 STATCOMs . . . 18
3.1.4 TCS Anual . . . 18
3.1.5 Diagrama de flujo . . . 19
3.2 ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN . . . 19
3.2.1 Conjuntos y escalares . . . 19
3.2.2 Información del Sistema . . . 19
3.2.3 Variables . . . 21
3.2.4 Restricciones operativas . . . 21
3.2.5 Ecuaciones . . . 22
3.2.6 Formulación Matemática . . . 23
3.2.7 Características del modelo . . . 23
3.2.8 Estructura global de la estrategia de solución ambientada en GAMS 23

4 SISTEMAS DE PRUEBA Y RESULTADOS 25
4.1 SISTEMAS DE PRUEBA . . . 25
4.1.1 IEEE-33 . . . 25
4.1.2 IEEE-69 . . . 26
4.2 RESULTADOS . . . 29
4.2.1 IEEE-33 . . . 29
4.2.1.1 Escenario 1 . . . 29
4.2.1.2 Escenario 2 . . . 32
4.2.2 IEEE-69 . . . 34
4.2.2.1 Escenario 1 . . . 34
4.2.2.2 Escenario 2 . . . 36

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 39
5.1 Conclusiones . . . 39
5.2 Trabajos Futuros . . . 40

BIBLIOGRAFIA 41

Lista de figuras

Figura 2.1: Representación de los controladores FACTS: a) Controlador Serie, b) Controlador Paralelo, c) Controlador Serie-Paralelo. Fuente: [21] 12
Figura 2.2: Esquema para un STATCOM conectado a un sistema de máquina síncrona y barraje infinito. Fuente: [31] 14

Figura 3.1: Diagrama de flujo estrategía de solución 20
Figura 3.2: Creación de conjuntos y escalares en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia. 21
Figura 3.3: Creación de tablas referentes a la información del sistema en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia. 21
Figura 3.4: Creación de variables en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia. 21
Figura 3.5: Definición de los límites de dispersión para las tensiones nodales del sistema. Fuente: Elaboración propia. 22
Figura 3.6: Modificación del algoritmo solución para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia. 22
Figura 3.7: Definición de las ecuaciones a solucionar por el modelo de optimización en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia. 22
Figura 3.8: Representación de las ecuaciones en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia. 23
Figura 3.9: Caracterización del modelo y opciones de visualización. Fuente: Elaboración propia 23
Figura 3.10: Estructura global de la estrategia de solución ambientada en GAMS. Fuente: Elaboración propia. 24

Figura 4.1: Sistema de distribución radial IEEE-33. Fuente: [12] 25
Figura 4.2: Sistema de distribución radial IEEE-69. Fuente: [12] 27
Figura 4.3: Perfil de tensión del sistema sin y con la inclusión del STATCOM (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 30
Figura 4.4: Comparación del perfil de tensión entre [18] y escenario 1. Fuente: Elaboración propia. 31
Figura 4.5: Comparación del perfil de tensión entre [19] y escenario 1. Fuente: Elaboración propia. 32

Figura 4.6: Perfiles de tensión superpuestos (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia. 32
Figura 4.7: Perfil de tensión del sistema sin y con la fijación del nodo Slack (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 34
Figura 4.8: Comparación de resultados entre algoritmos de optimización. Fuente: Elaboración propia. 35
Figura 4.9: Perfil de tensión del sistema con y sin la inclusión del STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 35
Figura 4.10: Perfil de tensión del sistema con y sin la inclusión del STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 36
Figura 4.11: Perfil de tensión del sistema sin y con la fijación del nodo Slack (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 38
Figura 4.12: Comparación de resultados entre algoritmos de optimización. Fuente: Elaboración propia. 38

Lista de tablas

Tabla 1.1: Antecedentes - Parte 1. Fuente: Elaboración propia. 4
Tabla 1.2: Antecedentes - Parte 2. Fuente: Elaboración propia. 5
Tabla 1.3: Resumen de metodologías utilizadas en la literatura para la ubicación y dimensionamiento optimo de STATCOMS en sistemas eléctricos de potencia. 6

Tabla 2.1: Metodología usada para el desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia. 15

Tabla 4.1: Datos del sistema de distribución radial IEEE-33. Fuente: [32] . . . 26
Tabla 4.2: Datos del sistema de distribución radial IEEE-69 - Parte 1. Fuente: [18] 27
Tabla 4.3: Datos del sistema de distribución radial IEEE-69 - Parte 2. Fuente: [18] 28
Tabla 4.4: Restricciones para el FPO y los STATCOMs. Fuente: Elaboración propia. 29
Tabla 4.5: Valores de los parámetros para calcular el TCS anual. Fuente: [18], [19] 29
Tabla 4.6: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia. 29
Tabla 4.7: Pérdidas con y sin STATCOM (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia. 30
Tabla 4.8: Comparación de resultados (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 30
Tabla 4.9: Reducción de pérdidas de potencia discriminados por algoritmo (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 31
Tabla 4.10: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-33, escenario 2). Fuente: Elaboración propia. 33
Tabla 4.11: Pérdidas con y sin fijación del nodo Slack (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 33
Tabla 4.12: Comparación de resultados entre escenarios (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia. 33
Tabla 4.13: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-69, escenario 1). Fuente: Elaboración propia. 34

Tabla 4.14: Pérdidas con y sin STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 34
Tabla 4.15: Comparación de resultados (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 36
Tabla 4.16: Reducción de pérdidas de potencia discriminados por algoritmo (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 36
Tabla 4.17: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-69, escenario 2). Fuente: Elaboración propia. 37
Tabla 4.18: Pérdidas con y sin fijación del nodo Slack (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 37
Tabla 4.19: Comparación de resultados entre escenario (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia. 37

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución son parte fundamental de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), se encargan de suministrar la energía eléctrica a los usuarios finales. Se estima que una red eléctrica de topología radial presenta alrededor del 70 % de las pérdidas del sistema de potencia y que dos terceras partes de la inversión en sistemas eléctricos están asociadas a dicho fin [3], [4].

Por ende, los estudios se han enfocado en optimizar la distribución de energía eléctrica, con el fin minimizar las pérdidas, mejorar los perfiles de tensión y reducir los costos de operación.

Uno de los métodos que ha surgido para la optimización de los sistemas de distribución de energía eléctrica es la inclusión de los Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS, Flexible Alternating Current Transmission System) en nodos específicos de la red. Desde el punto de vista del estado estacionario, los dispositivos FACTS funcionan suministrando o absorbiendo potencia reactiva, aumentando o reduciendo el voltaje y controlando la impedancia en serie de las líneas de transmisión o el ángulo de fase [5].

El Static Synchronous Compensator (STATCOM) es un compensador conectado en derivación que pertenece a la segunda generación de dispositivos FACTS [6], cuya característica más importante es que ofrece una alta flexibilidad en la gestión y el control del sistema eléctrico, dado que proporciona potencia reactiva en respuesta a los transitorios de tensión de la red mejorando su estabilidad de tensión [7], el perfil de tensión y reduciendo las pérdidas de potencia en condiciones de estado estacionario [8].

Sin embargo, el efecto de los STATCOMs en los sistemas de distribución depende en gran medida de su tipo, tamaño, número y ubicación dentro de la red [9]. En este trabajo se expone e implementa la formulación matemática de un algoritmo de Programación No Lineal Entero Mixto (MINLP, Mixed Integer Nonlinear Programming) para optimizar la

inclusión, en ubicación y tamaño, de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica; con el fin de maximizar su beneficio económico (TCS, Total Cost Savings) anual a través de la minimización de las pérdidas de potencia.

1.1. Antecedentes

En la literatura científica se han reportado estudios de diferentes tecnologías como baterías, generadores distribuidos y FACTS encaminados a determinar su ubicación y funcionamiento óptimo, a partir de modelos de Programación Entero Mixto (MIP, Mixed Integer Programming), No Lineal (NLP, Nolinear Programming) y MINLP. En las Tablas 1.1 y 1.2 se muestran algunos de los estudios previamente mencionados.

1.2. Justificación

Un alto porcentaje de las redes de distribución presentan topologías radiales o con mallas débiles las cuales, debido a su alta relación R/X, presentan grandes caídas de tensión y pérdidas de potencia [13]. Esto junto con el rápido crecimiento de la demanda y la lenta expansión del sistema eléctrico [21], ha generado una serie de inconvenientes en los sistemas de distribución tales como la inestabilidad de tensión, baja eficiencia, disminución en la capacidad de carga y grandes pérdidas económicas tanto para el sector eléctrico como para los usuarios finales del sistema [16], [22].

Para encontrar una respuesta adecuada ante estas problemáticas es de vital importancia que se puedan incluir, sobre la infraestructura ya presente, dispositivos de control que permitan ofrecer una solución técnico-económica en conjunto a través de la implementación de modelos de optimización estructurados con base al flujo de potencia de la red.

La inclusión de STATCOMs en los sistemas de distribución nace ante la necesidad de incrementar su eficiencia a partir de un control eficaz sobre la red eléctrica, debido a que la asignación óptima de dichos dispositivos maximiza la capacidad de carga, minimiza las pérdidas de potencia, compensa la potencia reactiva, mejora la estabilidad y la calidad de potencia [23].

Es posible encontrar diferentes estudios enfocados en incrementar la eficiencia de los sistemas de distribución a partir de distintos algoritmos que permiten simular el comportamiento de la red. Dichos estudios, a través de la incorporación de STATCOMs, buscan brindar un mejor servicio a los usuarios al mismo tiempo que aumentan el beneficio económico para los operadores de red.

El proyecto de grado presenta una alternativa para la inclusión de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica, complementaria a las expuestas en la literatura científica; la cual permita disminuir las pérdidas de potencia, maximizar el beneficio económico y mejorar los perfiles de tensión.

1.3. Planteamiento del problema

Para no sobrecargar las líneas de distribución de energía y utilizar su máxima capacidad, las empresas de servicios públicos tienen soluciones costosas que requieren mucho tiempo para su ejecución, como la construcción de nuevas líneas. Alternativamente, existen medidas operativas orientadas al mismo objetivo, tales como: cambios topológicos a través de conmutación de línea, el control de flujo de potencia activa y reactiva, entre otras [5].

Desde el punto de vista del control de flujo de potencia una de las alternativas disponibles para gestionar y maximizar los recursos de transmisión ya existentes, con elevados niveles de seguridad y estabilidad, es la implementación de FACTS [24]. Además, los dispositivos FACTS encajan con el enfoque alternativo ya que mejoran la eficiencia de las redes existentes de manera que no se exceden los límites térmicos, al tiempo que aumentan la capacidad de carga del sistema y disminuyen las pérdidas de potencia [5].

Los compensadores basados en electrónica de potencia conectados en paralelo, en las últimas décadas, han cobrado importancia dentro de los sistemas de distribución debido al alto porcentaje de disminución de pérdidas de potencia que se puede lograr con su implementación [20].

El STATCOM es considerado un compensador dinámico de potencia reactiva que varía sus salidas en función de las condiciones de operación de la red, operando de manera constante al realizar inyecciones continuas de potencia reactiva en función del comportamiento de la demanda [25].

Por lo tanto, es importante realizar estudios elaborados sobre el tema de la ubicación y dimensionamiento de STATCOMs para optimizar el funcionamiento de los sistemas de distribución a partir de la minimización de las pérdidas de potencia.

De acuerdo con lo anterior, surge la siguiente pregunta problema: ¿Cómo maximizar el TCS anual de un sistema de distribución a través de la minimización de las pérdidas de potencia?

Tabla 1.1: Antecedentes - Parte 1. Fuente: Elaboración propia.

Ref.	Objetivo	Metodología	Sistema de Prueba	Resultados
[10]	Maximizar el beneficio total del sistema al construir nuevas líneas de transmisión e instalar BESS (Battery Energy Storage System).	Implementación de un algoritmo en GAMS que optimice la construcción de líneas adicionales, el dimensionamiento y la ubicación de BESS.	Garver de 6 nodos. IEEE-24	El trabajo proporciona una herramienta valiosa para decidir sobre la idoneidad y las características de BESS en la Planificación de la Expansión de los sistemas de Transmisión (TEP, Transmission network Expansion Planning).
[11]	Maximizar el beneficio total del sistema al construir nuevas líneas de transmisión e instalar BESS.	Implementación de un algoritmo MIP en GAMS para la integración de BESS en un modelo TEP.	Garver de 6 nodos.	La investigación muestra que la inclusión de BESSS en los modelos TEP aumenta el beneficio social neto de todo el sistema, al disminuir los costos operativos, pérdidas y la congestión de la red.
[12]	Minimizar las pérdidas de potencia activa.	Implementación de un algoritmo MINLP en GAMS para optimizar la inclusión de Generadores Distribuidos (DGs, Distributed Generators) en sistemas de distribución.	IEEE-33 IEEE-69	Se propuso un modelo matemático representado a través de un algoritmo MINLP el cual, después de ser comparado con múltiples metodologías reportadas en la literatura especializada, muestra una eficiencia y precisión superiores en términos de reducción de pérdidas de potencia.
[13]	Minimizar las pérdidas de potencia.	Implementación de un algoritmo MINLP en GAMS para optimizar la ubicación de DGs en sistemas de distribución, dividido en dos fases: SPM (Siting Planning Model) y CPM (Capacity Planning Model).	IEEE-33 IEEE-69	El algoritmo MINLP propuesto brinda un mejor desempeño debido a su propiedad de colocación simultánea de múltiples unidades de DGs. Además, la formulación propuesta es general y se puede implementar para cualquier tipo y cantidad de unidades de DGs
[14]	Optimizar la inclusión de controladores serie-paralelo	Implementación de un algoritmo NLP y otro MINLP, en Matlab y GAMS, para optimizar la ubicación de los controladores dentro del sistema.	IEEE-14	Los resultados muestran la efectividad del algoritmo propuesto para ubicar de manera óptima el controlador shunt-serie en sistemas de transmisión. Además, los resultados ilustran que el Controlador de Flujo Híbrido (HFC, Hybrid Flow Controller) se puede aplicar en pro maximizar los beneficios del despachador en función de los aspectos técnicos y económicos.
[15]	Optimizar la inclusión de dispositivos TCSC (Thyristor Controlled Series Compensation).	Implementación de un algoritmo MINLP en GAMS para optimizar la ubicación y el número de dispositivos TCSC.	IEEE-24	Se obtuvo el número y la ubicación óptimos de dispositivos TCSC para un conjunto y combinación de contratos bilaterales y conjuntos para determinar la capacidad de carga del sistema utilizando un enfoque basado en un algoritmo MINLP en mercados de electricidad desregulados. Además, se encontró que La capacidad de carga del sistema aumenta sustancialmente cuando se optimiza la inclusión de dispositivos TCSC, para el grupo y para la combinación del grupo con el modelo bilateral.

Tabla 1.2: Antecedentes - Parte 2. Fuente: Elaboración propia.

Ref.	Objetivo	Metodología	Sistema de Prueba	Resultados
[16]	Determinar el efecto de los STATCOMs en la mitigación de las pérdidas de potencia y mejora de la estabilidad de tensión en sistemas de transmisión.	Desarrollo de un modelo de STATCOM utilizando objetos de control predefinidos vinculados a DSL (DIgSILENT Simulation Language), considerando cuatro (4) diferentes escenarios.	IEEE-14	Un STATCOM es capaz de brindar un soporte rápido de voltaje para evitar la probabilidad de un colapso por estabilidad en magnitud de tensión y mitigar las pérdidas de potencia a lo largo de las líneas de transmisión. La reducción de las pérdidas de potencia reactiva a lo largo de las líneas es mayor que las pérdidas de potencia activa, lo que resulta en la mejora del perfil de voltaje a medida que el dispositivo se encuentra conectado al sistema.
[17]	Mejorar el perfil de tensión en redes de distribución	Implementación de un Controlador Lógico Difuso (FLC, Fuzzy Logic Controller) para un STATCOM en MATLAB, para dos diferentes condiciones de carga (balanceada y desbalanceada), en presencia de perturbaciones sobre ella.	Propuesto por el autor	El sistema de compensación con FLC mejora el voltaje de carga y aumenta el margen de estabilidad en aproximadamente un 20 %. Además, el STATCOM ofrece una compensación más flexible, un menor tiempo de respuesta y no afecta a los parámetros de red.
[6]	Optimizar la inclusión de STATCOMs en sistemas de potencia.	Implementación de un algoritmo de Búsqueda de Armonía Global (GHS, Global Harmony Search Algorithm) para encontrar la ubicación y el tamaño óptimos de los dispositivos a instalar.	IEEE-30	El algoritmo GHS propuesto reduce el valor de la función multiobjetivo restringida (maximizar la estabilidad de voltaje del sistema y simultáneamente minimizar las pérdidas de potencia activa, la desviación de voltaje de bus y el costo total de una inversión), mejorando así el rendimiento y la confiabilidad del sistema de energía.
[1]	Maximizar la capacidad de carga en sistemas de transmisión.	Implementación de un algoritmo Genético (GA, Genetic Algorithm) para encontrar la óptima ubicación de STATCOMs.	IEEE-14	Una óptima ubicación de STATCOMs a través del GA permite mejorar la capacidad de carga del sistema con un perfil de tensión estable. Además, se encontró que el método implementado mejora la capacidad de transferencia de potencia con una mínima variación de voltaje, demostrado una relación directa entre el margen de carga seguro y los límites de estabilidad en los sistemas de potencia.
[8]	Minimizar las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de tensión en redes de distribución.	Implementación de un algoritmo de Evolución Diferencial (DEA, Differential Evolution Algorithm) para optimizar la reconfiguración de la red y la inclusión de STATCOMs.	IEEE-69 IEEE-83	Combinar la inclusión óptima de STATCOMs y la reconfiguración de la red además de reducir las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de tensión, permite mejorar la calidad de energía y de potencia, la capacidad de carga y la estabilidad del sistema.
[2]	Minimizar las pérdidas de potencia y controlar las tensiones nodales.	Desarrollo e implementación de un Algoritmo de Enjambre de Partículas (PSA, Particle Swarm Algorithm) en MATLAB para definir la ubicación óptima de un STATCOM y mejorar la estabilidad y confiabilidad de la red.	IEEE-14 IEEE-30	Los estudios han confirmado el alto rendimiento del STATCOM con el sistema de control diseñado que le permite trabajar en los modos de emergencia y post emergencia a través del algoritmo PSA. Es posible observar los beneficios de utilizar este método en las redes eléctricas para mejorar su funcionamiento en términos de regulación de voltaje, estabilidad del sistema y minimización de pérdidas de potencia.
[18]	Minimizar las pérdidas de potencia y mejorar el perfil de tensión.	Desarrollo de un Algoritmo Inmunológico (IA, Immune Algorithm) para encontrar la ubicación y el tamaño óptimos de STATCOMs en sistemas de distribución.	IEEE-33 IEEE-69	A través del algoritmo IA, se obtiene la ubicación y el tamaño óptimos de STATCOMs para disminuir la pérdida de potencia, su costo y mejorar el perfil de tensión. En comparación con otros algoritmos, el IA proporciona resultados superiores en cuanto al dimensionamiento del STATCOM, tiempo de procesamiento (CPU), corrección del perfil de tensión y minimización de las pérdidas de potencia.
[19]	Minimizar las pérdidas de potencia.	Desarrollo de un algoritmo de Búsqueda de Armonía Global (GHS, Global Harmony Search Algorithm) para encontrar la ubicación y el tamaño óptimos de STATCOMs en sistemas de distribución.	IEEE-33.	La optimización basada en el algoritmo GHS propuesto es más eficaz que la optimización basada en el algoritmo IA. Lo anterior se afirma con base en que la implementación del STATCOM en el sistema de distribución radial de prueba, a través del algoritmo GHS, arrojó mejores resultados en cuanto a la minimización de la función objetivo (pérdidas de potencia).

Tabla 1.3: Resumen de metodologías utilizadas en la literatura para la ubicación y dimensionamiento optimo de STATCOMS en sistemas eléctricos de potencia.

Solution Methodology	**Reference**	**Year**
Construir nuevas líneas de transmisión e instalar BESS (Battery Energy Storage System).	[10]	{2020}
Maximizar el beneficio economico total del sistema al construir nuevas líneas de transmisión e instalar BESS a través de un modelo MIP	[11]	{2014}
Implementacion de un algoritmo MINLP en GAMS para optimizar la inclusion de Generadores Distribuidos (DGs, Distributed Generators) en sistemasde distribucion.	[12]	{2012}
Non-dominated elitist sorting algorithm	**Lopez2011**	2011
Particle swarm optimization	**Khalil2012**	2012
Bacterial search algorithm	**Legha2015**	2015
Sine-cosine optimization algorithm	**Ismael2017**	2017
Crow search algorithm	**Abdelaziz2017**	2017
Teaching-learning based optimization algorithm	**Hassen2017**	2017
Tabu search algorithm	**IngeniereTABU**	2018
Exact MINLP solution in GAMS	**MONTOYA2018**, [20]	{2018, 2021}
Whale optimization algorithm	**Ismael2019**	2019
Branch wise minimization technique	**Kumari2019**	2019
Evaporation rate water cycle algorithm	**9392495**	2021

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Maximizar el TCS anual en sistemas de distribución de energía eléctrica a través de la minimización de las pérdidas de potencia.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Desarrollar un algoritmo MINLP que permita optimizar la inclusión, en ubicación y tamaño, de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica.

- Implementar el algoritmo MINLP en GAMS tomando como caso de estudio los sistemas de distribución radial IEEE-33 e IEEE-69.

- Contrastar los resultados obtenidos referentes a la disminución de pérdidas de potencia, cuantificación del beneficio económico y el perfil de tensión, con los presentados por otros autores.

Capítulo 2

MARCO REFERENCIAL Y METODOLOGÍA

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Flujo de Potencia Óptimo (FPO)

El FPO es una herramienta matemática usada en el planeamiento operativo de los sistemas de potencia para determinar el despacho de generación que minimiza el costo operativo mejorando las condiciones de operación. Es un problema de optimización no lineal que representa la operación en estado estacionario del sistema eléctrico de potencia y permite determinar el valor óptimo de las variables de control considerando las restricciones técnicas de operación [26].

2.1.2. Limitaciones de los sistemas de potencia

El crecimiento desproporcional entre la demanda y la capacidad de transmisión del sistema ha conllevado a que estos últimos se vean obligados constantemente a operar cada vez más cerca de sus límites seguros. Este problema se agrava cuando construir una nueva línea de transmisión no es posible debido a la dificultad para obtener los derechos de vía, sobre todo por temas medio ambientales. Adicional a esto, la carga cada vez se aleja más de la generación, por lo que los sistemas de potencia son obligados a transmitir altas potencias a través de grandes distancias por enlaces débiles, comprometiendo la estabilidad del sistema de potencia y la calidad del servicio. Además de esto, los SEP presentan otras tres limitantes que comprometen su capacidad de transmisión [21]:

a. Limitaciones térmicas: están relacionadas a las características eléctricas de los conductores. Limitan la cargabilidad de la línea al límite térmico.

b. Limitaciones dieléctricas: están relacionadas al nivel aislamiento del equipamiento

eléctrico del sistema. Limita el nivel de voltaje de transmisión.

c. Limitaciones de estabilidad: problemas de estabilidad de voltaje y de estabilidad transitoria limitan el máximo valor de transferencia de potencia, sobre todo en sistemas con enlaces pos-falla débiles.

2.1.3. Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP)

La Programación No Lineal Enteros Mixtos (MINLP) es el área de optimización que aborda problemas no lineales con variables continuas y enteras. El campo del MINLP ha recibido una mayor atención en las últimas dos décadas con contribuciones en el lado teórico, algorítmico y computacional que se originan en una comunidad en crecimiento que involucra a ingenieros, matemáticos e investigadores de operaciones [27].

2.1.4. Pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia que se presentan en los SEP se pueden clasificar en técnica y no técnicas.

2.1.5. Pérdidas de potencia técnicas

Las pérdidas de potencia técnicas se producen por la disipación de energía en los conductores durante los procesos de transmisión y distribución, y en el proceso transformación (núcleos y devanados de los transformadores) [3]. Las pérdidas técnicas se dividen a su vez en dos tipos: pérdidas fijas y pérdidas variables.

2.1.5.1. Pérdidas Fijas

Las pérdidas fijas no dependen de la corriente y se estima que entre 1/4 y 1/3 de las pérdidas técnicas en las redes de distribución son pérdidas permanentes. Las principales pérdidas fijas se enumeran a continuación [28]:

a. Pérdidas por efecto corona.

b. Pérdidas por corrientes de fuga.

c. Pérdidas dieléctricas.

d. Pérdidas producidas por carga continua de elementos de medida.

e. Pérdidas producidas por carga continua de elementos de control.

2.1.5.2. Pérdidas Variables

Las pérdidas variables dependen de la corriente y son proporcionales al cuadrado de esta (efecto Joule). Se estima que entre 2/3 y 3/4 de las pérdidas técnicas en las redes de distribución son pérdidas variables [28].

2.1.6. Pérdidas de potencia no técnicas

Las pérdidas no técnicas son causadas por acciones externas al sistema, ya sea debido a conexiones ilegales del servicio eléctrico, falta de pago de la factura de servicios públicos por parte de los clientes finales o errores en el mantenimiento de los equipos de medición. Las conexiones ilegales pueden causar sobrecargas y mal funcionamiento de los equipos eléctricos, por lo que la rentabilidad de las empresas de servicios públicos se ve afectada debido al consumo de energía no cuantificado [3].

2.1.7. Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna (FACTS)

The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) define los FACTS como: "Los sistemas de transmisión de corriente alterna que incorporan electrónica de potencia y otros controladores estáticos para mejorar la controlabilidad e incrementar la capacidad de transferencia en los sistemas de potencia". Los principales beneficios del uso de dispositivos FACTS en sistemas eléctricos son [29]:

a. Mejor control sobre el flujo de potencia, guiándola a través de determinados caminos (menos cargados).

b. Posibilidad de operación con niveles de carga seguros (sin sobre cargas) y cercanos a los límites térmicos de las líneas de transmisión.

c. Mayor capacidad de transferencia de potencia en áreas controladas, con la consiguiente reducción del margen de reserva en generación.

d. Aumento de la seguridad del sistema, aumentando el límite de estabilidad transitoria y restringiendo las corrientes de cortocircuito y las de sobrecarga.

e. Atenuación de las oscilaciones de potencia del sistema, las cuales son dañinas para los sistemas y equipamientos conectados a la red.

f. Actuación rápida ante cambio en las condiciones de la red, proporcionando un control del flujo de la potencia real y efectivo.

2.1.8. Tipos de controladores FACTS

Los controladores FACTS se agrupan en 3 categorías según el principio de compensación en la red y su forma de conexión [21]:

a. Controladores Serie.

b. Controladores Paralelo.

c. Controladores Serie-Paralelo.

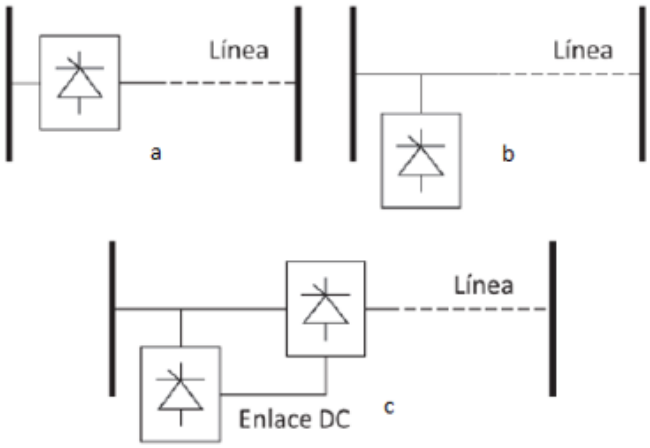


Figura 2.1: Representación de los controladores FACTS: a) Controlador Serie, b) Controlador Paralelo, c) Controlador Serie-Paralelo. Fuente: [21]

2.1.8.1. Controladores Serie

Actúan en la red generalmente como impedancias variables controladas en conexión serie con líneas de transmisión, ya sean éstas inductivas o capacitivas. Su principio de operación se basa en la inyección de voltaje en la línea como efecto de la circulación de corriente a través de su impedancia. Los controladores serien más utilizados son [21]:

a. TCSC (Thyristor-Controlled Series Capacitor).

b. SSSC (Static Synchronous Series Compensation).

c. IPFC (Interline Power Flow Controller).

2.1.8.2. Controladores Paralelo

Los controladores en paralelo actúan como una impedancia en derivación variable, una fuente variable o una combinación de ambas. Basan su principio de funcionamiento en la inyección de corriente a la red. Los controladores paralelo más utilizados son [21]:

a. SVC (Static VAR Compensator).

b. STATCOM (Static Synchronous Compensator).

c. TCR (Thyristor-Controlled Reactor).

d. TSC (Thyristor-Switched Capacitor).

2.1.8.3. Controladores Serie-Paralelo

Es la combinación de un controlador serie con un controlador paralelo controlados de una manera coordinada. La parte en serie se encarga de la inyección de voltaje en la línea mientras que la parte en paralelo se encarga de la inyección de corriente. Cuando ambos conversores se encuentran conectados a través de un enlace adecuado, puede existir un intercambio de potencia activa entre ellos. Los controladores serie-paralelo más utilizados son [21]:

a. UPFC (Unified Power Flow Converter).

b. TCPST o PST (Thyristor-Controlled Phase-Shifting Transformer).

2.1.9. Static Synchronous Compensator (STATCOM)

El STATCOM es un convertidor de fuente de voltaje (VSC), que hace parte de los FACTS, conectado en derivación con las redes de transmisión y distribución capaz de regular el voltaje, compensar la potencia reactiva y eliminar armónicos de corriente. El STATCOM permite un control efectivo de los intercambios de potencia con el sistema a través de la absorción o generación de potencia activa y reactiva controlable [30].

Un STATCOM es capaz de inyectar corriente de compensación en adelanto o en atraso asociada a una carga específica, con el fin de cumplir con las especificaciones técnicas de la red. Además, la asignación óptima de STATCOMs maximiza la capacidad de carga, minimiza las pérdidas de potencia, mejora la estabilidad, compensa la potencia reactiva y mejora la calidad de la energía [23].

La Figura 2 presenta el esquema general de conexión para un STATCOM a un sistema conformado por una máquina síncrona conectada a un barraje infinito a través de una línea de transmisión.

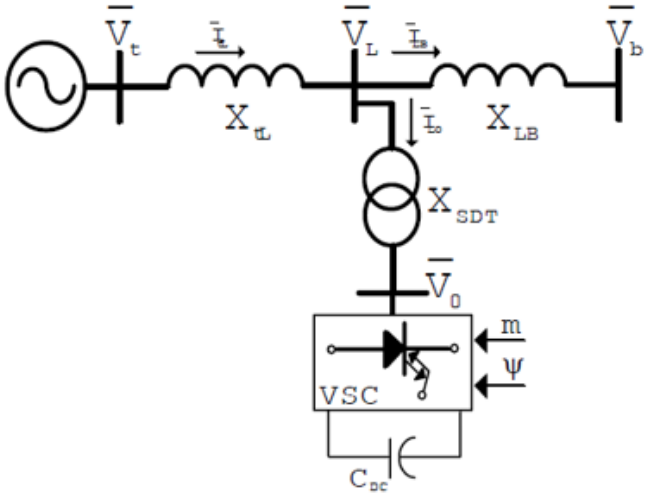


Figura 2.2: Esquema para un STATCOM conectado a un sistema de máquina síncrona y barraje infinito. Fuente: [31]

El controlador STATCOM de la Figura 2.2 está conformado por un transformador con reactancia de salida X_{SDT}, un convertidor fuente de voltaje basado en un puente trifásico de GTO y un capacitor DC. El convertidor genera un voltaje controlable en AC de la forma $V_0(t) = V_0 sin(\omega t - \psi)$ a través de la reactancia de salida. La diferencia de tensión entre el barraje V_L y el barraje V_0 produce un intercambio de potencia activa y reactiva entre el STATCOM y el sistema de potencia, cuyo flujo puede ser controlarse ajustando la magnitud de V_0 y ψ [31]. Además, el punto al cual el STATCOM es conectado a la red es llamado Punto de Acoplamiento Común (PCC, Point of Common Coupling) [22].

2.2. METODOLOGÍA

En la Tabla 2.1 se muestra la metodología realizada para llegar a los objetivos planteados

Tabla 2.1: Metodología usada para el desarrollo del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

No.	**DENOMINACIÓN DE PRIORIDAD U OBJETIVO GENERAL**		
O.G. 3.1	Maximizar el TCS anual en sistemas de distribución de energía eléctrica a través de la minimización de las pérdidas de potencia.		
No.	**DENOMINACIÓN DE LOS OBJETIVOS ESPECÍFICOS**	**No.**	**DENOMINACIÓN ACCIÓN / MÉTODO**
O.E. 3.2.1	Desarrollar un algoritmo MINLP que permita optimizar la inclusión, en ubicación y tamaño, de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica.	3.2.1.1	Realizar una investigación tomando como base la literatura técnica de mayor incidencia y calidad en ingeniera consignada en fuentes como IEEE Xplore, Elsevier, Google académico y Springer; con el fin de filtrar y seleccionar los artículos científicos que exhiben métodos de optimización en sistemas eléctricos.
		3.2.1.2	Definir los antecedentes sobre la teoría e implementación de diferentes tecnologías (BESS, GDs y FACTS) que permiten optimizar el funcionamiento de los SEP.
		3.2.1.3	Indagar específicamente sobre los métodos de solución basados en algoritmos de optimización referentes a optimizar la inclusión (ubicación y tamaño) y cuantificar los costos operativos de los STATCOMs, con el fin de minimizar las pérdidas de potencia, mejorar los perfiles de tensión y maximizar el beneficio económico anual de los sistemas de distribución.
		3.2.1.4	Definir y exponer la formulación matemática para un modelo de optimización a partir de la información seleccionada, el cual proponga una solución alternativa a las expuestas por otros autores en cuanto a la inclusión óptima de STATCOMs para minimizar las pérdidas de potencia y maximizar el beneficio económico anual en redes de distribución de energía.
O.E. 3.2.2	Implementar el algoritmo MINLP en GAMS tomando como caso de estudio los sistemas de distribución radial IEEE-33 e IEEE-69.	3.2.2.1	Formular el modelo matemático tomando como base las ecuaciones del flujo de potencia (método de Newton Raphson) a partir de cuatro (4) etapas secuenciales las cuales se definen como: a. Determinar el flujo de potencia libre (FPL). b. Determinar el flujo de potencia óptimo (FPO) c. Ubicar y dimensionar los STATCOMs a incluir d. Calcular el TCS anual para el sistema
		3.2.2.2	Precisar las características técnicas de los sistemas a evaluar, descritas a continuación: a. Esquema b. Datos asociados a las líneas de transmisión (resistencia y reactancia inductiva) c. Demanda de potencia activa y reactiva por nodo d. Demanda de potencia activa y reactiva total. e. Tensión Base f. Ubicación del nodo Slack g. Pérdidas de potencia activa iniciales
		3.2.2.3	Precisar las características técnicas de los sistemas a evaluar, descritas a continuación: a. Conjuntos b. Información de sistema. c. Variables d. Restricciones operativas e. Ecuaciones f. Formulación matemática. g. Característica del modelo de optimización.
O.E. 3.2.3	Comparar los resultados obtenidos referentes a disminución de pérdidas de potencia, cuantificación del beneficio económico y perfil de tensión, con los presentados por otros autores.	3.2.3.1	Confrontar los resultados obtenidos con los presentados en [18], [19] a través de las siguientes métricas: a. Costo por pérdidas de energía ($/kWh). b. Costo por dimensionamiento del dispositivo ($/kVAr). c. Duración de tiempo (h). d. Vida útil del dispositivo. e. Número de dispositivos a incluir. f. Perfil de tensión del sistema. g. Disminución de pérdidas de potencia. h. TCS anual de la red.
		3.2.3.2	Concluir

Capítulo 3

FORMULACIÓN MATEMÁTICA y ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

3.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

3.1.1. FPL

Se define como el flujo de potencia que presenta el sistema sin las restricciones operativas en estabilidad de tensión, y se formula a partir de las ecuaciones 1 (función objetivo) [12], 2 (balance de potencia activa en cada nodo) y 3 (balance de potencia reactiva en cada nodo) [26].

$$MinZ = \sum_{i=1}^{n} V_i \sum_{j=1}^{n} V_i * Y_{ij} * cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \tag{3.1}$$

sujeto a:

$$Pg_i - Pd_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j * Y_{ij} * cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \tag{3.2}$$

$$Qg_i - Qd_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j * Y_{ij} * sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \tag{3.3}$$

3.1.2. FPO

El objetivo del FPO dentro del modelo propuesto es limitar la dispersión en las magnitudes de las tensiones nodales que presenta el sistema. Para determinar el FPO se debe adicionar una restricción al modelo planteado para el FPL tal y como se presenta en la ecuación 4 [12].

$$V_i^{mín} \leq V_i \leq V_i^{máx} \tag{3.4}$$

3.1.2.1. Escenario 1

Es aquel en el cual la tensión del nodo Slack es asignada manualmente dentro de las restricciones de operación del modelo. Para este caso en particular se le fijó al nodo de referencia una tensión de operación de $1\angle 0°$ en pu.

3.1.2.2. Escenario 2

Es aquel en el cual la tensión del nodo Slack es liberada dentro de las restricciones de operación del modelo. Para este caso en particular la tensión del nodo de referencia fue asignada por el software de optimización respetando los límites superiores e inferiores definidos para la estabilidad en magnitud de tensión.

3.1.3. STATCOMs

Para encontrar la ubicación y el dimensionamiento óptimos de los STATCOMs se debe definir el número de dispositivos a incluir en el sistema, una variable de decisión binaria que tomará 1 como valor si el STATCOM está ubicado en el nodo y 0 en caso contrario, y el valor máximo en kVAr que puede tomar cada dispositivo. Lo anterior se debe incluir en el modelo como restricciones y se exponen en las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7) [12].

$$\#STATCOMs \leq \#STATCOMs^{máx} \tag{3.5}$$

$$X_i \leq \#STATCOMs^{máx} \tag{3.6}$$

$$0 \leq Q_{gS} \leq X_i * Q_{gS}^{máx} \tag{3.7}$$

3.1.4. TCS Anual

La cuantificación del TCS anual que se alcanza a partir de la incorporación de STATCOMs en sistemas distribución de energía eléctrica se obtiene haciendo uso de las ecuaciones (3.8) (TCS anual), (3.9) (costo anual del STATCOM) [18] y (3.10) (Costo del STATCOM por dimensionamiento) [19].

$$TCS = K_p(T * P_{pérdidas}^{sinSTATCOM}) - K_p(T * P_{pérdidas}^{conSTATCOM}) - K_c * STATCOM_{Costo-Año} \tag{3.8}$$

$$STATCOM_{Costo-Año} = STATCOM_{Costo-Total} * \frac{(1+B)^{N_{STATCOM}} * B}{(1+B)^{N_{STATCOM}} - 1} \tag{3.9}$$

$$STATCOM_{Costo-Total} = STATCOM_{Costo} * Q_{gS} \tag{3.10}$$

3.1.5. Diagrama de flujo

Ver figura 3.1

3.2. ESTRATEGIA DE SOLUCIÓN

Una vez definido el modelo matemático se plantea la estrategia de solución del modelo de optimización en GAMS. Dicha estrategia se compone de siete (7) secciones las cuales se describen a continuación:

3.2.1. Conjuntos y escalares

Define el número de nodos y de generadores convencionales que posee el sistema, la ubicación de los generadores dentro del sistema, el valor de potencia reactiva máxima de los STATCOMs y el número de dispositivos a incluir.

3.2.2. Información del Sistema

Incluye las tablas correspondientes a la matriz de admitancia (Ybus), la demanda de potencia activa y reactiva de cada uno de los nodos de la red. Es importante mencionar que los datos de la Ybus se obtuvieron usando el comando sparse (para magnitud y ángulo), después de ejecutar los sistemas de prueba en MATLAB.

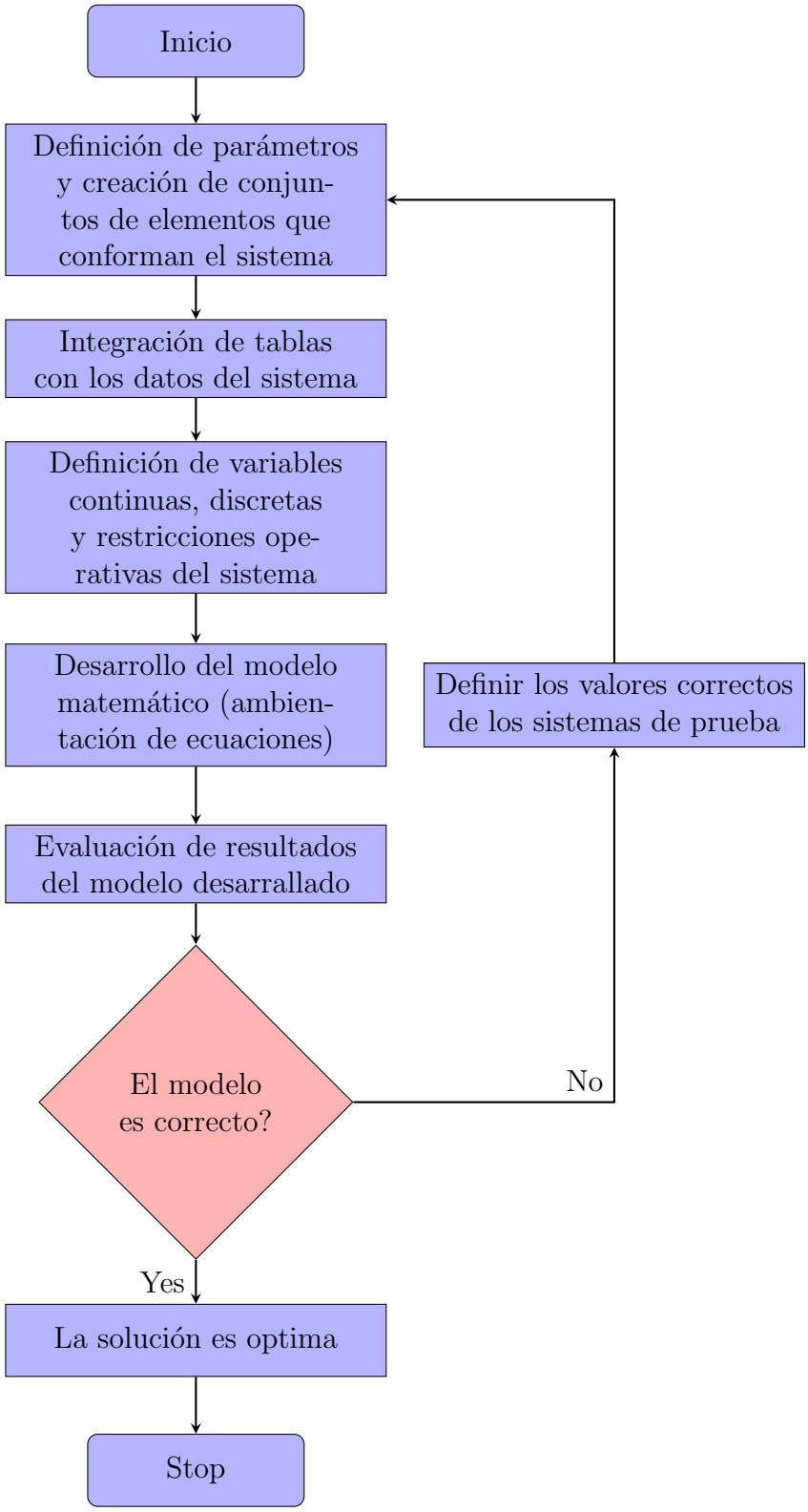


Figura 3.1: Diagrama de flujo estrategía de solución

```
*1) Creacion conjuntos
SETS
i          Conjunto de nodos /N1*Nn/
gc         Conjunto de generadores convencionales /GC1...GCn/
MAP(gc,i)  Relacion GC con el nodo /GCx.Nx/;

ALIAS(i,j);
SCALARS
QgSmax       Maxima potencia reactiva inyectada por los STATCOMs  /kVAr/
NSTATCOMmax Numero de STATCOMs a incluir  /X/;
```

Figura 3.2: Creación de conjuntos y escalares en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia.

```
*2) Informacion del sistema
TABLE YBUS(i,j,*)

           Yij          Phij
Ni.Nj   Magnitud     Ángulo;

*Demanda por nodo
TABLE DEM(i,*)
              Pd               Qd
N1     Potencia Activa Potencia Reactiva
...           ...              ...
Nn     Potencia Activa Potencia Reactiva;
```

Figura 3.3: Creación de tablas referentes a la información del sistema en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia.

3.2.3. Variables

Determina la cantidad y el tipo de variables (continuas o discretas) que necesita el modelo de optimización. Dichas variables definen los parámetros que se quieren conocer una vez que se ejecute el programa.

```
*3) Creación de variables
VARIABLES
z       Perdidas de potencia activa
Q       Pérdidas de potencia reactiva.
V(i)    Tensiones nodales.
d(i)    Ángulo de las tensiones nodales.
Pg(gc)  Potencia Activa generada por el generador convencional.
Qg(gc)  Potencia Reactiva generada por el generador convencional.
QS(i)   Potencia reactiva de los STATCOMs;
BINARY VARIABLES
X(i) Variable binaria para optimizar la ubicación de los STATCOMs.;
```

Figura 3.4: Creación de variables en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia.

3.2.4. Restricciones operativas

Establece el límite superior e inferior que pueden tomar las magnitudes de las tensiones nodales del sistema y fija la tensión de operación del nodo Slack (Figura 3.5).

Como se mencionó en la subsección 3.1.2 dentro del algoritmo solución se plantearon dos diferentes escenarios: 1) fijando la tensión del nodo Slack en $1\angle 0°$ pu y 2) liberando la

tensión del nodo Slack. Lo anterior obligó a realizar una modificación sobre el algoritmo para satisfacer el segundo escenario, tal y como se presenta en la Figura 3.6.

```
*4) Límites de las variables
V.up(i) = 1.10;
V.lo(i) = 0.90;
V.fx('NS') = 1.00;
d.fx('NS') = 0.00;
```

Figura 3.5: Definición de los límites de dispersión para las tensiones nodales del sistema. Fuente: Elaboración propia.

```
*4) Límites de las variables
V.up(i) = 1.10;
V.lo(i) = 0.90;
*V.fx('NS') = 1.00;
*d.fx('NS') = 0.00;
```

Figura 3.6: Modificación del algoritmo solución para el escenario 2. Fuente: Elaboración propia.

3.2.5. Ecuaciones

Enuncia las ecuaciones a desarrollar por el modelo de optimización.

```
*5) Ecuaciones
EQUATIONS
FO       Funcion objetivo.
Qt       Potencia reactiva total.
BalP(i)  Balance potencia activa.
BalQ(i)  Balance potencia reactiva.
NSTATCOM Numero de STATCOMs.
MAXR(i)  Limite superior de potencia reactiva del STATCOM.
MINR(i)  Limite inferior de potencia reactiva del STATCOM.;
```

Figura 3.7: Definición de las ecuaciones a solucionar por el modelo de optimización en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia.

3.2.6. Formulación Matemática

Describe en detalle cada una de las ecuaciones presentadas en la subsección anterior.

```
*6) Formulación matemática
FO.. z =E= SUM(i,V(i)*(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*cos(d(i)-d(j)
           -YBUS(i,j,'Phij'))));
Qt.. Q =E= SUM(i,V(i)*(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*sin(d(i)-d(j)
           -YBUS(i,j,'Phij'))));
BalP(i)..  SUM(gc$MAP(gc,i),Pg(gc)) - DEM(i,'Pd') =E= V(i)*(SUM(j,V(j)
           *YBUS(i,j,'Yij')*cos(d(i)-d(j) -YBUS(i,j,'Phij'))));
BalQ(i)..  SUM(gc$MAP(gc,i),Qg(gc)) - DEM(i,'Qd') + QS(i) =E= V(i)
           *(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*sin(d(i)-d(j) -YBUS(i,j,'Phij'))));
NSTATCOM.. SUM(i,X(i))=L= NSTATCOMmax;
MAXR(i)..  QS(i)=G= 0;
MINR(i)..  QS(i)=L= X(i)*QgSmax;
```

Figura 3.8: Representación de las ecuaciones en el entorno GAMS. Fuente: Elaboración propia.

3.2.7. Características del modelo

Especifica la naturaleza del modelo a optimizar (para este caso en particular será MINLP) y las opciones de visualización de los resultados.

```
*7) Características del modelo de optimización
MODEL   FlujodePot /ALL/;
OPTIONS decimals = 8;
SOLVE   FlujodePot using MINLP min z;
DISPLAY z.l, Q.l, V.l, d.l, Pg.l, Qg.l, QS.l, X.l;
```

Figura 3.9: Caracterización del modelo y opciones de visualización. Fuente: Elaboración propia

3.2.8. Estructura global de la estrategia de solución ambientada en GAMS

```
*1) Creacion conjuntos
SETS
i          Conjunto de nodos /N1*Nn/
gc         Conjunto de generadores convencionales /GC1...GCn/
MAP(gc,i)  Relacion GC con el nodo /GCx.Nx/;

ALIAS(i,j);
SCALARS
QgSmax       Maxima potencia reactiva inyectada por los STATCOMs  /kVAr/
NSTATCOMmax Numero de STATCOMs a incluir  /X/;

*2) Informacion del sistema
TABLE YBUS(i,j,*)

          Yij          Phij
Ni.Nj   Magnitud     Ángulo;

*Demanda por nodo
TABLE DEM(i,*)
              Pd                Qd
N1     Potencia Activa Potencia Reactiva
...           ...               ...
Nn     Potencia Activa Potencia Reactiva;

*3) Creación de variables
VARIABLES
z       Perdidas de potencia activa
Q       Pérdidas de potencia reactiva.
V(i)    Tensiones nodales.
d(i)    Ángulo de las tensiones nodales.
Pg(gc)  Potencia Activa generada por el generador convencional.
Qg(gc)  Potencia Reactiva generada por el generador convencional.
QS(i)   Potencia reactiva de los STATCOMs;
BINARY VARIABLES
X(i) Variable binaria para optimizar la ubicación de los STATCOMs.;

*4) Límites de las variables
V.up(i) = 1.10;
V.lo(i) = 0.90;
*V.fx('NS') = 1.00;
*d.fx('NS') = 0.00;

*5) Ecuaciones
EQUATIONS
FO        Funcion objetivo.
Qt        Potencia reactiva total.
BalP(i)   Balance potencia activa.
BalQ(i)   Balance potencia reactiva.
NSTATCOM Numero de STATCOMs.
MAXR(i)   Limite superior de potencia reactiva del STATCOM.
MINR(i)   Limite inferior de potencia reactiva del STATCOM.;

*6) Formulación matemática
FO.. z =E= SUM(i,V(i)*(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*cos(d(i)-d(j)
           -YBUS(i,j,'Phij')))));
Qt.. Q =E= SUM(i,V(i)*(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*sin(d(i)-d(j)
           -YBUS(i,j,'Phij')))));
BalP(i).. SUM(gc$MAP(gc,i),Pg(gc)) - DEM(i,'Pd') =E= V(i)*(SUM(j,V(j)
           *YBUS(i,j,'Yij')*cos(d(i)-d(j) -YBUS(i,j,'Phij'))));
BalQ(i).. SUM(gc$MAP(gc,i),Qg(gc)) - DEM(i,'Qd') + QS(i) =E= V(i)
           *(SUM(j,V(j)*YBUS(i,j,'Yij')*sin(d(i)-d(j) -YBUS(i,j,'Phij'))));
NSTATCOM.. SUM(i,X(i))=L= NSTATCOMmax;
MAXR(i).. QS(i)=G= 0;
MINR(i).. QS(i)=L= X(i)*QgSmax;

*7) Características del modelo de optimización
MODEL   FlujodePot /ALL/;
OPTIONS decimals = 8;
SOLVE   FlujodePot using MINLP min z;
DISPLAY z.l, Q.l, V.l, d.l, Pg.l, Qg.l, QS.l, X.l;
```

Figura 3.10: Estructura global de la estrategia de solución ambientada en GAMS. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 4

SISTEMAS DE PRUEBA Y RESULTADOS

4.1. SISTEMAS DE PRUEBA

4.1.1. IEEE-33

Se propone como primer caso de estudio el sistema de distribución radial IEEE-33 (4.1), el cual cuenta con una tensión base de 12,66 kV y una demanda de potencia de 3715 kW y 2300 kVAr; el nodo 1 es el Slack y las pérdidas iniciales de potencia activa equivalen a 210,98 kW. Los datos asociados a las líneas de transmisión y las cargas discriminadas por nodos se presentan en la Tabla 4.1.



Figura 4.1: Sistema de distribución radial IEEE-33. Fuente: [12]

Las columnas R y X corresponden a las modificaciones que se le deben realizar a los parámetros del sistema para alcanzar unas pérdidas de 202,67 kW, las cuales son las definidas para el caso base en [1], [2].

Tabla 4.1: Datos del sistema de distribución radial IEEE-33. Fuente: [32]

Nodo i	Nodo j	Resistencia (Ω)	R (Ω)[1]	Reactancia (Ω)	X (Ω)[2]	P (kW)	Q (kVAr)
1	2	0,0922	NA	0,0477	0,0470	100	60
2	3	0,4930	NA	0,2511	NA	90	40
3	4	0,3660	NA	0,1864	NA	120	80
4	5	0,3811	NA	0,1941	NA	60	30
5	6	0,8190	NA	0,7070	NA	60	20
6	7	0,1872	NA	0,6188	NA	200	100
7	8	17,114	0,7114	12,351	0,2351	200	100
8	9	10,300	NA	0,7400	NA	60	20
9	10	10,400	1,044	0,7400	NA	60	20
10	11	0,1966	NA	0,0650	NA	45	30
11	12	0,3744	NA	0,1238	NA	60	35
12	13	14,680	NA	11,550	NA	60	35
13	14	0,5416	NA	0,7129	NA	120	80
14	15	0,5910	NA	0,5260	NA	60	10
15	16	0,7463	NA	0,5450	NA	60	20
16	17	12,890	NA	17,210	NA	60	20
17	18	0,7320	NA	0,5740	NA	90	40
2	19	0,1640	NA	0,1565	NA	90	40
19	20	15,042	NA	13,554	NA	90	40
20	21	0,4095	NA	0,4784	NA	90	40
21	22	0,7089	NA	0,9373	NA	90	40
3	23	0,4512	NA	0,3083	NA	90	50
23	24	0,8980	NA	0,7091	NA	420	200
24	25	0,8960	NA	0,7011	NA	420	200
6	26	0,2030	NA	0,1034	NA	60	25
26	27	0,2842	NA	0,1447	NA	60	25
27	28	10,590	NA	0,9337	NA	60	20
28	29	0,8042	NA	0,7006	NA	120	70
29	30	0,5075	NA	0,2585	NA	200	600
30	31	0,9744	NA	0,9630	NA	150	70
31	32	0,3105	NA	0,3619	NA	210	100
32	33	0,3410	NA	0,5302	NA	60	40

[1] Valores de resistencia modificados para obtener unas pérdidas iniciales de potencia activa de 202,67 kW.

[2] Valores de reactancia modificados para obtener unas pérdidas iniciales de potencia activa de 202,67 kW.

4.1.2. IEEE-69

Se propone como segundo caso de estudio el sistema de distribución radial IEEE-69 (Figura 4.2), el cual cuenta con una tensión base de 12,66 kV y una demanda de potencia de 3802,19 kW y 2694,6 kVAr; el nodo 1 es el Slack y las pérdidas iniciales de potencia activa equivalen a 225,18 kW. Los datos asociados a las líneas de transmisión y las cargas discriminadas por nodos se presentan en las Tablas 4.2 y 4.3.

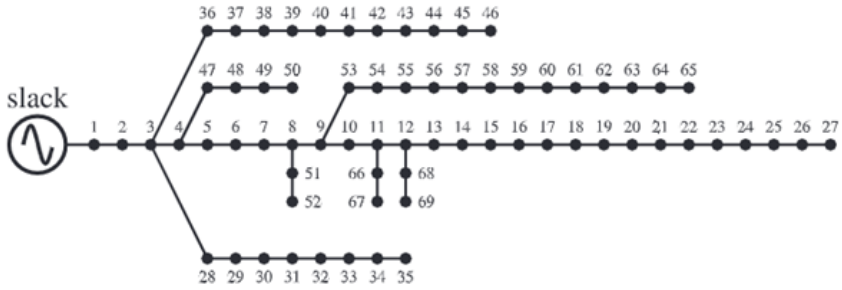


Figura 4.2: Sistema de distribución radial IEEE-69. Fuente: [12]

Tabla 4.2: Datos del sistema de distribución radial IEEE-69 - Parte 1. Fuente: [18]

Nodo i	**Nodo j**	**Resistencia (Ω)**	**Reactancia (Ω)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
1	2	0,0005	0,0012	0	0
2	3	0,0005	0,0012	0	0
3	4	0,0015	0,0036	0	0
4	5	0,0251	0,0294	0	0
5	6	0,3660	0,1864	2,60	2,20
6	7	0,3811	0,1941	40,40	30
7	8	0,0922	0,0470	75	54
8	9	0,0493	0,0251	30	22
9	10	0,8190	0,2707	28	19
10	11	0,1872	0,0619	145	104
11	12	0,7114	0,2351	145	104
12	13	10,300	0,3400	8	5,50
13	14	10,440	0,3450	8	5,50
14	15	10,580	0,3496	0	0
15	16	0,1966	0,0650	45,50	30
16	17	0,3744	0,1238	60	35
17	18	0,0047	0,0016	60	35
18	19	0,3276	0,1083	0	0
19	20	0,2106	0,0696	1	0,60
20	21	0,3416	0,1129	114	81
21	22	0,0140	0,0046	5,30	3,50
22	23	0,1591	0,0526	0	0
23	24	0,3463	0,1145	28	20
24	25	0,7488	0,2475	0	0
25	26	0,3089	0,1021	14	10
26	27	0,1732	0,0572	14	10

Tabla 4.3: Datos del sistema de distribución radial IEEE-69 - Parte 2. Fuente: [18]

Nodo i	**Nodo j**	**Resistencia (Ω)**	**Reactancia (Ω)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
3	28	0,0044	0,0108	26	18,60
28	29	0,0640	0,1565	26	18,60
29	30	0,3978	0,1315	0	0
30	31	0,0702	0,0232	0	0
31	32	0,3510	0,1160	0	0
32	33	0,8390	0,2816	14	10
33	34	17,080	0,5646	19,50	14
34	35	14,740	0,4873	6	4
3	36	0,0044	0,0108	26	18,55
36	37	0,0640	0,1565	26	18,55
37	38	0,1053	0,1230	0	0
38	39	0,0304	0,0355	24	17
30	40	0,0018	0,0021	24	17
40	41	0,7283	0,8509	1,20	1
41	42	0,3100	0,3623	0	0
42	43	0,0410	0,0478	6	4,30
43	44	0,0092	0,0116	0	0
44	45	0,1089	0,1373	39,22	26,30
45	46	0,0009	0,0012	39,22	26,30
4	47	0,0034	0,0084	0	0
47	48	0,0851	0,2083	79	56,40
48	49	0,2898	0,7091	384,70	274,50
49	50	0,0822	0,2011	384,70	274,50
8	51	0,0928	0,0473	40,50	28,30
51	52	0,3319	0,1114	3,60	2,70
9	53	0,1740	0,0886	4,35	3,50
53	54	0,2030	0,1034	26,40	19
54	55	0,2842	0,1447	24	17,20
55	56	0,2813	0,1433	0	0
56	57	15,900	0,5337	0	0
57	58	0,7837	0,2630	0	0
58	59	0,3042	0,1006	100	72
59	60	0,3861	0,1172	0	0
60	61	0,5075	0,2585	1244	888
61	62	0,0974	0,0496	32	23
62	63	0,1450	0,0738	0	0
63	64	0,7105	0,3619	227	162
64	65	10,410	0,5302	59	42
11	66	0,2012	0,0611	18	13
66	67	0,0047	0,0014	18	13
12	68	0,7394	0,2444	28	20
68	69	0,0047	0,0016	28	20

4.2. RESULTADOS

El modelo matemático expuesto fue implementado en GAMS, a través de los solucionadores KNITRO y BONMIN aplicado a los sistemas descritos en la sección anterior (IEEE-33 e IEEE-69 respectivamente). Para los sistemas implementados los límites de dispersión de las tensiones nodales en pu, el número máximo de STATCOMs, su tamaño máximo en kVAr y los parámetros K_P, T, K_C, $STATCOM_{Costo}$, B y $N^{STATCOM}$ se definieron con los mismos valores usados en [18], [19] y se presentan en las Tablas 4.4 y 4.5

Tabla 4.4: Restricciones para el FPO y los STATCOMs. Fuente: Elaboración propia.

Límites de las tensiones	**Número de Dispositivos**	**Tamaño Máximo de los Dispositivos**
$0{,}90 \leq V_i \leq 1{,}10$	$\#STATCOMs^{max} = 1$	$Q_{gS}^{max} = 10000kVAr$

Tabla 4.5: Valores de los parámetros para calcular el TCS anual. Fuente: [18], [19]

K_P **(\$/kWh)**	**T**	K_C	$STATCOM_{Costo}$ **(\$/kVAr)**	**B**	$N^{STATCOM}$ **(Años)**
0,06	8760	1	50	0,1	30

4.2.1. IEEE-33

4.2.1.1. Escenario 1

Se ubicó y dimensionó un STATCOM (Tabla 4.6), de tal manera que el TCS anual de la red se maximizó a partir de la minimización de las pérdidas de potencia activa. Los resultados obtenidos fueron comparados con los presentados en [18], [19].

Tabla 4.6: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia.

STATCOM	
Nodo	**Tamaꝋo (kVAr)**
30	1258

La Tabla 4.7 presenta las pérdidas de potencia antes y después de la inclusión del STATCOM, alcanzando una reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva del 28,26 % y 27,41 % respectivamente.

Cuando se incluye el STATCOM en el nodo 30 del sistema de distribución radial IEEE-33 se genera una corrección en la magnitud de las tensiones del sistema, dado que la compensación en derivación produce una inyección de corriente hacía el nodo supliendo la corriente de demanda de la carga, disminuyendo la caída de tensión y por ende mejorando en el perfil de tensión. Lo anterior se presenta con detalle en la Figura 4.3.

Tabla 4.7: Pérdidas con y sin STATCOM (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia.

	Sin STATCOM		**Con STATCOM**	
	P (kW)	**Q (kVAr)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
Pérdidas	210,98	143,12	151,36	103,89
Reducción	NA	NA	28,26 %	27,41 %

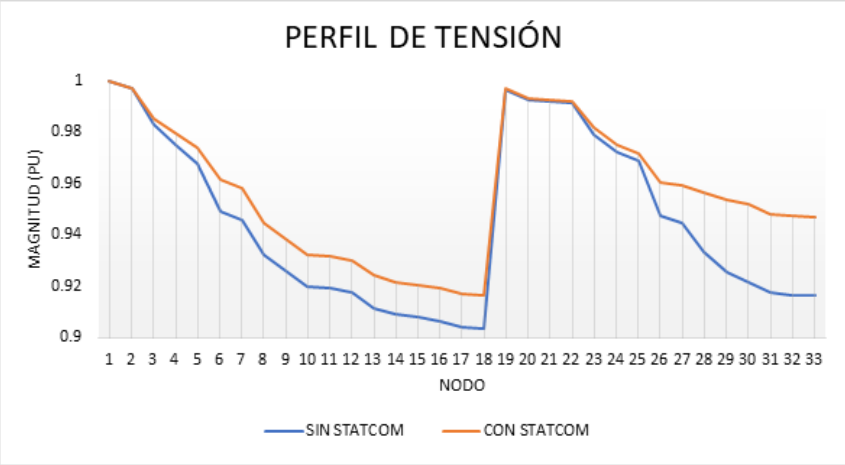


Figura 4.3: Perfil de tensión del sistema sin y con la inclusión del STATCOM (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.8 se realiza comparación de las pérdidas de potencia activa y reactiva, la ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM, la tensión mínima en por unidad (pu) y el TCS anual para los métodos presentados en [18], [19] y el implementado por los autores.

Como se mencionó en la sección 4.1.1 en [1] y [2] se presentan unas pérdidas de potencia iniciales de 202,67 kW y 135,24 kVAr (Caso Base A), las cuales discrepan con las que realmente se obtienen para la red IEEE-33: 210,98 kW y 143,12 kVAr (Caso Base B). Por ende, en la Tabla 4.8 se exhiben dos columnas para el Caso Base y Escenario 1 (A y B).

Tabla 4.8: Comparación de resultados (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

	Caso Base		**IA [1]**	**GHS [2]**	**Escenario 1**	
	A	**B**	**A**	**A**	**A**	**B**
Tamaño (kVAr)	NA	NA	962,49	1150	1253	1258
Ubicación (Nodo)	NA	NA	12	30	30	30
***PPérdidas* (kW)**	202,67	210,98	171,79	143,97	143,60	151,36
***QPérdidas* (kVAr)**	135,24	143,12	115,26	96,47	96,33	103,89
Vmin (pu)	0,9131	0,9038	0,9258	0,9236	0,9256	0,9165
TCS anual ($)	NA	NA	11120	24264	24401	24664

Tabla 4.9: Reducción de pérdidas de potencia discriminados por algoritmo (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

	Caso base A	**IA [1]**	**GHS [2]**	**Escenario 1**
$P_{Pérdidas}$ **(kW)**	202,67	171,79	143,97	143,60
$Q_{Pérdidas}$ **(kVAr)**	135,24	115,26	96,47	96,33
% **Reducción (P)**	NA	15,23	28,96	29,14
% **Reducción (Q)**	NA	14,77	28,66	28,77

En la Figura 4.6 se presenta una superposición de las gráficas correspondientes al perfil de tensión obtenido con el modelo expuesto y el algoritmo propuesto en [18].

La inclusión del STATCOM en el nodo 12 [18] permite alcanzar una corrección promedio del perfil de tensión, entre los nodos 8-18, del 1,11 % superior a la que se obtiene en con MINLP. Por otra parte, la inclusión del STATCOM en el nodo 30 (MINLP) permite alcanzar una corrección promedio del perfil de tensión, entre los nodos 26-33, del 1,57 % superior a la que se obtiene en [18].

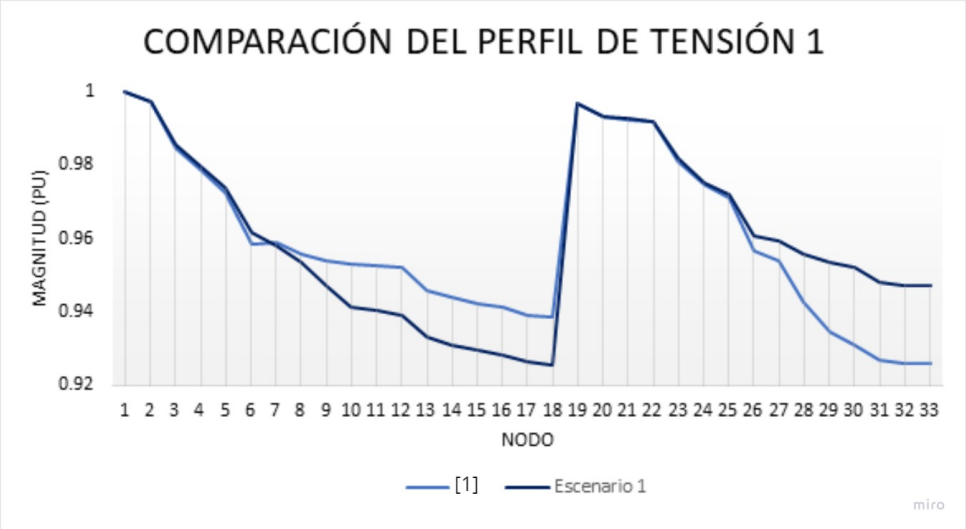


Figura 4.4: Comparación del perfil de tensión entre [18] y escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.5 se presenta una superposición de las gráficas correspondientes al perfil de tensión obtenido con el modelo expuesto y el algoritmo propuesto en [19].

A pesar que la inclusión del STATCOM se hace en el nodo 30 para los dos casos con el algoritmo MINLP se alcanza una corrección promedio del perfil de tensión, entre los nodos 6-16, del 0,2 % y, entre los nodos 28-33, del 0,25 % superior a la que se obtiene en [19].

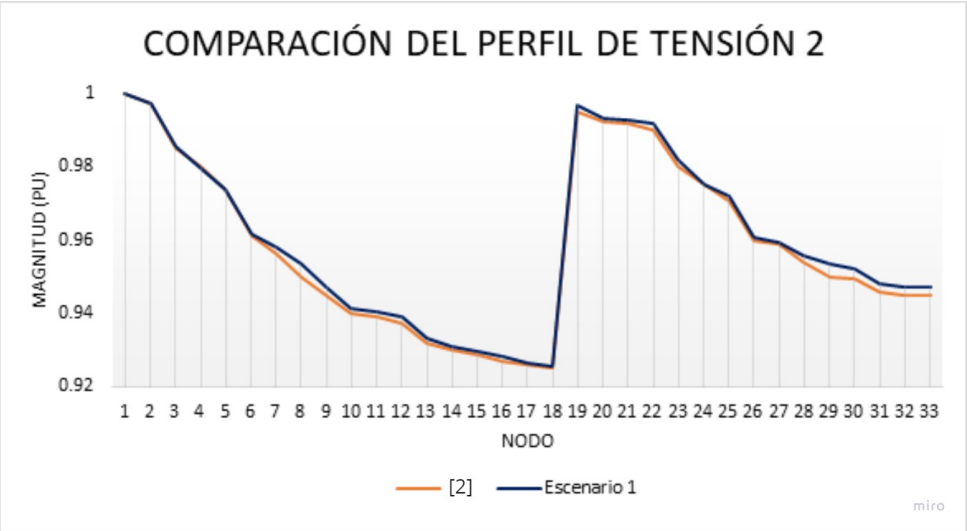


Figura 4.5: Comparación del perfil de tensión entre [19] y escenario 1. Fuente: Elaboración propia.

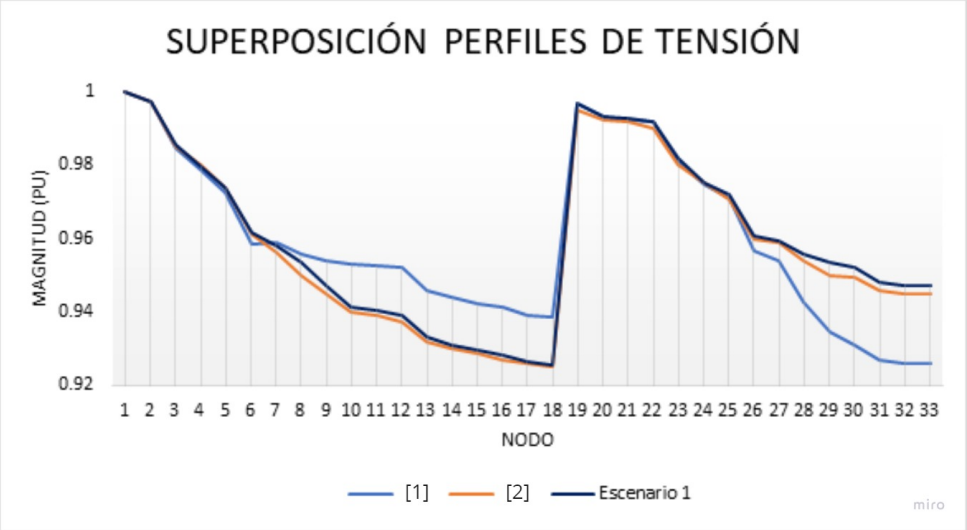


Figura 4.6: Perfiles de tensión superpuestos (IEEE-33, escenario 1). Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2. Escenario 2

Se ubicó y dimensionó un STATCOM (Tabla 4.10), de tal manera que el TCS anual de la red se maximizó a partir de la minimización de las pérdidas de potencia activa. Los resultados obtenidos fueron comparados con los presentados en la sección 4.2.1.1.

La Tabla 4.11 presenta las pérdidas de potencia antes y después de fijar el voltaje del nodo Slack, alcanzando una reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva del 19,08 % y 19,13 % respectivamente, en comparación con las obtenidas en el Escenario 1.

Tabla 4.10: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-33, escenario 2). Fuente: Elaboración propia.

STATCOM	
Nodo	**Tamaŋo (kVAr)**
30	1251

Tabla 4.11: Pérdidas con y sin fijación del nodo Slack (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

	Fijando el nodo Slack		**Liberando el nodo Slack**	
	P (kW)	**Q (kVAr)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
Pérdidas	151,36	103,89	122,47	84,01
Reducción	NA	NA	19,08 %	19,13 %

En la Tabla 4.12 se realiza una comparación de las pérdidas de potencia activa y reactiva, la ubicación y dimensionamiento óptimos del STACOM, la tensión mínima en pu y el TCS anual para los dos escenarios propuestos por los autores.

Tabla 4.12: Comparación de resultados entre escenarios (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

	Caso base		**Escenario 1**		**Escenario 2**	
	A	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**
Tamaño (kVAr)	NA	NA	1253	1258	1028	1251
Ubicación (Nodo)	NA	NA	30	30	32	30
$P_{Pérdidas}$ **(kW)**	202,67	210,98	143,60	151,36	122,99	122,47
$Q_{Pérdidas}$ **(kVAr)**	135,24	143,12	96,33	103,89	83,89	84,01
Vmin (pu)	0,9131	0,9038	0,9256	0,9165	10,312	10,250
TCS anual ($)	NA	NA	24401	24664	36427	39886
Aumento TCS (%)	NA	NA	NA	NA	49	62

Los resultados presentados en la Tabla 4.11 permiten inferir que al liberar el voltaje del nodo Slack para que pueda tomar cualquier valor entre los límites de tensión definidos en la Tabla 5, implícitamente se amplían las alternativas de decisión que puede tomar el programa de optimización con el fin de encontrar una solución superior a la obtenida en el primer escenario. Además, se evidenció que GAMS estableció la tensión del nodo Slack cercana a $1,1\angle 0°$ en pu (límite superior definido para la estabilidad en magnitud de tensión) obteniendo un aumento promedio del perfil de tensión del sistema del 10,43 %. Lo anterior se presenta con mayor detalle en la Figura 4.7.

La Figura 4.8 presenta una comparación de los resultados obtenidos referentes a la cuantificación del TCS anual alcanzado con los algoritmos IA [18], GHS [19] y los dos escenarios propuestos por los autores. Dentro de la comparación se incluyeron los dos casos base (A y B), con el fin de determinar la eficiencia del algoritmo MINLP implementado.

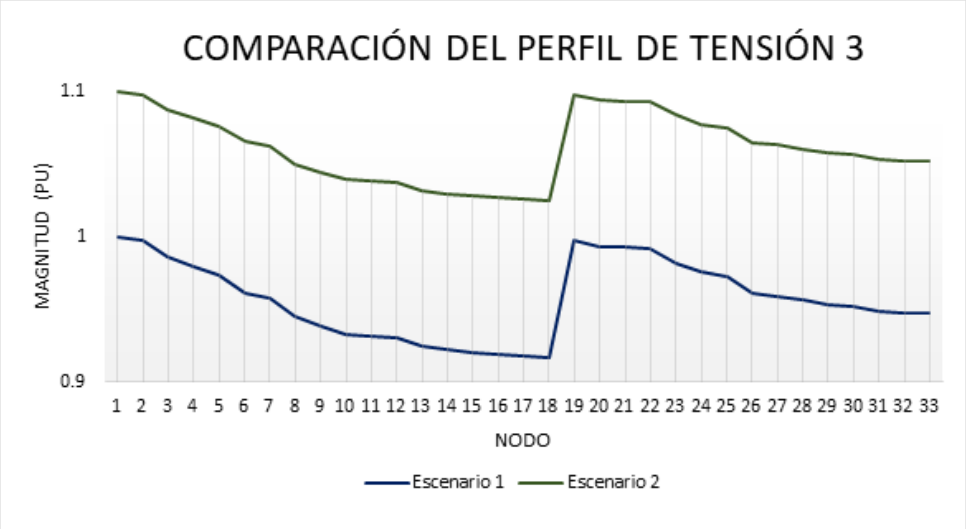


Figura 4.7: Perfil de tensión del sistema sin y con la fijación del nodo Slack (IEEE-33). Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. IEEE-69

4.2.2.1. Escenario 1

Se ubicó y dimensionó un STATCOM (Tabla 4.13), de tal manera que el TCS anual de la red se maximizó a partir de la minimización de las pérdidas de potencia activa. Los resultados obtenidos fueron comparados con los presentados en [18].

Tabla 4.13: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-69, escenario 1). Fuente: Elaboración propia.

STATCOM	
Nodo	**Tamaño (kVAr)**
61	1000

La Tabla 4.14 presenta las pérdidas de potencia antes y después de la inclusión del STATCOM, alcanzando una reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva del 30,47 % y 28,83 % respectivamente.

Tabla 4.14: Pérdidas con y sin STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

	Sin STATCOM		**Con STATCOM**	
	P (kW)	**Q (kVAr)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
Pérdidas	225,18	102,35	156,57	72,84
Reducción	NA	NA	30,47 %	28,83 %

Cuando se incluye el STATCOM en el nodo 61 del sistema de distribución radial IEEE-69 se genera una corrección en la magnitud de las tensiones del sistema, dado que la

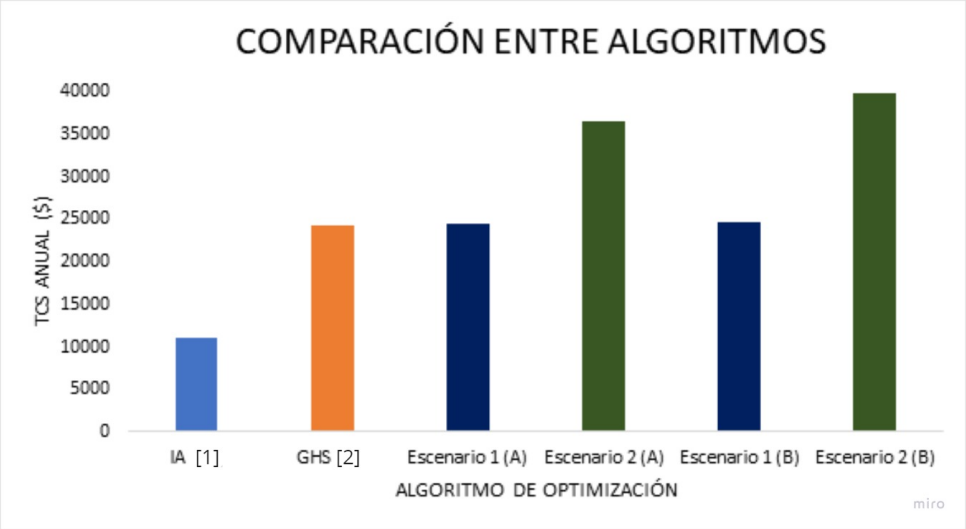


Figura 4.8: Comparación de resultados entre algoritmos de optimización. Fuente: Elaboración propia.

compensación en derivación produce una inyección de corriente hacía el nodo supliendo la corriente de demanda de la carga, disminuyendo la caída de tensión y por ende mejorando en el perfil de tensión. Lo anterior se presenta con detalle en la Figura 4.9.

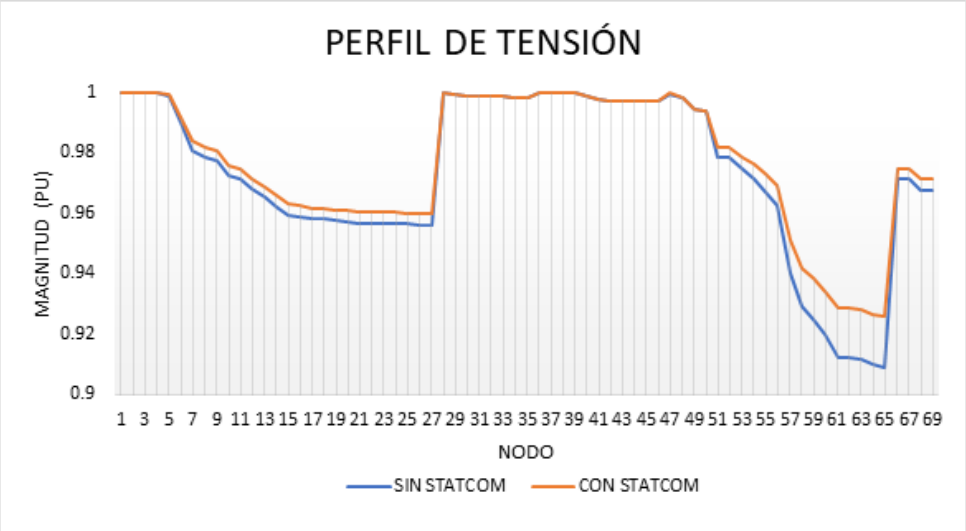


Figura 4.9: Perfil de tensión del sistema con y sin la inclusión del STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 4.15 se realiza comparación de las pérdidas de potencia activa, la ubicación y dimensionamiento óptimos del STACOM, la tensión mínima en pu y el TCS anual entre el método presentado en [18] y el expuesto por los autores.

En la Figura 4.10 se presenta una superposición de las gráficas correspondientes al perfil de tensión obtenidas con el modelo expuesto y el algoritmo IA propuesto en [1]. La

Tabla 4.15: Comparación de resultados (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

	Caso base	**IA [1]**	**Escenario 1**
Tamaño (kVAr)	NA	1704,42	1000
Ubicación (Nodo)	NA	61	61
$P_{Pérdidas}$ **(kW)**	225,18	157,50	156,57
V_{min} **(pu)**	0,9091	0,9361	0,9257
TCS anual ($)	NA	26532	30757
Aumento TCS (%)	NA	NA	16

Tabla 4.16: Reducción de pérdidas de potencia discriminados por algoritmo (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

	Caso base A	**IA [1]**	**Escenario 1**
$P_{Pérdidas}$ **(kW)**	225,18	157,50	156,57
% Reducción	NA	30	30,5

inclusión del STATCOM en el nodo 61 [1], permite alcanzar una corrección promedio del perfil de tensión, entre los nodos 7-27 y 51-65, del 0,20 % y 0,68 % superior a la que se obtiene con MINLP. Lo anterior se presenta con mayor detalle en la Figura 4.10.

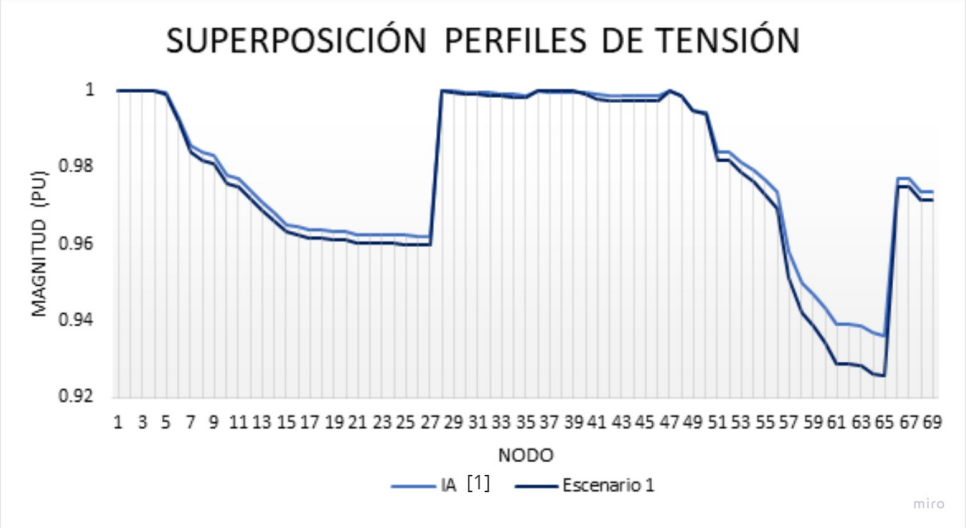


Figura 4.10: Perfil de tensión del sistema con y sin la inclusión del STATCOM (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.2. Escenario 2

Se ubicó y dimensionó un STATCOM (Tabla 4.17), de tal manera que el TCS anual de la red se maximizó a partir de la minimización de las pérdidas de potencia activa. Los resultados obtenidos fueron comparados con los presentados en la sección 4.2.2.1.

Tabla 4.17: Ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM (IEEE-69, escenario 2). Fuente: Elaboración propia.

STATCOM	
Nodo	**Tamaŋo (kVAr)**
61	1000

La Tabla 4.18 presenta las pérdidas de potencia antes y después de fijar el voltaje del nodo Slack, alcanzando una reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva del 19,34 % y 19,20 % respectivamente.

Tabla 4.18: Pérdidas con y sin fijación del nodo Slack (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

	Fijando el nodo Slack		**Liberando el nodo Slack**	
	P (kW)	**Q (kVAr)**	**P (kW)**	**Q (kVAr)**
Pérdidas	156,57	72,84	126,28	58,85
Reducción	NA	NA	19,34 %	19,20 %

En la Tabla 4.19 se realiza una comparación de las pérdidas de potencia activa y reactiva, la ubicación y dimensionamiento óptimos del STATCOM, la tensión mínima en pu y el TCS anual para los dos escenarios propuestos por los autores.

Tabla 4.19: Comparación de resultados entre escenario (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

	Caso base	**Escenario 1**	**Escenario 2**
Tamaño (kVAr)	NA	1000	1000
Ubicación (Nodo)	NA	61	61
$P_{Pérdidas}$ **(kW)**	225,18	156,57	126,28
$Q_{Pérdidas}$ **(kVAr)**	102,35	72,84	58,85
V_{min} **(pu)**	0,9091	0,9257	10,333
TCS anual ($)	NA	30757	46678
Aumento (%)	NA	NA	52

Los resultados presentados en la Tabla 4.19 permiten inferir que al liberar el voltaje del nodo Slack para que pueda tomar cualquier valor entre los límites de tensión definidos en la Tabla 4.4, implícitamente se amplían las alternativas de decisión que puede tomar el programa de optimización con el fin de encontrar una solución superior a la obtenida en el primer escenario. Además, se evidenció que GAMS estableció la tensión del nodo Slack igual a $1,1\angle 0°$ en pu (límite superior definido para la estabilidad en magnitud de tensión) evidenciando un aumento promedio del perfil de tensión del sistema del 10,23 %. Lo anterior se presenta con mayor detalle en la Figura 4.11.

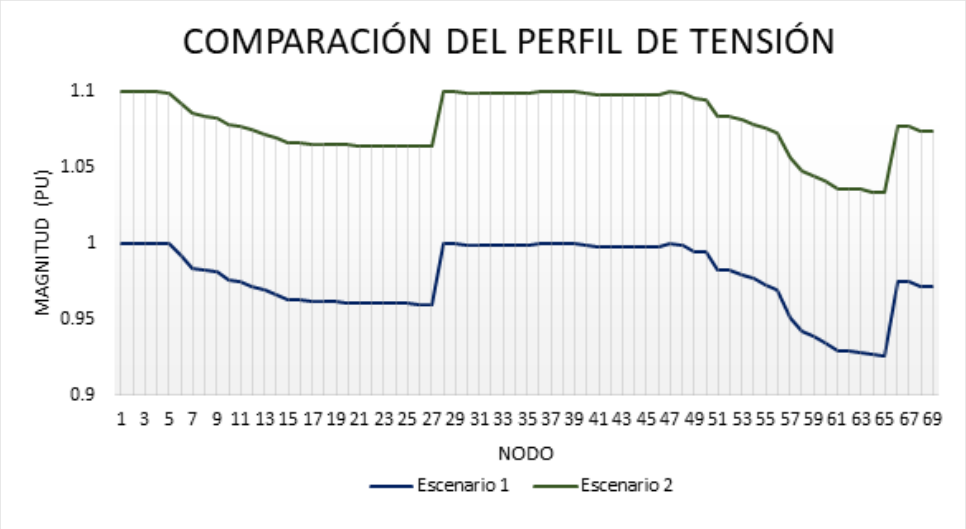


Figura 4.11: Perfil de tensión del sistema sin y con la fijación del nodo Slack (IEEE-69). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4.12 presenta una comparación de los resultados obtenidos referentes a la cuantificación del TCS anual alcanzado con los algoritmos IA [18] y los dos escenarios propuestos por los autores. Dentro de la comparación se incluyeron los dos escenarios con el fin de determinar la eficiencia del algoritmo MINLP implementado.

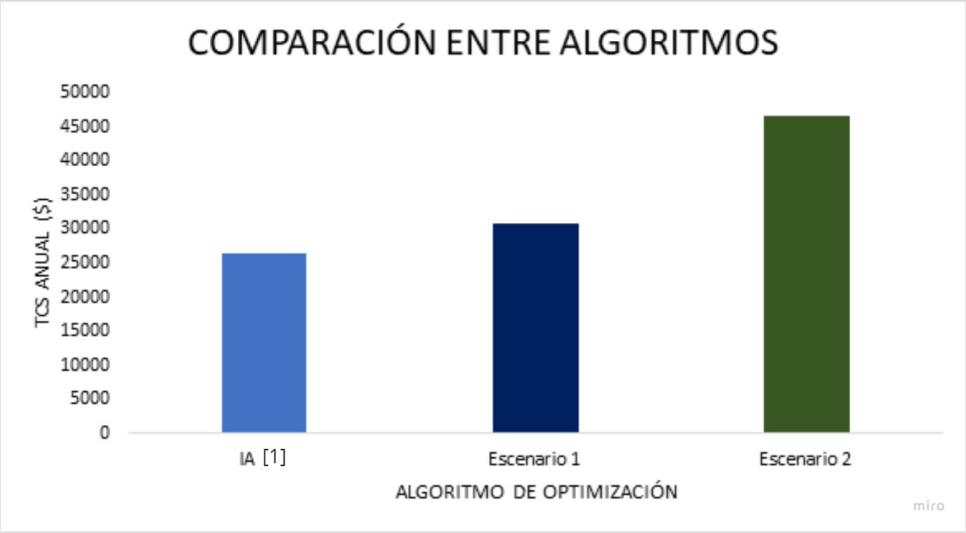


Figura 4.12: Comparación de resultados entre algoritmos de optimización. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

El trabajo desarrollado ofrece una alternativa para la óptima inclusión de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica, presentando una comparativa entre los resultados obtenidos y los presentados por otros autores respecto al porcentaje de disminución de las pérdidas de potencia, la cuantificación del TCS anual y el comportamiento del perfil de tensión para cada sistema de prueba.

Referente a maximizar el TCS anual en sistemas de distribución de energía eléctrica a través de la minimización de las pérdidas de potencia, el método implementado evidenció una mayor eficiencia debido a que, con el primer escenario, la optimización con el algoritmo MINLP permitió obtener un aumento en el TCS anual del 119 % y 0,54 % para IEEE-33 en relación a los resultados presentados en [1] y [2] respectivamente; y 16 % para IEEE-69 en relación a los resultados presentados en [1].

La formulación matemática y estrategia de solución expuestas permitieron definir un algoritmo MINLP el cuál es capaz de optimizar la inclusión, en ubicación y tamaño, de STATCOMs en sistemas de distribución de energía eléctrica. El algoritmo MINLP implementado en GAMS tomo como caso de estudio las redes de distribución radial IEEE-33 e IEEE-69, presentando resultados satisfactorios referentes a la minimización de pérdidas de potencia, evidenciando el mayor porcentaje de disminución para los dos sistemas de prueba en comparación con los algoritmos propuestos en [1] y [2].

La corrección del perfil de tensión para los sistemas de prueba depende de la ubicación del STATCOM, por ende, para la red de 33 nodos el algoritmo MINLP presentó una

mejor eficiencia entre los nodos 26 y 33. Sin embargo, para el sistema IEEE-69 se obtuvo una corrección inferior a la alcanzada por el algoritmo IA debido a que este dimensionó un STATCOM con una capacidad de 704,42 kVAr superior al dimensionado por MINLP.

Finalmente, al proponer un segundo escenario en el cual la tensión del nodo Slack fue liberada dentro de las restricciones del modelo de optimización, permitió alcanzar un incremento del TCS anual del 49 % y 62 % para los casos base A y B respectivamente en la red de 33 nodos y del 52 % para la red de 69 nodos, en comparación con el primer escenario. Esto representa una alternativa eficiente para aumentar el beneficio económico de la red en situaciones en las cuales la topología y/o los componentes del sistema no se puedan modificar, respetando los límites superiores e inferiores definidos para la estabilidad en magnitud de tensión.

5.2. Trabajos Futuros

Incluir curvas de demanda para los sistemas de prueba que permitan determinar el comportamiento del modelo de optimización frente a cambios en las potencias de los nodos.

Modificar el algoritmo MINLP con el fin de realizar una optimización en ubicación, dimensionamiento y cantidad de dispositivos a incluir, con el fin de obtener mejores resultados en cuanto a la maximización del TCS anual de la red.

Proponer un nuevo algoritmo el cual sea capaz de optimizar la inclusión de otros dispositivos FACTS, con el fin de determinar su influencia en el TCS anual en redes de distribución y comparar sus resultados con los expuestos en el presente documento.

BIBLIOGRAFIA

[1] S. A. Taher y S. A. Afsari, «Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm,» *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 60, págs. 34-44, 2014, ISSN: 01420615. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.02.020.

[2] T. Yuvaraj, K. R. Devabalaji y K. Ravi, *Optimal Placement and Sizing of DSTATCOM Using Harmony Search Algorithm*. Elsevier B.V., 2015, vol. 79, págs. 759-765. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.563.

[3] M. Koltun, «Optimal Placement and Sizing of STATCOMs in Power Systems using GHS Algorithm,» 2017.

[4] E. Ghahremani e I. Kamwa, «Optimal placement of multiple-type FACTS devices to maximize power system loadability using a generic graphical user interface,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, n.º 2, págs. 764-778, 2013, ISSN: 08858950. DOI: 10.1109/TPWRS.2012.2210253.

[5] M. S. Rawat y R. Tamta, «Optimal Placement of TCSC and STATCOM for Voltage Stability Enhancement in Transmission Network,» *2018 5th IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering, UPCON 2018*, págs. 1-6, 2018. DOI: 10.1109/UPCON.2018.8596791.

[6] S. Jazebi, S. H. Hosseinian y B. Vahidi, «DSTATCOM allocation in distribution networks considering reconfiguration using differential evolution algorithm,» *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n.º 7, págs. 2777-2783, 2011, ISSN: 01968904. DOI: 10.1016/j.enconman.2011.01.006.

[7] S. R. M. Tavakoli y B. A. H. Viki, «Simultaneous application of multi-type FACTS devices to the restructured environment : achieving both optimal number and location,» n.º September 2009, 2010. DOI: 10.1049/iet-gtd.2009.0287.

[8] J. A. Aguado, S. D. Torre y A. Trivi, «Battery energy storage systems in transmission network expansion planning,» vol. 145, págs. 63-72, 2017. DOI: 10.1016/j.epsr.2016.11.012.

[9] C. A. Mora, O. D. Montoya y E. R. Trujillo, «Mixed-integer programming model for transmission network expansion planning with Battery Energy Storage Systems (BESS),» *Energies*, vol. 13, n.º 17, 2020, ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en13174386.

[10] O. Danilo, W. Gil-gonzález y L. F. Grisales-noreña, «An exact MINLP model for optimal location and sizing of DGs in distribution networks : A general algebraic modeling system approach,» *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 11, n.º 2, págs. 409-418, 2020, ISSN: 2090-4479. DOI: 10.1016/j.asej.2019.08.011.

[11] S. Kaur, G. Kumbhar y J. Sharma, «Electrical Power and Energy Systems A MINLP technique for optimal placement of multiple DG units in distribution systems,» *INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRICAL POWER AND ENERGY SYSTEMS*, vol. 63, págs. 609-617, 2014, ISSN: 0142-0615. DOI: 10.1016/j.ijepes.2014.06.023.

[12] A. Lashkar Ara, A. Kazemi y S. A. Nabavi Niaki, «Multiobjective optimal location of FACTS shunt-series controllers for power system operation planning,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, n.º 2, págs. 481-490, 2012, ISSN: 08858977. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2176559.

[13] A. K. Sharma, «Optimal number and location of TCSC and loadability enhancement in deregulated electricity markets using MINLP,» *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 5, n.º 1, págs. 1-15, 2006, ISSN: 1553779X. DOI: 10.2202/1553-779X.1117.

[14] A. A. Adebiyi y K. T. Akindeji, «Investigating the Effect of Static Synchronous Compensator (STATCOM) for Voltage Enhancement and Transmission Line Losses Mitigation,» págs. 462-467, 2017.

[15] M. Y. Suliman, «Voltage profile enhancement in distribution network using static synchronous compensator STATCOM,» *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 10, n.º 4, págs. 3367-3374, 2020, ISSN: 20888708. DOI: 10.11591/ijece.v10i4.pp3367-3374.

[16] S. Sreedharan, T. Joseph, S. Joseph, C. Veni, J. Vishnu y V. D. P, «Power system loading margin enhancement by optimal STATCOM integration – A case study,» *Computers and Electrical Engineering*, vol. 81, pág. 106 521, 2020, ISSN: 0045-7906. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2019.106521.

[17] V. Tuzikova, J. Tlusty y Z. Muller, «A Novel Power Losses Reduction Method Based on a Particle Swarm Optimization Algorithm,» 2018. DOI: 10.3390/en11102851.

[18] R. Pegado, Z. Ñaupari, Y. Molina y C. Castillo, «Radial distribution network reconfiguration for power losses reduction based on improved selective BPSO,» *Electric Power Systems Research*, vol. 169, n.º September 2018, págs. 206-213, 2019, ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2018.12.030.

[19] F. E. Riaño, J. F. Cruz, O. D. Montoya, H. R. Chamorro y L. Alvarado-barrios, «Reduction of Losses and Operating Costs in Distribution Networks Using a Genetic Algorithm and Mathematical Optimization,» *Electronics*, vol. 10, n.º 4, pág. 419, 2021. DOI: 10.3390/electronics10040419.

[20] O. D. Montoya, W. Gil-González y J. Hernández, «Efficient Operative Cost Reduction in Distribution Grids Considering the Optimal Placement and Sizing of,» *Applied Sciences*, vol. 11, pág. 2175, 2021. DOI: 10.3390/app11052175.

[21] M. González y F. Quilumba, «Incorporación de dispositivos FACTS y transmisión HVDC en el cálculo de flujos de potencia,» *Jornadas En Ing. Eléctrica Y Electrónica, Epn*, págs. 109-120, 2016.

[22] M. A. Matilla y J. F. Petit, «Compensadores Estáticos de Potencia: Visión General y Revisión del Estado del Arte,» *Revista UIS Ingenierías*, vol. 9, págs. 9-21, 2010.

[23] I. Wasiak, R. Mienski, R. Pawelek y P. Gburczyk, «Application of DSTATCOM compensators for mitigation of power quality disturbances in low voltage grid with distributed generation,» *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU*, n.º 11239, 2007. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424166.

[24] J. MERINO, «Estudio y Simulación de un STATCOM conectado a una red,» Tesis doct., 2016, pág. 134.

[25] O. D. Montoya, H. Chamorro, L. Alvarado-Barrios, W. Gil-González y C. Orozco-henao, «Genetic-Convex Model for Dynamic Reactive Power Compensation in Distribution Networks Using D-STATCOMs,» *Applied Sciences*, vol. 11, n.º 8, pág. 3353, 2021.

[26] M. A. Ríos, C. J. Zapata y O. Gómez, «Flujo de Potencia Óptimo con Restricciones de Estabilidad de Voltaje (VSC-OPF),» págs. 1-8, 2014.

[27] N. V. Sahinidis, «Mixed - integer nonlinear programming 2018,» *Optimization and Engineering*, vol. 20, n.º 2, págs. 301-306, 2019, ISSN: 1573-2924. DOI: 10.1007/s11081-019-09438-1.

[28] S. S. Bhatti, E. M. Umair, U. Lodhi y S. Haq, «Electric Power Transmission and Distribution Losses Overviewand Minimization in Pakistan,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 6, n.º 4, págs. 1108-1112, 2015.

[29] J. Luis y O. Rubio, «dispositivos FACTS en generadores eólicos,» págs. 36-41, 2008.

[30] V. M. Awasth y V. A. Huchche, «Reactive power compensation using D-STATCOM,» *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, ICEETS 2016*, págs. 583-585, 2016. DOI: 10.1109/ICEETS.2016.7583821.

[31] A. Alzate, C. Torres y C. Restrepo, «Control of a Statcom on a Power System by Means of Pole Placement and LQR,» *Universidad Tecnológica de Pereira*, n.º 39, págs. 66-71, 2008.

[32] B. Venkatesh y R. Ranjan, «Optimal radial distribution system reconfiguration using fuzzy adaptation of evolutionary programming,» vol. 25, págs. 775-780, 2003. DOI: 10.1016/S0142-0615(03)00046-2.