



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO  
CARRERA DE ELECTRICIDAD**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
CONTROL DINÁMICO VOLT-VAR EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON D-  
STATCOM UTILIZANDO EL ALGORITMO GENÉTICO PARA MEJORAR EL  
PERFIL DE VOLTAJE.**

**AUTOR:  
WILMER JAVIER TOAPANTA GUANÍN**

**TUTOR:  
ALEXANDER AGUILA TÉLLEZ**

**Quito -Ecuador  
2026**

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

Yo, Wilmer Javier Toapanta Guanín con documento de identificación N° 1850271386 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de enero del año 2026

Atentamente,



---

Wilmer Javier Toapanta Guanín  
1850271386

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

Yo, Wilmer Javier Toapanta Guanín con documento de identificación N° 1850271386, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Control dinámico Volt-Var en sistemas de distribución con D-STATCOM utilizando el algoritmo Genético para mejorar el perfil de voltaje”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de enero del año 2026

Atentamente,



---

Wilmer Javier Toapanta Guanín

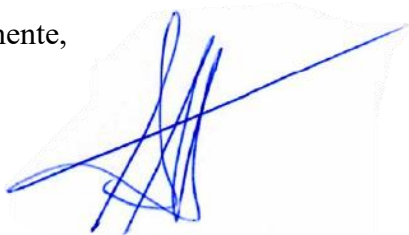
1850271386

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Alexander Aguila Téllez con documento de identificación N° 1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: CONTROL DINÁMICO VOLT-VAR EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON D-STATCOM UTILIZANDO EL ALGORITMO GENÉTICO PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE, realizado por Wilmer Javier Toapanta Guanín con documento de identificación N° 1850271386, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de enero del año 2026

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right. The signature is positioned above a dashed horizontal line.

Ing. Alexander Aguila Téllez, P.hD  
1755983184

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico.....	6
2.1	Sistema de distribución (SD) .....	6
2.1.1	Estructura radial de los sistemas de distribución.....	6
2.2	Perfil de voltaje.....	6
2.3	Control Volt-Var (VVC) .....	7
2.3.1	Parámetros del control Volt-Var .....	7
2.4	D-STATCOM.....	7
2.4.1	Aplicación del D-STATCOM en sistemas de distribución .....	7
2.4.2	Factores para considerar el dimensionamiento del D-STATCOM .....	8
3	Metodología .....	9
3.1	Algoritmo genético (AG).....	9
3.1.1	Procedimiento de un algoritmo genético .....	10
3.2	Desarrollo de la función objetivo a minimizar .....	12
3.3	Restricciones de la función objetivo .....	12
3.3.1	Límite de voltaje permitido para las barras de un sistema .....	13
3.3.2	Límites asociados a la potencia reactiva del D-STATCOM.....	13
3.4	Desviación de voltaje respecto al valor nominal.....	13
3.5	Definición de los escenarios de operación a partir de la demanda base.....	14
3.6	Pseudocódigo del Algoritmo Genético aplicado al dimensionamiento del D-STATCOM .....	14
3.7	Cálculo de los resultados a partir del AG.....	15
3.7.1	Cálculo de reducción de pérdidas de potencia.....	15
3.7.2	Voltaje promedio del SD.....	15
4	Caso de estudio.....	16
4.1	Características del SD IEE de 33 barras .....	16
4.2	Ubicación óptima del D-STATCOM .....	17
4.2.1	Ubicación seleccionada para el D-STATCOM.....	19
5	Análisis de resultados.....	20
5.1	Resultados del sistema para los tres escenarios de demanda a partir de la demanda base.....	20
5.2	Resultados del sistema con dimensionamiento óptimo del D-STATCOM en los diferentes escenarios de demanda mediante el AG.....	22
5.3	Resultados cuasidinámicos del sistema IEEE de 33 barras.....	27
6	Conclusiones .....	29

6.1	Trabajos futuros .....	29
7	Referencias .....	30
7.1	Matriz de Estado del Arte.....	34
7.2	Resumen de Indicadores .....	37
8	Anexos.....	38

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación de gen, cromosoma y población [autor].	10
Figura 2. Ejemplo de cruce de un punto entre dos cromosomas [autor].	11
Figura 3. Cambio de genes antes y después de la mutación [autor].	11
Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento del AG [autor].	12
Figura 5. Diagrama del sistema IEEE-33 barras [autor].	16
Figura 6. Barras con mayor coincidencia para ubicar el D-STATCOM [autor].	20
Figura 7. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda mínima.	21
Figura 8. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda media.	21
Figura 9. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda máxima.	22
Figura 10. Ubicación del D-STATCOM en la barra 30 en el sistema IEE-33 barras [autor].	22
Figura 11. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda mínima.	23
Figura 12. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda mínima.	23
Figura 13. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda mínima.	23
Figura 14. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda mínima.	24
Figura 15. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda media.	24
Figura 16. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda media.	25
Figura 17. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda media.	25
Figura 18. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda media.	25
Figura 19. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda máxima.	26
Figura 20. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda máxima.	26
Figura 21. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda máxima.	26
Figura 22. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda máxima.	26
Figura 23. Curva aproximada del perfil de voltaje en la barra 18 durante 24 h.	27
Figura 24. Despacho de potencia Q del D-STATCOM.	27
Figura 25. Pérdidas de potencia P en el sistema IEEE-33 barras a lo largo del día.	28
Figura 26. Comportamiento diario de la desviación promedio de voltaje del SD.	28
Figura 27. Voltaje promedio del sistema IEEE-33 barras.	28
Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	37
Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.	37
Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte.	37

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Abreviaciones y Nomenclatura.....	5
Tabla 2 Perfiles de variación de voltaje permitidos en el SD.....	6
Tabla 3 Relación de voltajes según el modo de operación del D-STATCOM.....	7
Tabla 4 Distribución de los perfiles de demanda a lo largo del día.....	14
Tabla 5 Parámetros de las líneas y cargas utilizados para el modelado del SD IEEE-33 barras.....	16
Tabla 6 Revisión de diferentes artículos para seleccionar la ubicación del D-STATCOM.....	17
Tabla 7 Comparación de la ubicación, dimensionamiento y resultados del D-STATCOM según la revisión bibliográfica.....	19
Tabla 8 Indicadores de pérdidas de potencia, DPV y $V_{min}$ en demanda mínima.....	21
Tabla 9 Pérdidas de potencia, $V_{min}$ y DPV en demanda media.....	21
Tabla 10 Pérdidas de potencia, $V_{min}$ y DPV en demanda máxima.....	22
Tabla 11 Potencia reactiva inyectada en demanda mínima por el D-STATCOM.....	23
Tabla 12 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda mínima.....	24
Tabla 13 Potencia reactiva inyectada en demanda media por el D-STATCOM.....	24
Tabla 14 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda media.....	25
Tabla 15 Potencia reactiva inyectada en demanda máxima por el D-STATCOM.....	26
Tabla 16 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda máxima.....	27
Tabla 17 Resumen del despacho diario de potencia reactiva del D-STATCOM.....	28
Tabla 18 Comparación de resultados de pérdidas de energía y desviación promedio de voltaje.....	29
Tabla 19 Voltaje del sistema para el escenario de demanda mínima sin compensación.....	38
Tabla 20 Voltaje del sistema para el escenario de demanda mínima con compensación.....	38
Tabla 21 Voltaje del sistema para el escenario de demanda media sin compensación.....	38
Tabla 22 Voltaje del sistema para el escenario de demanda media con compensación.....	38
Tabla 23 Voltaje del sistema para el escenario de demanda máxima sin compensación.....	39
Tabla 24 Voltaje del sistema para el escenario de demanda máxima con compensación.....	39

# CONTROL DINÁMICO VOLT-VAR EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON D-STATCOM UTILIZANDO EL ALGORITMO GENÉTICO PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE

## Resumen

En el presente trabajo se implementó un algoritmo genético (AG) para desarrollar una estrategia de control cuasidinámico Volt-Var mediante un D-STATCOM, con el objetivo de mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia en los sistemas de distribución. En la actualidad, los sistemas radiales modernos presentan problemas operativos, los cuales se incrementan debido al crecimiento de la demanda y a la variabilidad de cargas, lo que provoca caídas de voltaje y un incremento en las pérdidas técnicas.

Se modeló el sistema de prueba IEEE de 33 barras en el software PowerFactory, versión 2021, de DlgSILENT considerando la ubicación del D-STATCOM previamente definida de acuerdo con la revisión bibliográfica. A partir del caso base se desarrollaron tres escenarios de demanda (mínima, media, máxima). Posteriormente, se implementó el algoritmo genético en MATLAB, versión R2023b, para optimizar el dimensionamiento del D-STATCOM, utilizando como función objetivo la minimización de las pérdidas de energía y la reducción de la desviación promedio del voltaje (DPV), con la finalidad de mejorar la eficiencia y la calidad del servicio eléctrico del sistema de distribución.

**Palabras Clave:** Algoritmo Genético, D-STATCOM, Perfil de voltaje, Pérdidas de potencia, Sistema de distribución.

## Abstract

In this study, a genetic algorithm (GA) was implemented to develop a quasi-dynamic Volt-Var control strategy using a D-STATCOM, with the aim of improving the voltage profile and reducing power losses in distribution systems. Currently, modern radial systems present operational problems, which are exacerbated by growing demand and load variability, causing voltage drops and an increase in technical losses.

The 33-bus IEEE test system was modeled in DlgSILENT's PowerFactory software, version 2021, considering the location of the D-STATCOM previously defined according to the literature review. Three demand scenarios (minimum, average, maximum) were developed based on the base case. Subsequently, the genetic algorithm was implemented in MATLAB, version R2023b, to optimize the sizing of the D-STATCOM, using as an objective function the minimization of energy losses and the reduction of the average voltage deviation (AVD), with the aim of improving the efficiency and quality of the electrical service of the distribution system.

**Keywords:** Genetic Algorithm, D-STATCOM, Voltage profile, Power losses, Distribution system.

# 1 Introducción

El transporte de la energía eléctrica hasta los consumidores finales es responsabilidad del SD, que forma parte del sistema eléctrico. Sin embargo, debido a su estructura radial, variabilidad de la demanda y a la presencia de cargas distribuidas a lo largo de la red, estos sistemas suelen presentar problemas relacionados al perfil de voltaje y a las elevadas pérdidas de potencia activa [1], [2]. Las caídas de voltaje en las barras más alejadas de la subestación son una de las limitaciones operativas más importantes de las redes de distribución eléctrica y afectan al rendimiento del sistema y a la calidad del servicio [3].

Frente a este escenario, el control Volt-Var se presenta como una estrategia eficaz para mejorar la regulación del voltaje en los sistemas de distribución, ya que permite compensar la potencia reactiva de forma adecuada y adaptarse a las circunstancias operativas del sistema [4]. El objetivo de este modo de control consiste en mantener los perfiles de voltaje dentro de los límites determinados incluso bajo condiciones de carga variables y al mismo tiempo reducir las pérdidas eléctricas logrando mejorar el funcionamiento global de la red [5]. Estas funciones se han llevado a cabo a través de medios tradicionales como bancos de capacitores, reguladores de voltaje y cambiadores de tomas bajo carga (OLTC). Por otro lado, las respuestas de dichos dispositivos llegan a ser limitadas cuando se presentan variaciones rápidas de demanda [4], [6].

Por consiguiente, dentro de este contexto de las aplicaciones de distribución, los dispositivos FACTS, en particular el D-STATCOM, han cobrado gran importancia debido a su capacidad para inyectar o absorber potencia reactiva de forma continua y controlada en todo momento [7], [8]. El D-STATCOM corresponde a un equipo basado en convertidores electrónicos de potencia, el cual permite regular el perfil de voltaje desde el punto de

conexión, al ser un dispositivo que puede adaptarse de manera controlada a los cambios del sistema, mejorando el perfil de voltaje y reduciendo las pérdidas de potencia activa [9]. Sin embargo, el desempeño del dispositivo está fuertemente relacionado con su correcta ubicación dentro del sistema, así como con un adecuado dimensionamiento y una estrategia de control apropiada [10], [11].

Varios estudios han demostrado que si la ubicación y el dimensionamiento del D-STATCOM son incorrectos, pueden limitar los beneficios esperados en su aplicación o incluso afectar negativamente en la operación del sistema [10]. Por esta razón, es importante determinar de manera correcta dichos parámetros que se han convertido en un problema de optimización, el cual ha sido abordado mediante diferentes técnicas matemáticas y enfoques metaheurísticos [11]-[13]. Dentro de estas técnicas, los algoritmos genéticos resultan adecuados para abordar problemas con alta no linealidad y múltiples restricciones, condiciones que suelen presentarse en los sistemas de distribución [14], [15].

En este trabajo se propone la implementación de un control cuasidinámico Volt-Var mediante un D-STATCOM, cuyo dimensionamiento se obtiene a partir del uso de un algoritmo genético en el software MATLAB, versión R2023b. Se lleva a cabo el estudio en el sistema IEEE 33 barras, el cual es ampliamente utilizado para evaluar las diferentes estrategias de compensación en redes de distribución [13].

A partir de una revisión bibliográfica previa se determinó la ubicación óptima del D-STATCOM, sobre la cual se lleva a cabo el proceso de optimización considerando distintos escenarios de demanda (mínima, media, máxima) con el propósito de representar de manera aproximada el comportamiento cuasidinámico del sistema a lo largo del día.

A continuación, se presentan diversos trabajos relacionados con la ubicación y dimensionamiento del D-STATCOM en sistemas de distribución.

El artículo [21] presentó un método de optimización metaheurística basado en el algoritmo Dragonfly, el cual utiliza un vector de paso adaptativo para determinar la ubicación y el tamaño óptimos del D-STATCOM dentro de la red de distribución IEEE de 33 barras. El objetivo principal de este método fue minimizar las pérdidas eléctricas y mejorar el perfil de voltaje. El procedimiento consideró diferentes escenarios de carga y evaluó el rendimiento del método propuesto en comparación con otros algoritmos como GA, PSO, ABC y WOA. Los resultados mostraron que el algoritmo Dragonfly obtuvo el mejor desempeño en términos de reducción de pérdidas de energía, aumento del voltaje y velocidad de convergencia.

En [13] se propone un modelo híbrido genético-convexo (CBGA-SOCP) para la localización y el dimensionamiento del D-STATCOM en sistemas de distribución, con el objetivo de reducir los gastos operativos anuales asociados principalmente a las pérdidas de energía. Este modelo también considera los costos de inversión en los equipos. El algoritmo genético de Chu y Beasley (CBGA) se emplea en la etapa maestra para determinar las barras de ubicación de los dispositivos, mientras que en la etapa esclava se utiliza una reformulación convexa SOCP del flujo de potencia en distintos momentos del día para calcular el dimensionamiento. Los resultados obtenidos en el sistema IEEE de 33 barras muestran una reducción del costo anual de operación de 130 613,90 US\$/año a 109 455,96 US\$/año, lo que representa aproximadamente un 16,20 %, mediante la instalación de tres D-STATCOM en las barras 14, 30 y 32, con capacidades aproximadas de 0,2896, 0,5593 y 0,1177 Mvar, respectivamente.

En [22] se utiliza el algoritmo de optimización seno-coseno (SCA) para determinar la ubicación y el tamaño óptimos del D-STATCOM en sistemas de distribución IEEE de 33 y 69 buses, con el objetivo de reducir los gastos operativos anuales asociados a las pérdidas de energía y a los costos de los equipos. El algoritmo se implementa bajo un esquema discreto-continuo, en el cual la parte continua ajusta los tamaños del D-STATCOM, mientras que la parte discreta selecciona las barras candidatas. La evaluación de cada solución se realiza mediante un flujo de potencia multiperiodo, considerando la demanda diaria, y posteriormente se compara con el modelo exacto (MINLP) resuelto en GAMS. Los resultados obtenidos en el sistema IEEE de 33 barras muestran que el método SCA alcanza el menor costo anual, con un valor de 98 550,80 USD/año frente al caso base de 112 740,90 USD/año, lo que equivale a una reducción cercana al 12,59 %, mediante la instalación de tres dispositivos en las barras 15, 30 y 32.

En [11] se abordó la ubicación y el dimensionamiento simultáneo de generación distribuida (DG) y un D-STATCOM en el sistema IEEE de 33 buses mediante el algoritmo de optimización Artificial Rabbits Optimization (ARO), planteando un problema multiobjetivo orientado a la reducción de las pérdidas de potencia activa, la mejora del perfil y la estabilidad del voltaje, así como la disminución de los costos de instalación y operación. Para convertir el problema multiobjetivo en uno monoobjetivo se empleó un enfoque basado en lógica difusa, y el desempeño del método fue comparado con los algoritmos HHO y EPS. Los resultados obtenidos muestran que, al instalar DG y D-STATCOM de manera conjunta, el método ARO alcanza los mejores valores globales, logrando reducir las pérdidas de potencia activa de 2278,507 kW a 815,7983 kW, además de mejorar el

perfil de voltaje y disminuir el costo total en comparación con los otros algoritmos.

En [23] se aplica el algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSO) para identificar la ubicación y el tamaño óptimos del D-STATCOM en el sistema de distribución IEEE de 33 barras y en una red real de 20 buses de Nigeria, con el objetivo de minimizar las pérdidas de potencia activa y mejorar el perfil de voltaje. La técnica integra el flujo de potencia mediante el método de barrido adelante-atrás (BFS) junto con el PSO para ajustar la barra de conexión y la capacidad del compensador. Los resultados muestran que el algoritmo PSO supera al caso base y al método BOA, logrando reducir las pérdidas totales de 221,6772 kW a 182,1772 kW, además de mejorar los perfiles de voltaje en las barras más relevantes del sistema.

En [24] se propone un modelo basado en la versión discreta-continua del algoritmo genético de Chu-Beasley (DC-CBGA) para determinar la ubicación y el tamaño óptimos de los D-STATCOM en sistemas de distribución radiales y mallados, considerando perfiles de carga diarios de tipo residencial, comercial e industrial, con el objetivo de reducir los costos anuales por pérdidas de energía y la inversión en dispositivos. El enfoque emplea un esquema maestro-esclavo, en el cual el DC-CBGA define las barras de ubicación y los tamaños de los D-STATCOM, mientras que el flujo de potencia multiperiodo se calcula mediante aproximaciones sucesivas. Los resultados obtenidos en el sistema IEEE de 33 barras indican una reducción del costo anual de operación de 130 580,82 USD a 108 196,46 USD en la red radial, y hasta 77 809,93 USD en configuración mallada, superando a los solvers de GAMS y al modelo genético-convexo, lo que evidencia la mayor eficiencia del enfoque propuesto.

En [26] se propone un método híbrido basado en el algoritmo Firefly mejorado mediante lógica difusa (FEFO) para

determinar la ubicación y el tamaño óptimos del D-STATCOM en combinación con generación eólica distribuida en el sistema IEEE de 33 buses, con el objetivo de mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia activa. Los resultados muestran que, al implementar el D-STATCOM, las pérdidas de potencia activa se reducen de 210,07 kW a 149,67 kW, lo que evidencia una mejora significativa en el desempeño del sistema.

El presente trabajo está estructurado en siete partes principales. En la Sección 2 se desarrolla el marco teórico, en el cual se abordan las características del sistema de distribución, las restricciones de tensión, el control Volt-Var, el funcionamiento del D-STATCOM y los conceptos básicos del algoritmo genético.

En la Sección 3 se describe la metodología empleada, incluyendo la función objetivo, sus restricciones y la definición de los escenarios de operación a partir de la demanda base, así como la implementación del algoritmo genético (AG). En la Sección 4 se presenta el caso de estudio, donde se describen las características del sistema IEEE de 33 barras y se incluye la revisión bibliográfica que respalda la selección de la ubicación del compensador en la red. En la Sección 5 se analizan los resultados obtenidos, comparando el caso base con el caso optimizado mediante D-STATCOM para los diferentes escenarios de demanda y el análisis cuasidinámico. Finalmente, la Sección 6 presenta las conclusiones y los trabajos futuros, mientras que la Sección 7 contiene las referencias y el material complementario, junto con los anexos.

Tabla 1 Abreviaciones y Nomenclatura

**Abreviaturas**

<b>ABC</b>	Algoritmo de colonia de abejas.
<b>ARCONEL</b>	Agencia de regulación y control de electricidad.
<b>ARCERNNR</b>	Agencia de regulación y control de electricidad y recursos naturales no renovables.
<b>ARO</b>	Algoritmo inspirado en conejos.
<b>ASDA</b>	Optimización adaptativa basada en vectores de pasos de libélula.
<b>BFS</b>	Barrido progresivo inverso.
<b>BOA</b>	Algoritmo inspirado en mariposas.
<b>CBGA</b>	Algoritmo genético de Chu y Beasley.
<b>DC</b>	Corriente continua.
<b>DG</b>	Generación distribuida.
<b>DPV</b>	Desviación promedio de voltaje.
<b>D-STATCOM</b>	Compensador estático síncrono de distribución.
<b>FACTS</b>	Sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna.
<b>FEFO</b>	Optimización de luciérnagas mejorado difuso.
<b>FL-PSO</b>	Técnica híbrida basada en la lógica difusa y optimización por enjambre de partículas.
<b>FO</b>	Función objetivo.
<b>GA</b>	Algoritmo genético.
<b>GAMS</b>	Sistema de modelado algebraico general.
<b>HHO</b>	Algoritmo inspirado en halcones.
<b>MILP</b>	Programación lineal entera mixta.
<b>MINLP</b>	Programación no lineal entera mixta.
<b>OLTC</b>	Cambiador de tomas bajo carga.
<b>P</b>	Potencia activa [kW].
<b>PCM</b>	Modo de control de potencia.
<b>PCC</b>	Punto de Conexión Común.
<b>PSO</b>	Optimización por enjambre de partículas.
<b>Q</b>	Potencia reactiva [Mvar].
<b>R</b>	Resistencia.
<b>S</b>	Potencia aparente.
<b>SCA</b>	Algoritmo de optimización que usa funciones seno y coseno.
<b>SD</b>	Sistema de distribución.
<b>SOCP</b>	Programación cónica de segundo orden.
<b>VCM</b>	Modo de control de voltaje.
<b>VSC</b>	Convertidor de fuente de voltaje.
<b>VVC</b>	Control Volt-Var.
<b>WOA</b>	Algoritmo de optimización de ballenas
<b>X</b>	Reactancia.

**Nomenclatura**

<b><math>\alpha</math></b>	Factor de escalamiento de la demanda.
<b><math>\Delta P_{\text{loss}}</math></b>	Reducción de pérdidas de potencia activa.
<b><math>E_{\text{loss}}</math></b>	Pérdidas de Energía en [kWh].
<b><math>h</math></b>	Índice de escenario de demanda.
<b><math>j</math></b>	Índice de barra del sistema.
<b><math>N_b</math></b>	Número total de barras del sistema.
<b><math>P_{\text{activa}}</math></b>	Pérdidas de potencia activa [kW].
<b><math>P_{\text{loss,AG}}</math></b>	Pérdidas del sistema con la optimización.
<b><math>P_{\text{loss,base}}</math></b>	Pérdidas del sistema en caso base.
<b><math>P_{\text{loss,h}}</math></b>	Pérdidas de potencia activa en el escenario h.
<b><math>Q_{\text{D-STATCOM,h}}</math></b>	Potencia reactiva que el D-STATCOM entrega o absorbe en el escenario h.
<b><math>Q_{\text{max}}</math></b>	Potencia reactiva máxima que entrega el D-STATCOM.
<b><math>-Q_{\text{max}}</math></b>	Potencia reactiva máxima absorbida por el D-STATCOM.
<b><math>V_{\text{BUS}}</math></b>	Voltaje del nodo en el sistema.
<b><math>V_{j,h}(x)</math></b>	Voltaje en la barra j durante el escenario h.
<b><math>V_{\text{max}}</math></b>	Voltaje máximo [p.u.]
<b><math>V_{\text{min}}</math></b>	Voltaje mínimo [p.u.]
<b><math>V_{\text{prom}}</math></b>	Voltaje promedio del sistema.
<b><math>V_{\text{ref}}</math></b>	Voltaje de referencia [p.u.]
<b><math>V_{\text{VSC}}</math></b>	Voltaje del convertidor.
<b><math>w_1</math> y <math>w_2</math></b>	Pesos asociados a la potencia activa y desviación de voltaje respectivamente.

## 2 Marco teórico

En este apartado se darán a conocer varios conceptos clave presentes en la literatura, los cuales son fundamentales para la comprensión del desarrollo de este trabajo. Con el fin de optimizar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia activa, estos contenidos se centran en los sistemas de distribución eléctrica y el control cuasidinámico Volt-Var mediante el uso de D-STATCOM con la ayuda de algoritmos genéticos.

### 2.1 Sistema de distribución (SD)

El SD es de fundamental importancia, su objetivo es distribuir la energía desde las subestaciones a través de las líneas de distribución primarias, las cuales son responsables de abastecer el servicio eléctrico en zonas requeridas donde se encuentren diferentes usuarios, como residenciales, comerciales e industriales. Además, está conformado por un gran número de equipos que permiten solventar la demanda diaria de energía en medio y bajo voltaje de cada uno de los usuarios que estén conectados en la red eléctrica [27].

En la etapa de distribución, es necesario considerar que el sistema genera mayor cantidad de pérdidas debido al inadecuado perfil de voltaje el cual es causado por la complejidad de las topologías de las redes de distribución [2], [3].

#### 2.1.1 Estructura radial de los sistemas de distribución

La configuración de la red radial es considerada una de las topologías más simples y utilizadas en redes pequeñas, la cual consta de un único alimentador primario que se encarga de transportar la potencia hacia las cargas, logrando así la reducción de costos y mantenimiento de la red. Sin embargo, presenta desventajas, en caso de existir alguna falla en el alimentador todos los usuarios conectados a esta red quedarán sin servicio, así también presenta

mayor caída de voltaje en las barras más alejadas de la subestación [28].

### 2.2 Perfil de voltaje

Los límites de operación de voltaje son diferentes en cada país según su normativa, la cual fija sus propias características técnicas que les permite operar sin problemas. Sin embargo, se considera que a nivel internacional los límites de voltaje establecidos para el funcionamiento adecuado de un sistema eléctrico deben mantenerse entre el 0.95 [p.u.] y el 1.05 [p.u.] [29]. En Ecuador, de acuerdo con la normativa ecuatoriana ARCONEL-001/21 establece criterios oficiales aplicables al comportamiento del voltaje en los puntos de conexión del sistema eléctrico. Aunque la normativa está dirigida a las centrales de generación, los valores de voltaje expresados en por unidad también sirven como una referencia útil para analizar el comportamiento del voltaje en redes de distribución. Bajo condiciones normales, el voltaje debe encontrarse entre el 0.9 [p.u.] y el 1.1 [p.u.] [20].

Por otro lado, la regulación Nro. ARCERNR-002/2020 especifica que el perfil de voltaje en los sistemas de distribución debe encontrarse dentro de ciertos límites específicos. Los valores aceptables para cada perfil de voltaje se muestran en la Tabla 2, que indica los valores admisibles permitidos para cada perfil de voltaje, los cuales permiten que el voltaje real se mantenga cerca del valor nominal y que la calidad del servicio siga siendo adecuada [20].

Tabla 2 Perfiles de variación de voltaje permitidos en el SD

Categoría de Perfil de Voltaje	Límite de Variación Permitido
Sistema de Alto Voltaje	$\pm 5 \%$
Sistema de Medio Voltaje	$\pm 6 \%$
Sistema de Bajo Voltaje	$\pm 8 \%$

### 2.3 Control Volt-Var (VVC)

El VVC es una técnica que utiliza la gestión de la potencia reactiva para controlar el voltaje en los sistemas de distribución. Mediante esta técnica se busca mantener el voltaje dentro de los límites establecidos en cada uno de los nodos del sistema, bajo diferentes condiciones de carga [4]. Para lograr el VVC es necesario utilizar dispositivos como reguladores de voltaje, bancos de capacitores, cambiadores de tomas bajo carga (OLTC), dispositivos FACTS, entre otros [4], [5].

#### 2.3.1 Parámetros del control Volt-Var

- Pendiente de la curva Volt-Var, debe garantizar que la potencia reactiva se adapte a las variaciones de voltaje para mantener la estabilidad del sistema.
- Banda de tolerancia, se encarga de que las pequeñas oscilaciones de voltaje no activen el compensador de manera innecesaria.
- Establecer límites de potencia reactiva ayuda a que el compensador opere de manera eficiente.
- Voltaje de referencia debe ser establecido en función del perfil de voltaje deseado hacia el cual el sistema va a converger bajo cualquier condición de carga.
- Tiempo de respuesta del controlador, el cual determina la velocidad del dispositivo con la que actúa ante las variaciones de carga para corregir el perfil de voltaje [6], [32].

### 2.4 D-STATCOM

El D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) es un dispositivo estático basado en la electrónica de potencia, el cual está formado por varios componentes que trabajan en conjunto, como es el convertidor de fuente de voltaje (VSC), dispositivo de almacenamiento de

energía (condensador DC), transformador de acoplamiento, filtros (generalmente L o LCL) y un sistema de control avanzado. El D-STATCOM se conecta en derivación (shunt) a los nodos de las redes eléctricas de distribución en donde se necesite inyectar o absorber potencia reactiva de manera controlable; lo hace modificando la magnitud y el ángulo de fase del VSC. Su función principal es ajustarse a las variaciones instantáneas de voltaje, de tal manera que el voltaje esté dentro de los límites establecidos y así mejorar la estabilidad de la red [7]-[9].

La operación del D-STATCOM depende de la diferencia entre el voltaje generado por el convertidor (VSC) respecto al voltaje del nodo en donde se encuentra conectado el equipo. Esto ayuda a determinar la manera en que el dispositivo actúa, ya sea como capacitivo o inductivo según la dirección de la corriente al momento de intercambiar la potencia reactiva [7]. En la Tabla 3 se detalla la relación de operación del D-STATCOM, en donde se define el voltaje del convertidor como  $V_{VSC}$  y el voltaje del nodo en el sistema como  $V_{BUS}$ .

Tabla 3 Relación de voltajes según el modo de operación del D-STATCOM

Condición eléctrica	Comportamiento del D-STATCOM	Interpretación física
$V_{VSC} < V_{BUS}$	Inyecta potencia reactiva	Actúa como compensador capacitivo.
$V_{VSC} > V_{BUS}$	Absorbe potencia reactiva	Se comporta como una carga inductiva.

#### 2.4.1 Aplicación del D-STATCOM en sistemas de distribución

El D-STATCOM es un dispositivo utilizado en los sistemas de distribución que tiene la capacidad de absorber o suministrar potencia reactiva de acuerdo con las necesidades del sistema eléctrico. Estos dispositivos pueden ser colocados en cualquier nodo del sistema, manteniendo perfiles adecuados de voltaje en los nodos

para optimizar el perfil de voltaje, ya que ayuda a reducir las pérdidas eléctricas [9], [10]. Sin embargo, una ubicación inadecuada puede resultar desfavorable para el correcto funcionamiento del sistema [10].

La incorporación de este equipo en el sistema de distribución se realiza mediante una conexión en derivación, la cual es capaz de intercambiar potencia activa y reactiva de manera continua. Gracias a la capacidad del VSC, el D-STATCOM puede comportarse como reactancia capacitiva o inductiva en el punto de acoplamiento común (PCC), lo que permite mejorar las condiciones de operación del sistema [7].

Este dispositivo tiene dos estrategias de control de operación, como es el modo de control de potencia (PCM), donde el nodo compensado se modela como PQ y el dispositivo ajusta la potencia reactiva requerida para apoyar al PCC y a nodos aguas abajo, y así también el modo de control de voltaje (VCM), donde el nodo se modela como PV y se busca mantener un voltaje estrictamente regulado para cargas críticas mediante compensación continua en estado estacionario [7].

#### 2.4.2 Factores para considerar el dimensionamiento del D-STATCOM

Es necesario analizar algunos factores técnicos y económicos para el dimensionamiento óptimo de un D-STATCOM, con el fin de maximizar su efectividad y viabilidad.

- **Perfil de voltaje y estabilidad**

Antes de instalar un D-STATCOM es importante localizar en que nodos o barras la red eléctrica presenta el voltaje más bajo o inestable, de tal manera que al colocar el D-STATCOM en estos lugares ayuda a que el voltaje se mantenga dentro de los parámetros adecuados y a que la red sea más estable, evitando caídas o fluctuaciones que puedan afectar a los usuarios [7], [10], [11], [33].

- **Reducción de pérdidas eléctricas**

Reducir la cantidad de energía que se desperdicia en forma de calor como consecuencia del efecto Joule en los equipos eléctricos y los cables del sistema es uno de los objetivos principales [10], [11].

Las pérdidas de potencia activa se calculan mediante la siguiente ecuación.

$$P_{activa} = I^2 * R \quad (1)$$

Para el cálculo de la energía que se disipa en forma de calor, se realiza un producto entre la potencia activa por el tiempo en que circula la corriente como se indica en la ecuación (2) [10].

$$E_{loss} = I^2 * R * t \quad (2)$$

Donde:

<b>P<sub>activa</sub></b>	Potencia activa en [kW]
<b>E<sub>loss</sub></b>	Pérdidas de Energía en [kWh]
<b>I</b>	Corriente en el cable [A]
<b>R</b>	Resistencia del cable [ $\Omega$ ]
<b>t</b>	Tiempo de circulación de la corriente en [seg]

Al dimensionar correctamente el D-STATCOM se logra disminuir la corriente la corriente que circula por los alimentadores, por lo tanto, la energía es mejor aprovechada, permitiendo una operación más eficiente del sistema eléctrico [10]-[13].

- **Compensación de potencia reactiva**

La compensación de potencia reactiva resulta fundamental para el control Volt-Var, ya que permite regular de forma adecuada el perfil de voltaje en el sistema ante las variaciones de carga. El D-STATCOM debe inyectar o absorber potencia reactiva en conformidad con las necesidades de la red. Su dimensionamiento debe ser el adecuado ya que una capacidad

insuficiente limita la mejora del perfil de voltaje, mientras que una capacidad sobredimensionada puede provocar mayores pérdidas de potencia en la red.

La correcta compensación disminuye las pérdidas de potencia y también ayuda a mantener un voltaje estable, logrando que la electricidad viaje de manera eficiente [13], [34].

### 3 Metodología

Para dar solución a los cambios de demanda a los que están expuestas las redes de distribución, se plantea implementar el control Volt-Var cuasidinámico con D-STATCOM, el cual permitirá mejorar el perfil de voltaje en la red, es decir, lo mantendrá dentro de los parámetros establecidos, como a su vez reducir las pérdidas de potencia activa. El método empleado para la solución consiste en analizar la ubicación óptima del D-STATCOM según la literatura y hacer uso del algoritmo genético para optimizar el tamaño del dispositivo, el cual será evaluado en el sistema IEEE de 33 barras, considerando escenarios de demanda como mínima, media y máxima para simular condiciones cuasidinámicas.

#### 3.1 Algoritmo genético (AG)

El AG corresponde a un enfoque metaheurístico de optimización que se utiliza con frecuencia en ingeniería para resolver problemas complejos y se basa en principios genéticos y en la selección natural [14]. Los fundamentos de la selección natural descritos por Charles Darwin y las reglas genéticas que rigen la evolución de los organismos sirvieron de base para la introducción inicial del AG por parte de John Holland, de la Universidad de Michigan, en 1975 [15]-[17].

El primer paso que desarrolla el AG para resolver un problema es llamado inicialización, en donde se genera aleatoriamente una población de individuos, a veces también conocidos como cromosomas, los cuales contienen

genes o caracteres que almacenan valores conocidos como alelos [14], [17], [18]. El conjunto de estos cromosomas forma una población que puede contener valores numéricos, binarios, símbolos o de caracteres con posibles soluciones candidatas para resolver un problema, en la Figura 1 se representa cómo está formada una población mediante el proceso de selección de cromosomas [14], [16].

La evolución comienza una vez obtenida la población inicial y es un proceso iterativo, es decir, cada iteración en el AG se denomina generación [17], [19], donde cada uno de los individuos es evaluado con base en una función objetivo con la finalidad de seleccionar a individuos excepcionales para procrear y transmitir sus cualidades a la siguiente generación [14], [15], [18]. Posteriormente el AG realiza la combinación de su material genético mediante una operación de cruce y la introducción de cambios aleatorios mediante la mutación, de tal manera que se crean nuevas poblaciones con buena amplitud física, este proceso se repetirá hasta alcanzar un criterio de terminación o el número de iteraciones preestablecido [15], [17]-[19].

En resumen, el AG se ha aplicado eficazmente a una variedad de actividades y ámbitos de aplicación con el fin de optimizar diversos parámetros. El acto de establecer las circunstancias básicas se denomina optimizar. El término optimizar se refiere a la acción de establecer condiciones iniciales con el fin de conseguir valores óptimos de salida, ya sea para maximizar o minimizar una o más funciones objetivo mediante la modificación de los parámetros de entrada [15], [16]. La adaptabilidad y capacidad son una ventaja del AG para solucionar problemas complejos de optimización no lineal y no convexa, al igual que en escenarios cuasidinámicos. Además, cuentan con una capacidad de búsqueda general que les permite evitar estancarse en

soluciones óptimas locales. Sin embargo, para evitar que el rendimiento del AG se vea afectado negativamente por una velocidad de convergencia lenta, es necesario modificar algunos parámetros, como la cantidad de individuos que conforman la población, las probabilidades de cruce y mutación [15].

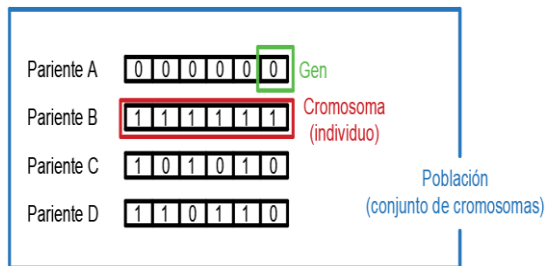


Figura 1. Representación de gen, cromosoma y población [autor].

### 3.1.1 Procedimiento de un algoritmo genético

Para comprender de mejor manera el funcionamiento del AG, es necesario conocer cómo se desarrolla cada uno de los procesos, ya que son fundamentales para solucionar el problema de optimización.

#### a) Inicialización

El primer paso que desarrolla el AG es llamado “Inicialización”, el cual crea una población inicial al azar formada por un conjunto de individuos, en donde cada individuo se considera una posible respuesta para dar solución a un problema. Estos individuos a su vez son llamados cromosomas, ya que se caracterizan por formar una cadena de variables que también se los conoce como genes, cuyos valores (alelos) pueden ser numéricos, binarios, simbólicos o de caracteres [16], [18].

#### b) Evaluación de aptitud física

El diseño de una función de aptitud es esencial para el AG, ya que nos permite evaluar cuán cercana está una solución sugerida de la mejor opción posible. En otras palabras, le da a cada cromosoma creado a partir de la población original un valor de aptitud que indica cuán útil es para resolver problemas. Es importante mencionar que la función fitness debe

diseñarse cumpliendo criterios teóricos y prácticos [16].

#### c) Selección

La selección es un proceso fundamentado en el AG, busca a los individuos más aptos según la función de aptitud, si uno de los individuos no cumple con lo que necesita el algoritmo será descartado y no pasará sus características a futuras generaciones[16].

Los individuos que pasarán sus características a la siguiente generación son aquellos que, al evaluarse con la función de aptitud, obtuvieron los mejores resultados. Este proceso de selección es similar a la selección natural, ya que cada individuo posee características únicas y puede ser evaluado. Por lo tanto, los individuos que mejor se adaptan serán seleccionados para la reproducción, esto ayuda a que el AG tenga una buena convergencia [18].

#### d) Cruce

El proceso de cruce o cruzamiento es el operador que se encarga de combinar el material genético de dos cromosomas progenitores para poder generar nuevos individuos, de forma analógica a la reproducción sexual, el cual tiene como objetivo heredar y recombinar las mejores características de cada uno de ellos [16], [18]. En la Figura 2 se ilustra el proceso de cruce entre los cromosomas. Una vez que se ha definido cómo se van a representar los cromosomas, normalmente mediante cadenas de 0 y 1, el algoritmo elige al azar uno o varios puntos dentro de los genes de los padres y, a partir de estos puntos, se puede intercambiar partes de sus cadenas, de tal forma que se generan nuevos cromosomas que corresponden a la descendencia [17], [19].

Este proceso se realiza con una probabilidad de cruce definida por el usuario y puede llevarse a cabo con diferentes tipos de cruce, como de un punto, de varios puntos o uniforme. La selección del esquema depende de cómo estén codificados los cromosomas y del problema que se quiere resolver, ya que un buen



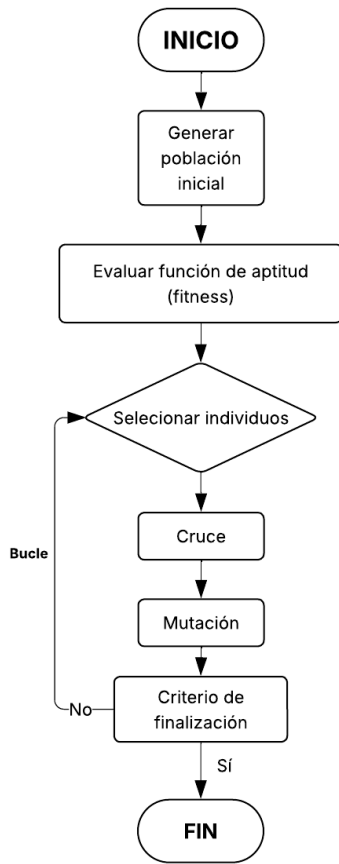


Figura 4. Diagrama de flujo del funcionamiento del AG [autor].

### 3.2 Desarrollo de la función objetivo a minimizar

Plantear una FO resulta útil para estudiar el comportamiento de un sistema bajo la acción del D-STATCOM. De tal manera, que en ecuación (3) se muestra la FO que se utiliza con el propósito de reducir pérdidas de potencia activa y mejorar el perfil de voltaje respecto al valor nominal de 1.0 [p.u] ante distintos escenarios de demanda, la cual permite medir la calidad de cada solución generada durante el proceso de optimización. Esta función busca la minimización de ambos efectos, de modo que el AG pueda identificar la configuración del D-STATCOM que ofrezca el mejor desempeño global del sistema.

$$FO: \min F = w_1 * \sum_{h=1}^H P_{loss,h}(x) + w_2 * \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{N_b} |V_{j,h}(x) - V_{ref}| \quad (3)$$

Donde:

**FO** Función Objetivo

**x** Es el vector de variables de decisión del D-STATCOM (tamaño)

**$P_{loss,h}(x)$**  Son las pérdidas de potencia activa en el escenario h

**$V_{j,h}(x)$**  Representa el voltaje en la barra j durante el escenario h

**$V_{ref}$**  Es el voltaje de referencia, definida como 1.0 [p.u.]

**$w_1$**  Es el peso asociado a las pérdidas de potencia activa.

**$w_2$**  Es el peso asociado a la desviación de voltaje.

**h** Índice de escenario de demanda

**H** Número de escenarios evaluados

**j** Es el índice de barra del sistema

**$N_b$**  Número total de las barras del sistema

### 3.3 Restricciones de la función objetivo

En este caso se toman en cuenta dos restricciones que son fundamentales en este estudio, una se encarga de mantener el voltaje de las barras dentro del rango permitido, y la otra limita la potencia reactiva que el D-STATCOM puede inyectar o absorber, las cuales son muy importantes para asegurar que el modelo funcione de manera correcta y que las soluciones obtenidas sean coherentes con el comportamiento del sistema.

Seguidamente, se describen cada una de ellas.

### 3.3.1 *Límite de voltaje permitido para las barras de un sistema*

Se requiere establecer una restricción para tener la capacidad de regular la magnitud de voltaje en las distintas barras del sistema y garantizar que el sistema opere dentro de los márgenes de voltaje determinados después de ubicar el D-STATCOM. Los límites establecidos se muestran en [p.u.], tal como se presenta en la ecuación (4). Así, la restricción ayuda a que el sistema funcione de manera adecuada, lo que significa que los perfiles de voltaje no se desvían de los valores apropiados.

$$V_{min} \leq V_{j,h} \leq V_{m\acute{a}x} \quad (4)$$

Donde:

- $V_{min}$  Es el voltaje mínimo que acepta el sistema en este caso es de 0.95 [p.u.]
- $V_{m\acute{a}x}$  Es el voltaje máximo permitido es 1.05 [p.u.]
- $V_{j,h}$  Indica el voltaje que tiene la barra j durante el escenario de demanda h. Este valor cambia según la carga de sistema y la acción del D-STATCOM.

### 3.3.2 *Límites asociados a la potencia reactiva del D-STATCOM*

Otra restricción importante por considerar es el límite de potencia reactiva que el D-STATCOM puede inyectar o absorber según la situación de demanda, con la finalidad de garantizar que opere dentro de su capacidad permitida. Por eso se propone una restricción que impide que el dispositivo supere su valor nominal y trabaje en condiciones que podrían afectar su rendimiento. En la ecuación (5) se

muestra el intervalo definido, en el cual se calcula el límite de potencia reactiva máxima que el equipo es capaz de inyectar o absorber, ya sea de manera inductiva o capacitiva. El valor máximo se obtiene considerando como referencia la demanda reactiva total del sistema bajo el escenario de máxima carga, con el fin de garantizar un dimensionamiento adecuado del D-STATCOM.

$$-Q_{m\acute{a}x} \leq Q_{D-STATCOM,h} \leq Q_{m\acute{a}x} \quad (5)$$

Donde:

- $Q_{m\acute{a}x}$  Es la potencia reactiva máxima que el D-STATCOM puede entregar sin salirse de su capacidad.
- $-Q_{m\acute{a}x}$  Representa el límite mínimo, es decir, la máxima potencia que puede absorber.
- $Q_{D-STATCOM,h}$  Es la potencia reactiva que está entregando o absorbiendo el D-STATCOM en el escenario de demanda h.

### 3.4 *Desviación de voltaje respecto al valor nominal*

La desviación de voltaje es la diferencia que existe entre el voltaje de cada uno de los nodos del sistema eléctrico respecto al voltaje nominal o referencia. Este parámetro permite estudiar el comportamiento general del perfil de voltaje y ver cómo se afectan las estrategias de control y las compensaciones reactivas en el sistema de control [30], [31].

La desviación promedio de voltaje (DPV) como se indica en la ecuación (6) se utiliza para cuantificar la desviación de voltaje, que es el promedio de las

desviaciones de las barras en comparación con el valor de referencia del sistema [10], [30], [31].

$$DPV = \frac{1}{N_b} \sum_{j=1}^{N_b} |V_{j,h}(x) - V_{ref}| \quad (6)$$

Donde:

- DPV** Desviación promedio de voltaje
- N<sub>b</sub>** Representa el número total de barras
- V<sub>j,h(x)</sub>** Representa el voltaje en la barra j durante el escenario h
- V<sub>ref</sub>** Es el voltaje de referencia, definida como 1.0 [p.u.]
- j** Es el índice de barra del sistema

### 3.5 Definición de los escenarios de operación a partir de la demanda base

En este estudio resulta fundamental entender cómo se generan los tres escenarios de demanda, que son mínima, media y máxima, con el propósito de analizar la variación de la demanda a lo largo del día. Para obtener cada uno de estos escenarios, se multiplicó el factor de escalamiento porcentual por todas las cargas del sistema base. En este trabajo se consideraron factores como  $\alpha = 0.4$ ,  $\alpha = 0.7$ ,  $\alpha = 1.0$ , los cuales representan el 40%, 70% y 100% de la demanda base, respectivamente. Estos valores de escalamiento porcentuales a menudo son utilizados con en sistemas de distribución que requieran simular condiciones típicas de operación.

La demanda mínima está relacionada con los periodos de bajo consumo, tales como las horas de la noche, en los cuales solo predominan las cargas necesarias, mientras que la demanda media representa las situaciones normales de funcionamiento durante gran parte del día y la demanda máxima es la que describe la operación del

sistema bajo condiciones de máxima exigencia. Por lo tanto, estos factores de escalamiento se aplican de manera proporcional tanto a la potencia activa como a la potencia reactiva de las cargas del sistema, conservando el factor de potencia original.

De este modo, se puede crear perfiles horarios de 24 horas, en los cuales cada intervalo del día se asocia a un perfil de demanda específico (mínimo, medio o máximo). Esta distribución del perfil de demanda se muestra en la Tabla 4, que se puede observar a continuación. Se desglosa según la hora del día.

Tabla 4 Distribución de los perfiles de demanda a lo largo del día

Intervalo horario	Periodo del día	Perfil de demanda	Factor de escalamiento ( $\alpha$ )
00:00 – 05:00	Madrugada / noche	Mínima	0,4
06:00 – 09:00	Mañana (rampa)	Media	0,7
10:00 – 15:00	Mediodía	Media	0,7
16:00 – 20:00	Tarde / hora pico	Máxima	1,0
21:00 – 23:00	Noche	Media	0,7

### 3.6 Pseudocódigo del Algoritmo Genético aplicado al dimensionamiento del D-STATCOM

A fin de obtener una mejor comprensión del funcionamiento del AG aplicado a la optimización del D-STATCOM en su dimensionamiento óptimo, se presenta el pseudocódigo, el cual resume de manera ordenada las principales etapas del algoritmo que se siguen a medida que avanza el proceso de optimización.

---

**Pseudocódigo del AG aplicado al  
dimensionamiento del D-STATCOM**

---

**Inicio**

- Paso 1:** Se define el modelo de red en donde se aplicará el AG con la ubicación del D-STATCOM ya definida en la barra 30 según la revisión bibliográfica.
- Paso 2:** Se detallan los datos y los parámetros de simulación, así como los distintos escenarios de demanda (mínima, media, máxima).
- Factores de escalamiento de la demanda:  $\alpha = \{0.4, 0.7, 1.0\}$
  - Definir límites de voltaje:  $V_{\min}$ ,  $V_{\max}$  y  $V_{ref}$
  - Definir límites de potencia reactiva:  $-Q_{\max}$ ,  $Q_{\max}$
  - Definir los pesos  $w_1$  y  $w_2$
- Paso 3:** Ejecución del flujo de carga del sistema caso base y escalamiento de cargas.
- Paso 4:** Definición de las variables a controlar en cada escenario de demanda (mínima, media y máxima).
- Paso 5:** Planteamiento de la función objetivo a minimizar y restricciones.  
Función objetivo:
- $$FO: \min F = w_1 * \sum_{h=1}^H P_{loss,h}(x) + w_2 * \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^{N_b} |(V_{j,h}(x) - V_{ref})|$$
- Restricciones:
- Límites de voltaje en las barras:
$$V_{min} \leq V_{j,h} \leq V_{max}$$
  - Límites de potencia reactiva del D-STATCOM
$$-Q_{max} \leq Q_{D-STATCOM,h} \leq Q_{max}$$
- Paso 6:** Se ejecuta el AG para cada escenario de demanda.
- Generación de población inicial aleatoria.
  - Evolución de cada individuo mediante el flujo de carga.
  - Aplicación de operadores de (selección, cruce, mutación) hasta cumplir con el criterio de parada.
- Paso 7:** Aplicación de la potencia reactiva óptima del D-STATCOM para cada escenario de demanda y cálculo de los resultados finales.

- Paso 8:** Comparación de resultados entre los escenarios de demanda.

Variables reportadas:

- Generación de población inicial aleatoria.
- Potencia reactiva óptima.
- Pérdidas activas del caso base.
- Pérdidas activas optimizadas.

- Paso 9:** Análisis de resultados, enfocado en la mejor solución del perfil de voltaje y la reducción de pérdidas del sistema en cada escenario

- Paso 10:** Conclusión del dimensionamiento para demanda mínima, media y máxima.

**Fin**

---

### 3.7 Cálculo de los resultados a partir del AG

#### 3.7.1 Cálculo de reducción de pérdidas de potencia

Las pérdidas de potencia se calcularon a partir de las pérdidas obtenidas en el caso base y el caso optimizado con el AG para cada uno de los tres escenarios. La siguiente ecuación muestra cómo se calculó la reducción de pérdidas.

$$\Delta P_{loss} = P_{loss,BASE} - P_{loss,AG} \quad (7)$$

Donde:

$\Delta P_{loss}$  Reducción de pérdidas de potencia activa

$P_{loss,BASE}$  Pérdidas del sistema en condición base para los tres escenarios

$P_{loss, AG}$  Pérdidas del sistema en condición optimizada para los tres escenarios

#### 3.7.2 Voltaje promedio del SD

Con la finalidad de evaluar el comportamiento del perfil de voltaje del sistema, se emplea el voltaje promedio como un indicador de la calidad de suministro eléctrico.

Este parámetro permite analizar cómo es el comportamiento del perfil de voltaje de todo el sistema a lo largo del día, facilitando

la evaluación comparativa del caso base frente al caso optimizado con el D-STATCOM. A continuación, el voltaje promedio del sistema se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N V_i \quad (8)$$

Donde:

- $V_{prom}$  Voltaje promedio del sistema
- $N$  Número total de barras
- $V_i$  Voltaje de la barra  $i$
- $i$  Índice de conteo

## 4 Caso de estudio

En este espacio se dan a conocer las características del sistema de prueba IEEE de 33 barras, el cual servirá como base para el estudio de este artículo. Además, se presenta la ubicación del D-STATCOM previamente seleccionada de acuerdo con la revisión de diferentes trabajos en la literatura, identificando los criterios que se consideraron para su ubicación.

### 4.1 Características del SD IEE de 33 barras

El SD radial IEEE de 33 barras y 32 líneas, tal y como se observa en la Figura 5, corresponde a una red clásica ampliamente empleada con frecuencia en el estudio de redes de distribución y que debe modelarse para validar los métodos sugeridos en esta investigación. El sistema presenta una carga total instalada de 3.715 [MW] + j 2.3 [Mvar], y su magnitud de voltaje y potencia base corresponden a 12.66 [kV] y 10 [MVA] respectivamente [13].

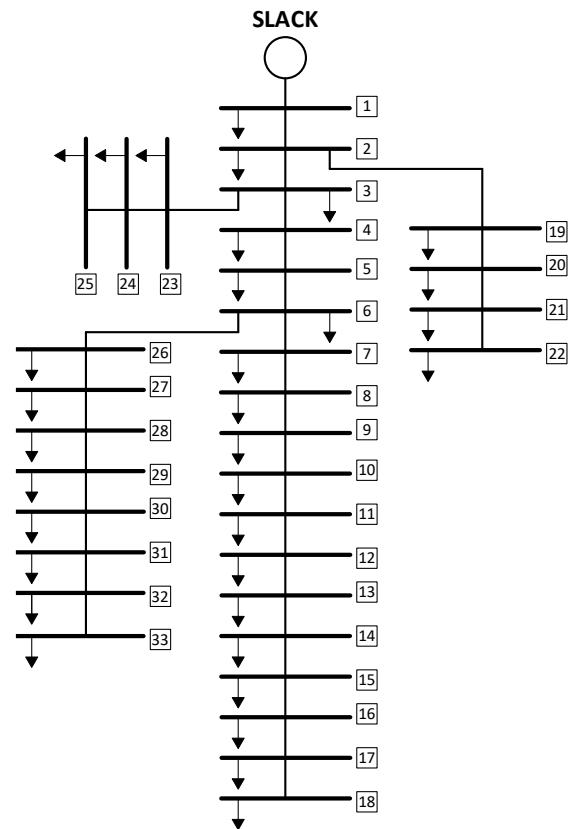


Figura 5. Diagrama del sistema IEEE-33 barras [autor].

La Tabla 5 indica cada uno de los parámetros del sistema, como las resistencias y reactancias de cada línea, así también las cargas máximas de potencia activa junto con la reactiva aplicadas con el fin de desarrollar dicho cálculo del flujo de potencia.

Tabla 5 Parámetros de las líneas y cargas utilizados para el modelado del SD IEEE-33 barras.

Barra $i$	Barra $j$	$R_{ij}$ ( $\Omega$ )	$X_{ij}$ ( $\Omega$ )	$P_j$ (kW)	$Q_j$ (kvar)
1	2	0,0922	0,0477	100	60
2	3	0,493	0,2511	90	40
3	4	0,366	0,1864	120	80
4	5	0,381	0,1941	60	30
5	6	0,819	0,707	60	20
6	7	0,1872	0,6188	200	100
7	8	1,7114	1,2351	200	100
8	9	1,03	0,74	60	20
9	10	1,04	0,74	60	20

Barra i	Barra j	R <sub>ij</sub> (Ω)	X <sub>ij</sub> (Ω)	P <sub>j</sub> (kW)	Q <sub>j</sub> (kvar)
10	11	0,1966	0,065	45	30
11	12	0,3744	0,1238	60	35
12	13	1,468	1,155	60	35
13	14	0,5416	0,7129	120	80
14	15	0,591	0,526	60	10
15	16	0,7463	0,545	60	20
16	17	1,289	1,721	60	20
17	18	0,732	0,574	90	40
2	19	0,164	0,1565	90	40
19	20	1,5042	1,3554	90	40
20	21	0,4095	0,4784	90	40
21	22	0,7089	0,9373	90	40
3	23	0,4512	0,3083	90	50
23	24	0,898	0,7091	420	200
24	25	0,896	0,7011	420	200
6	26	0,203	0,1034	60	25
26	27	0,2842	0,1447	60	25
27	28	1,059	0,9337	60	20
28	29	0,8042	0,7006	120	70
29	30	0,5075	0,2585	200	600
30	31	0,9744	0,963	150	70
31	32	0,3105	0,3619	210	100
32	33	0,341	0,5302	60	40

## 4.2 Ubicación óptima del D-STATCOM

La ubicación del D-STATCOM no se eligió de forma aleatoria, si no que fue establecida a partir de un análisis de varias investigaciones sobre el sistema de prueba IEEE de 33 barras. Con el propósito de mejorar la eficiencia y el desempeño de la red, los autores de estos trabajos emplean diversas estrategias de optimización.

La siguiente Tabla 6 proporciona un resumen de varias investigaciones llevadas a cabo en el sistema IEEE de 33 barras, las cuales utilizan diferentes técnicas de optimización, sobre todo del tipo metaheurístico; además, se identifican métodos matemáticos e híbridos. El objetivo de aplicar estos métodos es lograr incrementar el perfil de voltaje, disminuir las pérdidas de potencia y optimizar el rendimiento del D-STATCOM en el sistema. También en estas investigaciones se tienen en cuenta varias restricciones técnicas para garantizar que la red funcione correctamente. Asimismo, se muestran observaciones. De esta manera, se pueden comparar los resultados fácilmente que obtuvo cada autor en su investigación.

Tabla 6 Revisión de diferentes artículos para seleccionar la ubicación del D-STATCOM

Cita	Método de Ubicación	Objetivos	Restricciones	Observaciones
[21]	Optimización adaptativa basada en vectores de pasos de libélula (ASDA)	Reducir pérdidas de potencia. Analizar el rendimiento del sistema (convergencia, costos, número de iteraciones).	Satisfacción de la demanda. Índice de estabilidad de voltaje. Costo de pérdida de energía (CEL). Costo del D-STATCOM. Margen de estabilidad de voltaje (VSM).	Se ha evaluado cuatro experimentos variando el número de D-STATCOM instalados (1, 2, 3 y 4 unidades) para el SD del IEEE 33 barras.
[13]	Modelo genético-convexo (CBGA-SOCP)	Minimizar costos operativos anuales (pérdidas de energía, inversiones en instalación de los D-STATCOM).	Balance de potencia activa y reactiva. Capacidad máxima de los D-STATCOMs. Límites de voltaje. Número máximo de dispositivos permitidos.	Se ha considerado las curvas de cargas diarias para la compensación dinámica de potencia reactiva para ubicar y dimensionar los D-STATCOMs en el SD de prueba IEEE 33 barras.

Cita	Método de Ubicación	Objetivos	Restricciones	Observaciones
[22]	Algoritmo de optimización seno-coseno (SCA)	Reducir los costos operativos anuales totales (Pérdidas de energía, inversión en los D-STATCOM).	Balance de potencia activa y reactiva. Número máximo de compensadores permitidos. Límites de voltaje. Capacidad máxima del D-STATCOM	La ubicación y dimensionamiento óptimo del D-STATCOM fue evaluado en dos sistemas de prueba IEEE de 33 y 69 barras.
[11]	Algoritmo de optimización de Conejos Artificiales (ARO)	Reducir las pérdidas de potencia. Mejora del perfil de voltaje. Minimizar costos de instalación de Generadores Distribuidos (DG).	Rango de voltaje permitido. Limitaciones de la capacidad del D-STATCOM. Limitaciones de la capacidad de la línea. Limitaciones de la capacidad de los DG.	Se desarrollo tres escenarios de simulación SD IEEE 33 barras para determinar la ubicación y dimensionamiento óptimo de DG Y D-SATACOM (solo DG, solo D-STATCOM, DG + D-STATCOM)
[23]	Algoritmo de optimización por enjambre de partículas (PSOA) + método de flujo de Potencia de Barrido Progresivo-Inverso (BFS)	Determinar la potencia y ubicación óptima de los D-STATCOM. Mejorar el perfil de voltaje. Reducción de pérdidas de potencia en los alimentadores. Estabilizar los SD.	Límites de voltaje. Equilibrio de potencia activa y reactiva. Capacidad máxima del D-STATCOM. Flujo de potencia de corriente alterna.	La optimización del D-STATCOM fue evaluada en dos sistemas de distribución radial IEEE 33 barras y en una RDS real de Jalingo con alimentadores ACT II de 20 barras.
[24]	Discreta-Continua del Algoritmo genético de Chu-Beasley (DC-CBGA)	Minimizar los costos operativos anuales (pérdidas de energía, inversión en la instalación de los D-STATCOM).	Límites de voltaje. Balance de potencia activa y reactiva. Capacidad máxima del D-STATCOM. Número máximo de compensadores	Se ha resuelto la ubicación y dimensionamiento óptimo de los D-STATCOM en topologías radial y mallada evaluado en sistema de prueba IEEE 33 barras teniendo en cuenta variaciones de carga y discriminación por zonas (residencial, comercial e industrial).
[35]	Programación No Lineal Entera Mixta (MINLP) implementado en GAMS	Minimizar las pérdidas de potencia activa. Mejorar el perfil de voltaje. Optimización del D-STATCOM considerando armónicos.	Balances de potencia activa y potencia reactiva. Límites de voltaje. Cantidad máxima de dispositivos D-STATCOM. Red balanceada. THD según IEEE-519.	El modelo matemático ofrece un aporte solido en la ubicación y dimensionamiento del D-STATCOM en los dos SD IEEE de 33 y 69 barras con resultado exactos, pero con alta carga computacional.
[25]	Lógica difusa + Optimización por enjambre de partículas (Híbrido Fuzzy-PSO)	Mejorar el perfil de voltaje. Minimizar pérdidas de potencia activa. Dimensionamiento óptimo del D-STATCOM considerando.	Límites de voltaje. Límites de velocidad. Posición de partículas.	La metodología propuesta se evaluó en dos SD IEEE de 33 y 69 barras considerando escenarios que incluyen condiciones normales de operación y variación de 125%, 150%, 175% de la carga nominal.

Cita	Método de Ubicación	Objetivos	Restricciones	Observaciones
[26]	Optimización de luciérnagas mejorado difuso (FEFO)	Mejorar la estabilidad de voltaje. Disminuir las pérdidas de potencia activa y reactiva. Maximizar las ganancias económicas. Reducir emisiones contaminantes.	Límites de voltaje. Balance de potencia activa y reactiva. Límites de generación de potencia activa y reactiva del sistema como de generación distributiva (DG).	La optimización y ubicación de la DG y D-STATCOM se evaluó en el SD IEEE 33 barras bajo tres condiciones: sin ningún dispositivo, con D-STATCOM y con integración de generación distributiva eólica.
[36]	Modelo de programación Lineal Entera Mixta (MILP)	Minimizar el costo de pérdidas de energía y de inversión en dispositivos D-STATCOM.	Límites de voltaje. Límites de corriente por rama. Potencia máxima por D-STATCOM. Máximo de 3 unidades instalables. Potencia aparente máxima por línea.	El modelo MILP para la ubicación, dimensionamiento y operación óptimo de los D-STATCOM en SD radiales considerando tres sistemas del IEEE de 33, 69 y el SD de la red de presidente Prudente, Brasil 136 barras para demostrar la eficiencia del modelo propuesto.

#### 4.2.1 Ubicación seleccionada para el D-STATCOM

La Tabla 7 presenta los resultados más relevantes conseguidos en cada trabajo realizado por los autores al implementar varios algoritmos de optimización en el sistema IEEE de 33 barras, donde se indica el dimensionamiento y la ubicación del D-STATCOM. En estas investigaciones, se comparan las pérdidas asociadas a la potencia activa y también el voltaje más bajo antes y después de la compensación. Por ejemplo, al colocar el D-STATCOM en la barra 30 se logra reducir notablemente las pérdidas mediante diversos métodos como FL-PSO, FEFO, DC-CBGA y MILP. En particular, en el caso del algoritmo FEFO, el voltaje mínimo mejora de 0.90 [p.u.] a 0.94 [p.u.] aproximadamente, mientras que las pérdidas activas disminuyen alrededor de 210 kW a unos 150 kW.

Tabla 7 Comparación de la ubicación, dimensionamiento y resultados del D-STATCOM según la revisión bibliográfica

Algoritmo	Ubicación y dimensionamiento (barra, kvar)	Potencia activa pérdida (kW) Antes/Después	Voltaje Mínimo Antes/Después (p.u)
ASDA	33(20)	-	-
CBGA-SOCP	14(289,6), 30(559,3), 32(117,7)	111,84 - 93,72	0,913 - 0,967
SCA	15(155,7) /30(336,4) /32(128,2)	-	-
ARO	33(300) /3(0) /18(423)	2778,507 - 1833,041	-
PSOA-BFS	10(300)	221,6772 - 190,4572	0,9417 - 0,9948
DC-CBGA	14(232,7) /25(105,6) /30(540,3)	210,99 - 195,99	0,9137 - 0,9326
MINLP	18(494) /25(455) /30(676)	125 - 109	0,944 - 0,960
FL-PSO	30(1253,2)	202,766 - 143,6445	-
FEFO	30(1300,1)	210,07 - 149,67	0,9042 - 0,9462
MILP	14(157,91) /30(411,97) /32(142,22)	88,93 - 69,01	-

La selección de la barra 30 se ha considerado como la ubicación óptima para instalar el D-STATCOM, basada en los resultados presentados en la revisión bibliográfica, donde varios autores coinciden en que el compensador se coloca en este nodo, ya que tanto el perfil de voltaje como la disminución de las pérdidas de potencia activa han mejorado claramente, tal y como se indica en la barra. En la Figura 6 se puede ver la barra con el mayor perfil de coincidencia de los autores para ubicar el D-STATCOM. La barra 30 se considera un punto clave en el sistema IEEE de 33 barras, pues está ubicada en una zona de la red con alta sensibilidad eléctrica, donde el D-STATCOM tiene un efecto más eficaz, el cual consigue disminuir de manera significativa las pérdidas y aumentar el voltaje mínimo del sistema.

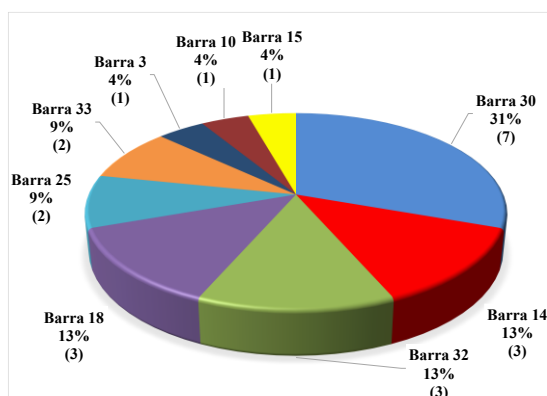


Figura 6. Barras con mayor coincidencia para ubicar el D-STATCOM [autor].

Por otra parte, en este trabajo se ha decidido emplear únicamente un dispositivo D-STATCOM, ya que la adquisición, la implementación y el cuidado técnico de estos equipos son muy costosos, lo cual representa una limitación real en aplicaciones prácticas. A pesar de que hay estudios, como en el método [11], en los que se utilizan múltiples dispositivos simultáneamente, se observa que uno de los compensadores está situado en la barra 3 con una potencia reactiva de 0 [kvar], lo que significa que el dispositivo no contribuye a la compensación del sistema, por esa razón

se tiene la idea de que con un único D-STATCOM, es posible conseguir mejoras significativas y evitar inversiones innecesarias. Por tal motivo se propone que en este estudio se da preferencia a una solución más realista desde una perspectiva tanto financiera como operativa, que emplea un único dispositivo ubicado en la barra 30.

## 5 Análisis de resultados

Los resultados obtenidos mediante las simulaciones hechas en el software PowerFactory, versión 2021, para el sistema IEEE de 33 barras, se presentan en esta sección. Se comparan los resultados del caso base con aquellos que se obtienen al incorporar el D-STATCOM, el cual fue optimizado utilizando el algoritmo genético. Además, se realiza el análisis para tres escenarios de demanda (mínima, media y máxima), lo que posibilita observar la disminución de las pérdidas de potencia activa y el mejoramiento del perfil de voltaje.

### 5.1 Resultados del sistema para los tres escenarios de demanda a partir de la demanda base

A continuación, se dan a conocer los resultados conseguidos en los tres escenarios de demanda (mínima, media, máxima) para el SD de 33 barras en condiciones operativas sin la presencia del D-STATCOM, con el objetivo de estudiar cómo reacciona naturalmente el perfil de voltaje frente a distintos escenarios de demanda.

El análisis de los flujos de potencia en la red sin compensación para los tres escenarios de demanda considerados en este estudio se presenta a detalle en los anexos.

Después de analizar los resultados obtenidos del flujo de potencia de la red, se determina que la barra 18 presenta el menor perfil de voltaje ( $V_{min}$ ) en los tres escenarios de demanda, por lo que se

considera como la barra más crítica dentro del sistema.

- **ESCENARIO DE DEMANDA MÍNIMA**

En la Figura 7 se puede observar el perfil de voltaje por barra bajo el factor de escalamiento  $\alpha=0.4$ , donde se aprecia que en la mayor parte del sistema los voltajes se mantienen cercanos a 1.0 [p.u] ya que se trata de una situación con poca demanda y la corriente que circula por las líneas es menor.

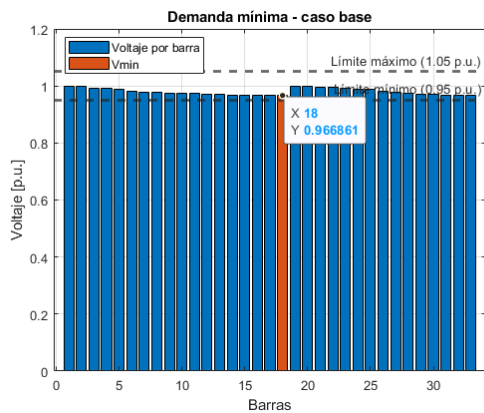


Figura 7. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda mínima.

En la Tabla 8 se muestran los resultados globales de las pérdidas totales del sistema en potencia activa y reactiva, así como la desviación promedio de voltaje (DPV), la cual indica cómo se comporta en general el perfil de voltaje. Además, se indica el voltaje mínimo que tiene la barra 18 en este escenario.

Tabla 8 Indicadores de pérdidas de potencia, DPV y Vmin en demanda mínima

Demanda mínima (0,4)					
Indicadores del sistema			Indicadores de la barra		
P [kW]	Q [kvar]	DPV [p.u]	Barra crítica	Vmin [p.u]	
29.716	19.788	0.0227	18	0.966861	

- **ESCENARIO DE DEMANDA MEDIA**

En la Figura 8 se observa el perfil de voltaje de cada una de las barras, bajo el factor de escalamiento  $\alpha=0.7$  para demanda media. En donde se visualiza una mayor caída de voltaje a lo largo de la red debido a que la demanda aumenta, este efecto es más evidente en las barras que están más alejadas de la subestación.

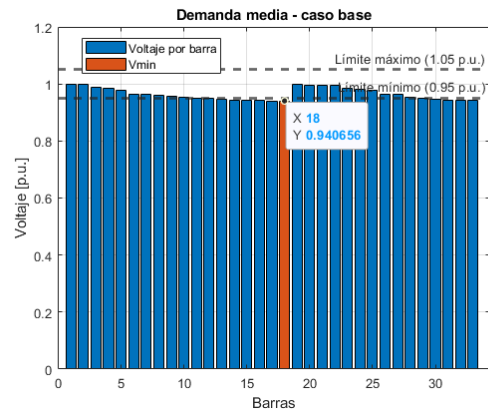


Figura 8. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda media.

Los resultados correspondientes al escenario de demanda media en donde se presentan las pérdidas totales del sistema en potencia activa y reactiva, así como la desviación promedio de voltaje, se detallan en Tabla 9, la cual también indica el voltaje mínimo que alcanza la barra 18.

Tabla 9 Pérdidas de potencia, Vmin y DPV en demanda media

Demanda media (0,7)					
Indicadores del sistema			Indicadores de la barra		
P [kW]	Q [kvar]	DPV [p.u]	Barra crítica	Vmin [p.u]	
94.911	63.241	0.0407	18	0.940656	

- **ESCENARIO DE DEMANDA MÁXIMA**

En la Figura 9 se observa el voltaje de cada una de las barras del sistema bajo el escenario de demanda máxima con un factor de escalamiento  $\alpha=1$ . Se puede apreciar que el voltaje tiende a tener una mayor caída a lo largo del sistema, debido a que las cargas se encuentran operando en

condiciones de máximo consumo. El voltaje más bajo del sistema sigue siendo la barra 18 y se encuentra muy cercano al límite inferior.

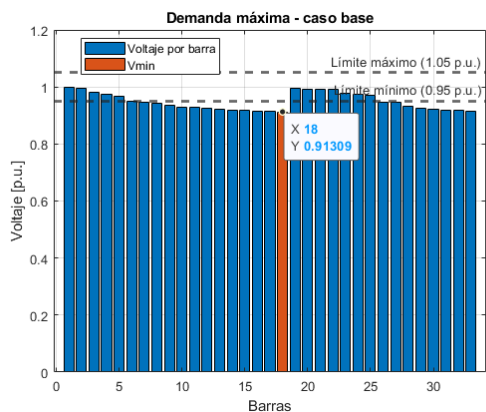


Figura 9. Perfil de voltaje del SD IEEE-33 barras operando en demanda máxima.

En la Tabla 10 se dan a conocer los resultados obtenidos para el escenario de demanda máxima, donde se muestran las pérdidas totales del sistema tanto en potencia activa y reactiva, las cuales presentan un mayor incremento en comparación con los anteriores escenarios. Asimismo, se da a conocer la desviación promedio de voltaje. De manera adicional, también se indica el voltaje mínimo en la barra 18.

Tabla 10 Pérdidas de potencia, Vmin y DPV en demanda máxima

Demanda máxima (1.0)				
Indicadores del sistema			Indicadores de la barra	
P [kW]	Q [kvar]	DPV [p.u]	Barra crítica	Vmin [p.u]
202.677	135.141	0.0595	18	0.913090

## 5.2 Resultados del sistema con dimensionamiento óptimo del D-STATCOM en los diferentes escenarios de demanda mediante el AG.

Una vez ubicado el D-STATCOM en la barra 30, de acuerdo con los criterios establecidos en la revisión bibliográfica, se implementa el algoritmo genético con el

objetivo de dimensionar de manera óptima el equipo para cada uno de los escenarios de demanda considerados (mínimo, medio, máximo). A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

La Figura 10 muestra el diagrama del SD IEEE de 33 barras, indicando la ubicación del D-STATCOM en la barra 30 previamente definida.

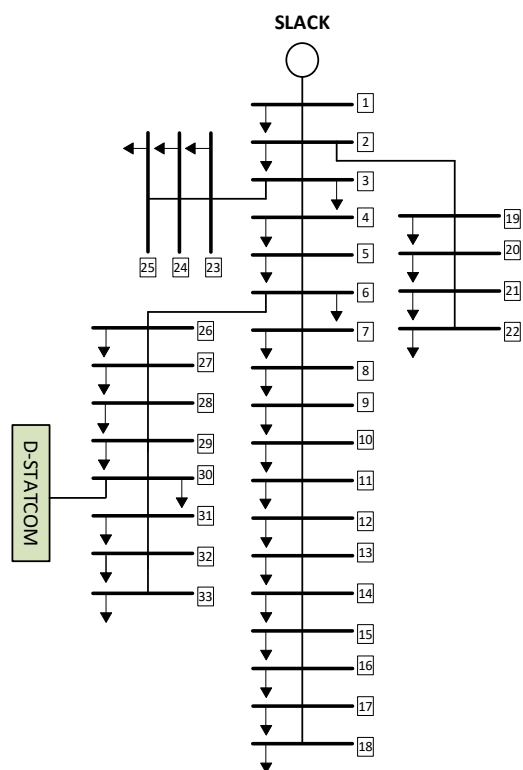


Figura 10. Ubicación del D-STATCOM en la barra 30 en el sistema IEEE-33 barras [autor].

En la sección de anexos se presentan a detalle los resultados del análisis de flujo de potencia, considerando la compensación de potencia reactiva que inyecta el D-STATCOM en el sistema para los tres escenarios de demanda.

- **ESCENARIO DE DEMANDA MÍNIMA**

Al aplicar el algoritmo genético en este escenario, se logró determinar la capacidad

óptima de potencia reactiva que debe inyectar el D-STATCOM al sistema, el valor se muestra en Tabla 11.

Tabla 11 Potencia reactiva inyectada en demanda mínima por el D-STATCOM

D-STATCOM	
Q [Mvar]	0.49

Se puede observar en la convergencia del algoritmo genético que el valor de la función objetivo mejora hasta llegar a un mejor fitness, que corresponde al valor óptimo del D-STATCOM mostrado en la Tabla 11. El algoritmo alcanza la convergencia alrededor de la generación 13 con un valor fitness cercano a 0.73124, posteriormente, el proceso sigue hasta la generación 60 como se muestra en la Figura 11.

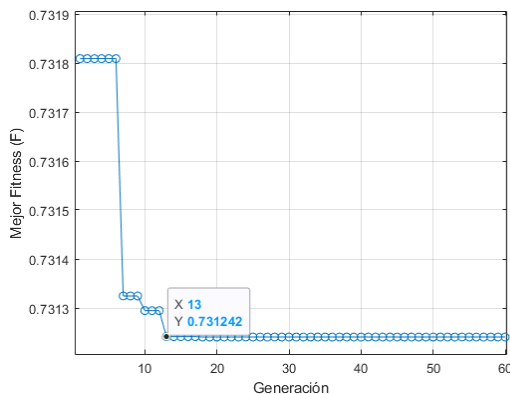


Figura 11. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda mínima.

En la siguiente Figura 12 se observan los voltajes de la red sin compensar y los voltajes de la red con compensación del D-STATCOM para el escenario de demanda mínima, donde se puede comparar de manera directa cómo mejora el voltaje en cada una de las barras.

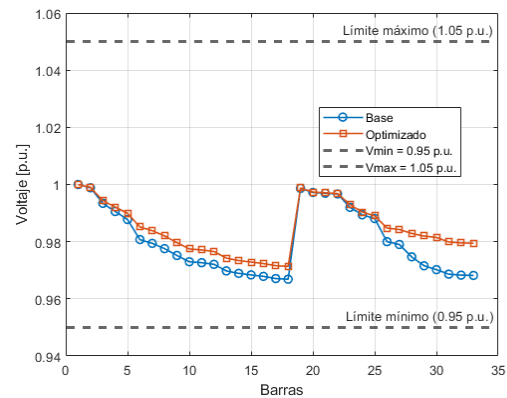


Figura 12. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda mínima.

Como se ilustra en la siguiente gráfica la desviación de voltaje en las barras se reduce de manera notable respecto al caso base de demanda mínima, reflejando una mejora en el perfil de voltaje.

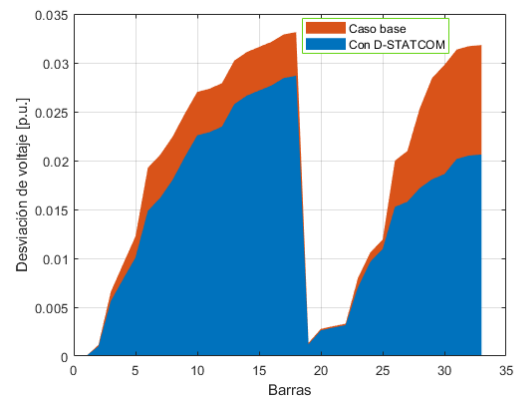


Figura 13. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda mínima.

La potencia reactiva que la red y el D-STATCOM inyectan en el SD se muestra en la Figura 14. Además, se indica la potencia reactiva consumida por las cargas.

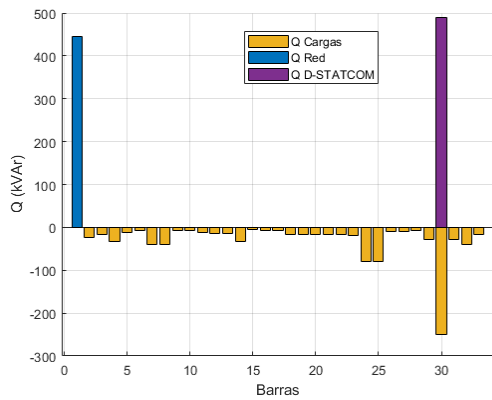


Figura 14. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda mínima.

En la Tabla 12 se comparan los resultados que se consiguieron en el escenario de demanda mínima para el caso base sin compensación y para el caso optimizado con compensación. Al incorporar el D-STATCOM en la barra 30 se nota que las pérdidas de potencia activa y potencia reactiva del sistema se reducen aproximadamente un 27.5% y 27.1% respectivamente y en cuanto a la desviación promedio de voltaje se reduce alrededor del 22%, lo cual presenta una notable mejoría en el sistema. Adicionalmente el voltaje mínimo en la barra 18 presenta un incremento del 0.5%.

Tabla 12 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda mínima.

Demanda mínima (0.4)		
Indicadores del sistema	Caso base	Caso optimizado
P [kW]	29.716	21.546
Q [kvar]	19.788	14.434
DPV [p.u]	0.0227	0.0178
Indicadores de la barra	Caso base	Caso optimizado
Barra crítica	18	18
Vmin [p.u]	0.96686	0.97132

## • ESCENARIO DE DEMANDA MEDIA

Se utilizó el algoritmo evolutivo para estimar la capacidad de potencia reactiva ideal que el D-STATCOM debe inyectar en el sistema, tal y como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 13 Potencia reactiva inyectada en demanda media por el D-STATCOM

D-STATCOM	
Q [Mvar]	1.1933

En la gráfica de convergencia del algoritmo genético, podemos observar que el valor de la función objetivo va mejorando al mismo tiempo que valor óptimo fitness, que es igual al tamaño del D-STATCOM mostrado anteriormente. Para la demanda media, el algoritmo alcanza la convergencia en la generación 9 con un valor fitness de aproximadamente 0.73661 como se puede observar en la Figura 15 donde el algoritmo se sigue ejecutando hasta la generación 60 sin obtener cambios significativos.

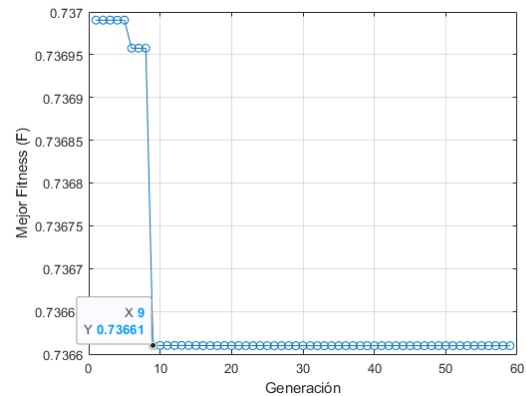


Figura 15. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda media.

En la Figura 16 es posible observar el perfil de voltaje del sistema antes y después de la incorporación del D-STATCOM para el escenario de demanda media, lo cual permite hacer una comparación entre los resultados, determinando que el voltaje mejora notablemente en todas las barras.

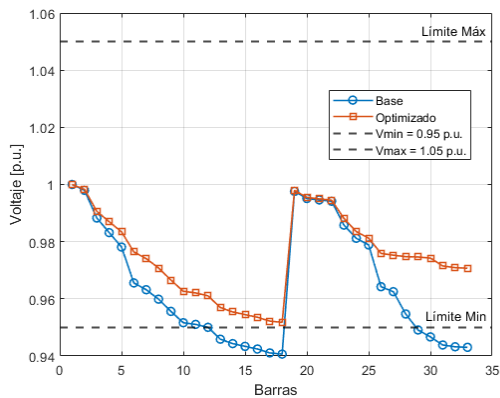


Figura 16. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda media.

De la misma manera, se observa que la desviación de voltaje en la mayoría de las barras disminuye de forma significativa en comparación con el caso base, lo cual evidencia una mejora del perfil de voltaje, como se muestra en la Figura 17.

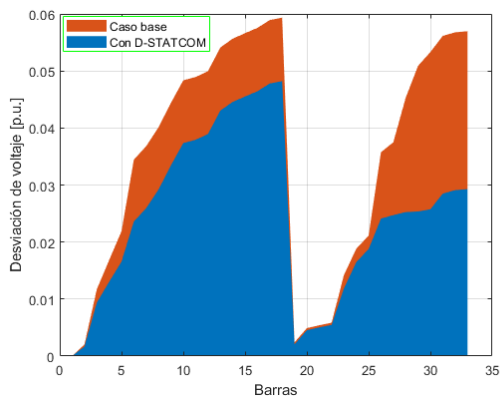


Figura 17. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda media.

En la Figura 18 se ilustra el comportamiento de la potencia reactiva en las diferentes barras del sistema, en donde se muestra claramente la potencia abastecida por la red y por el D-STATCOM, así como la potencia consumida por las cargas.

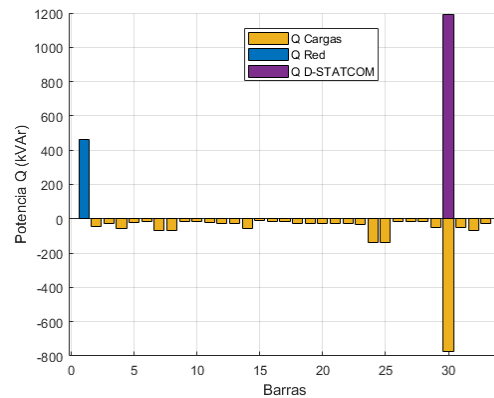


Figura 18. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda media.

Como resumen de los resultados obtenidos al comparar el caso compensado y sin compensar para el escenario de demanda media se presenta la siguiente Tabla 14, en la cual se puede observar que las pérdidas de potencia activa y reactiva se reduce alrededor de un 24.602% y 23.26% respectivamente y respecto a la desviación promedio de voltaje se reduce en un 29.38% lo que representa una mejora relevante en el sistema. Además, el voltaje en la barra 18 ha aumentado en un 1.17%.

Tabla 14 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda media.

Demanda media (0.7)		
Indicadores del sistema	Caso base	Caso optimizado
P [kW]	94.911	71.561
Q [kvar]	63.241	48.531
DPV [p.u]	0.0407	0.02874
Indicadores de la barra	Caso base	Caso optimizado
Barra critica	18	18
Vmin [p.u]	0.94065	0.95178

## • ESCENARIO DE DEMANDA MÁXIMA

El valor ideal de potencia reactiva que el D-STATCOM debe inyectar cuando el SD funciona a plena carga se muestra en la

Tabla adjunta. Para determinarlo se utilizó el algoritmo genético.

Tabla 15 Potencia reactiva inyectada en demanda máxima por el D-STATCOM

D-STATCOM	
Q [Mvar]	2.30

Como se puede apreciar en la Figura 19 el algoritmo genético converge cuando la función objetivo llega a la generación 15, con un valor de fitness cercano 0.748723 en donde permanece constante hasta llegar a la generación número 60 para finalizar así con el proceso.

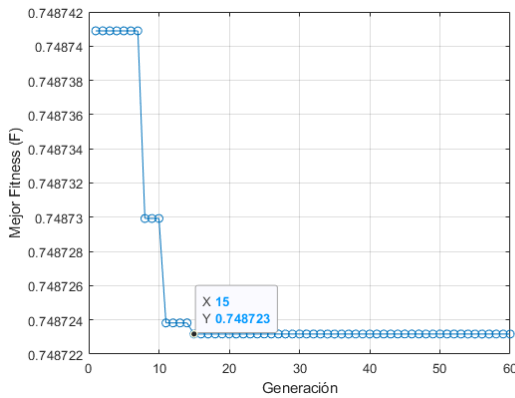


Figura 19. Convergencia de la función objetivo para el escenario de demanda máxima.

En comparación con el escenario sin compensación, la Figura 20 muestra que el voltaje en cada barra mejora considerablemente cuando se incorpora el D-STATCOM, determinando que el voltaje mejora notablemente en todas las barras.

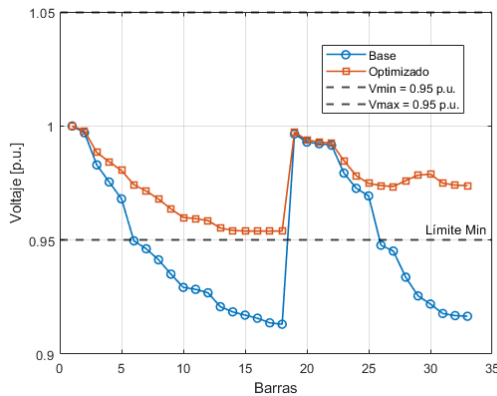


Figura 20. Comparación de voltaje en [p.u.] para el escenario de demanda máxima.

En la Figura 21 se presenta gráficamente como se reduce la desviación de voltaje respecto al caso base.

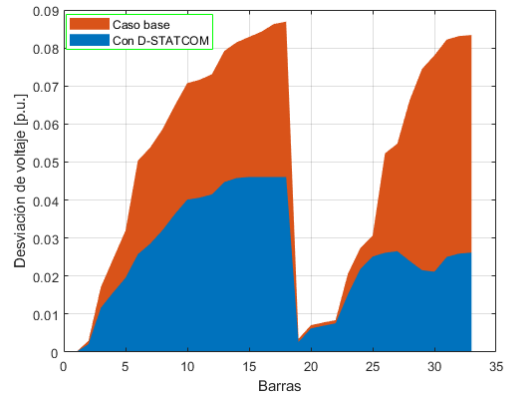


Figura 21. Desviación de voltaje en cada barra para el escenario de demanda máxima.

En la siguiente figura se muestra la potencia reactiva que aporta la red y el D-STATCOM al sistema, así como la potencia reactiva que es consumida por cada una de las cargas.

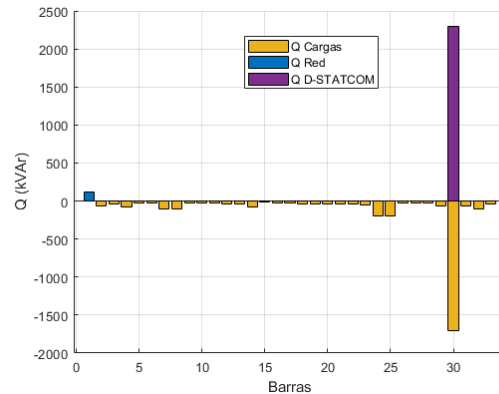


Figura 22. Potencia Q suministrada y consumida en el escenario de demanda máxima.

La Tabla 16 presenta los resultados que se consiguieron al analizar el escenario de demanda máxima con compensación y sin compensación de potencia reactiva en la cual se muestra que las pérdidas de potencia activa y reactiva disminuyeron alrededor del 23.44% y 21.38% respectivamente, así también se reduce la desviación promedio de voltaje en un 50.59% en todo el sistema. Además, el voltaje en la barra 18 ha aumentado en un 4.28%.

Tabla 16 Resumen comparativo de resultados para el escenario de demanda máxima.

Demanda máxima (1.0)		
Indicadores del sistema	Caso base	Caso optimizado
P [kW]	202,677	155.162
Q [kvar]	135.141	106.246
DPV [p.u]	0.0595	0.0294
Indicadores de la barra	Caso base	Caso optimizado
Barra critica	18	18
Vmin [p.u]	0.91309	0.95394

### 5.3 Resultados cuasidinámicos del sistema IEEE de 33 barras

En esta sección se presentan los resultados del comportamiento cuasidinámico del D-STATCOM, analizando su capacidad para inyectar o absorber potencia reactiva en la red en respuesta a las variaciones de la demanda, a lo largo de un periodo de 24 horas.

Para este análisis se evaluó el comportamiento del perfil de voltaje en la barra número 18 del SD, la cual fue seleccionada debido a que presenta el menor voltaje en los tres escenarios de demanda considerados.

Con el objetivo de dar a conocer cómo varía el voltaje a lo largo del día, se utilizaron los resultados obtenidos del sistema sin compensación y con compensación de potencia reactiva para cada uno de los escenarios de demanda mínima, media y máxima evaluados anteriormente. A partir de estos resultados, se puede construir de manera aproximada, la curva de voltaje diaria con ayuda de la interpolación.

El comportamiento del perfil de voltaje en la barra 18 durante el día se representa gráficamente en la Figura 23. Es evidente que, en comparación con el caso base, el perfil de voltaje mejora considerablemente cuando se implementa la compensación de

potencia reactiva mediante el D-STATCOM.

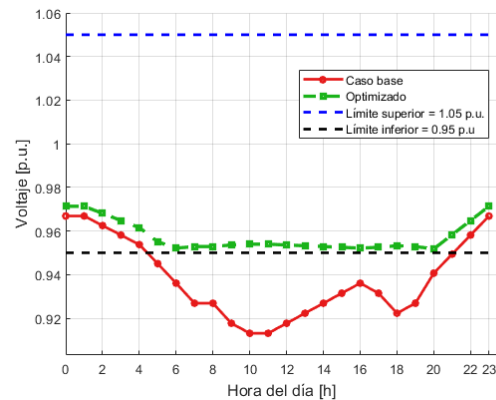


Figura 23. Curva aproximada del perfil de voltaje en la barra 18 durante 24 h.

La Figura 24 presenta el despacho horario de la potencia reactiva del D-STATCOM a lo largo del día, el cual se obtiene de manera aproximada a partir de los escenarios de demanda mediante el proceso de interpolación. En la gráfica se puede observar cómo varía la potencia reactiva inyectada por el D-STATCOM dependiendo de la demanda del sistema, alcanzando valores más altos cuando hay una carga elevada y reduciéndose durante las horas con menor demanda.

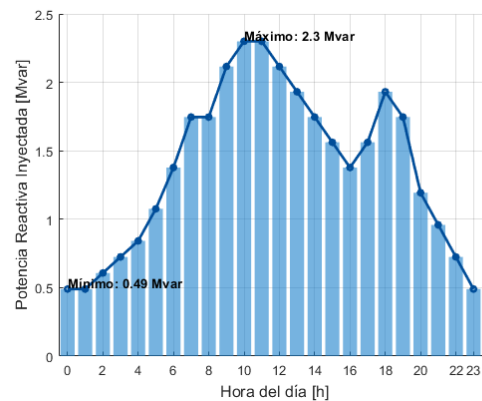


Figura 24. Despacho de potencia Q del D-STATCOM.

En la Tabla 17 se exponen los indicadores principales del despacho de potencia reactiva del D-STATCOM, donde se indica la energía total inyectada durante el día, así como los valores máximos y mínimos de potencia reactiva que entrega el dispositivo. El valor de energía total diaria es calculado en función de la potencia

reactiva inyectada en cada hora del día por el D-STATCOM, lo cual permite tener una noción general de cómo varía su operación de acuerdo con la demanda del sistema.

Tabla 17 Resumen del despacho diario de potencia reactiva del D-STATCOM

Indicador	Valor
Energía reactiva total diaria	33.1558 Mvarh
Inyección máxima de potencia reactiva	2.3000 Mvar
Inyección mínima de potencia reactiva	0.4900 Mvar

La siguiente Figura 25 muestra la variación aproximada de las pérdidas totales de potencia activa del sistema durante las 24 horas del día para el caso base y el caso optimizado con el D-STATCOM. En el caso base las pérdidas de potencia activa se incrementan en los periodos con mayor demanda, mientras que para el escenario optimizado las pérdidas tienden a disminuir de manera general.

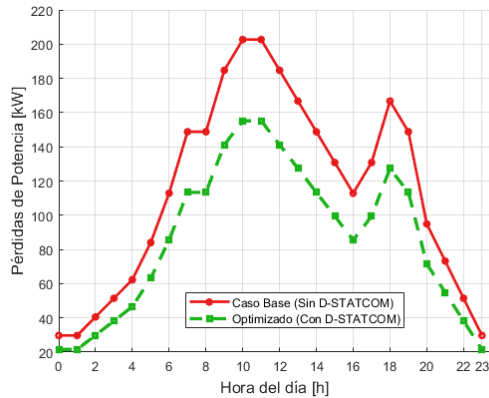


Figura 25. Pérdidas de potencia P en el sistema IEEE-33 barras a lo largo del día.

La Figura 26 ilustra cómo varía la desviación promedio de voltaje (DPV) del sistema a lo largo de un periodo de 24 horas, tanto en el caso base como en el escenario optimizado con D-STATCOM. Es evidente que, en el escenario base, la desviación promedio de voltaje es mayor durante las horas de demanda máxima. En cambio, cuando se incorpora el D-STATCOM, este índice disminuye durante el día, alcanzado una reducción máxima de desviación de

0.0302 [p.u.] en la hora más crítica, lo que indica que el perfil de voltaje del sistema mejora.

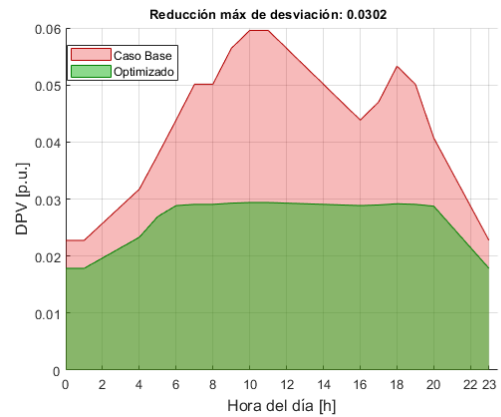


Figura 26. Comportamiento diario de la desviación promedio de voltaje del SD.

La Figura 27 presenta la comparación del voltaje promedio del SD en el caso base sin compensación y en el caso optimizado con compensación, se aprecia que el voltaje promedio se mantiene más estable y cercano al valor nominal con la incorporación del D-STATCOM.

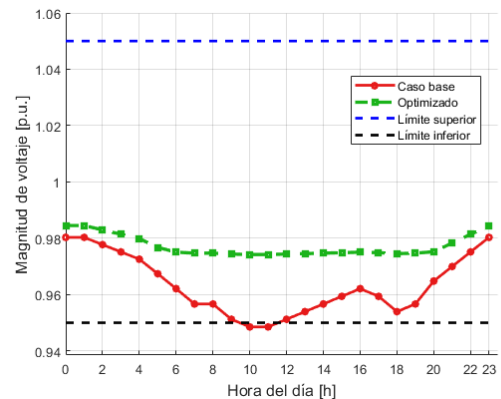


Figura 27. Voltaje promedio del sistema IEEE-33 barras.

Los resultados de la pérdida de energía en [kWh] y la desviación promedio de voltaje del sistema en [p.u.] se muestran en la Tabla 18 a continuación. Al integrar el D-STATCOM en la red, estos indicadores nos permiten realizar un seguimiento del progreso del sistema a lo largo del día.

Tabla 18 Comparación de resultados de pérdidas de energía y desviación promedio de voltaje

Indicador	Caso base	Caso optimizado	Mejora
Pérdidas de energía	2737.96 kWh	2077.85 kWh	24.11%
Desviación promedio de voltaje	0.0596 [p.u.]	0.0294 [p.u.]	38.28%

## 6 Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica se determinó la ubicación óptima del D-STATCOM para el SD IEEE de 33 barras propuesta en diferentes investigaciones, las cuales tienen como principales objetivos la reducción de las pérdidas de potencia, la mejora del perfil de voltaje y la disminución de costos operativos, entre otros aspectos. En varios estudios se plantea la instalación de más de un dispositivo de compensación; sin embargo, en el presente trabajo se optó por utilizar únicamente un D-STATCOM, considerando que este tipo de equipos presenta un alto costo de implementación. Con base en la revisión realizada, se identificó que la barra 30 es la ubicación más adecuada para la instalación del D-STATCOM, ya que en la mayoría de los trabajos coinciden en señalar dicha barra como el punto óptimo.

A partir de la ubicación definida del D-STATCOM se implementó el algoritmo genético en el software MATLAB, versión R2023b, para tres escenarios de demanda: mínima, media y máxima. En cada uno de estos escenarios el equipo entrega una potencia reactiva de 0.49 [Mvar], 1.1933 [Mvar] y 2.300 [Mvar] respectivamente. Con esta implementación se logró reducir las pérdidas totales de potencia activa en los tres escenarios en un 27.5% en demanda mínima, 24.602% en demanda media y 23.44% en demanda máxima. Por otro lado, la barra 18 fue considerada como la barra crítica debido a que registra el menor voltaje en los tres escenarios de demanda; sin

embargo, al incorporar el D-STATCOM se observó una mejora del perfil de voltaje en dicha barra, alcanzando incrementos aproximados del 0.5% para la demanda mínima, 1.17% para la demanda media y 4.28% para la demanda máxima. Si bien los incrementos obtenidos son moderados, estos resultan técnicamente relevantes, ya que permiten mantener el voltaje dentro de los límites operativos establecidos, cumpliendo en todos los escenarios de demanda con el rango de operación permitido de 0.95–1.05 [p.u.], sin que ninguna barra del sistema presente violaciones a dichos límites, especialmente en condiciones de alta demanda, considerando que la barra 18 se encuentra entre las más alejadas de la subestación principal, donde los efectos de caída de voltaje son de mayor magnitud.

Finalmente, considerando los resultados obtenidos, en los tres escenarios de demanda, tanto para el caso base como para el caso optimizado con el D-STATCOM, se logró estimar aproximadamente el comportamiento cuasidinámico del sistema a lo largo del día. Este análisis se realizó mediante la interpolación de los resultados, con lo cual se construyó la curva de voltaje en un periodo diario en función de la variación de la demanda, permitiendo distinguir la mejora del perfil de voltaje durante el día. De igual manera, se estimó la potencia reactiva aportada por el D-STATCOM a lo largo del día, obteniéndose una energía reactiva total diaria de 33.1558 [Mvarh]. Asimismo, se evaluó el comportamiento de las pérdidas de energía en [kWh] y la desviación promedio de voltaje (DPV) en [p.u.], las cuales se redujeron alrededor de un 24.11% y 38.28% respectivamente.

### 6.1 Trabajos futuros

Se recomienda que, a partir de esta investigación, se realice un análisis comparativo del algoritmo de optimización empleado en este trabajo frente a otros

algoritmos metaheurísticos reportados en la literatura, manteniendo las mismas condiciones del sistema de distribución. Adicionalmente, este estudio podría desarrollarse bajo un enfoque cuasidinámico, considerando diferentes escenarios de carga, con el fin de evaluar el desempeño de cada algoritmo en términos de calidad de la solución, la velocidad de convergencia y el esfuerzo computacional requerido.

Adicionalmente, se propone extender el análisis del control Volt-Var mediante el D-STATCOM en sistemas de distribución con alta penetración de generación distribuida, en particular de origen fotovoltaico. Este estudio permitiría evaluar el comportamiento del sistema ante escenarios de demanda y generación variables, así como la efectividad del D-STATCOM para mitigar problemas de sobrevoltaje y variaciones de voltaje en redes de distribución modernas.

## 7 Referencias

- [1] C. Gavilanez, M. Jaramillo, W. Pavon, C. Barrera-Singana, and M. Ruiz, "Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters," *2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GlobConPT 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/GlobConPT57482.2022.9938312.
- [2] M. Kolcun, Z. Conka, V. Kohan, R. Stefko, M. Pavlik, and D. M. Sarwari, "Application of Capacitor to Distribution System for Minimization of Power Losses," *Proceedings of the 2022 22nd International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/EPE54603.2022.9814127.
- [3] Z. Tan, B. Liu, Y. Xu, J. Ou, and X. Xiao, "Crucial status and perspectives of topology identification technologies of distribution network based on electrical quantity characteristics identification considering cloud-edge-end coordination," *Front Energy Res*, vol. 10, no. August, pp. 1–5, 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.975244.
- [4] D. Hua, F. Peng, S. Liu, Q. Lin, J. Fan, and Q. Li, "Coordinated Volt/VAR Control in Distribution Networks Considering Demand Response via Safe Deep Reinforcement Learning," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 2, 2025, doi: 10.3390/en18020333.
- [5] D. Hu, Z. Ye, Y. Gao, Z. Ye, Y. Peng, and N. Yu, "Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Voltage Control with Coordinated Active and Reactive Power Optimization," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 13, no. 6, pp. 4873–4886, 2022, doi: 10.1109/TSG.2022.3185975.
- [6] I. Murzakhonov, S. Gupta, S. Chatzivasileiadis, and V. Kekatos, "Optimal Design of Volt/VAR Control Rules for Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 15, no. 1, pp. 312–323, 2024, doi: 10.1109/TSG.2023.3279982.
- [7] S. K. Dash, S. Mishra, and A. Y. Abdelaziz, "A Critical Analysis of Modeling Aspects of D-STATCOMs for Optimal Reactive Power Compensation in Power Distribution Networks," *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, 2022, doi: 10.3390/en15196908.
- [8] W. Rohouma, M. Metry, R. S. Balog, A. A. Peerzada, M. M. Begovic, and D. Zhou, "Analysis of

- the Capacitor-Less D-STATCOM for Voltage Profile Improvement in Distribution Network With High PV Penetration,” *IEEE Open Journal of Power Electronics*, vol. 3, no. April, pp. 255–270, 2022, doi: 10.1109/OJPEL.2022.3167548.
- [9] V. Tejaswini and D. Susitra, “Óptimal D-STATCOM placement and sizing using a novel bird swarm operated exploitation of elephant herd algorithm,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–45, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-89856-7.
- [10] R. Alvaro, A. Águila Téllez, and L. Ortiz, “Óptimal Location and Sizing of a D-STATCOM in Electrical Distribution Systems to Improve the Voltage Profile Considering the Restriction of Harmonic Injection through the JAYA Algorithm,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 23, 2023, doi: 10.3390/en16237683.
- [11] P. Zare, I. F. Davoudkhani, R. Zare, H. Ghadimi, and R. Mohajery, “Multi-Objective Optimization for Simultaneous Óptimal Sizing & Placement of DGs and D-STATCOM in Distribution Networks Using Artificial Rabbits Optimization,” *2023 10th Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, ICREDG 2023*, pp. 1–7, 2023, doi: 10.1109/ICREDG58341.2023.10092092.
- [12] P. Raghuwanshi and S. K. Jain, “Impact Analysis of Simultaneous Integration of Óptimal DG And D-STATCOM Allocation In Distribution System With Intermittent Nature of Load,” *2024 2nd International Conference on Advancements and Key Challenges in Green Energy and Computing, AKGEC 2024*, pp. 1–6, 2024, doi: 10.1109/AKGEC62572.2024.10868611.
- [13] O. D. Montoya, H. R. Chamorro, L. Alvarado-Barrios, W. Gil-González, and C. Orozco-Henao, “Genetic-convex model for dynamic reactive power compensation in distribution networks using D-STATCOMs,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 8, 2021, doi: 10.3390/app11083353.
- [14] S. M. Almufti, A. Ahmad Shaban, Z. Arif Ali, R. Ismael Ali, and J. A. Dela Fuente, “Overview of Metaheuristic Algorithms,” *Polaris Global Journal of Scholarly Research and Trends*, vol. 2, no. 2, pp. 10–32, 2023, doi: 10.58429/pgjsrt.v2n2a144.
- [15] J. Song, B. Wang, and X. Hao, “Optimization Algorithms and Their Applications and Prospects in Manufacturing Engineering,” *Materials*, vol. 17, no. 16, 2024, doi: 10.3390/ma17164093.
- [16] F. M. Isa, W. N. M. Ariffin, M. S. Jusoh, and E. P. Putri, “A Review of Genetic Algorithm: Operations and Applications,” *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 40, no. 1, pp. 1–34, 2024, doi: 10.37934/araset.40.1.134.
- [17] D. Waysi Naaman, B. Tahir Ahmed, and M. Ibrahim, “Optimization by Nature : A Review of Genetic Algorithm Techniques,” *The Indonesian Journal of Computer Science*, vol. 14, no. 1, pp. 268–284, 2025, [Online]. Available: <http://ijcs.stmkindonesia.ac.id/ijcs/index.php/ijcs/article/view/3135>
- [18] G. Arora, S. Sahlot, and K. Bala, “MATHEMATICS Exploring Optimization Technique: Genetic Algorithm,” *SSRN Electronic Journal*, pp. 2–7, 2024, doi: 10.2139/ssrn.4832455.
- [19] A. Anwaar, A. Ashraf, W. H. K. Bangyal, and M. Iqbal, “Genetic

- Algorithms: Brief review on Genetic Algorithms for Global Optimization Problems,” *Proceedings - 2022 International Conference on Human-Centered Cognitive Systems, HCCS 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/HCCS55241.2022.10090327.
- [20] ARCONEL, “Regulación Nro. ARCONEL-001/24 – Código de Conexión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano,” QUITO, 2024. [Online]. Available: <https://www.regulacionelectricidad.gob.ec>
- [21] V. Tejaswini and D. Susitra, “Adaptive step vector-based dragonfly optimization: a new deed for localizing and sizing D-STATCOM in distribution system,” *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 20, no. 1, pp. 13–26, 2023, doi: 10.1080/1448837X.2022.2100545.
- [22] O. D. Montoya, A. Molina-Cabrera, D. A. Giral-Ramírez, E. Rivas-Trujillo, and J. A. Alarcón-Villamil, “Óptimal integration of D-STATCOM in distribution grids for annual operating costs reduction via the discrete version sine-cosine algorithm,” *Results in Engineering*, vol. 16, no. November, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100768.
- [23] D. N. Wesley, A. Abdulkarim, and P. U. Okorie, “Comparative óptimal siting and sizing D-STATCOM in radial distribution network,” *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 75–89, 2024, doi: 10.1007/s41872-023-00240-8.
- [24] C. M. Castiblanco-Pérez, D. E. Toro-Rodríguez, O. D. Montoya, and D. A. Giral-Ramírez, “Óptimal placement and sizing of d-statcom in radial and meshed distribution networks using a discrete-continuous version of the genetic algorithm,” *Electronics (Switzerland)*, vol. 10, no. 12, pp. 1–20, 2021, doi: 10.3390/electronics10121452.
- [25] S. Vasiha Anjum, S. Mallikarjunaiah, G. Balakrishna, A. Bonasi, and R. Matham, “Efficient power system operation through fuzzy and PSO algorithm for power loss reductions and voltage profile improvement by óptimal placement of D-STATCOM,” *E3S Web of Conferences*, vol. 547, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202454701011.
- [26] S. Anbuchandran, M. Arumuga Babu, D. Silas Stephen, and M. Thinakaran, “A hybrid optimization for distributed generation and D-STATCOM placement in radial distribution network: a multi-faceted evaluation,” *Engineering Research Express*, vol. 6, no. 3, 2024, doi: 10.1088/2631-8695/ad734c.
- [27] C. Gavilanez, M. Jaramillo, W. Pavon, C. Barrera-Singana, and M. Ruiz, “Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters,” *2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies, GlobConPT 2022*, pp. 1–6, 2022, doi: 10.1109/GlobConPT57482.2022.9938312.
- [28] A. El Berkaoui, S. Bahsine, A. Oukennou, F. A. Nouh, and B. Rzine, “Distribution network topology planning and optimization: a brief review,” *E3S Web of Conferences*, vol. 469, 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346900054.
- [29] D. Calvachi, L. Tipán, and M. Jaramillo, “Localization and Sizing of Distributed Generation through a Genetic Algorithm to Improve Voltage Profile Using Ecuadorian

- Standards,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 10, 2023, doi: 10.3390/en16104139.
- [30] G. A. Adepoju, S. A. Salimon, I. G. Adebayo, and O. B. Adewuyi, “Impact of DSTATCOM penetration level on technical benefits in radial distribution network,” *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, no. July 2023, p. 100413, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2023.100413.
- [31] K. Loji, S. Sharma, G. Sharma, and T. Rawat, “Multiobjective distribution system operation with demand response to optimize solar hosting capacity, voltage deviation index and network loss,” *Sci Rep*, vol. 15, no. 1, pp. 1–25, 2025, doi: 10.1038/s41598-024-82379-7.
- [32] K. Gholami, M. R. Islam, M. M. Rahman, A. Azizivahed, and A. Fekih, “State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 8630–8651, 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.06.080.
- [33] Prashant, A. S. Siddiqui, M. Sarwar, A. Althobaiti, and S. S. M. Ghoneim, “Óptimal Location and Sizing of Distributed Generators in Power System Network with Power Quality Enhancement Using Fuzzy Logic Controlled D-STATCOM,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 6, 2022, doi: 10.3390/su14063305.
- [34] M. L. Woldesemayat, D. B. Biramo, and A. T. Tantu, “Assessment of power distribution system losses and mitigation through óptimally placed D-STATCOM: (A case study: Gesuba town 15 kV distribution system),” *Cogent Eng*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2330824.
- [35] A. ULLOA and L. TIPÁN, “ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS,” Universidad Politécnica Salesiana, 2018. doi: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16314>.
- [36] J. E. Suarez Patiño, L. A. Gallego Pareja, and O. Gómez Carmona, “Óptimal placement, sizing and operation of D-STATCOMs in power distribution systems using a Mixed-Integer Linear Programming model,” *Results in Engineering*, vol. 26, no. March, p. 104749, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104749.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

CONTROL DINÁMICO VOLT-VAR EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN CON D-STATCOM UTILIZANDO EL ALGORITMO GENÉTICO PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE.																					
ITEM	AÑO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA			
		TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Compensación Reactiva	Control Volt-Var	D-STATCOM	Dimensionamiento óptimo	Estabilidad de voltaje	Ubicación óptima de D-STATCOM	Reducción de pérdidas de potencia	Minimización de la desviación de voltaje	Pérdidas de potencia	Perfil de voltaje	Capacidad de D-STATCOM	Control dinámico Volt-VAR	Algoritmos de optimización	Simulaciones	Ubicación y dimensionamiento óptimo del D-STATCOM	Dimensionamiento óptimo del D-STATCOM	Ubicación del D-STATCOM	Reducción de pérdidas de potencia
1	2022	Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters	3	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒		☒				☒	☒
2	2022	Application of Capacitor to Distribution System for Minimization of Power Looses	2	☒				☒	☒		☒	☒				☒				☒	☒
3	2022	Crucial status and perspectives of topology identification technologies of distribution network based on electrical quantity characteristics identification considering cloud-edge-end coordination	1													☒					
4	2025	Coordinated Volt/VAR Control in Distribution Networks Considering Demand Response via Safe Deep Reinforcement Learning	4	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒				☒	☒
5	2022	Multi-Agent Deep Reinforcement Learning for Voltage Control with Coordinated Active and Reactive Power Optimization	129	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒				☒	☒
6	2024	Optimal Design of Volt/VAR Control Rules for Inverter-Interfaced Distributed Energy Resources," IEEE Trans Smart Grid	21	☒	☒			☒	☒	☒	☒	☒		☒	☒	☒				☒	☒
7	2022	A Critical Analysis of Modeling Aspects of D-STATCOMs for Optimal Reactive Power Compensation in Power Distribution Networks	15	☒		☒		☒	☒		☒	☒	☒			☒				☒	☒
8	2022	Analysis of the Capacitor-Less D-STATCOM for Voltage Profile Improvement in Distribution Network With High PV Penetration	18	☒	☒	☒		☒	☒		☒	☒	☒			☒				☒	☒

9	2025	Optimal D-STATCOM placement and sizing using a novel bird swarm operated exploitation of elephant herd algorithm	1	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
10	2023	Optimal Location and Sizing of a D-STATCOM in Electrical Distribution Systems to Improve the Voltage Profile Considering the Restriction of Harmonic Injection through the JAYA Algorithm	5	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
11	2023	Multi-Objective Optimization for Simultaneous Optimal Sizing & Placement of DGs and D-STATCOM in Distribution Networks Using Artificial Rabbits Optimization	14	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
12	2024	Impact Analysis of Simultaneous Integration of Optimal DG And D-STATCOM Allocation In Distribution System With Intermittent Nature of Load	5	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
13	2021	Genetic-convex model for dynamic reactive power compensation in distribution networks using D-STATCOMs	20	✗		✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗		✗		✗	✗
14	2023	Overview of Metaheuristic Algorithms	110													✗						
15	2024	Optimization Algorithms and Their Applications and Prospects in Manufacturing Engineering	13													✗						
16	2024	A Review of Genetic Algorithm: Operations and Applications	0													✗						
17	2025	Optimization by Nature: A Review of Genetic Algorithm Techniques	5													✗						
18	2024	MATHEMATICS Exploring Optimization Technique: Genetic Algorithm	0													✗						
19	2022	Genetic Algorithms: Brief review on Genetic Algorithms for Global Optimization Problems	36													✗						
20	2024	Regulación Nro. ARCONEL-001/24 – Código de Conexión del Sistema Eléctrico Ecuatoriano	0					✗					✗									
21	2022	Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters	3	✗	✗			✗		✗	✗	✗	✗		✗			✗			✗	✗
22	2023	Distribution network topology planning and optimization: a brief review	4																			
23	2023	Localization and Sizing of Distributed Generation through a Genetic Algorithm to Improve Voltage Profile Using Ecuadorian Standards.	5					✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗	✗	✗
24	2023	Impact of DSTATCOM penetration level on technical benefits in radial distribution network	13	✗		✗		✗		✗		✗	✗				✗				✗	✗

25	2025	Multiobjective distribution system operation with demand response to optimize solar hosting capacity, voltage deviation index and network loss	3	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗	✗		
26	2022	State-of-the-art technologies for volt-var control to support the penetration of renewable energy into the smart distribution grids	40	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗							✗	✗		
27	2022	Optimal Location and Sizing of Distributed Generators in Power System Network with Power Quality Enhancement Using Fuzzy Logic Controlled D-STATCOM	32	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗			✗	✗	✗	
28	2024	Assessment of power distribution system losses and mitigation through optimally placed D-STATCOM: (A case study: Gesuba town 15 kV distribution system)	10	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
29	2023	Adaptive step vector-based Dragonfly Optimization: A New Deed for localizing and sizing DSTATCOM in distribution system	1	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
30	2022	Optimal integration of DSTATCOM in distribution grids for annual operating costs reduction via the discrete version sine-cosine algorithm	29	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
31	2024	Comparative optimal siting and sizing D-STATCOM in radial distribution network	4	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
32	2021	Optimal placement and sizing of d-statcom in radial and meshed distribution networks using a discretecontinuous version of the genetic algorithm	48	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
33	2018	Optima ubicación y dimensionamiento de dstatcom para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución considerando la incidencia de armónicos	0	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
34	2024	Efficient power system operation through fuzzy and PSO algorithm for power loss reductions and voltage profile improvement by optimal placement of D-STATCOM	0	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
35	2024	A hybrid optimization for distributed generation and DSTATCOM placement in radial distribution network: a multi-faceted evaluation	9	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
36	2025	Optimal placement, sizing and operation of D-STATCOMs in power distribution systems using a Mixed-Integer Linear Programming model	5	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗			✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	
CANTIDAD:				25	10	23	18	27	18	28	21	28	29	20	8	19	30	18	17	16	28	30

## 7.2 Resumen de Indicadores

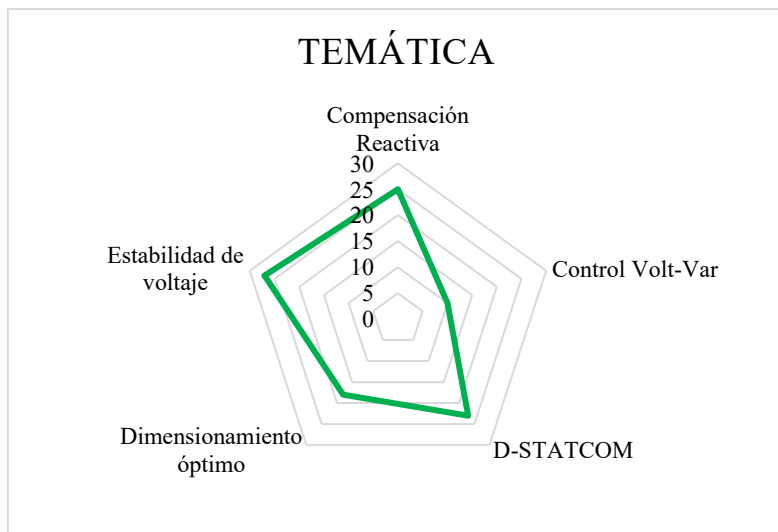


Figura 28. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

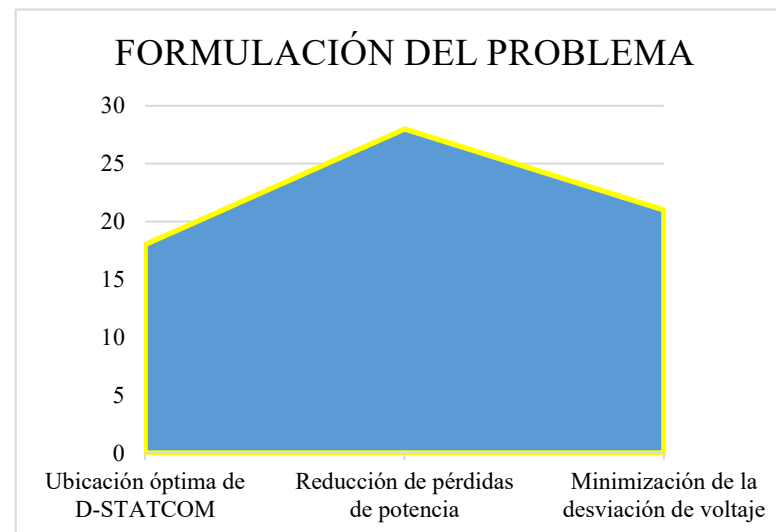


Figura 29. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

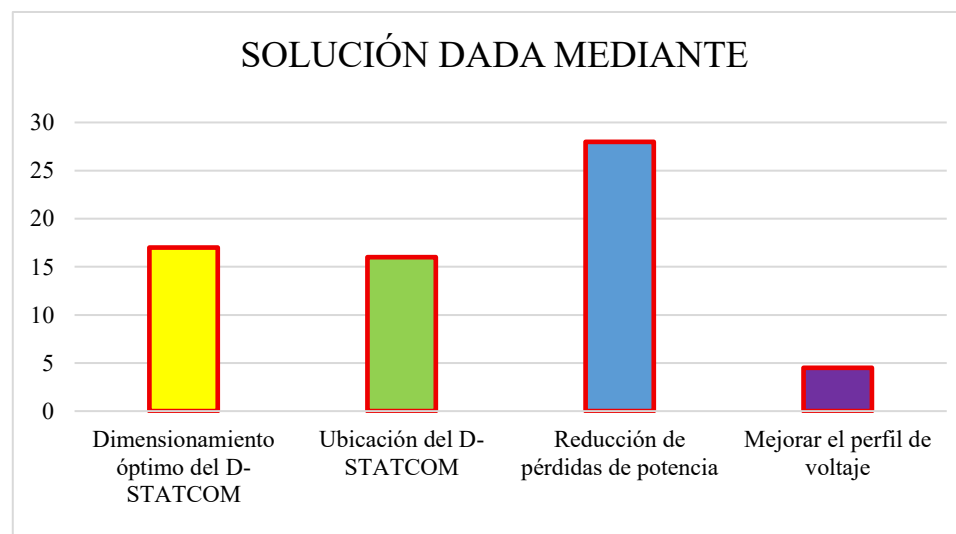


Figura 30. Indicador de solución - Estado del arte.

## 8 Anexos

Tabla 19 Voltaje del sistema para el escenario de demanda mínima sin compensación

<b>Demanda mínima base</b>			
<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>
1	1	18	0,966861
2	0,998852	19	0,998642
3	0,993424	20	0,997218
4	0,990565	21	0,996938
5	0,987744	22	0,996684
6	0,980733	23	0,992014
7	0,979405	24	0,989394
8	0,977559	25	0,98809
9	0,975179	26	0,98
10	0,972973	27	0,979026
11	0,972647	28	0,974683
12	0,972078	29	0,971563
13	0,969764	30	0,970214
14	0,968907	31	0,968638
15	0,968373	32	0,968291
16	0,967856	33	0,968184
17	0,96709	-	-

Tabla 20 Voltaje del sistema para el escenario de demanda mínima con compensación

<b>Demanda mínima con D-STATCOM</b>			
<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>
1	1	18	0,971328
2	0,999002	19	0,998792
3	0,994375	20	0,997368
4	0,992111	21	0,997088
5	0,989909	22	0,996834
6	0,985136	23	0,992967
7	0,983815	24	0,99035
8	0,981977	25	0,989046
9	0,979607	26	0,984731
10	0,977412	27	0,984216
11	0,977087	28	0,982819
12	0,976521	29	0,981914
13	0,974218	30	0,981385
14	0,973364	31	0,979826

15	0,972833	32	0,979484
16	0,972318	33	0,979378
17	0,971556	-	-

Tabla 21 Voltaje del sistema para el escenario de demanda media sin compensación

<b>Demanda media base</b>			
<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>
1	1	18	0,940656
2	0,997959	19	0,99759
3	0,988284	20	0,995092
4	0,98317	21	0,9946
5	0,978118	22	0,994155
6	0,965558	23	0,985796
7	0,963179	24	0,98117
8	0,959872	25	0,978865
9	0,955601	26	0,964243
10	0,951641	27	0,962496
11	0,951056	28	0,954702
12	0,950035	29	0,949104
13	0,945877	30	0,946682
14	0,944335	31	0,94385
15	0,943375	32	0,943227
16	0,942446	33	0,943034
17	0,941068	-	-

Tabla 22 Voltaje del sistema para el escenario de demanda media con compensación

<b>Demanda media con D-STATCOM</b>			
<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>	<b>Barra</b>	<b>V [p.u.]</b>
1	1	18	0,951787
2	0,998327	19	0,997958
3	0,99062	20	0,99546
4	0,986967	21	0,994969
5	0,983439	22	0,994524
6	0,97640	23	0,988139
7	0,974049	24	0,983523
8	0,97078	25	0,981224
9	0,966558	26	0,975892
10	0,962644	27	0,975275
11	0,962065	28	0,974752
12	0,961056	29	0,974638

13	0,956947	30	0,974256
14	0,955423	31	0,971506
15	0,954474	32	0,970901
16	0,953556	33	0,970713
17	0,952194	-	-

11	0,959378	28	0,976039
12	0,958515	29	0,978451
13	0,955268	30	0,978875
14	0,95421	31	0,974958
15	0,953944	32	0,974097
16	0,953944	33	0,97383
17	0,953944	-	-

Tabla 23 Voltaje del sistema para el escenario de demanda máxima sin compensación

Demanda máxima base			
Barra	V [p.u]	Barra	V [p.u]
1	1	18	0,91309
2	0,997032	19	0,996504
3	0,982938	20	0,992926
4	0,975456	21	0,992222
5	0,968059	22	0,991584
6	0,949658	23	0,979352
7	0,946173	24	0,972681
8	0,941328	25	0,969356
9	0,935059	26	0,947729
10	0,929244	27	0,945165
11	0,928384	28	0,933726
12	0,926885	29	0,925507
13	0,920772	30	0,92195
14	0,918505	31	0,917789
15	0,917093	32	0,916873
16	0,915725	33	0,91659
17	0,913698	-	-

Tabla 24 Voltaje del sistema para el escenario de demanda máxima con compensación

Demanda máxima con D-STATCOM			
Barra	V [p.u]	Barra	V [p.u]
1	1	18	0,953944
2	0,997887	19	0,997359
3	0,988378	20	0,993785
4	0,984303	21	0,993081
5	0,980467	22	0,992444
6	0,974262	23	0,984813
7	0,971483	24	0,978179
8	0,967906	25	0,974873
9	0,963674	26	0,973873
10	0,959901	27	0,973469