

**ÓPTIMA UBICACIÓN Y
DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN
PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE
CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE
INYECCIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE EL
ALGORITMO JAYA.**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

**ÓPTIMA UBICACIÓN Y
DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN
PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE
CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE
INYECCIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE EL
ALGORITMO JAYA.**

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

AUTOR: RONY JHOAN ALVARO SIMBAÑA

TUTOR: ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

Quito -Ecuador

2024

Rony Jhoan Alvaro Simbaña

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE INYECCIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE EL ALGORITMO JAYA.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2024

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Rony Jhoan Alvaro Simbaña (Y'2000 – M'03). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Salesiano “Don Bosco” de la ciudad de Quito. Actualmente se encuentra cursando el décimo semestre de la carrera de electricidad. Su trabajo se basa en técnicas de optimización y modelado matemático para la incorporación óptima de compensación reactiva en sistemas eléctricos de distribución. ralvaro@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Alexander Águila Téllez (Y'1981 – M'09) recibió el título de Ingeniero Eléctrico y el de Máster en Eficiencia Energética en los años 2005 y 2010 respectivamente. En 2019 Recibió el título de Magíster en Ingeniería y 2021 el título de Doctor en Ingeniería (Magna Cum Laude), ambos, en la Universidad Pontificia Bolivariana - Colombia-Medellín. Es miembro del Grupo de Investigación GIREI. Sus principales intereses de investigación incluyen la compensación VOLT-VAR en redes de distribución eléctrica, redes inteligentes, minimización de pérdidas de energía, las energías renovables, la confiabilidad, la optimización, los análisis multicriterio y la eficiencia energética. Es profesor investigador de la Universidad Politécnica Salesiana- Ecuador. aaguila@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2024 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

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

Yo, RONY JHOAN ALVARO SIMBAÑA con documento de identificación N°
1718514670 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, 29 de enero del año 2024

Atentamente,



RONY JHOAN ALVARO
SIMBAÑA

1718514670

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

Yo, RONY JHOAN ALVARO SIMBAÑA con documento de identificación No. 1718514670, 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 “Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA”, 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, 29 de enero del año 2024

Atentamente,



RONY JHOAN ALVARO
SIMBAÑA

1718514670

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alexander Águila Téllez con documento de identificación N° 1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE INYECCIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE EL ALGORITMO JAYA, realizado por Rony Jhoan Alvaro Simbaña con documento de identificación N° 1718514670, 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, 29 de enero del año 2024

Atentamente,



Ing. Alexander Águila Téllez, P.hD.
1755983184

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	4
2.1	Flujos de Potencia	4
2.1.1	Técnicas de resolución.....	4
	Gauss Seidel	5
	Formulación del método	5
	Newton-Raphson (NR)	5
2.2	Variación de voltaje y armónicos enfocados a la calidad de energía	6
2.3	Pérdidas en el Sistema	7
2.4	Compensación reactiva en redes de distribución	8
2.4.1	Compensación Shunt.....	8
2.4.2	Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC).....	8
2.4.3	D-STATCOM	9
2.5	Algoritmo JAYA	9
3	Formulación del problema.....	10
3.1	Modelación: optima ubicación y dimensionamiento del D-STATCOM	10
3.2	Pseudocódigo para determinar el dimensionamiento y ubicación del DSTATCOM mediante el algoritmo JAYA.....	11
3.3	Pseudocódigo para determinar el THD por la incorporación del D-STATCOM 12	
4	Casos de estudio	12
4.1	Sistema de 34 barras	12
4.2	Sistema de 33 barras	13
5	Análisis de resultados	14
5.1	Sistema de 33 barras	14
5.2	Sistema de 34 barras	19
6	Trabajos futuros.....	24
7	Conclusiones.....	24
8	Referencias.....	24
8.1	Matriz de Estado del Arte	29
8.2	Resumen de Indicadores.....	34
	ANEXOS	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación y dimensionamiento óptimo del DSTATCOM.....	3
Figura 2. Pérdida de potencia en los alimentadores.	7
Figura 3. Esquema sistema de 34 barras IEEE	13
Figura 4. Esquema sistema de 33 barras	14
Figura 5. Espectro de magnitud de convertidores de 6 pulsos.....	15
Figura 6. THDv de las barras al agregar la compensación.	15
Figura 7. Comportamiento de la población en el sistema de 33 barras sin restricción de inyección de armónicos.	16
Figura 8. Evolución de la función objetivo en el sistema 33 barras sin restricción de inyección de armónicos.	16
Figura 9. Abastecimiento y demanda de potencia reactiva.....	16
Figura 10. Comportamiento de la población en el sistema de 33 barras con restricción de inyección de armónicos.	17
Figura 11. Evolución de la función objetivo en el sistema 33 barras con restricción de inyección de armónicos.	17
Figura 12. Ubicación óptima del dispositivo en el sistema de 33 barras.	17
Figura 13. Voltaje en cada nodo	18
Figura 14. Desviación de voltaje.....	18
Figura 15. Pérdidas de potencia	18
Figura 16. Corriente inyectada por el D-STATCOM.....	18
Figura 17. THDv del sistema compensado considerando la restricción de armónicos	19
Figura 18. Factor de potencia escenario base y compensado en el sistema de 33 barras.	19
Figura 19. Comportamiento de la población en el sistema de 34 barras sin restricción de inyección de armónicos.	20
Figura 20. Minimización de la función objetivo en el sistema de 34 barras sin restricción de inyección de armónicos.	20
Figura 21. THDv del sistema de 34 barras.	21
Figura 22. Comportamiento de la población en el sistema de 34 barras con restricción de inyección de armónicos	21
Figura 23. Minimización de la función objetivo en el sistema de 34 barras con restricción de inyección de armónicos.	21
Figura 24. Óptima ubicación del D-STATCOM en el sistema de 34 barras.	22
Figura 25. Potencia reactiva consumida e inyectada	22
Figura 26. Perfil de voltaje previo y posterior a la compensación reactiva.	22
Figura 27. Desviación de voltaje previo y posterior a la compensación.	22
Figura 28. Pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras.....	23
Figura 29. Corriente inyectada por el D-STATCOM en el sistema de 34 barras.....	23
Figura 30. THDv en el sistema de 34 barras	23
Figura 31. Factor de potencia en el sistema de 34 barras	23
Figura 32. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	34
Figura 33. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	34
Figura 34. Indicador de solución - Estado del arte.....	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de líneas y cargas del sistema IEEE 34 barras.....	13
Tabla 2. Datos de líneas y cargas del sistema IEEE 33 barras.....	13
Tabla 3. Desviación del voltaje y pérdidas de potencia	15
Tabla 4. Ubicación y Potencia del D-STATCOM.	15
Tabla 5. Indicadores con el sistema compensado.....	15
Tabla 6. Ubicación y capacidad del D-STATCOM.....	16
Tabla 7. Comparación de la desviación de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema compensado	18
Tabla 8. Resumen resultados 33 barras. Tabla comparativa de DMV, DPV, Pérdidas de P y Q.....	19
Tabla 9. Desviación de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras...	19
Tabla 10. Ubicación óptima sin la restricción de armónicos en el sistema de 34 barras.....	20
Tabla 11. Desviaciones de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras compensado.....	20
Tabla 12. Ubicación y capacidad del D-STATCOM.....	21
Tabla 13. Indicadores del perfil de voltaje y las pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras.....	22
Tabla 14. Comparación de los indicadores del perfil de voltaje y las pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras	24
Tabla 15: Matriz de estado del arte.....	29

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN PARA MEJORAR EL PERFIL DE VOLTAJE CONSIDERANDO RESTRICCIÓN DE INYECCIÓN DE ARMÓNICOS MEDIANTE EL ALGORITMO JAYA

Resumen

El presente artículo tiene como objetivo mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia en los sistemas de prueba de 33 y 34 barras IEEE, para lo cual se implementó la óptima ubicación y dimensionamiento de un D-STATCOM en cada sistema analizado mediante el algoritmo JAYA. El modelado de los sistemas, así como la implementación de la técnica de optimización se lleva a cabo en el software Matlab. Debido a la naturaleza no lineal del dispositivo se realiza el análisis del impacto de la inclusión del DSTATCOM mediante el estudio de penetración armónica no iterativa o simple, considerando esto, se analizan los escenarios de optimización con y sin la restricción de inyección de armónicos. Al implementar la técnica de optimización en los escenarios expuestos, se pudo observar que la desviación máxima de voltaje (DMV), la desviación promedio de voltaje (DPV), así como las pérdidas de potencia (S perdida) en los sistemas analizados, se redujeron con respecto al caso inicial. Los resultados de DMV, DPV y S perdida en el escenario con la restricción de inyección de armónicos son menos favorables con respecto al escenario sin la restricción. Sin embargo, esta reducción de la mejoría se lo realiza para conseguir cumplir el límite máximo del 3% de THDv en los sistemas analizados.

Palabras Clave: Óptima ubicación y dimensionamiento, algoritmo JAYA, DSTATCOM, Minimización de pérdidas de potencia, Perfil de voltaje.

Abstract.

This paper aims to improve the voltage profile and reduce power losses in IEEE 33 and 34 bus test systems, for which the optimal placement and sizing of a D-STATCOM was implemented in each system analyzed using the JAYA algorithm. The modeling of the systems as well as the implementation of the optimization technique is carried out in Matlab software. Due to the nonlinear nature of the device, the analysis of the impact of the inclusion of DSTATCOM is performed by means of the non-iterative or simple harmonic penetration study, considering this, the optimization scenarios with and without the harmonic injection constraint are analyzed. By implementing the optimization technique in the exposed scenarios, it could be observed that the maximum voltage deviation (DMV), the average voltage deviation (DPV), as well as the power losses (Sloss) in the analyzed systems, were reduced with respect to the initial case. The results of DMV, DPV and Sloss in the scenario with the harmonic injection constraint are less favorable with respect to the scenario without the constraint. However, this reduction of the improvement is done in order to achieve the maximum limit of 3% THDv in the analyzed systems.

Keywords: Optimal location and sizing, JAYA Algorithm, DSTATCOM, Voltage Profile, Power Loss Minimization

1 Introducción

El sistema eléctrico de potencia (SEP) está conformado por diferentes áreas, las cuales son generación, transmisión y distribución [1].

El principal enfoque del sistema de distribución es proporcionar energía generada de manera segura y confiable a los consumidores [2]. La tendencia del crecimiento de esta sección del SEP se encuentra ligada con la creciente población.

La energía entregada a los consumidores debe mantener parámetros de calidad, seguridad y confiabilidad para evitar inconvenientes tanto de naturaleza económica como técnica a los usuarios finales, así como a la empresa distribuidora [3].

La compensación reactiva es un criterio mediante el cual se busca asegurar la calidad de energía eléctrica, mediante esta compensación se abordan diferentes parámetros, tales como la regulación de voltaje en los nodos del sistema, mediante la cual se evita que existan caídas de voltaje, debido a que el mismo se mantiene en un rango determinado; otro parámetro que se aborda es la reducción de la relación de la potencia activa con respecto a la potencia aparente, mediante el cual se evita la circulación excesiva de corriente reduciendo las pérdidas de potencia por efecto Joule [3].

La compensación reactiva mediante la incorporación de banco de capacitores, así como la de generadores síncronos se han implementado como una estrategia para lograr un mejoramiento en el funcionamiento de los sistemas de distribución.

Esta alternativa conlleva una deficiencia considerable, puesto que no tiene la capacidad de controlar las variaciones dinámicas de potencia reactiva que presenta la carga [3].

Para enfrentar esta problemática se desarrollaron los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexible (FACTS).

Estos dispositivos se emplean para realizar un control en el flujo o transmisión de potencia, así como optimizar la capacidad de transmisión de potencia; estos dispositivos se fundamentan en la electrónica de potencia [3], [4].

Un tipo de dispositivo perteneciente a los FACTS es el D-STATCOM, el cual se conecta en derivación, se fundamenta en un convertidor de fuente de tensión (VSC). El D-STATCOM se emplea para absorber o inyectar potencia reactiva según se requiera [4].

El dispositivo puede ser ubicado en todos los nodos de la red, sin embargo, un dimensionamiento y colocación no adecuado de este, puede socavar su eficiencia [5].

De esta manera se aborda el dimensionamiento, así como la ubicación del D-STATCOM mediante la implementación de técnicas de optimización, con el fin de conseguir una adecuada regulación de voltaje, y una mejora tanto en los perfiles de voltaje, como en las pérdidas de potencia.

Debido a esto, existen varias investigaciones en las cuales se instalan DSTATCOM en redes eléctricas de distribución con la finalidad de realizar compensación de potencia reactiva, realizando una optimización del funcionamiento de la red eléctrica.

En [6] implementa un algoritmo inmune (IA) para ubicar y dimensionar un DSTATCOM en dos sistemas de pruebas, el de 33 y el sistema de 69 barras propuestos por IEEE. Este trabajo tiene la finalidad de mejorar tanto los perfiles de corriente como de voltaje, al mismo tiempo que disminuye tanto las pérdidas de potencia como el costo de instalación del DSTATCOM.

En [5] propone una técnica fundamentada en el algoritmo inmune y genético híbrido (IA-GA) para la ubicación, así como el dimensionamiento óptimo de DSTATCOM considerando diferentes niveles de carga con la finalidad de

disminuir tanto el costo anual de inversión en DSTATCOM, como las pérdidas de potencia. El algoritmo se implementó en el sistema radial de 33 barras IEEE.

En [7] se propone la implementación del algoritmo mejorado de búsqueda de forrajeo bacteriano (IBFA), con la finalidad de disminuir las pérdidas de potencia, mejorar tanto la estabilidad, así como el perfil del voltaje. La técnica propuesta se validó en el sistema de 78 barras. La implementación del algoritmo presenta una reducción del 49.021% de las pérdidas de potencia con respecto al caso base.

La ubicación de la compensación, así como la DG se realiza mediante el índice de estabilidad de potencia (PSI), el dimensionamiento de DG se determina mediante el análisis de estabilidad, por otro lado, el dimensionamiento del DSTATCOM se realiza mediante el incremento controlado de potencia reactiva hasta que se consigan las menores pérdidas de potencia. La técnica propuesta es implementa en los sistemas de prueba de 34 y 69 barras de IEEE.

Considerando la naturaleza no lineal de la electrónica de potencia en la que se fundamenta el DSTATCOM, resulta importante realizar un análisis del impacto de los armónicos generados por la incorporación del DSTACOM a la red eléctrica.

Tomando en consideración lo antes expuesto, el presente artículo presenta el dimensionamiento y la ubicación óptima de un D-STATCOM restringiendo la inyección de armónicos mediante la restricción del máximo valor de THDv en el sistema. La representación visual de lo mencionado se expone en la Figura 1.

La técnica de optimización empleada para establecer el dimensionamiento y la ubicación del DSTATCOM es el algoritmo JAYA, por otro lado, el cálculo de armónicos para determinar el THDv se realiza mediante la penetración armónica no iterativa o simple. Este modelo matemático se aplicó a los sistemas radiales de 33 y 34 barras de IEEE.

Para el cálculo de penetración armónica, se considera que el DSTATCOM se caracteriza por un convertidor de 6 pulsos.

El presente artículo se compone por la distribución que se muestra a continuación.

La sección 2 abarca un marco teórico que incluye las técnicas de cálculo del flujo de potencia, los indicadores del perfil de voltaje y la distorsión armónica de voltaje. Además, se abordan las pérdidas de potencia en los sistemas eléctricos, las alternativas para realizar una compensación de potencia reactiva y, finalmente, se presenta el algoritmo JAYA.

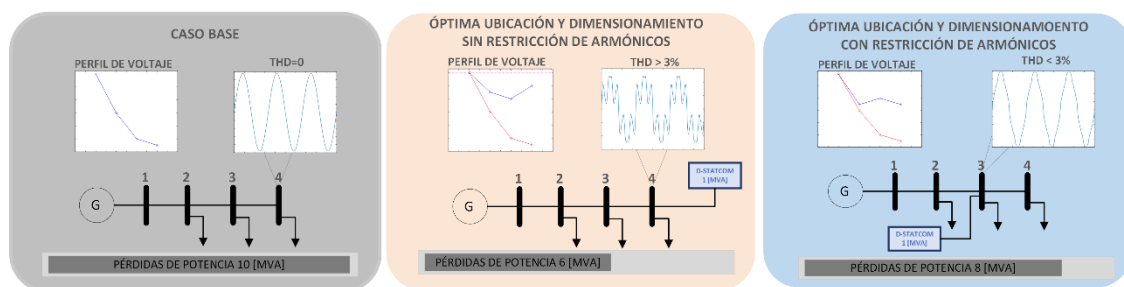


Figura 1. Ubicación y dimensionamiento óptimo del DSTATCOM.

La sección 3 proporciona una descripción detallada de la modelación del algoritmo utilizado para determinar la

ubicación óptima del DSTATCOM, así como para calcular el THDv en el sistema

por la incorporación de la compensación reactiva.

En la sección 4 se detallan los sistemas de pruebas en los cuales se implementará la técnica propuesta. En la sección 5 se examinan los resultados obtenidos y se comparan con los distintos escenarios propuestos.

Los trabajos e investigaciones futuras planteadas se exponen en la sección 6, y para concluir, en la sección 7 se exponen las conclusiones obtenidas a partir del estudio realizado.

2 Marco teórico

En la presente sección se describe el flujo de potencia y algunas técnicas para determinarlo, también se describen las desviaciones y distorsión armónica de voltaje, así como, las pérdidas de potencia en los sistemas eléctricos, y para finalizar se describe el algoritmo JAYA.

2.1 Flujos de Potencia

El flujo de carga o flujo de potencia determina el punto de operación en estado estable de un sistema eléctrico de potencia considerando una carga específica [8].

En el flujo de carga se considera que el sistema eléctrico se compone por diversas barras o nodos los cuales se conectan mediante transformadores y líneas de conexión [3].

Los resultados obtenidos al realizar el flujo de carga son los siguientes [3], [9]:

- Magnitud del voltaje en todos los nodos
- Ángulo de fase del voltaje en todos los nodos
- Potencia activa y reactiva en todos los ramales

La matriz de admitancias es el parámetro fundamental para el planteamiento de flujos de potencia. En esta se matriz incluyen todos los elementos conectados entre cada nodo del sistema, considerando transformadores, así como los valores tanto

de admitancia como de capacitancia de las líneas de transmisión [3].

La matriz de admitancias (Y_{bus}) se compone por dos grupos de elementos, los que se encuentran en la diagonal principal (Y_{ii}) y aquellos que no pertenecen a esta diagonal (Y_{ij}) [3].

La suma de todas las admitancias de los componentes que están directamente conectados al nodo o barra i corresponden a los valores que pertenecen a la diagonal principal, por otro lado, los valores que se son ajenos la diagonal principal son los valores en negativo de las admitancias mutuas entre los nodos i, j ; de esta manera si no existe una conexión física entre dos nodos i, j , el valor correspondiente de Y_{ij} es igual a 0 [3].

Esta matriz de admitancias es una matriz simétrica, de esta manera se tiene que:

$$Y_{ij} = Y_{ji} \quad (1)$$

Ya determinados los valores tanto de los componentes de la matriz principal, así como los que se encuentran fuera de la misma, se procede a armar la matriz de impedancias de la siguiente manera [3]:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} & \cdots & Y_{in} \\ Y_{ji} & Y_{jj} & \vdots & Y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{ni} & Y_{nj} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Esta matriz se puede descomponer en dos, G_{bus} y Y_{bus} , los cuales corresponden a los valores real e imaginario, que representan la conductancia y susceptancia de la matriz de admitancias respectivamente [3].

2.1.1 Técnicas de resolución

Las soluciones planteadas para realizar un flujo de carga se basan generalmente en métodos iterativos, debido a la naturaleza no lineal de las ecuaciones a resolver [9], [10].

Gauss Seidel

Se basa en finalizar el cálculo cuando la diferencia entre, los nuevos voltajes calculados de las barras y los voltajes de la iteración anterior, es menor al valor de error determinado por el usuario [11]

La convergencia del método no es rápida y está directamente relacionada con el factor de aceleración α . Con el objetivo de lograr una convergencia más efectiva, por lo general, se elige un valor de aceleración que oscila entre 1.4 y 1.6 [9].

Formulación del método

Al analizar las barras de voltaje controlado (PV), se consideran las ecuaciones de voltaje potencia reactiva y voltaje en el nodo [9].

$$V_i^k = \frac{1}{Y_{ii}} * \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^{(k-1)*}} - \sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k - \sum_{j=i+1}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right] \quad (3)$$

$$Q_i^k = -Im \left[V_i^{(k-1)} \left(\sum_{j=1}^{i-1} Y_{ij} V_j^k + \sum_{j=i}^n Y_{ij} V_j^{(k-1)} \right) \right] \quad (4)$$

Para el análisis en las barras de potencia controlada (PQ) se tiene la siguiente ecuación [9]:

$$V_j^k = V_i^{esp} \frac{V_i^{k+1}}{V_i^{k+1}} \quad (5)$$

Con el objetivo de reducir las iteraciones se aplica el factor de aceleración α [9].

$$V_{i,acel}^k = (1 - \alpha) V_{i,aceñ}^{(k-1)} + \alpha V_i^{(k)} \quad (6)$$

Dado que el método es iterativo, las siguientes restricciones de convergencia deben ser cumplidas.

$$|V_{i,real}^k - V_{i,real}^{k+1}| < tolerancia \quad (7)$$

$$|V_{i,imag}^k - V_{i,imag}^{k+1}| < tolerancia \quad (8)$$

Newton-Raphson (NR)

El método transforma las ecuaciones no lineales, las cuales representan, tanto las potencias activas como las potencias reactivas, en ecuaciones lineales.

Las iteraciones requeridas para la convergencia de la solución son independientes del tamaño del sistema a analizar [9].

Formulación del método

Las potencias calculadas se determinan mediante las siguientes ecuaciones según [3].

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

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

Para el cálculo de los errores de potencias según [9] se emplean las siguientes ecuaciones.

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,cal} \quad (11)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,cal} \quad (12)$$

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} & \Delta Q_i \quad (14) \\ = & Q_{i,prog} \\ & - V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned}$$

Los valores de corrección tanto de voltaje como de ángulo se determinan de la siguiente manera [9], [12]:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} = -[J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (15)$$

La matriz “J”, el jacobiano, se expresa como se muestra a continuación [9].

$$J = \begin{bmatrix} H & M \\ N & L \end{bmatrix} \quad (16)$$

Los componentes de la matriz se pueden dividir en dos grupos: aquellos que están en la diagonal principal y aquellos que son ajenos a esta [9].

Las ecuaciones para establecer los valores de los elementos que se encuentran dentro de la diagonal principal son las siguientes [12]:

$$H_{ii} = V_i^2 B_{ii} + Q_i \quad (17)$$

$$N_{ii} = -V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (18)$$

$$M_{ii} = V_i^2 G_{ii} - P_i \quad (19)$$

$$L_{ii} = V_i^2 B_{ii} - Q_i \quad (20)$$

Fuera de la diagonal principal [9].

$$H_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (21)$$

$$\begin{aligned} N_{ij} = & -V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} \\ & - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} M_{ij} = & V_i V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} \\ & - B_{ij} \sin \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} L_{ij} = & -V_i V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} \\ & - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned} \quad (24)$$

Con los datos calculados se emplea la ecuación 15, de esta manera se determinan los valores de las correcciones de magnitud de voltaje, así como los de ángulo [9].

Los resultados son empleados en las ecuaciones 25 y 26 para corregir los datos. [9], [12].

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \quad (25)$$

$$V^{k+1} = V^k (1 + (\Delta V/V^{k+1})) \quad (26)$$

2.2 Variación de voltaje y armónicos enfocados a la calidad de energía

Se lleva a cabo una evaluación de los niveles de voltaje en un sistema eléctrico y se examinan las desviaciones de las ondas de voltaje respecto a la forma de onda sinusoidal ideal con frecuencia fundamental [13].

Desviación de voltaje

Se refiere a la desviación que tiene el voltaje en un nodo con respecto al voltaje nominal o deseado. Se puede analizar esta desviación mediante los índices de desviación máxima de voltaje, así como con la desviación promedio de voltaje [12], [14], [15].

Las ecuaciones de los índices expuestos en [12], [15] se muestran a continuación.

$$DPV = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{di} - V_i|}{n} \quad (27)$$

$$DMV = \max |V_{di} - V_i| \quad (28)$$

Distorsión de la forma de onda:

Es la diferencia entre una onda sinusoidal ideal y la forma de onda real que adquiere una señal de voltaje o corriente en estado permanente [16].

Los armónicos producen esta distorsión en la señal. Un armónico es el elemento sinusoidal de una señal compleja cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental.

Esta incorporación de señales con frecuencias múltiples de la fundamental se produce por la inyección de corrientes no lineales producidas por las cargas no lineales [1].

La presencia de esta distorsión en la señal original puede llegar a producir problemas representativos entre los cuales se tienen las fallas y sobrecalentamiento de los equipos, falsos positivos en las activaciones de los relés de protección [1].

Se determina la cantidad de armónicos presentes en una red mediante la distorsión armónica THD, la cual se calcula según [17] de la siguiente manera:

$$\%THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^H (V_i)^2}{V_n}} * 100\% \quad (29)$$

Donde:

- V_I Magnitud de voltaje a frecuencia fundamental
- V_i Magnitud del voltaje del armónico para la frecuencia i
- H Orden del armónico más alto

2.3 Pérdidas en el Sistema

Las pérdidas de potencia en los alimentadores, también conocidas como efecto pérdidas por efecto Joule, se calculan mediante el cuadrado de la corriente que fluye a través de un conductor multiplicado por su resistencia [18], [19]. La representación gráfica se expone en la Figura 2.

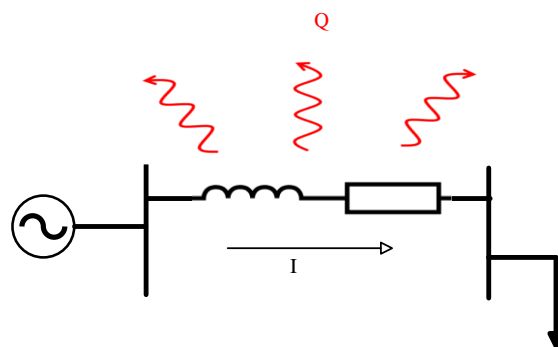


Figura 2. Pérdida de potencia en los alimentadores.

Se lo calcula mediante la siguiente expresión.

$$P_{potencia} = I^2 * R \quad (30)$$

Si a esta potencia consumida en forma de calor se multiplica por el tiempo en el que se encuentra circulando la corriente, se tiene la energía disipada en forma de calor [20].

De esta manera se tiene la siguiente expresión.

$$P_{Energía} = I^2 * R * t \quad (31)$$

Donde:

- $P_{potencia}$ Pérdidas de potencia en el conductor (W)
- $P_{Energía}$ Pérdidas de energía por efecto Joule (kWh)
- I Corriente circulante por el conductor (A)
- R Resistencia del conductor (Ω)
- t Tiempo por el que la corriente circula (seg)

Estas pérdidas no solo se manifiestan en los alimentadores, también lo hacen en las bobinas de los transformadores, provocando un calentamiento en los conductores [18].

Un mal dimensionamiento tanto de los transformadores como de las líneas, pueden

provocar una sobrecarga en los equipos, lo que provocan pérdidas en el sistema [21].

Las distancias de los primarios, así como el calibre también son una causa de las pérdidas en los alimentadores, debido a que la resistencia de estos varía en función de la sección y la longitud del conductor [21], [22].

De la misma manera se generan pérdidas en los conductores por un exceso de demanda en horas pico, o por un consumo provocado por las necesidades de aclimatación en zonas calientes; debido a que la corriente circulante excede a la corriente nominal del conductor [21], [22].

Una excesiva corriente circulando por el alimentador, provocando pérdidas y caídas de voltaje en las redes primarias se da por la falta de compensación de potencia reactiva, es decir que toda la potencia que la carga demanda es abastecida por el alimentador primario [21].

Por otro lado, la incidencia de armónicos en la red puede provocar pérdidas, debido a que los armónicos pueden causar una potencia aparente adicional a la prevista en la carga, provocando de esta manera que los transformadores y líneas lleguen a su capacidad instalada antes de lo previsto [23].

Las pérdidas por efecto corona en las redes de distribución se pueden despreciar, debido a que el nivel de tensión al que se transmite la energía eléctrica en los alimentadores se encuentra en un rango de 0.6 y 40 kV [20].

Las pérdidas excesivas de potencia dentro del sistema provocan inconvenientes en el adecuado funcionamiento del sistema de distribución, provocando a la empresa distribuidora, elevados costos de operación. Es por ello por lo que se realizan investigaciones detalladas para conseguir reducir al máximo estas pérdidas [24].

2.4 Compensación reactiva en redes de distribución

La compensación en el sistema eléctrico contempla varios métodos de solución a problemas que se pueden presentar en el mismo, algunos de los métodos implementados son los siguientes [25]:

- Bancos inductivos o capacitivos
- D-STATCOM
- FACTS

Los dispositivos de compensación reactiva acoplados dentro de un sistema eléctrico de distribución realizan un mejoramiento en el perfil de voltaje del sistema, reducen tanto las corrientes que circulan por los alimentadores, así como las pérdidas de potencia; y suministran una mayor estabilidad a la red eléctrica [26].

2.4.1 Compensación Shunt

La compensación shunt o en derivación se realiza mediante el uso de capacitores o reactores con el objetivo de realizar una mejora en el perfil de voltaje. Al implementar el uso de capacitores, estos suministran corriente con el fin de contrarrestar la corriente que se presenta en desfase producida por las cargas inductivas presentes en el sistema [26], [27].

Por otro lado, al incorporar reactores, de naturaleza inductiva, en la compensación se implementa para reducir la presencia de sobrevoltajes en las redes eléctricas extensas producidas por el efecto Ferranti cuando las redes presentan una carga nula o muy baja [28].

2.4.2 Compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC)

Son aquellos dispositivos que presentan un comportamiento de una reactancia variable que se encuentra conectada en derivación. La acción de control de conexión y desconexión se realiza mediante tiristores, actuando de manera instantánea [29], [30].

Los dispositivos SVC se utilizan con el propósito de mejorar la estabilidad del

voltaje, así como para mejorar el factor de potencia, al compensar la regulación de tensión mediante el control de la compensación reactiva [26], [30].

2.4.3 D-STATCOM

Compensador estático de potencia para sistemas de distribución, es un dispositivo tipo FACTS que permite el control de la potencia reactiva [28], [31].

El funcionamiento se basa en una fuente convertidora de voltaje (VSC), la cual requiere de un transformador de acoplamiento para su conexión a la red, la conexión del dispositivo se realiza en paralelo a la red de distribución o a una carga puntual [28], [31].

Estos dispositivos son capaces tanto de suministrar como consumir potencia reactiva, sin embargo, no pueden proporcionar ni consumir potencia activa [28], [31].

El controlador del dispositivo permite la regulación del voltaje de corriente directa mediante la conmutación de la fuente convertidora de voltaje, con el objetivo de realizar una acción de compensación de la energía reactiva presente en la carga [25].

2.5 Algoritmo JAYA

Algoritmo JAYA, propuesto por Venkata Rao en [32], se fundamenta en la idea de que la solución obtenida para un problema dado debe dirigirse hacia la solución más favorable y evitar la solución menos favorable [32].

Es un algoritmo de tipo poblacional que no necesita ni depende de parámetros de control específicos y, solo requiere parámetros de control comunes como el número de variables de diseño del algoritmo, la cantidad máxima de generaciones y el tamaño de la población [32]–[34].

En el algoritmo durante cada iteración, se realizan modificaciones en las variables de diseño, basadas en la mejor y peor solución obtenidas hasta ese momento, y se

aceptan o rechazan estas modificaciones en función de si mejoran o empeoran la solución actual [32], [33].

Esto se realiza mediante las siguientes consideraciones:

Se tiene una función objetivo a ser minimizada o maximizada $f(x)$. En cualquier iteración i , se tiene una cantidad " m " de variables de diseño ($j = 1, 2, \dots, m$), y una cantidad " n " de soluciones candidatas ($k = 1, 2, \dots, n$). Se considera que la mejor solución candidata obtiene el mejor valor en la función objetivo $f(x)$, el cual es denominado como $f(x)_{best}$; y la peor solución candidata obtiene el peor valor en $f(x)$, el cual se denomina $f(x)_{worst}$ [32].

Sea $X_{j,k,i}$ es el valor de la j –ésima variable para el k –ésimo candidato durante la i –ésima iteración, entonces este valor se modifica según lo siguiente [32].

$$X_{j,k,i}^{nuevo} = X_{j,k,i} + r1_{j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - r2_{j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|) \quad (32)$$

Donde:

$X_{j,k,i}^{nuevo}$	Es el valor actualizado $X_{j,k,i}$
$X_{j,best,i}$	Es el valor de la variable j para el mejor candidato durante la i –ésima iteración
$X_{j,worst,i}$	Es el valor de la variable j para el peor candidato durante la i –ésima iteración
$r1_{j,i}$	Es un número aleatorio para la j –ésima variable durante la i –ésima iteración en el rango $[0,1]$
$r2_{j,i}$	Es un número aleatorio para la j –ésima variable durante la i –ésima iteración en el rango $[0,1]$

$X_{j,k,i}^{nuevo}$ se acepta si da un mejor valor en la función $f(x)$. Al final de la iteración, se

mantiene todos los valores de la función aceptados y estos valores se convierten en la entrada para la siguiente iteración [32].

El término $+r1_{j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|)$ indica la tendencia de la solución a acercarse a la mejor solución, y el término $-r2_{j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|)$ indica la tendencia de la solución a evitar la peor solución [32], [33].

A continuación, se presenta el algoritmo:

Algoritmo JAYA	
Inicio	
Paso 1:	Inicializar PS: Tamaño de Población NVD: Número de variables de diseño TER_CR: Criterio de terminación
Paso 2:	Evaluación
Hasta que el criterio de terminación no sea satisfecho, repetir los pasos 2 al 5	
Paso 3:	Identificar la mejor y peor solución
Paso 4:	Modificar la solución basado en la mejor y peor solución $X_{j,k,i}^{nuevo} = X_{j,k,i} + r1_{j,i}(X_{j,best,i} - X_{j,k,i}) - r2_{j,i}(X_{j,worst,i} - X_{j,k,i})$
Paso 5:	If $X_{j,k,i}^{nuevo}$ es mejor que $X_{j,k,i}$ Actualizar la solución anterior. else Mantener la solución anterior End if
Paso 6:	Mostrar el óptimo resultado.
Fin	

3 Formulación del problema

La implementación de compensación reactiva mediante D-STATCOM se lo realiza para reducir en un sistema eléctrico, tanto la desviación de voltaje, como las pérdidas de potencia.

Sin embargo, esta implementación de compensación reactiva puede resultar contraproducente debido a la naturaleza no lineal del dispositivo, provocando

alteraciones en la red. Para dar solución a lo mencionado, se implementa un análisis mediante penetración armónica simple.

3.1 Modelación: optima ubicación y dimensionamiento del D-STATCOM

El dimensionamiento, así como la ubicación óptima de D-STATCOM se lo realiza mediante el algoritmo JAYA en conjunto con los solucionadores de Newton-Raphson propuestos por MATPOWER

Para la implementación del algoritmo JAYA se emplearon 2 variables, la primera representa la potencia que inyecta el D-STATCOM y la segunda la barra en la que se encuentra instalada, dichas variables toman valores aleatorios en la población inicial.

La función objetivo se enfoca en la disminución de pérdidas de potencia, lo que implica también una mejora en el perfil del voltaje. Como el problema presenta un enfoque multiobjetivo en el cual se presenta la reducción tanto de la desviación del voltaje como la de pérdidas de potencia, se implementa una función objetivo mediante una suma ponderada expresada en la siguiente ecuación.

$$FO: \min (P1 * DPV + P2 * |S_{perdida}| / |S_{perdida_inicial}|) \quad (33)$$

Donde:

$|S_{perdida}|$ Es el módulo de la potencia aparente perdida.

$$\left| \sum_{i=1}^n Sg_i - \sum_{j=1}^m Scarga_j \right|$$

$P1 P2$ Es el valor de los pesos

DPV Es la desviación promedio de voltaje

El flujo de potencia se resuelve mediante Newton-Raphson, el cual será resuelto mediante la herramienta MATPOWER.

Las restricciones se presentan a continuación

$$V_{min} \leq V_j \leq V_{max} \quad (34)$$

$$Q_{min} \leq Q_{DST} \leq Q_{max} \quad (35)$$

$$\max THD \leq THD_{max} \quad (36)$$

En la ecuación 33 se presenta el voltaje mínimo y máximo que pueden adquirir las barras del sistema. Se tiene como voltaje máximo el 1.10 [p.u] y como voltaje mínimo un 0.90 [p.u], estos valores se disponen con la finalidad de realizar una adecuada regulación de voltaje, así como una adecuada operación del sistema.

Los límites establecidos en la ecuación 34 son los límites máximos de potencia reactiva que puede entregar o absorber el DSTATCOM. El valor máximo se obtiene al sumar la potencia reactiva de todo el sistema, mientras que el valor mínimo se calcula como el negativo de la potencia máxima. Esto se realiza con la finalidad de obtener un adecuado dimensionamiento del dispositivo.

El límite máximo de THDv considerado para el sistema es el de 3%, considerando un margen de 2 puntos porcentuales, respecto al 5% establecido en el estándar IEEE 519.

3.2 Pseudocódigo para determinar el dimensionamiento y ubicación del DSTATCOM mediante el algoritmo JAYA

Algoritmo JAYA enfocado al dimensionamiento y ubicación del D-SATCOM

Inicio

Paso 1: Inicializar
 TER_CR: Número máximo de generaciones
 PS: Tamaño de Población
 Determinar los valores de P1 P2 correspondientes a los pesos

NVD:

- Potencia reactiva del D-STATCOM
- Número del nodo en donde se ubica

Hasta que el criterio de terminación no sea satisfecho, repetir los pasos 2 al 5

Paso 2: Evaluación
 Determinar los valores de la población de las NVD considerando los límites de las restricciones de potencia del D-STATCOM
 Realizar el flujo de potencia mediante Newton-Raphson
 Determinar

- Pérdidas de potencia
- Desviación promedio de voltaje

Con los datos de la ubicación y potencia del D-STATCOM y los voltajes de cada nodo determinados por el flujo de potencia calcular mediante penetración armónica simple el THD_{max}

Evaluar la función objetivo

$$Fo: P1 * |(v_{prom} - 1)| + P2 * (S_{perdida})$$

Paso 3: Identificar la mejor y peor solución
 La mejor solución es cuando F sea mínimo
 La peor solución es cuando F sea máximo

Paso 4: Modificar la solución basado en la mejor y peor solución

$$X_{j,k,i}^{nuevo} = X_{j,k,i} + r1_{j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,k,i}|) - r2_{j,i}(X_{j,worst,i} - |X_{j,k,i}|)$$

Paso 5: If $X_{j,k,i}^{nuevo}$ es mejor que $X_{j,k,i}$
 Actualizar la solución anterior.
 else
 Mantener la solución anterior
 End if

Paso 6: Mostrar el óptimo resultado.

Fin

Las variables de diseño, empleadas en el modelo matemático propuesto son dos.

- Potencia del DSTATCOM
- Nodo en el que se conecta el DSTATCOM

El rango de potencia se explica en el apartado 3.1 en la sección de restricciones, por otro lado, el rango de la segunda variable de diseño es la cantidad de nodos que presenta el sistema.

El tamaño de la población, así como el número de generaciones o iteraciones se definen por el usuario, en este caso se implementó una población de 100 y 100 iteraciones, éste último también es implementado como criterio de terminación, es decir que el algoritmo concluye cuando se han evaluado todas las iteraciones definidas por el usuario. Otro criterio de finalización es cuando toda la población llega a ser la misma.

Para determinar los valores de la distorsión armónica total de voltaje en cada barra del sistema se realizó una subrutina, la cual se presenta en el siguiente apartado.

3.3 Pseudocódigo para determinar el THD por la incorporación del D-STATCOM

Mediante la aplicación de penetración armónica simple, o no iterativa, se determinan los valores de voltaje armónico en cada nodo, así como, la distorsión total de voltaje.

Pseudocódigo Penetración armónica no iterativa y cálculo de THD_v

Inicio

Paso 1: Inicializar
Obtener los valores del flujo de potencia

- V: Voltaje de todos los nodos
- Q: Potencia reactiva del D-STATCOM
- BAR: Barra en la que se encuentra ubicado el D-STATCOM

Paso 2: Determinar como variables a

- V_i^h
- THD_v

Paso 3 Cálculo

Calcular la matriz Z_{bus}^h para cada frecuencia armónica.

- Se realiza la modelación de los elementos del sistema para análisis armónico

Calcular la corriente armónica en función del espectro armónico

considerado para el análisis y la corriente de carga del D-STATCOM

- $I_i^h = \frac{Q_{DST}}{V_i} * Espectro^h$

Calcular los voltajes para cada armónico en todos los nodos

- $V_i^h = Z_{bus}^h * I_i^h$

Calcular el THD_v índice de distorsión total de voltaje

- $\%THD_U = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^H (V_n)^2}{V_n}} * 100\%$

Fin

4 Casos de estudio

Se presentan y detallan los datos de los sistemas en donde se aplicará el modelo matemático propuesto. Los datos que se detallan son:

- Potencia base del sistema.
- Voltaje base del sistema.
- Resistencia de las líneas de distribución.
- Reactancia de las líneas de distribución.
- Potencia activa instalada en los nodos del sistema.
- Potencia reactiva instalada en los nodos del sistema.

4.1 Sistema de 34 barras

Para la modelación del sistema de 34 barras se implementaron los datos propuestos en [35].

El sistema propuesto tiene una potencia y voltaje base de 10 [MVA] y 11 [kV] respectivamente. La carga total del sistema conectada al sistema es de 4.636 [MW] y 2.873 [MVar]

A continuación, se tiene la representación del sistema radial de 34 barras.

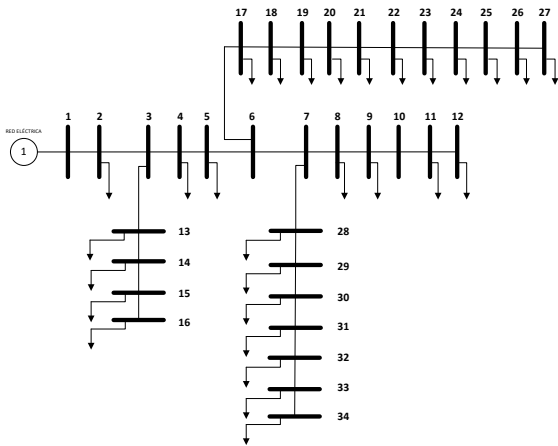


Figura 3. Esquema sistema de 34 barras IEEE

Los valores de reactancia, resistencia, así como los valores de las cargas instaladas en la red, son presentados en la siguiente tabla.

Tabla 1. Datos de líneas y cargas del sistema IEEE 34 barras

Nodo i	Nodo j	r [ohm]	x [ohm]	P [kW]	Q [kVAr]
1	2	0.117	0.048	0	0
2	3	0.107	0.044	230	142.5
3	4	0.164	0.046	0	0
4	5	0.150	0.042	230	142.5
5	6	0.150	0.042	230	142.5
6	7	0.314	0.054	0	0
7	8	0.210	0.036	0	0
8	9	0.314	0.054	230	142.5
9	10	0.210	0.036	230	142.5
10	11	0.131	0.023	0	0
11	12	0.105	0.018	230	142.5
3	13	0.157	0.027	137	84
13	14	0.210	0.036	72	45
14	15	0.105	0.018	72	45
15	16	0.052	0.009	72	45
6	17	0.179	0.050	13.5	7.5
17	18	0.164	0.046	230	142.5
18	19	0.208	0.047	230	142.5

Nodo i	Nodo j	r [ohm]	x [ohm]	P [kW]	Q [kVAr]
19	20	0.189	0.043	230	142.5
20	21	0.189	0.043	230	142.5
21	22	0.262	0.045	230	142.5
22	23	0.262	0.045	230	142.5
23	24	0.314	0.054	230	142.5
24	25	0.210	0.036	230	142.5
25	26	0.131	0.023	230	142.5
26	27	0.105	0.018	230	142.5
7	28	0.157	0.027	137	85
28	29	0.157	0.027	75	48
29	30	0.157	0.027	75	48
30	31	0.157	0.027	75	48
31	32	0.210	0.036	57	34.5
32	33	0.157	0.027	57	34.5
33	34	0.105	0.018	57	34.5

4.2 Sistema de 33 barras

El sistema de 33 barras tiene como voltaje y potencia base de 12.66 [kV] y 10 [MVA] respectivamente. La carga instalada total en el sistema es de 3.715 [MW] y 2.3 [MVar].

Los valores de reactancia, resistencia de las líneas y las cargas utilizadas para realizar el cálculo del flujo de potencia son presentadas en tabla que se encuentra a continuación.

Tabla 2. Datos de líneas y cargas del sistema IEEE 33 barras.

Nodo i	Nodo j	r [ohm]	x [ohm]	P [kW]	Q [kVAr]
1	2	0.0922	0.047	100	60
2	3	0.493	0.2511	90	40
3	4	0.366	0.1864	120	80
4	5	0.3811	0.1941	60	30

Nodo i	Nodo j	r [ohm]	x [ohm]	P [kW]	Q [kVAr]
5	6	0.819	0.707	60	20
6	7	0.1872	0.6188	200	100
7	8	0.7114	0.2351	200	100
8	9	1.03	0.74	60	20
9	10	1.044	0.74	60	20
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

La siguiente figura ilustra la estructura del sistema mediante su diagrama unifilar.

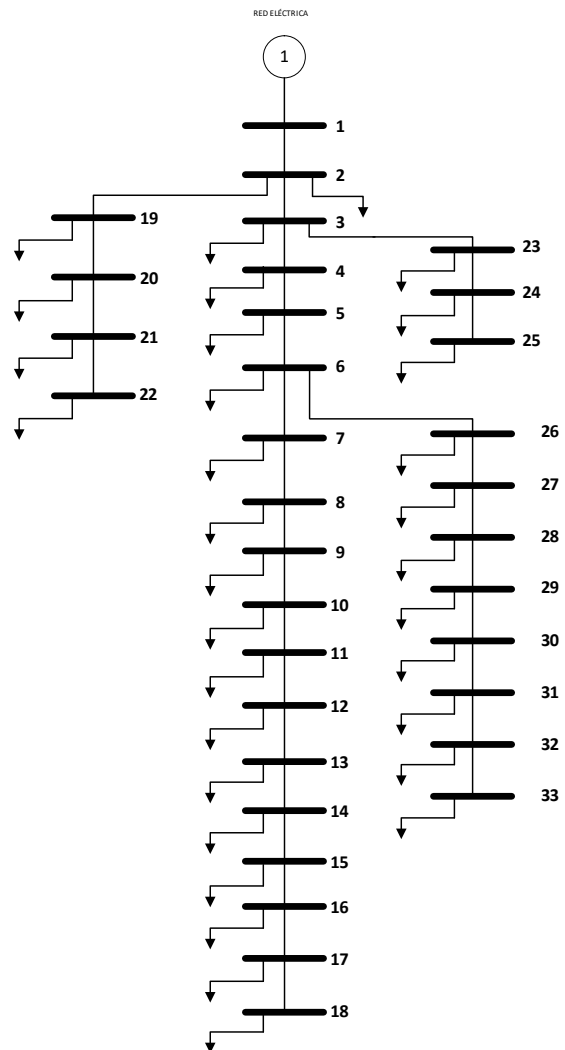


Figura 4. Esquema sistema de 33 barras

5 Análisis de resultados

Se exponen los resultados conseguidos en el caso inicial y se explora el impacto de la ubicación del D-STATCOM tanto en la reducción de pérdidas de potencia, como el mejoramiento del perfil de voltaje. Además, se examina cómo la incorporación del D-STATCOM afecta la distorsión armónica total (THDv) en la red de distribución.

5.1 Sistema de 33 barras

Escenario 1: Situación inicial o base

Los resultados del flujo de potencia en el sistema sin la presencia del D-STATCOM

se encuentran detallados en la sección de anexos.

En la tabla 3, se exponen los resultados obtenidos de las pérdidas de potencia tanto activa como reactiva, así como las desviaciones promedio y máxima del voltaje.

Tabla 3. Desviación del voltaje y pérdidas de potencia

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0869	0.0515	202.68	135.51

Con el objetivo de reducir los indicadores mencionados se propone la ubicación de un D-STATCOM en la red.

Escenario 2: Óptima ubicación y dimensionamiento sin la restricción de inyección de armónicos

Al implementar el algoritmo JAYA para determinar tanto la ubicación como el dimensionamiento del D-STATCOM de manera óptima, sin la restricción de inyección de armónicos, se tienen los siguientes resultados.

Tabla 4. Ubicación y Potencia del D-STATCOM.

	Nodo	Potencia Reactiva [kVA]
D-STATCOM	30	1300

La ubicación del dispositivo en la barra 30 resulta ser una estrategia efectiva para mejorar el perfil de voltaje y reducir las pérdidas de potencia en el sistema. Estas mejoras se evidencian en los resultados presentados en la siguiente tabla:

Tabla 5. Indicadores con el sistema compensado

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Compensado sin restricción de armónicos	0.0740	0.0395	143.68	96.48

Para el análisis de armónicos se implementa un espectro armónico característico de un convertidor de 6 pulsos. En la siguiente figura se ilustra el espectro armónico del convertidor.

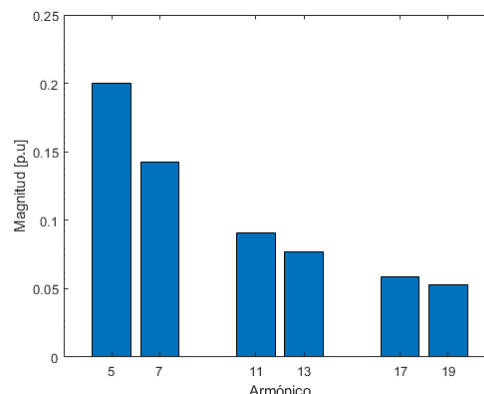


Figura 5. Espectro de magnitud de convertidores de 6 pulsos

Mediante penetración armónica simple se determina el THDv obteniendo los resultados expuestos en la gráfica que se presenta a continuación.

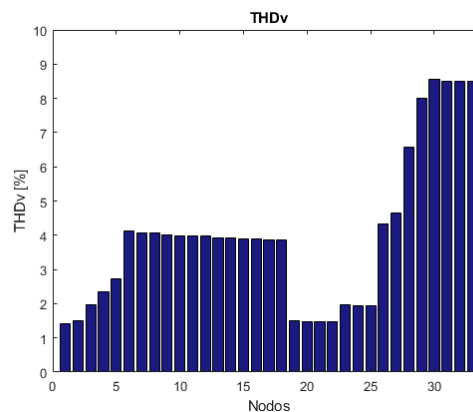


Figura 6. THDv de las barras al agregar la compensación.

Como se puede observar existe una distorsión del voltaje mayor al 3%, por lo que se considera necesario incluir la restricción de inyección de armónicos.

El comportamiento de la población mediante la cual se determinó la ubicación y dimensionamiento del DSTATCOM se presenta en la siguiente imagen. El círculo

verde representa la partícula con la que se obtuvo el mejor resultado en la iteración anterior, por otro lado, el círculo rojo

representa la partícula con la que se obtuvo el peor resultado en la iteración anterior.

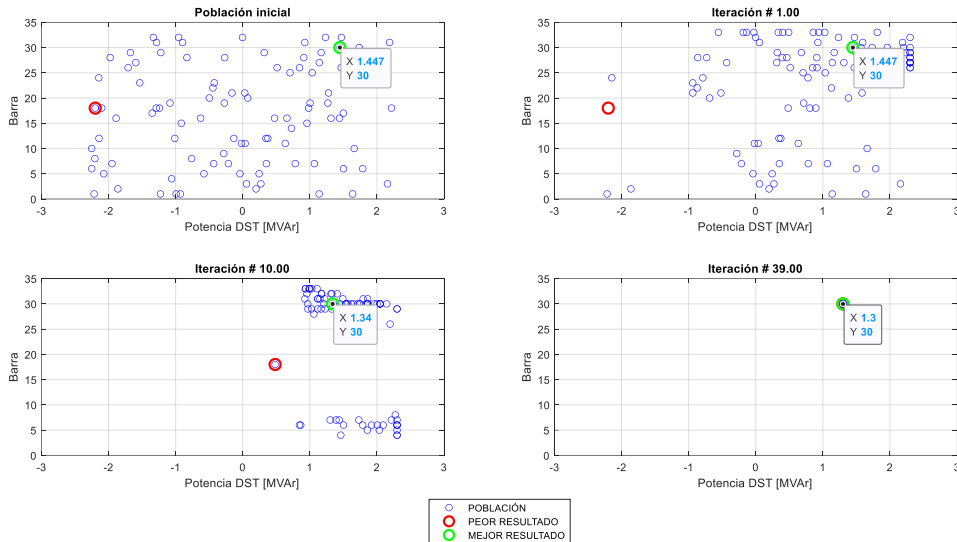


Figura 7. Comportamiento de la población en el sistema de 33 barras sin restricción de inyección de armónicos.

El comportamiento de la función objetivo en función de las iteraciones se presenta a continuación.

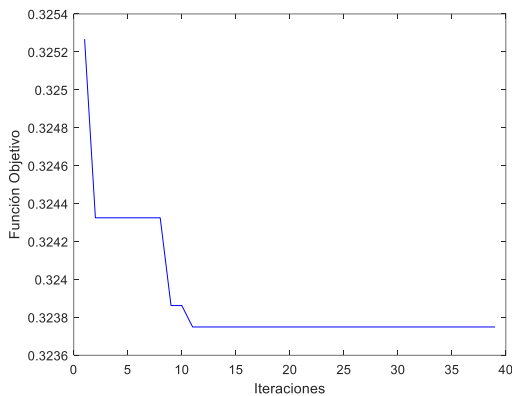


Figura 8. Evolución de la función objetivo en el sistema 33 barras sin restricción de inyección de armónicos.

Escenario 3: Óptima ubicación y dimensionamiento con la restricción de inyección de armónicos

Mediante el algoritmo propuesto con la restricción de inyección de armónicos se define la ubicación, así como la capacidad del D-STATCOM

Tabla 6. Ubicación y capacidad del D-STATCOM

	Nodo	Potencia Reactiva [kVA]
D-STATCOM	27	0.854

En el gráfico siguiente, se representa la potencia reactiva inyectada al sistema por el D-STATCOM, la potencia reactiva inyectada por la red y la potencia reactiva demandada por la carga.

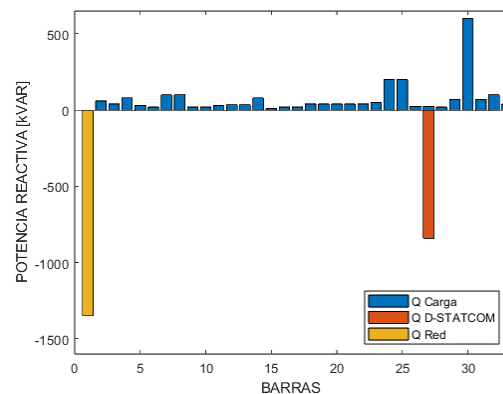


Figura 9. Abastecimiento y demanda de potencia reactiva.

El comportamiento de la población mediante la cual se determinó la ubicación y dimensionamiento del DSTATCOM se presenta en la siguiente imagen.

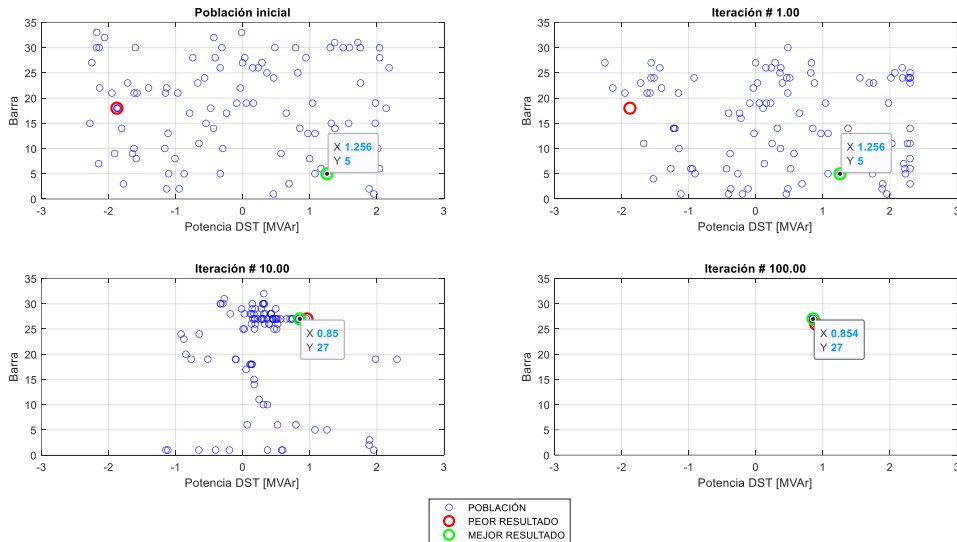


Figura 10. Comportamiento de la población en el sistema de 33 barras con restricción de inyección de armónicos.

Mediante este comportamiento se obtiene la evolución o minimización de la función objetivo, esta evolución se presenta en la siguiente figura.

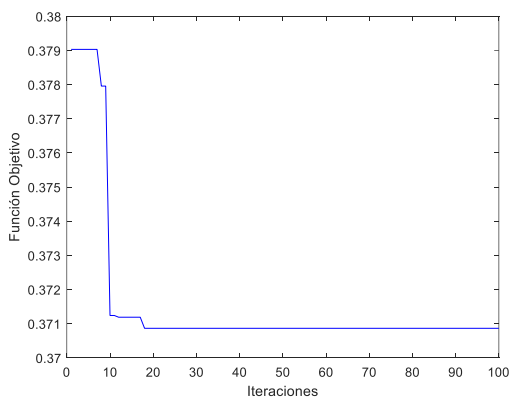


Figura 11. Evolución de la función objetivo en el sistema 33 barras con restricción de inyección de armónicos.

La representación gráfica de la ubicación del DSTATCOM determinada por el algoritmo JAYA, en el sistema de 33 barras, se presenta en el siguiente diagrama unifilar.

El círculo verde representa la partícula con la que se obtuvo el mejor resultado en la iteración anterior y el círculo rojo representa la partícula con la que se obtuvo el peor resultado en la iteración anterior.

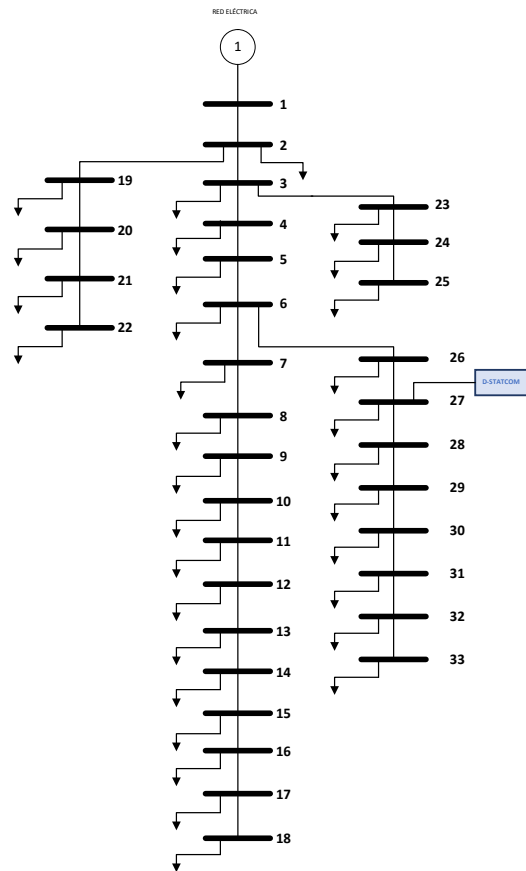


Figura 12. Ubicación óptima del dispositivo en el sistema de 33 barras.

Los valores obtenidos del voltaje en cada nodo mediante un flujo de potencia, al implementar la compensación reactiva se muestran en los anexos.

En la siguiente figura se puede observar la mejora del voltaje en cada nodo con respecto al caso inicial.

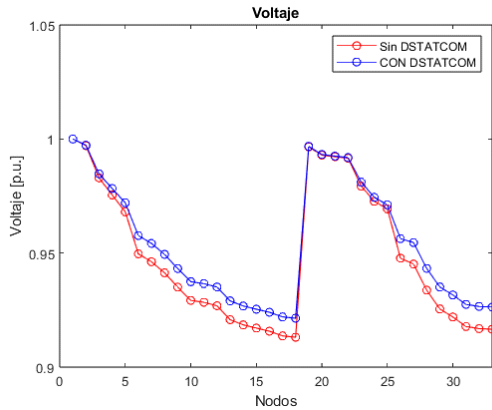


Figura 13. Voltaje en cada nodo

Esta mejora también se refleja en la reducción de los valores de desviación de voltaje, los cuales son presentados en la siguiente figura.

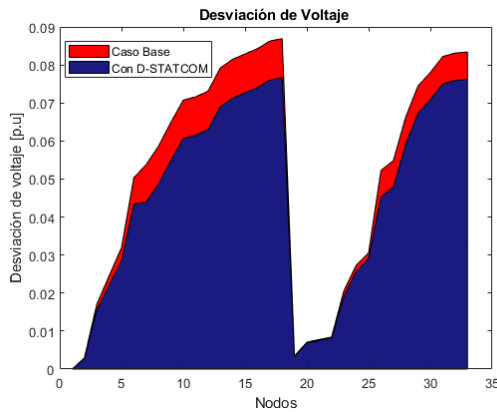


Figura 14. Desviación de voltaje

La tabla que se muestra a continuación presenta la reducción de los valores de desviación máxima (DMV) y desviación promedio de voltaje (DPV) en el sistema analizado.

Tabla 7. Comparación de la desviación de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema compensado

Escenario	DMV [p.u.]	DPV [p.u.]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0869	0.0515	202.68	135.51
Compensado con restricción	0.0785	0.0455	164.04	111.19

El sistema compensado con el D-STATCOM adicional a la mejora del perfil del voltaje expuesto con anterioridad, reduce la cantidad de pérdidas de potencia en la red tanto activa como reactiva, esto se puede evidenciar en la siguiente imagen.

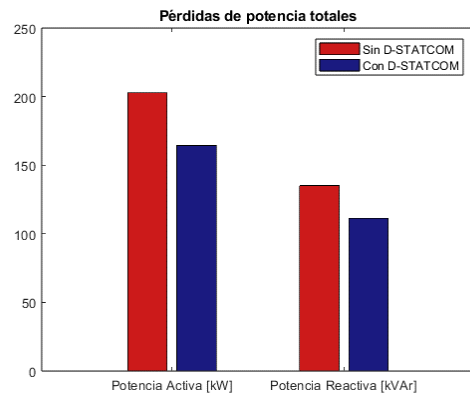


Figura 15. Pérdidas de potencia

El algoritmo restringe la inyección de armónicos a la red evitando que del THDv en cada barra sea superior al 3%. La amplitud de la corriente inyectada por el dispositivo para cada frecuencia se muestra a continuación.

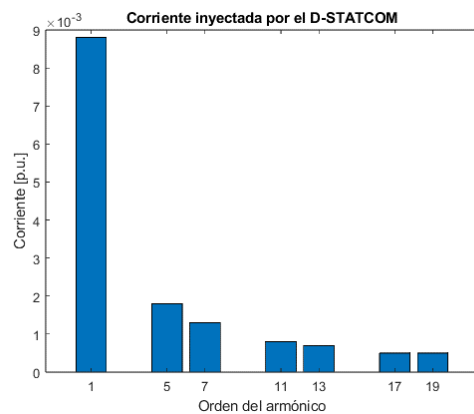


Figura 16. Corriente inyectada por el D-STATCOM

El resultado de THDv en todas las barras, al realizar la penetración armónica simple, se presenta en la siguiente figura.

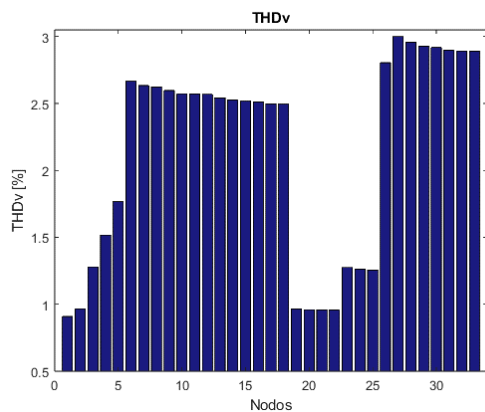


Figura 17. THDv del sistema compensado considerando la restricción de armónicos

Como se puede observar el THDv se mantiene dentro del límite del 3% establecido.

El factor de potencia, en la barra de generación, tiene una mejoría notable, debido a que parte de la potencia reactiva lo suministra el DSTATCOM.

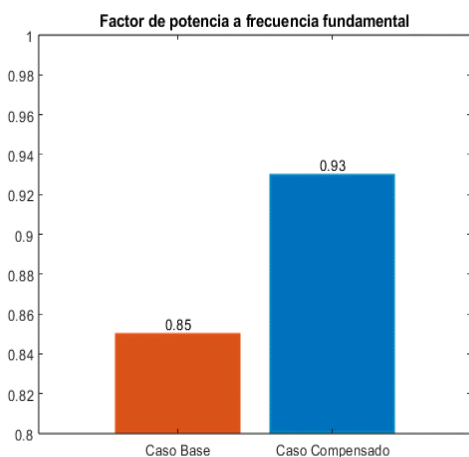


Figura 18. Factor de potencia escenario base y compensado en el sistema de 33 barras.

Como resumen, se proporciona en la siguiente tabla un registro de las desviaciones de voltaje, así como las pérdidas de potencia en los diferentes escenarios analizados. Evidenciando que la compensación reactiva es beneficiosa para abordar los problemas relacionados con los

perfiles de tensión y reducir las pérdidas de potencia.

Tabla 8. Resumen resultados 33 barras. Tabla comparativa de DMV, DPV, Pérdidas de P y Q.

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0869	0.0515	202.68	135.51
Compensado sin restricción	0.0740	0.0395	143.68	96.48
Compensado con restricción	0.0785	0.0455	164.04	111.19

5.2 Sistema de 34 barras

Escenario 1: Situación inicial o base

Los resultados del flujo de carga en el sistema sin la ubicación del D-STATCOM se presentan en los anexos.

Los datos obtenidos de la desviación máxima, promedio de voltaje, así como las pérdidas de potencia totales sin la compensación reactiva se presentan a continuación.

Tabla 9. Desviación de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0583	0.0342	221.72	65.11

Con el fin de disminuir los valores mencionados en la tabla anterior, se procede a implementar en el sistema un DSTATCOM.

Escenario 2: Óptima ubicación y dimensionamiento sin la restricción de inyección de armónicos

Al implementar el algoritmo JAYA para determinar el dimensionamiento del D-STATCOM, así como su ubicación, en el sistema de 34 barras, sin la restricción de

inyección de armónicos, se tienen los siguientes resultados.

Tabla 10. Ubicación óptima sin la restricción de armónicos en el sistema de 34 barras

	Nodo	Potencia Reactiva [MVar]
D-STATCOM	21	1.842

El siguiente comportamiento de la población dio como resultado los valores detallados en la tabla 10. El círculo verde representa la partícula con la que se obtuvo el mejor resultado en la iteración anterior y, por otro lado, el círculo rojo representa la partícula con la que se obtuvo el peor resultado en la iteración anterior.

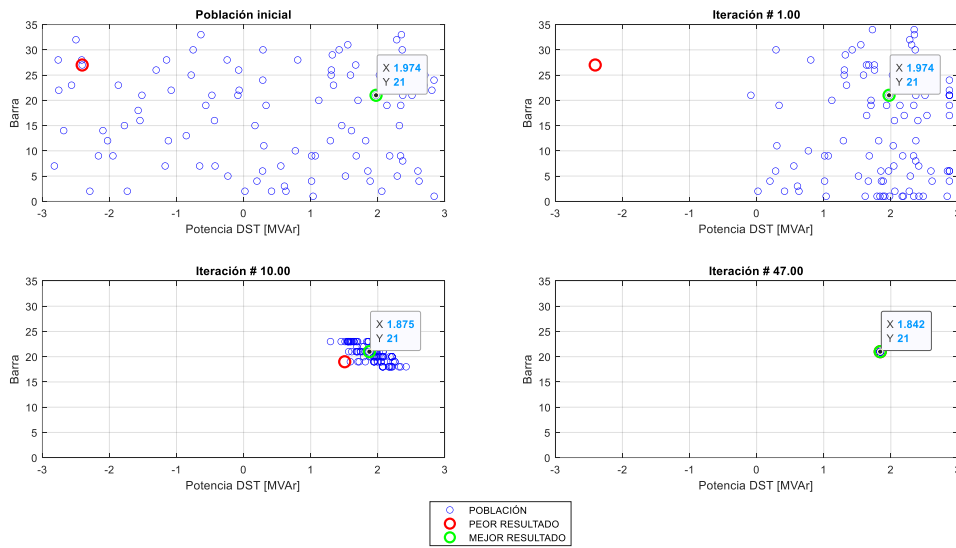


Figura 19. Comportamiento de la población en el sistema de 34 barras sin restricción de inyección de armónicos.

Este comportamiento de la población da como resultado la evolución de la función objetivo, su minimización se ilustra en la gráfica que se presenta a continuación.

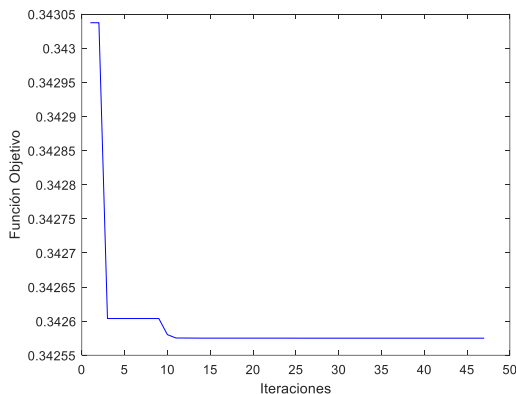


Figura 20. Minimización de la función objetivo en el sistema de 34 barras sin restricción de inyección de armónicos.

Al incorporar el dispositivo en la barra 21 se lograron reducir tanto las desviaciones

máximas y promedio de voltaje, como las pérdidas de potencia. Estos resultados son presentados en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 11. Desviaciones de voltaje y pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras compensado

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Compensado sin restricción de armónicos	0.0509	0.0302	173.42	50.029

Mediante penetración armónica no iterativa y considerando el mismo espectro armónico típico de un convertidor de 6 pulsos se realiza el cálculo del THDv en todas las barras del sistema. Estos resultados se representan en la siguiente figura.

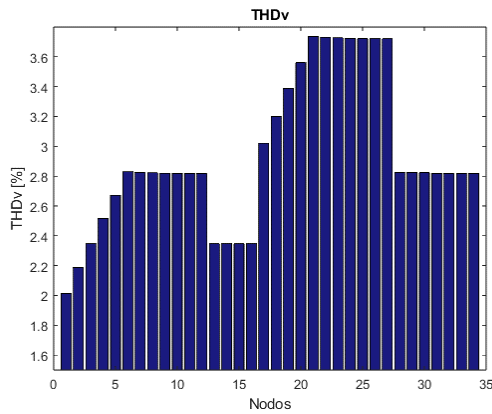


Figura 21. THDv del sistema de 34 barras.

La detección de una alta distorsión armónica de voltaje en el sistema destaca la importancia de incluir la restricción de armónicos.

Escenario 3: Óptima ubicación y dimensionamiento con la restricción de inyección de armónicos

El comportamiento de la población para determinar el dimensionamiento y la ubicación del DSTATCOM considerando la restricción de inyección de armónicos se representa a continuación.

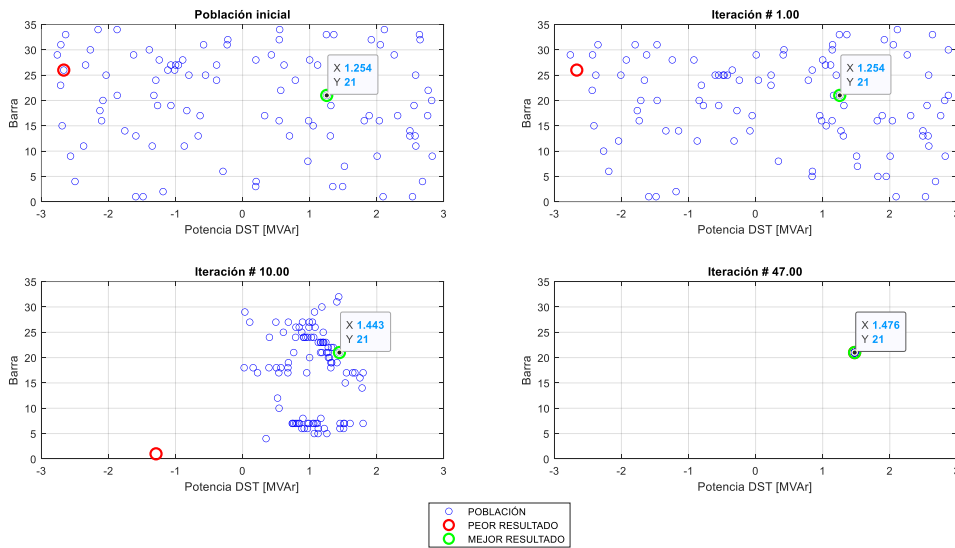


Figura 22. Comportamiento de la población en el sistema de 34 barras con restricción de inyección de armónicos

Esta conducta conlleva a la siguiente la minimización de la función objetivo.

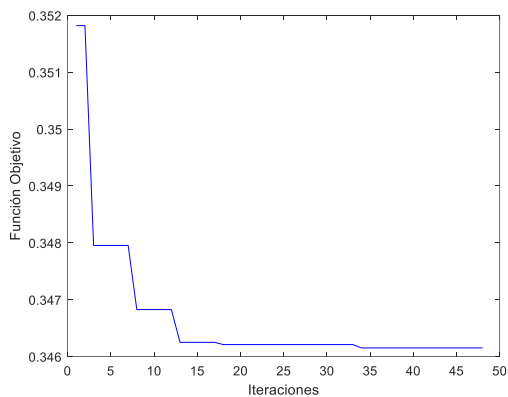


Figura 23. Minimización de la función objetivo en el sistema de 34 barras con restricción de inyección de armónicos.

Los resultados obtenidos de la ubicación y dimensionamiento del dispositivo se exponen en la tabla que se presenta a continuación.

Tabla 12. Ubicación y capacidad del D-STATCOM

	Nodo	Potencia Reactiva [MVA]
D-STATCOM	21	1.476

Se ilustra en la siguiente imagen la ubicación del dispositivo en el sistema de 34 barras.

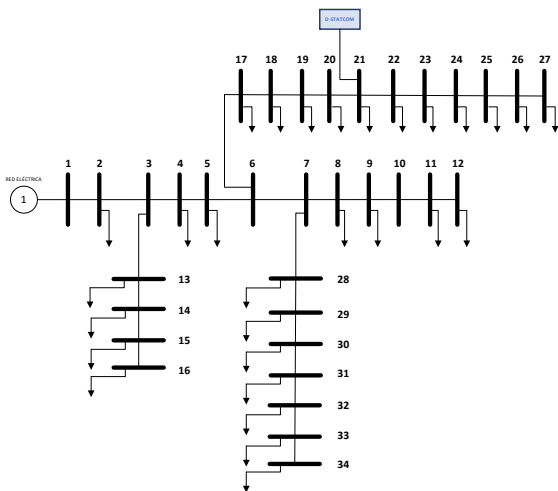


Figura 24. Óptima ubicación del D-STATCOM en el sistema de 34 barras.

La siguiente figura ilustra los valores de la potencia reactiva que consume la carga, y la potencia reactiva inyectada por el DSTATCOM, así como la entregada por la red eléctrica.

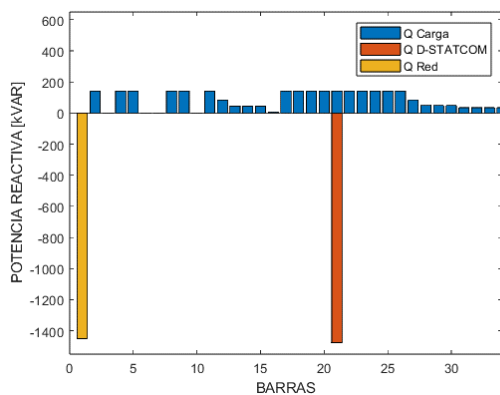


Figura 25. Potencia reactiva consumida e inyectada

Los valores obtenidos al realizar el flujo de carga en el sistema compensado se presentan en la sección de anexos.

Las figuras que se muestran a continuación presentan la mejora significativa del voltaje en cada nodo con respecto al caso inicial.

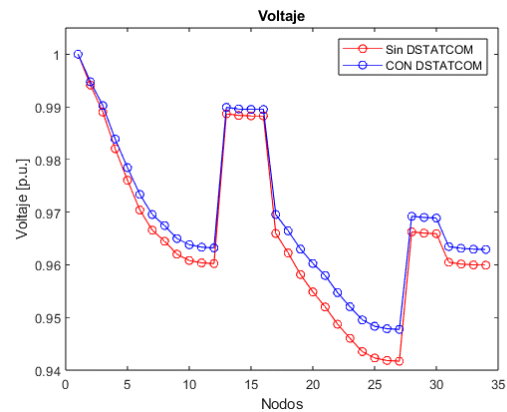


Figura 26. Perfil de voltaje previo y posterior a la compensación reactiva.

La mejora del perfil de voltaje también se evidencia al reducir la desviación de voltaje, la cual se presenta en la siguiente figura.

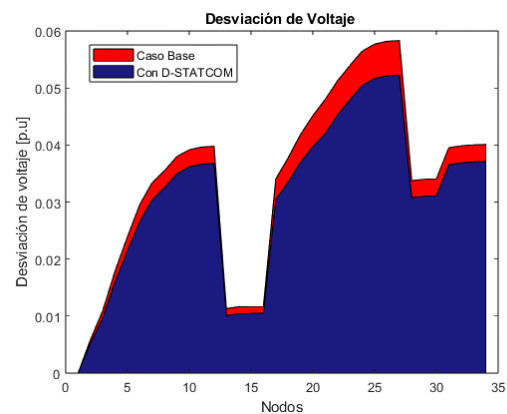


Figura 27. Desviación de voltaje previo y posterior a la compensación.

A continuación, se puede apreciar la reducción de la desviación máxima (DMV) y desviación promedio de voltaje (DPV) del sistema analizado.

Tabla 13. Indicadores del perfil de voltaje y las pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0583	0.0342	221.72	65.11
Compensado	0.0522	0.0309	174.895	50.759

El sistema compensado con el D-STATCOM adicional a la mejora del perfil del voltaje expuesto con anterioridad, reduce la cantidad de pérdidas de potencia

en la red tanto activa como reactiva, esto se puede evidenciar en la siguiente imagen.

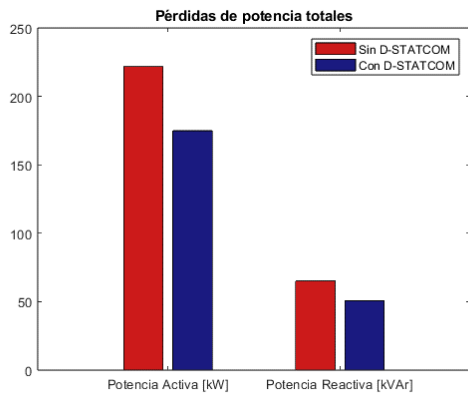


Figura 28. Pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras

El algoritmo restringe la inyección de armónicos a la red, evitando que del THDv en cada barra sea superior al 3%. En la siguiente imagen se presenta la amplitud de la corriente inyectada por el dispositivo para cada frecuencia.

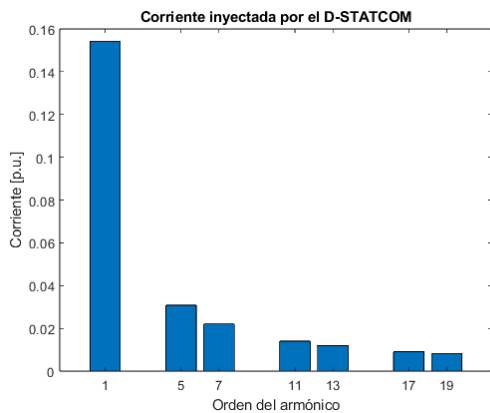


Figura 29. Corriente inyectada por el D-STATCOM en el sistema de 34 barras

También se exponen en la siguiente figura, los valores de THDv en cada barra del sistema.

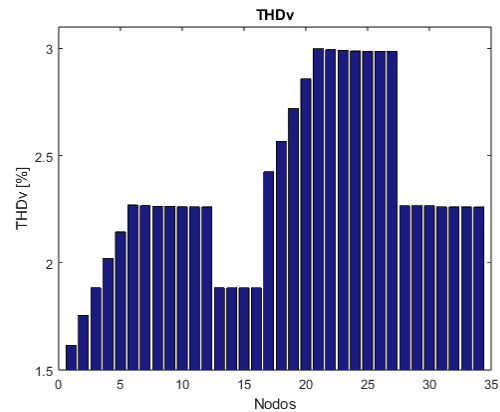


Figura 30. THDv en el sistema de 34 barras

El factor de potencia en la barra 1, la cual alimenta a todo el sistema, también se ve mejorado al realizar la compensación, esto se puede evidenciar visualmente en la siguiente imagen.

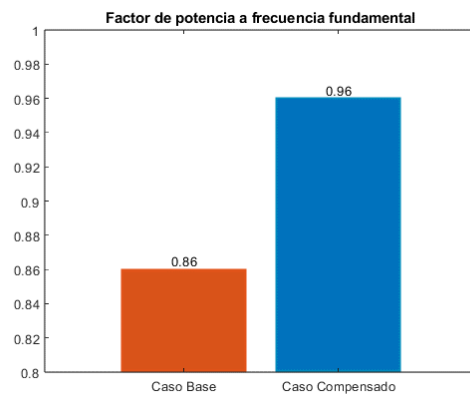


Figura 31. Factor de potencia en el sistema de 34 barras

El perfil de voltaje, así como las pérdidas de potencia en el sistema compensado sin la restricción de armónicos presenta una notable mejoría con respecto al compensado con la restricción. Sin embargo, al agregar la restricción, el sistema presenta una mejora sin que se vea afectado de manera considerable debido a que la distorsión se mantiene en los límites establecidos.

A continuación, se proporciona una tabla comparativa que muestra la mejora de los índices del perfil de voltaje, así como las pérdidas de potencia en comparación con su caso base.

Tabla 14. Comparación de los indicadores del perfil de voltaje y las pérdidas de potencia en el sistema de 34 barras

Escenario	DMV [p.u]	DPV [p.u]	P [kW]	Q [kVAr]
Base	0.0583	0.0342	221.72	65.11
Compensado sin restricción	0.0509	0.0302	173.42	50.029
Compensado con restricción	0.0522	0.0309	174.895	50.759

6 Trabajos futuros

Se recomienda continuar la investigación añadiendo la implementación de generación distribuida con energía renovable y analizando el desempeño del sistema de distribución y cómo la ubicación óptima del D-STATCOM puede contribuir a maximizar la penetración de energía renovable.

Una investigación adicional puede ser la modelación y análisis del D-STATCOM considerando la implementación de un filtro híbrido para la mitigación de armónicos.

Estudio de aspectos económicos: Analizar el impacto económico de la implementación y operación del D-STATCOM en comparación con los beneficios conseguidos en términos de minimización de pérdidas y mejora de la calidad de energía.

Para finalizar, se puede realizar una investigación de comparación de diferentes algoritmos de optimización para establecer el dimensionamiento y el lugar de conexión de varios DSTATCOM en sistemas de distribución.

7 Conclusiones

Mediante el análisis y la implementación del algoritmo JAYA, se determinó la ubicación óptima del DSTATCOM en los sistemas radiales de prueba de 33 y 34 barras IEEE, de esta manera se logró

compensar de manera óptima la potencia reactiva minimizando las pérdidas de potencia y mejorando el perfil de voltaje en el sistema.

Los resultados propuestos por el algoritmo JAYA proponen ubicar en la barra 27 y 21 un DSTATCOM que entregue 0.841 MVar y 1.46 MVar para compensar los sistemas de 33 y 34 barras respectivamente. Con esta implementación se logró reducir, respecto al caso inicial, en el sistema de 33 barras en un 11.7% la desviación promedio de voltaje, un 9.7% la desviación máxima de voltaje y se redujo la potencia aparente perdida en un 18.7%. En el sistema de 34 barras se logró reducir un 10.5% la desviación promedio de voltaje, un 9.7% la desviación máxima de voltaje y se redujeron en un 21.2% las pérdidas de potencia aparente.

Los resultados obtenidos indican que al incorporar los D-STATCOM en las ubicaciones óptimas determinadas mediante el algoritmo JAYA, se logra una mejora significativa en el perfil de voltaje y en la reducción de pérdidas de potencia de los sistemas de distribución utilizados en las pruebas.

Los D-STATCOM ubicados y dimensionados de manera óptima mediante el algoritmo JAYA mantuvieron el THDv máximo en un valor de 2.9993% y 2.998% para los sistemas de pruebas de 33 y 34 barras respectivamente, los cuales son inferiores al 3% propuesto como límite máximo.

8 Referencias

- [1] F. J. Vaca Dávalos, “Minimización de THD en redes de distribución eléctrica mediante implementación de control en espacio vectorial en inversores de potencia”, 2021, Consultado: el 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en:

- <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20693>
- [2] E. G. Pila Cárdenas, “Propuesta metodológica para el redimensionamiento de redes primarias de distribución debido a sistemas de recarga domiciliaria para vehículos eléctricos”, 2022. Consultado: el 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22794>
- [3] A. G. Ulloa de Souza, “Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución considerando la incidencia de armónicos.”, 2018. Consultado: el 7 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16314>
- [4] M. A. Rosen *et al.*, “Fuzzy-Based Fifteen-Level VSC for STATCOM Operations with Single DC-Link Voltage”, 2023, doi: 10.3390/su15076188.
- [5] M. A. Kallon, G. N. Nyakoe, y C. M. Muriithi, “Development of DSTATCOM Optimal Sizing and Location Technique Based on IA-GA for Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement in an RDN”, *International Journal of Electrical and Electronics Research*, vol. 9, núm. 4, pp. 96–106, 2021, doi: 10.37391/IJEER.090402.
- [6] S. A. Taher y S. A. Afsari, “Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm”, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 60, pp. 34–44, sep. 2014, doi: 10.1016/J.IJEPES.2014.02.020.
- [7] B. Khan, K. Redae, E. Gidey, O. P. Mahela, I. B. M. Taha, y M. G. Hussien, “Optimal integration of DSTATCOM using improved bacterial search algorithm for distribution network optimization”, *Alexandria Engineering Journal*, vol. 61, núm. 7, pp. 5539–5555, jul. 2022, doi: 10.1016/J.AEJ.2021.11.012.
- [8] S. Gao *et al.*, “Fast Decoupled Power Flow Calculation with Complementary Constraints of Reactive Power Generation and Node Voltage”, en *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/PESGM41954.2020.9281974.
- [9] E. R. Tenelema Yanez, “Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados”, 2019. Consultado: el 11 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17625>
- [10] M. Aghamohamadi, M. H. Haque, A. Mahmoudi, y J. K. Ward, “A novel directly-solvable non-iterative load flow model for radial distribution system studies”, *9th IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES 2020*, dic. 2020, doi: 10.1109/PEDES49360.2020.9379828.
- [11] A. Nur y A. Kaygusuz, “Load Flow Analysis With Newton–Raphson and Gauss–Seidel Methods in a Hybrid AC/DC System”, *IEEE Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 44, núm. 4, pp. 529–536, sep. 2021, doi: 10.1109/ICJECE.2021.3097447.
- [12] A. Aguila-Téllez, D. González, G. Gutiérrez, y L. Ortiz, “Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de

- distribución usando PSO”, *I+D Tecnológico*, vol. 18, núm. 1, pp. 50–68, jul. 2022, doi: 10.33412/IDT.V18.1.3219.
- [13] P. Atănăsoae y R. Pentiu, “Indices for the power quality monitoring in the Romanian Power Transmission System”, en *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2014, pp. 68–71. doi: 10.1109/ICHQP.2014.6842933.
- [14] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, y J. W. González, “Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review”, *Heliyon*, vol. 4, núm. 8, p. e00746, ago. 2018, doi: 10.1016/J.HELIYON.2018.E00746.
- [15] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, y G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm”, *Heliyon*, vol. 7, núm. 9, p. e08061, sep. 2021, doi: 10.1016/J.HELIYON.2021.E08061.
- [16] M. Holguín y D. Gómez Coello, “Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universidad Politécnica Salesiana”, 2010, Consultado: el 19 de octubre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/2110>
- [17] ARCONEL, “Regulación No. CONELEC 004/01 1”, 2012.
- [18] F. W. Tejeda Timaná, “Estudio de las pérdidas de energía eléctrica para estimar el balance de energía del alimentador de media tensión N° 2 de la subestación de Bagua Grande”, 2020. Consultado: el 18 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/50961>
- [19] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, y L. O. Matos, “Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, núm. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [20] T. Kevin y E. M. Caja, “Propuesta de una metodología para la determinación del nivel de las pérdidas de energía eléctrica en el alimentador A4602 del S.E Jauja de la UUNN valle Mantaro”, 2019. Consultado: el 18 de enero de . [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/8156>
- [21] J. A. Cedeño, “Análisis de pérdidas de energía eléctrica de CNEL EP. Unidad de negocios Milagro del periodo 2017 – 2018”, 2019. Consultado: el 18 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/43215>
- [22] D. H. C. Villacrés, C. F. C. Córdova, y N. R. L. Quinteros, “Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable”, *INGENIO*, vol. 4, núm. 1, pp. 17–26, jun. 2021, doi: 10.29166/INGENIO.V4I1.3067.
- [23] C. Lombard y A. P. J. Rens, “Evaluation of system losses due to harmonics in medium voltage distribution networks”, *2016 IEEE International Energy Conference, ENERGYCON 2016*, jul. 2016, doi: 10.1109/ENERGYCON.2016.7513919.
- [24] A. CARRASCO, “Análisis multi-objetivo para la minimización de pérdidas de potencias en un sistema de distribución usando técnicas de compensación.”, Quiro, 2021. Consultado: el 13 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20317>

- [25] LEONEL ESTEBAN FLORES IZA, “Mejora del factor de potencia mediante óptima ubicación y dimensionamiento de Dstatcom en redes de distribución aplicando el método de enjambre de partículas”, 2022. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23300>
- [26] L. F. Chillán Sacancela, “Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje”, 2020. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19125>
- [27] E. J. Mamani Barrera, “Planeamiento eléctrico para ubicación óptima de banco de compensación reactiva en redes de distribución radial para mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico la Yarada - Tacna”, 2022. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/15097>
- [28] B. A. Rojas Calderón, “Control de voltaje en redes de distribución mediante el uso de cambiadores de toma bajo carga empleando el software Open DSS”, 2022. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21871>
- [29] P. A. Achig Santamaria, “Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica.”, 2019. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16812>
- [30] G. A. C. ACOSTA, C. A. O. CADENA, A. PIZANO, J. M. L. G. MARTÍNEZ, y L. R. M. VILLALBA, “Modelado, Simulación y Validación de un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC)”.
- [31] C. F. Egúez Mendoza, “Mejoramiento de los perfiles de tensión en sistemas de distribución con la inclusión de un compensador estático de potencia reactiva (DSTATCOM).”, 2019. Consultado: el 11 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/16690>
- [32] R. Venkata Rao, “Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems”, *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 7, núm. 1, pp. 19–34, dic. 2016, doi: 10.5267/J.IJIEC.2015.8.004.
- [33] H. M. Pandey, “Jaya a novel optimization algorithm: What, how and why?”, *Proceedings of the 2016 6th International Conference - Cloud System and Big Data Engineering, Confluence 2016*, pp. 728–730, jul. 2016, doi: 10.1109/CONFLUENCE.2016.7508215.
- [34] M. Alsajri, M. A. Ismail, y S. Abdul-Baqi, “A review on the recent application of jaya optimization algorithm”, *Proceedings - 2018 1st Annual International Conference on Information and Sciences, AiCIS 2018*, pp. 129–132, feb. 2019, doi: 10.1109/AICIS.2018.00034.
- [35] A. K. Tagore y A. R. Gupta, “Impact of DG and D-STATCOM allocation in radial distribution system for reducing harmonics”, *8th*

*International Conference on
Computing, Communications and
Networking Technologies, ICCCNT
2017*, dic. 2017, doi:
10.1109/ICCCNT.2017.8204087.

8.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 15: Matriz de estado del arte.

Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA.																					
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA			
	AÑO DE PUBLICACIÓN	TÍTULO DEL ARTÍCULO	NÚMERO DE CITAS PUBLISH OR PERISH SCHOLAR GOOGLE	FLUJO DE POTENCIA	DESVIACIÓN DE VOLTAJE	ARMONICOS EN REDES ELÉCTRICAS	COMPENSACIÓN REACTIVA	REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA	IMPLEMENTACIÓN DE DSTATCOM EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	IMPACTO DE ARMONICOS EN LA RED	UBICACIÓN OPTIMA DE DSTATCOM	NIVEL DE VOLTAJE	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL DE VOLTAJE	PÉRDIDAS DE POTENCIA	UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE COMPENSACIÓN REACTIVA MEDIANTE ALGORITMOS	UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE COMPENSACIÓN REACTIVA MEDIANTE ALGORITMOS	UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE GENERACIÓN	UBICACIÓN OPTIMA DE DSTATCOM	DIMENSIONAMIENTO OPTIMO DE DSTATCOM	MEJORAR PERFILES DE VOLTAJE	REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS DE POTENCIA
1	2021	Minimización de THD en redes de distribución eléctrica mediante implementación de control en espacio vectorial en inversores de potencia	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2022	Propuesta metodológica para el redimensionamiento de redes primarias de distribución debido a sistemas de recarga domiciliaria para vehículos eléctricos	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2018	Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución considerando la incidencia de armónicos	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2023	Fuzzy-Based Fifteen-Level VSC for STATCOM Operations with Single DC-Link Voltage	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2021	Development of DSTATCOM Optimal Sizing and Location Technique Based on IA-GA for Power Loss Reduction and Voltage Profile Enhancement in an RDN	3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA.

6	2014	Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm	284	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
7	2022	Optimal integration of DSTATCOM using improved bacterial search algorithm for distribution network optimization	12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
8	2018	“Developed Analytical Technique for Optimal Placement and Sizing of DG and DSTATCOM in Radial Distribution Systems	14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
9	2020	“Fast Decoupled Power Flow Calculation with Complementary Constraints of Reactive Power Generation and Node Voltage	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
10	2019	Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados	8	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
11	2020	A novel directly-solvable non-iterative load flow model for radial distribution system studies	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
12	2021	Load Flow Analysis With Newton–Raphson and Gauss–Seidel Methods in a Hybrid AC/DC System	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
13	2022	Ubicación y dimensionamiento óptimo de Generación Distribuida en redes de distribución usando PSO	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA.

14	2014	Indices for the power quality monitoring in the Romanian Power Transmission System	10	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2018	Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review	86	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
16	2021	Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm	29	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
17	2010	Análisis de calidad de energía eléctrica en el nuevo campus de la Universida Politécnica Salesiana	41	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
18	2020	Estudio de las pérdidas de energía eléctrica para estimar el balance de energía del alimentador de media tensión N° 2 de la subestación de Bagua Grande	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
19	2019	Propuesta de una metodología para la determinación del nivel de las pérdidas de energía eléctrica en el alimentador A4602 del S.E Jauja de la UUNN valle Mantaro	1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA.

20	2019	Análisis de pérdidas de energía eléctrica de CNEL EP. Unidad de negocios Milagro del periodo 2017 – 2018	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
21	2021	Estabilidad de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica Monofásicas de Medio Voltaje, Aplicando Reguladores Quick Drive Tap en Estado Estable	3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2016	Evaluation of system losses due to harmonics in medium voltage distribution networks	14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
23	2021	Análisis multi-objetivo para la minimización de pérdidas de potencias en un sistema de distribución usando técnicas de compensación	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
24	2022	Mejora del factor de potencia mediante óptima ubicación y dimensionamiento de Dstatcom en redes de distribución aplicando el método de enjambre de partículas	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
25	2020	Óptima ubicación de SVC en sistemas de distribución mediante búsqueda exhaustiva para mejora de perfiles de voltaje	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
26	2022	Planeamiento eléctrico para ubicación óptima de banco de compensación reactiva en redes de distribución radial para mejorar el factor de potencia del sistema eléctrico la Yarada - Tacna	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
27	2022	Control de voltaje en redes de distribución mediante el uso de cambiadores de toma bajo carga empleando el software Open DSS	0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
28	2019	Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM en sistemas eléctricos de distribución para mejorar el perfil de voltaje considerando restricción de inyección de armónicos mediante el algoritmo JAYA.

29	2021	Modelado, Simulación y Validación de un Compensador Estático de Potencia Reactiva (SVC)	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
30	2019	Mejoramiento de los perfiles de tensión en sistemas de distribución con la inclusión de un compensador estático de potencia reactiva (DSTATCOM)	0	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
31	2016	Jaya: A simple and new optimization algorithm for solving constrained and unconstrained optimization problems	1884	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
32	2016	Jaya a novel optimization algorithm: What, how and why?	71	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
33	2018	A review on the recent application of jaya optimization algorithm	18	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
34	2017	Impact of DG and D-STATCOM allocation in radial distribution system for reducing harmonics	13	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:				6	10	5	6	13	5	1	5	14	5	11	11	3	3	6	6	12	15	3

8.2 Resumen de Indicadores

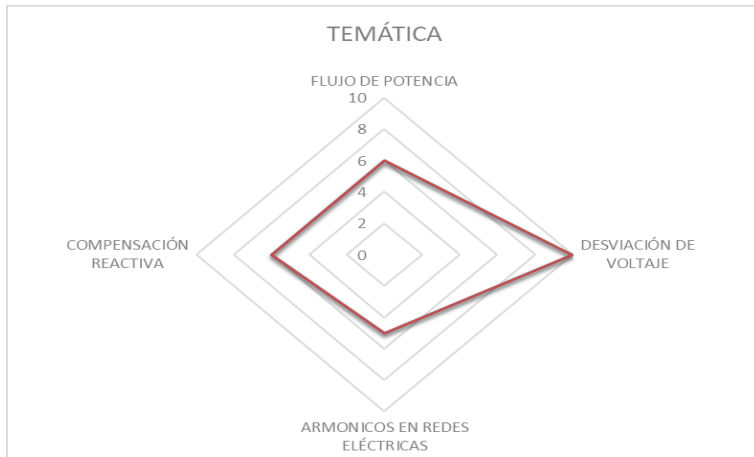


Figura 32. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

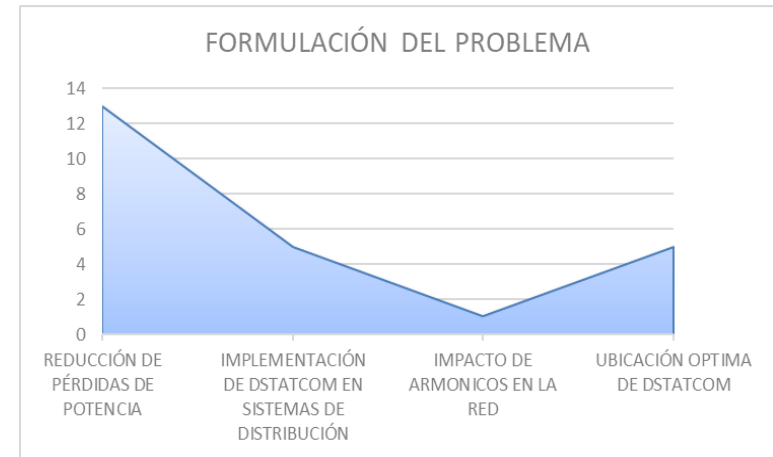


Figura 33. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

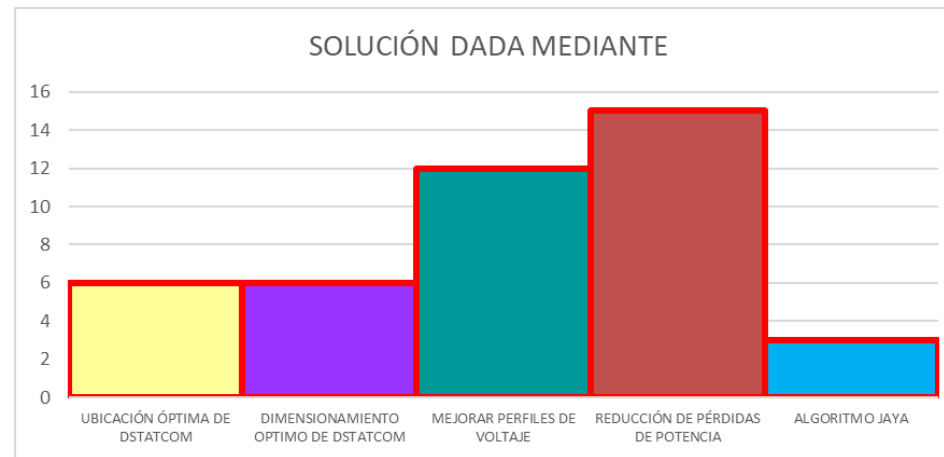


Figura 34. Indicador de solución - Estado del arte.

ANEXOS

Tabla 16. Datos de valores de voltaje del sistema de 33 barras caso base

Nodo	Voltaje [p.u.]
1	1
2	0.997
3	0.9829
4	0.9755
5	0.9681
6	0.9497
7	0.9462
8	0.9413
9	0.9351
10	0.9292
11	0.9284
12	0.9269
13	0.9208
14	0.9185
15	0.9171
16	0.9157
17	0.9137
18	0.9131
19	0.9965
20	0.9929
21	0.9922
22	0.9916
23	0.9794
24	0.9727
25	0.9694
26	0.9477
27	0.9452

Nodo	Voltaje [p.u.]
28	0.9337
29	0.9255
30	0.922
31	0.9178
32	0.9169
33	0.9166

Tabla 17. Datos de valores de voltaje del sistema de 33 barras en el escenario 3

Nodo	Voltaje [p.u.]
1	1
2	0.9973
3	0.9847
4	0.9783
5	0.9721
6	0.9578
7	0.9543
8	0.9495
9	0.9433
10	0.9376
11	0.9367
12	0.9352
13	0.9292
14	0.9269
15	0.9255
16	0.9242
17	0.9221
18	0.9215
19	0.9968
20	0.9932
21	0.9925

Nodo	Voltaje [p.u.]
22	0.9919
23	0.9811
24	0.9745
25	0.9712
26	0.9565
27	0.9547
28	0.9434
29	0.9353
30	0.9318
31	0.9276
32	0.9267
33	0.9265

Tabla 18. Datos de valores de voltaje del sistema de 34 barras en el caso base.

Nodo	Voltaje [p.u.]
1	1.0000
2	0.9941
3	0.9890
4	0.9821
5	0.9761
6	0.9704
7	0.9666
8	0.9645
9	0.9620
10	0.9608
11	0.9604
12	0.9602
13	0.9887
14	0.9884
15	0.9883

Nodo	Voltaje [p.u.]
16	0.9883
17	0.9660
18	0.9622
19	0.9581
20	0.9549
21	0.9520
22	0.9487
23	0.9460
24	0.9435
25	0.9423
26	0.9418
27	0.9417
28	0.9663
29	0.9660
30	0.9659
31	0.9605
32	0.9601
33	0.9600
34	0.9599

Tabla 19. Datos de valores de voltaje del sistema de 34 barras en el escenario 3.

Nodo	Voltaje [p.u.]
1	1.0000
2	0.9948
3	0.9902
4	0.9839
5	0.9785
6	0.9734
7	0.9696

Nodo	Voltaje [p.u.]
8	0.9675
9	0.9650
10	0.9638
11	0.9634
12	0.9632
13	0.9899
14	0.9896
15	0.9895
16	0.9895
17	0.9696
18	0.9665
19	0.9630
20	0.9603
21	0.9580
22	0.9547
23	0.9520
24	0.9495
25	0.9483
26	0.9479
27	0.9477
28	0.9692
29	0.9690
30	0.9689
31	0.9635
32	0.9631
33	0.9630
34	0.9629