

**ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM  
PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE  
DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA  
COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN  
CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS**

**AUTOR:  
ADRIÁN GONZALO ULLOA DE SOUZA**

**DIRECTOR:  
LUIS FERNANDO TIPÁN VERGARA**

**Quito, octubre 2018**

Adrián Gonzalo 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**

Universidad Politécnica Salesiana

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



**Adrián Gonzalo Ulloa de Souza** (Y'1990-M'09).

Realizó sus estudios secundarios en el Colegio “Sagrado Corazón” en la ciudad de Esmeraldas, obteniendo el título de bachiller en físico matemático. Egresado de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la implementación de D-STATCOM para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución.

[aulload@est.ups.edu.ec](mailto:aulload@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Luis Fernando Tipán Vergara** (Y'1982-M'06).

Se graduó de la Facultad de Ingeniería Eléctrica como Ingeniero en Electrónica en Control en la Escuela Politécnica Nacional. Sus estudios de postgrado los hizo en la Escuela Politécnica Nacional Facultad de Ingeniería Mecánica, obteniendo el grado de Magister en eficiencia Energética. Sus intereses de investigación incluyen los métodos de GD con Energías alternativas.

[ltipan@ups.edu.ec](mailto:ltipan@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

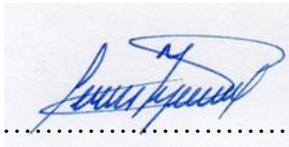
©2018 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO-ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A**

Yo, Luis Fernando Tipán Vergara declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM para la Compensación de Potencia Reactiva en Redes de Distribución considerando la Incidencia de Armónicos*” realizado por Adrián Gonzalo Ulloa de Souza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, octubre 2018



.....  
Luis Fernando Tipán Vergara

C.C.: 1717329005

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Adrián Gonzalo Ulloa de Souza, con documento de identificación N° 0802887372, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor/es del trabajo de grado/titulación intitulado: “*Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM para la Compensación de Potencia Reactiva en Redes de Distribución considerando la Incidencia de Armónicos*”, mismo que 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 aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, octubre 2018



Adrián Gonzalo Ulloa de Souza

C.C.: 0802887372

## ***1. ÍNDICE GENERAL***

1.	Introducción .....	2
2.	D-STATCOM .....	5
2.1	Modelación matemática del D- STATCOM .....	5
2.2	Formulación matemática de Flujos de Potencia.....	6
3.	Armónicos en las redes eléctricas de distribución .....	8
3.1	Penetración armónica simple .....	8
3.2	Índice de distorsión armónica .....	8
4.	Formulación del problema .....	9
4.1	Modelo matemático, Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM .....	9
4.2	Pseudocódigo para la Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM..	11
4.3	Pseudocódigo para el análisis de la incidencia de armónicos en el sistema .....	11
5.	Casos de Estudio y Análisis de Resultados .....	12
5.1	Sistema de distribución IEEE de 33 barras en condiciones iniciales .....	12
5.2	Sistema de distribución IEEE de 33 barras, con la inclusión del D-STATCOM ....	13
5.3	Incidencia de armónicos en el Sistema de distribución IEEE de 33 barras .....	15
5.4	Sistema de distribución IEEE de 69 barras en condiciones iniciales .....	16
5.5	Sistema de distribución IEEE de 69 barras, con la inclusión del D-STATCOM ....	17
5.6	Incidencia de armónicos en el Sistema de distribución radial IEEE de 69 barras ...	19
6.	Trabajos Futuros .....	20
7.	Conclusiones .....	20
8.	Referencias.....	21
8.1	Estado del arte .....	23
8.2	Resumen de indicadores.....	26
9.	Anexos .....	27
9.1	Anexo 1 .....	27
9.2	Anexo 2 .....	28

## 2. *ÍNDICE DE FIGURAS*

Figura 1. Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM .....	3
Figura 2. Estructura básica del D-STATCOM.....	6
Figura 3. Diagrama de 33 barras de la IEEE.....	12
Figura 4. Voltajes para el Sistema de 33 barras de la IEEE en condición inicial .....	13
Figura 5. Voltajes en pu para el Sistema de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM....	13
Figura 6. Diagrama de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM.....	14
Figura 7. Potencia Reactiva abastecida y consumida.....	14
Figura 8. Voltajes en pu del sistema sin compensar y compensado .....	15
Figura 9. Pérdidas de Potencia activa .....	15
Figura 10. Espectro armónico Rectificador de 6 pulsos .....	15
Figura 11. Voltajes armónicos en los nodos 17, 18 y 19 .....	15
Figura 12. Voltajes armónicos en los nodos 24, 25 y 26 .....	16
Figura 13. Voltajes armónicos en los nodos 29, 30 y 31 .....	16
Figura 14. %THD en los 33 nodos del sistema.....	16
Figura 15. Diagrama de 69 barras de la IEEE.....	16
Figura 16. Voltajes para el Sistema de 69 barras de la IEEE en condición inicial .....	17
Figura 17. Voltajes en pu para el Sistema de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM..	18
Figura 18. Diagrama de 69 barras de la IEEE con D-STATCOM.....	18
Figura 19. Potencia Reactiva abastecida y consumida.....	18
Figura 20. Voltajes en pu del sistema sin compensar y compensado .....	19
Figura 21. Pérdidas de Potencia activa .....	19
Figura 22. Voltajes armónicos en los nodos 55, 56 y 57 .....	19
Figura 23. Voltajes armónicos en los nodos 59, 60 y 61 .....	19
Figura 24. Voltajes armónicos en los nodos 62, 63 y 64 .....	19
Figura 25. %THD en los 69 nodos del sistema.....	20

### 3. *ÍNDICE DE TABLAS*

Tabla 1: Modo de operación del D-STATCOM .....	5
Tabla 2: Descripción de elementos asociados a las ecuaciones 1,2,3,4 y 5.....	6
Tabla 3: Descripción de elementos empleados en el modelo matemático.....	10
Tabla 4: Voltajes en pu del sistema en condiciones iniciales .....	13
Tabla 5: Voltajes en pu del sistema con D-STATCOM .....	13
Tabla 6: Ubicación y dimensionamiento de los D-STATCOM.....	14
Tabla 7: Voltajes en pu de los D-STATCOM.....	14
Tabla 8: Pérdidas de Potencia Activa.....	15
Tabla 9: Voltajes en pu del sistema en condiciones iniciales .....	17
Tabla 10: Voltajes en pu del sistema con D-STATCOM .....	17
Tabla 11: Ubicación y dimensionamiento de los D-STATCOM.....	18
Tabla 12: Voltajes en pu de los D-STATCOM.....	18
Tabla 13: Pérdidas de Potencia Activa.....	19
Tabla 14: Datos de líneas del sistema de distribución IEEE de 33 nodos .....	27
Tabla 15: Valores de cargas del sistema de distribución radial IEEE de 33 nodos .....	27
Tabla 16: Datos de líneas del sistema de distribución IEEE de 69 nodos .....	28
Tabla 17: Valores de cargas del sistema de distribución radial IEEE de 69 nodos .....	29

# ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS

## Resumen

En la presente investigación se plantea un modelo matemático de optimización desarrollado en el entorno GAMS, mediante programación no lineal entera mixta, para la óptima ubicación y dimensionamiento del Compensador Estático de Distribución, por sus siglas en inglés (D-STATCOM); con el fin de realizar una compensación de potencia reactiva; lo cual conlleva a una mejora general en la calidad y eficiencia del sistema.

El trabajo considera al D-STATCOM como un dispositivo electrónico, por ende, mediante el estudio de la penetración armónica simple, se analiza la inyección de armónicos en la red, para examinar si la inclusión del elemento supone afectaciones significativas, a pesar de las ventajas que trae consigo la compensación de potencia reactiva. El algoritmo de optimización es implementado en los sistemas radiales de distribución de 33 y 69 barras de la IEEE; con el objeto de minimizar las pérdidas de potencia activa y mejorar el perfil de voltaje, sujeto a restricciones de operación.

**Palabras Clave:** Potencia reactiva, Sistema de distribución, D-STATCOM, Perfil de voltaje, Pérdidas de potencia activa, Incidencia de armónicos.

## Abstract

This document proposes an optimization algorithm developed in GAMS environment, by mixed integer non-linear programming, for the optimal placement and sizing of the Static Distribution Compensator (D-STATCOM), in order to perform reactive power compensation to improve the quality and efficiency of the system.

The investigation considers the D-STATCOM as an electronic device, so, the study analyze through simple harmonic penetration, the injection of harmonics in the network, to evaluate if the inclusion of the element supposes significant affectation. The model is validated in the distribution systems of 33 and 69-bus of the IEEE; minimizing active power losses and improve the voltage profile, subject to operating restrictions.

**Keywords:** Reactive Power, Distribution system, D-STATCOM, Voltage profile, Active power losses, Harmonic impacts.

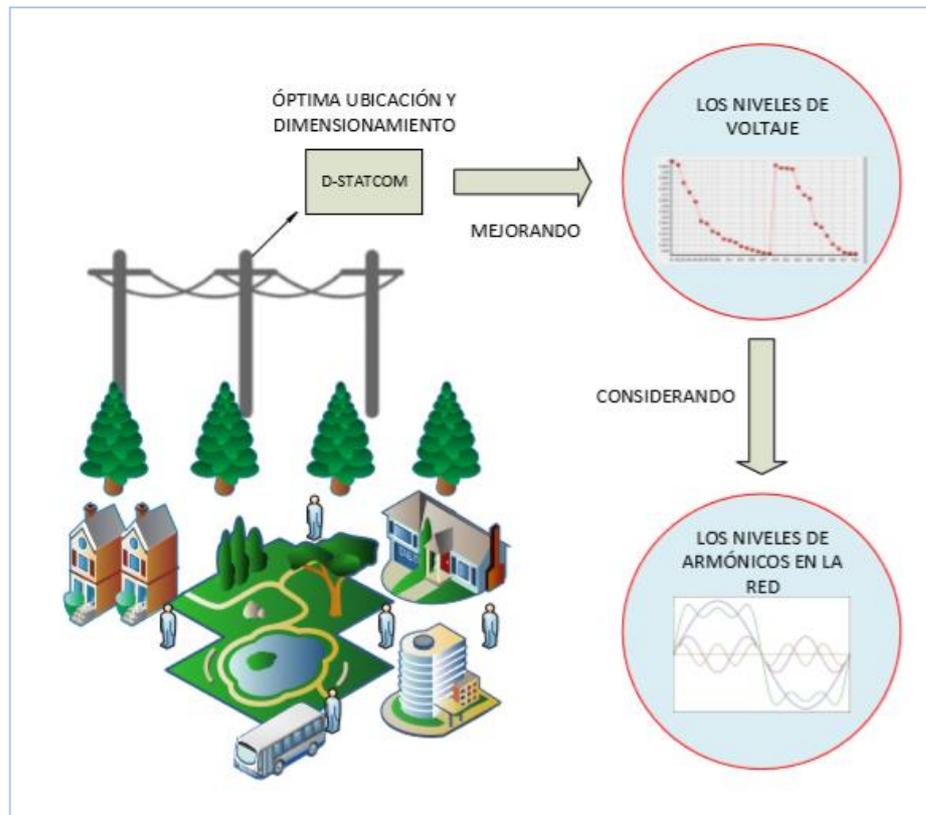
# 1. Introducción

La red de distribución representa una parte fundamental de los sistemas de energía eléctrica y se encarga principalmente en repartir entre los usuarios la potencia generada, para abastecer la demanda [1].

Una mala calidad de la electricidad abastecida desemboca en perjuicios técnicos y económicos tanto para los usuarios como para las empresas encargadas en prestar el servicio, por ello las redes de distribución deben proporcionar energía eléctrica con parámetros de calidad, confiabilidad y seguridad [1] [2] [3]; uno de los criterios utilizados para garantizar la calidad de la energía eléctrica se centra en realizar una compensación de potencia reactiva en el sistema, acción que permite controlar ciertos parámetros de la red, lo que incrementa de eficiencia de la misma [4] [5]. Entre los parámetros de control de calidad se pueden mencionar los siguientes: regulación de voltaje en cada uno de los nodos de la red, es decir que dicho voltaje se encuentre dentro de un rango específico de valores, evitando así que se produzcan caídas de voltaje y sobretensiones [2] [6]; otro de los parámetros a controlar es el incremento de la proporción de potencia activa útil en relación con la potencia total suministrada, lo que ayuda a disminuir las pérdidas del sistema [5]; también se puede mencionar como parámetro de control a la corrección del factor de potencia, lo que evita una circulación de corriente eléctrica excesiva [2] [7]. Con el pasar de los años se han implementado diversas estrategias para mejorar el funcionamiento de las redes de distribución, realizando compensación reactiva mediante la inclusión de capacitores [8], y generadores sincrónicos, los cuales presentan una desventaja importante ya que no son capaces de efectuar un

control en los cambios dinámicos de la potencia reactiva de las cargas.

La instalación de dispositivos como los Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexible (FACTS), para realizar una compensación de potencia reactiva, surge como una estrategia que proporciona una solución eficaz ante los problemas de calidad de energía anteriormente mencionados; su principal ventaja en comparación con los capacitores o los generadores sincrónicos para resolver el mismo inconveniente, es que estos son capaces de realizar un control en la dinámica del sistema y controlar el flujo de potencia [9]. Los FACTS son sistemas basados en la electrónica de potencia los cuales se implementan en las redes eléctricas para mejorar el control de las mismas e incrementar la capacidad de transferencia de potencia [9] [10]. El presente trabajo pretende realizar una compensación de potencia reactiva mediante la óptima ubicación y dimensionamiento de un dispositivo FACTS como lo es el Compensador Estático de Distribución (D-STATCOM) el cual es un elemento de estado sólido que se conecta en paralelo a la red, está basado en un Convertidor de Fuente de Voltaje (VSC), y entre sus principales funciones se encarga de absorber o inyectar potencia reactiva variando la amplitud y el ángulo de fase del convertidor de fuente de voltaje con respecto a la red en la cual está conectado [11]. Los D-STATCOM pueden ser ubicados en cualquier nodo de la red de forma aleatoria inyectando o absorbiendo cualquier cantidad de potencia reactiva, sin embargo, al mencionar la óptima ubicación y dimensionamiento de los mismos se hace referencia al desarrollo de un modelo matemático que permita determinar por medio de una optimización, en qué nodo o nodos serán conectados dichos dispositivos y cuál será la cantidad de potencia



**Figura 1.** Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM

reactiva inyectada o absorbida de la red, con el fin de garantizar una óptima regulación de voltaje y minimización de las pérdidas del sistema.

Por esta razón existen varias investigaciones acerca de la inclusión de D-STATCOM para la compensación de potencia reactiva en redes de distribución con el objetivo común de optimizar el funcionamiento de la misma.

En [11] plantea una simulación por medio del software MATLAB/Simulink para la inclusión de un D-STATCOM en 3 sistemas de distribución distintos. En el estudio se logra tener una regulación de voltaje a través de una compensación de potencia reactiva, donde el D-STATCOM actúa de manera inductiva y capacitiva, es decir absorbiendo e inyectando reactivos.

En [12] propone la implementación de un D-STATCOM utilizando un controlador PI a través del software MATLAB/Simulink para la compensación de potencia reactiva

aplicado en un modelo genérico, donde concluye que al implementar el dispositivo se mejora el perfil de voltaje, se reducen pérdidas en el sistema y se observa una reducción en las caídas de voltaje debido a la inyección de potencia reactiva en el sistema por parte del D-STATCOM.

En [13] realiza una modificación a la propuesta citada anteriormente, la cual consiste en añadir un supervisor de lógica difusa en el que la ganancia es añadida a la referencia del controlador PI; este añadido evita las variaciones de voltaje que ocurren en el capacitor de corriente continua del D-STATCOM debido a las variaciones de la carga, y como resultado se reducen las afectaciones causadas a la compensación reactiva. El modelo es implementado en un sistema de distribución genérico utilizando el software SimPower Toolbox, donde el supervisor de lógica difusa implementado para el dispositivo provee de una compensación reactiva satisfactoria.

En [14] investiga la óptima localización de D-STATCOM basado en estudios de flujo de carga, cargabilidad máxima y estabilidad de voltaje, aplicado en el sistema de distribución de 30 barras de la IEEE, simulado en el software DigSILENT PowerFactory. Muestra que las barras 26, 29 y 30 son las más apropiadas para implementar los D-STATCOM lo que ayuda a mejorar la estabilidad de voltaje, reducir pérdidas e incrementa el perfil de voltaje de todo el sistema.

En [15] demuestra que la inclusión de dispositivos D-STATCOM es una solución factible de los problemas de calidad de energía como los son: caídas de voltaje, sobretensiones y fluctuaciones; lo hace mediante la implementación de un modelo del dispositivo conectado en paralelo con un alimentador trifásico, una carga constante y otra variable, simulado en el software Simulink.

En [16] realiza una revisión y comparación de varios métodos utilizados para la óptima localización y dimensionamiento de D-STATCOM en redes eléctricas de distribución, donde considera que la implementación de múltiples D-STATCOM resulta importante para cubrir con todas las condiciones de variación de carga debido a que dichas variaciones de carga afectan en la óptima localización de los dispositivos; además recomienda realizar trabajos futuros en redes desbalanceadas ya que la mayoría de estudios han sido realizados en redes eléctricas balanceadas.

En [17] propone una óptima ubicación de D-STATCOM basado en índices de estabilidad y el óptimo dimensionamiento a través de una técnica por incremento del tamaño del dispositivo en pasos, también se considera el impacto armónico producido por la inserción de generación distribuida y el dispositivo basado en la electrónica de potencia; el

modelo matemático es implementado en un sistema de distribución de 34 barras validado por la IEEE, obteniendo una mejora en el perfil de voltaje, reducción de pérdidas y reducción en la distorsión armónica total (THD).

En [18] desarrolla a partir del Algoritmo Inmunológico, un modelo matemático para realizar la óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM con el fin de reducir pérdidas en el sistema y mejorar los perfiles de corriente y voltaje, teniendo un mínimo costo en la instalación de los D-STATCOM; dicho modelo es implementado en los sistemas de distribución de 33 y 69 barras de la IEEE, como resultado se obtiene una reducción de pérdidas del 10.9% y 18% respectivamente para cada uno de los sistemas, manteniendo los perfiles de corriente y voltaje dentro de los límites establecidos.

En [19] realiza la óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM utilizando un algoritmo de búsqueda de armonía, planteando como función objetivo de optimización la reducción de las pérdidas totales del sistema, el modelo es probado en un sistema de distribución de 33 barras de la IEEE, como resultado obtiene una efectiva reducción de pérdidas, siendo el modelo desarrollado útil para la implementación en sistemas de  $n$  barras.

Resulta importante realizar un análisis del impacto de la inclusión del D-STATCOM como fuente generadora de armónicos, debido a que el dispositivo está basado en la electrónica de potencia; dicho análisis es fundamental para determinar si la implementación de los dispositivos genera una influencia negativa significativa en la red, a pesar de los beneficios obtenidos con la compensación reactiva [6] [20]. Es sustancial que las inyecciones de armónicos en las redes eléctricas sean

mínimas con el objeto de garantizar una energía de calidad. La investigación propone realizar un análisis de penetración armónica considerando que el D-STATCOM está caracterizado por un rectificador de 6 pulsos. El modelo matemático es realizado mediante una programación no lineal entera mixta (MINLP) con la ayuda del software GAMS, aplicado a los sistemas radiales balanceados de distribución de 33 y 69 barras de la IEEE.

El trabajo de investigación se distribuye de la siguiente manera:

En la sección 2 se describe el funcionamiento del D-STATCOM, dispositivo empleado para la compensación de potencia reactiva, su modelación matemática y la formulación de flujos de potencia. En la sección 3 se explica la incidencia de los armónicos en las redes eléctricas de distribución. En la sección 4 se puntualiza la formulación del problema y se define el algoritmo de optimización planteado. En la sección 5 se analizan los casos de estudio, se presentan los resultados obtenidos y la comparación entre el sistema compensado y sin compensar. En la sección 6 se describen trabajos futuros y en la 7 se muestran las conclusiones de la investigación.

## 2. D-STATCOM

El D-STATCOM es un elemento de estado sólido el cual está conformado por un Convertidor de Fuente de Voltaje (VSC), un transformador de acoplamiento conectado en derivación con la red eléctrica de distribución y un elemento almacenador de energía; este dispositivo es capaz de realizar una compensación de potencia reactiva por ende regular el voltaje de los nodos. El D-STATCOM es capaz de absorber e inyectar potencia activa y potencia reactiva en la red eléctrica de una

manera controlable y lo hace variando la amplitud y el ángulo de fase del VSC con respecto al nodo de la red en el cual se conectará el dispositivo [11] [12] [13].

La potencia reactiva de intercambio entre la red eléctrica y el D-STATCOM puede ser inductiva o capacitiva, dependiendo de la relación entre el voltaje del VSC y el voltaje del nodo de la red [11], en la tabla 1 se detalla el modo de operación del D-STATCOM el cual obedece a la relación anteriormente mencionada; en donde se refiere al voltaje del nodo de la red como  $V_{bus}$  y al voltaje del VSC como  $V_{VSC}$ .

Tabla 1: Modo de operación del D-STATCOM

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

### 2.1 Modelación matemática del D-STATCOM

Para diseñar un compensador estático de distribución, es necesario considerar cuatro parámetros principales: potencia, intensidad de corriente eléctrica, voltaje y frecuencia; aspectos que dependen principalmente de la red eléctrica considerada para la inclusión del dispositivo [14].

En la figura 2 se ilustra la estructura básica del D-STATCOM actuando como elemento de compensación reactiva; en donde  $V_{bus}$  es el voltaje del nodo del sistema en el punto de acoplamiento común ( $P_{CC}$ ),  $X_{TH}$  se refiere a la reactancia de acoplamiento entre el D-STATCOM y la red eléctrica, también se representan la carga ( $Z$ ) y los componentes del sistema a compensar, como lo son las, barras, reactancia ( $X_s$ ) y resistencia ( $R_s$ ) que representa la línea de enlace [16] [20].

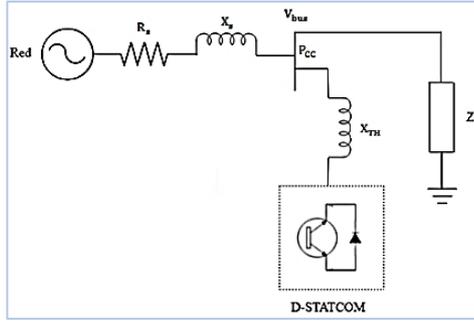


Figura 2. Estructura básica del D-STATCOM

Como ya fue mencionado anteriormente el DSTATCOM es capaz de generar o absorber potencia reactiva, dependiendo de la magnitud de voltaje de salida del convertidor con referencia al voltaje del nodo en el punto de acoplamiento común, para ello en (1) y (2) se proponen las ecuaciones generales para el cálculo de la potencia activa y reactiva correspondientemente [15].

$$P_{DST} = \frac{|V_o| |V_{DST}|}{X_{DST}} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q_{DST} = \frac{|V_o| |V_{DST}|}{X_{DST}} \cos \delta - \frac{|V_o|^2}{X_{DST}} \quad (2)$$

Si se considera un desfase ( $\delta = 0$ ), se tiene:

$$P_{DST} = \frac{|V_o| |V_{DST}|}{X_{DST}} \sin \delta = 0 \quad (3)$$

$$P_{DST} = 0 [W] \quad (4)$$

Para la potencia reactiva se tiene:

$$Q_{DST} = \frac{|V_o - V_{DST}| V_o}{X_{DST}} [VAR] \quad (5)$$

La ecuación (5) muestra la manera de calcular el intercambio de potencia reactiva entre el D-STATCOM y la red eléctrica.

En la tabla 2 se describen los elementos utilizados en las ecuaciones 1,2,3,4 y 5.

Tabla 2: Descripción de elementos asociados a las ecuaciones 1,2,3,4 y 5.

Nombre	Descripción
$P_{DST}$	Potencia activa de intercambio entre el D-STATCOM y la red
$Q_{DST}$	Potencia reactiva de intercambio entre el D-STATCOM y la red
$V_o$	Voltaje en el nodo de conexión
$V_{DST}$	Voltaje del D-STATCOM
$X_{DST}$	Reactancia de acoplamiento entre el D-STATCOM y el nodo del sistema
$\delta$	Diferencia entre los ángulos de voltaje del D-STATCOM y el nodo de la red eléctrica

## 2.2 Formulación matemática de Flujos de Potencia

El análisis de flujo de potencia es de gran importancia para determinar las condiciones del sistema existente, a su vez es capaz de proporcionar información útil para aplicar estrategias que conlleven al mejoramiento de la operación y eficiencia del mismo; para el caso de la presente investigación dicho análisis facilita la inclusión de los D-STATCOM para la compensación de potencia reactiva, indicando de alguna manera con los datos entregados los lugares más factibles y óptimos de ubicación del dispositivo para mejorar el rendimiento del sistema, realizando una regulación de voltaje y disminuyendo las pérdidas. Los estudios de flujos de potencia proporcionan como resultado la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada uno de los nodos de la red, el flujo de potencia activa y reactiva, y las pérdidas del sistema [21] [22].

Para dicho estudio se considera que la red de distribución está conformada por varios nodos o barras conectados mediante líneas de conexión y transformadores; en específicos nodos de la red se conectan cargas las cuales son capaces de absorber o entregar

potencia activa y reactiva al sistema; también se dispone de una fuente de alimentación [22]. El principal parámetro a tener en cuenta para la formulación de los flujos de potencia es la matriz de admitancias, la cual está conformada por todos los elementos existentes entre cada una de las barras, se consideran la impedancia y capacitancia de las líneas, así como los transformadores modelados como una reactancia. Para realizar el cálculo de los elementos que conforman la matriz de admitancias ( $Y_{bus}$ ), se los separa en dos grupos, los que pertenecen a la diagonal ( $Y_{ii}$ ) y los que se encuentran fuera de la diagonal ( $Y_{ij}$ ); los componentes de la diagonal son calculados mediante la suma de las admitancias de todos los elementos considerados conectados al nodo  $i$  en cuestión, incluyendo también los elementos conectados en derivación. Los componentes fuera de la diagonal de la matriz de admitancias son negativos y se consideran como las admitancias que conectan a los nodos  $i, j$ ; es decir, si no existe una conexión real entre dos nodos, el componente de la matriz de admitancias es igual a cero [21] [23]. Es importante señalar que la matriz de admitancias es una matriz simétrica, lo cual queda establecido en la ecuación (6):

$$Y_{ij} = Y_{ji} \quad (6)$$

Una vez establecidos los componentes pertenecientes a la diagonal y los componentes fuera de ella, la ecuación (7) define la matriz de admitancias [23].

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ Y_{ji} & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{ni} & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

La matriz de admitancias puede ser dividida en dos componentes las cuales se establecen en (8) y (9) que corresponden a la conductancia ( $G_{bus}$ ) y a la susceptancia ( $B_{bus}$ ) que representan la parte real e imaginaria de la matriz de admitancias [24] [25].

$$G_{bus} = \begin{bmatrix} G_{ii} & G_{ij} & \dots & G_{in} \\ G_{ji} & G_{jj} & \dots & G_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{ni} & G_{nj} & \dots & G_{nn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$B_{bus} = \begin{bmatrix} B_{ii} & B_{ij} & \dots & B_{in} \\ B_{ji} & B_{jj} & \dots & B_{jn} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{ni} & B_{nj} & \dots & B_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

A partir de la matriz de admitancia obtenida es posible calcular la potencia activa y reactiva, las cuales son expresadas en (10) y (11) respectivamente [26] [27]:

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

$$Q_i = \sum_{j=1}^m |V_i| \cdot |V_j| \cdot (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (11)$$

Donde:  $P_i$  es la potencia activa que es inyectada en el nodo  $i$  en relación con los demás nodos,  $Q_i$  es la potencia reactiva que es inyectada en el nodo  $i$  en relación con los demás nodos;  $V_i$  es el voltaje en el nodo  $i$ ;  $G_{ij}$  y  $B_{ij}$  son la conductancia y susceptancia existentes entre el nodo  $i$  y el nodo  $j$ ;  $\theta_{ij}$  es la diferencia entre los ángulos del nodo  $i$  y el nodo  $j$ .

### 3. Armónicos en las redes eléctricas de distribución

En todos los sistemas eléctricos incluyendo al de distribución se pretende tener formas de onda de las señales de voltaje y corriente perfectas, pero esto en la realidad no sucede, debido a la presencia de cargas no lineales y dispositivos electrónicos; la integración de dichos elementos en las redes eléctricas de distribución ocasiona la introducción de armónicos en el sistema, que son básicamente una combinación de componentes de frecuencia que son múltiplos de la frecuencia fundamental más la componente de la fundamental; estos componentes múltiplos se añaden a la forma de onda de la fundamental ocasionando distorsión en las señales de corriente y voltaje [28].

La circulación de corrientes armónicas en las redes eléctricas provoca caídas de voltaje, pérdidas y otras afectaciones en el sistema; por ello se ve necesario la mitigación de estos agentes que ocasionan un gran perjuicio e impiden el correcto funcionamiento de las redes eléctricas de distribución, así como daños a los equipos del sistema y de los usuarios [28] [29]. Cuando una corriente armónica circula por una línea de transmisión, o por un conductor se producen mayores pérdidas [29]. Para estudiar la incidencia de los armónicos en la red eléctrica producidos por la inclusión del D-STATCOM se implementará al modelo matemático el análisis de penetración armónica simple.

#### 3.1 Penetración armónica simple

Para analizar la incidencia de los armónicos en las redes de distribución eléctrica, se necesita obtener los valores de la magnitud y ángulo de los voltajes para cada frecuencia armónica,

los cuales son producidos debido a la inyección de corrientes armónicas provenientes de componentes contaminantes en el sistema.

En la ecuación (12) se determina la forma de obtener los voltajes para cada frecuencia armónica [30].

$$V_i^h = Z_{bus}^h \cdot I_i^h \quad (12)$$

Donde:  $V_i^h$  es un vector que está compuesto por los voltajes de cada nodo de la red una frecuencia armónica  $h$  determinada. El vector  $I_i^h$  tiene una dimensión  $i$  donde sus elementos son 0 exceptuando los nodos en los que existan conectados componentes causantes de la inclusión de armónicos en el sistema; estas corrientes armónicas se calculan como un porcentaje de la corriente obtenida a frecuencia fundamental calculada en los flujos de potencia para cada nodo en cuestión; el porcentaje se lo obtiene en función al espectro armónico del elemento contaminante.

La matriz  $Z_{bus}^h$  es la inversa de la  $Y_{bus}$  en función de cada frecuencia armónica considerada.

Una vez obtenidos los voltajes armónicos para cada uno de los nodos de la red, se procede a realizar el cálculo de los índices de distorsión armónica que nos indican el grado de distorsión de las ondas de voltaje.

#### 3.2 Índice de distorsión armónica

Los valores de distorsión armónica además de indicar de manera general el grado de distorsión de la onda de voltaje, son utilizados para establecer si dichos valores son menores a los valores máximos permitidos; en el caso de ser mayores emplear estrategias para mitigar la incidencia de los armónicos. El índice de distorsión más utilizado para establecer el contenido armónico de la onda de voltaje es el índice de distorsión armónica total (THD); dicho

índice representa la cantidad de componentes armónicos presentes en la onda de voltaje [17] [31]. La ecuación para el cálculo del índice de distorsión armónica se detalla en (13).

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h^2)}}{V_1} \quad (13)$$

Donde:  $V_h$  es el valor del voltaje armónico para la frecuencia  $h$  y  $V_1$  es el valor del voltaje a frecuencia fundamental.

## 4. Formulación del problema

Para la solución del problema de compensación de potencia reactiva con la óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM considerando la incidencia de armónicos, se plantea separarlo en dos partes; una que considere la inclusión en el sistema del dispositivo basado en la electrónica de potencia, y la otra que parte del análisis de penetración armónica simple, donde se calcularán los voltajes de todos los nodos para cada frecuencia armónica incluida la fundamental, y el cálculo de índices de distorsión armónica total.

### 4.1 Modelo matemático, Óptima ubicación y dimensionamiento de D-STATCOM

Como objetivo principal de la compensación de potencia reactiva se plantea realizar una minimización de pérdidas activas, mediante la implementación de un modelo matemático basado en la programación no lineal entera mixta (MINLP); se trata de dicha programación debido a que se dispone en parte de variables binarias, las cuales son empleadas para decidir la óptima ubicación y dimensionamiento de los D-

STATCOM; por otro lado, los flujos de potencia que son parte fundamental del modelo en cuestión y el D-STATCOM están caracterizados por ecuaciones no lineales que dependen del cuadrado del voltaje y de funciones trigonométricas. El modelo matemático será resuelto a través de un software computacional llamado GAMS.

En la ecuación (14) se plantea la función objetivo la cual se refiere a la minimización de pérdidas activas en el sistema, incluyendo la potencia que absorbe o inyecta el D-STATCOM.

$$FO: Min P_{loss} = \sum_{i=1}^n P_{g_i} - \sum_{j=1}^m P_{d_j} \quad (14)$$

Todo modelo de optimización debe estar sujeto a restricciones las cuales pueden ser de igualdad o de desigualdad.

Como restricciones de igualdad se definen las siguientes:

En las ecuaciones (15) y (16) se determinan los balances de potencia activa y potencia reactiva respectivamente; y se refiere a que la sumatoria de las potencias que ingresan a un nodo es igual a la sumatoria de potencias que entrega el nodo mencionado.

$$\sum_{i=1}^n P_{g_i} - \sum_{j=1}^m P_{d_j} = \sum_{j=1}^m |V_i| \cdot |V_j| \cdot (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n Q_{g_i} - \sum_{j=1}^m (Q_{d_j} - Q_{dst_j}) = \sum_{j=1}^m |V_i| \cdot |V_j| \cdot (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (16)$$

En (17) se define a la variable binaria, la cual analiza la posibilidad óptima de incluir en cada uno de los nodos candidatos el dispositivo D-STATCOM para garantizar la compensación de potencia reactiva,

realizando una regulación de voltaje y minimizando las pérdidas del sistema.

$$U_{dst} \in \{0,1\} \quad (17)$$

Una vez definida la variable binaria, en (18) y (19) se determinan las ecuaciones necesarias para el cálculo de la potencia activa y reactiva que el D-STATCOM será capaz de absorber o inyectar en el sistema, adaptadas al modelo matemático de optimización.

$$Pdst_j = 0 \quad (18)$$

$$Qdst_j = \left[ \frac{V_j \cdot Vdst_j}{X_{dst}} \cos(\theta_{dst} - \theta_j) - \frac{V_j^2}{X_{dst}} \right] \cdot U_{dst} \quad (19)$$

Dentro del modelo matemático de optimización se disponen también de restricciones de desigualdad, las cuales básicamente limitan los componentes del modelo dentro de un rango de valores especificados.

En la ecuación (20) se especifica el rango de voltajes aceptables para sistemas de distribución, donde se tiene un voltaje máximo de 1.05 pu y como voltaje mínimo 0.95 pu; el objetivo de esta restricción es la de realizar una óptima regulación de voltaje en el sistema.

$$Vmin_j \leq V_j \leq Vmax_j \quad (20)$$

Como restricción final se considera siempre importante establecer una cantidad máxima de dispositivos D-STATCOM implementados en la red, debido a que al colocar un número muy grande de elementos para la compensación reactiva implica que el generador principal encargado de abastecer la potencia activa y reactiva del sistema quede subutilizado, generando así mayores pérdidas e inestabilidad general en el sistema. En (21) se establece la ecuación que

determina el número máximo de D-STATCOM que serán incluidos.

$$\sum_{j=1}^n U_{dst} \leq NmaxDST \quad (21)$$

En la tabla 3 se describen los elementos empleados para el modelo matemático de optimización anteriormente detallado y el pseudocódigo posterior.

Tabla 3: Descripción de elementos empleados en el modelo matemático

Nombre	Descripción
<i>FO</i>	Función Objetivo
<i>Pg<sub>i</sub></i>	Potencia activa suministrada de cada generador i
<i>Pd<sub>j</sub></i>	Potencia activa de carga de cada nodo j
<i>Pdst<sub>j</sub></i>	Potencia activa de D-STATCOM para cada nodo j candidato
<i>P<sub>loss</sub></i>	Pérdidas de potencia activa en el sistema
<i>Qg<sub>i</sub></i>	Potencia reactiva suministrada por cada generador i
<i>Qd<sub>j</sub></i>	Potencia reactiva de carga de cada nodo j
<i>Qdst<sub>j</sub></i>	Potencia reactiva de D-STATCOM para cada nodo j candidato
<i>V<sub>i</sub></i>	Voltaje en el nodo i
<i>V<sub>j</sub></i>	Voltaje en el nodo j
<i>G<sub>ij</sub></i>	Elemento de la matriz de conductancia mutua entre los nodos i-j
<i>B<sub>ij</sub></i>	Elemento de la matriz de susceptancia mutua entre los nodos i-j
<i>θ<sub>ij</sub></i>	Diferencia angular del voltaje de los nodos i-j
<i>n</i>	Número total de generadores en el sistema
<i>m</i>	Número total de nodos del sistema
<i>ε</i>	Relación de pertenencia
<i>Vdst<sub>j</sub></i>	Voltaje del D-STATCOM implementado
<i>X<sub>dst</sub></i>	Reactancia de acoplamiento del D-STATCOM implementado
<i>θ<sub>dst</sub></i>	Ángulo del voltaje del D-STATCOM
<i>θ<sub>j</sub></i>	Voltaje del nodo j
<i>Vmin<sub>j</sub></i>	Valor mínimo del voltaje para el nodo j
<i>Vmax<sub>j</sub></i>	Valor máximo del voltaje para el nodo j
<i>NmaxDST</i>	Número máximo de D-STATCOM

## 4.2 Pseudocódigo para la Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM

A continuación, se plantea el pseudocódigo propuesto para resolver el modelo matemático de optimización.

---

### Pseudocódigo Óptima Ubicación y Dimensionamiento de D-STATCOM

---

**Paso 1: Inicio.**

**Paso 2:** Ingreso de los datos del sistema de distribución en pu; número de nodos ( $m$ ), características de las líneas, y cargas.

**Paso 3:** Asignación de magnitudes eléctricas como variables  $V_j$ ,  $V_{dstj}$ ,  $\theta_j$ ,  $\theta_{dst}$ ,  $Pg_i$ ,  $Pdst_j$ ,  $Qg_i$ ,  $Qdst_j$ ,  $P_{loss}$ .

**Paso 4:** Cálculos y Desarrollo

Cálculo de los datos del sistema en pu.

Cálculo de la matriz de admitancias  $Y_{bus}$

Inicialización de ángulos y magnitud de voltaje para cada uno de los nodos y el D-STATCOM.

$$V_j = 1 \text{ pu}$$

$$V_{dstj} = 1 \text{ pu}$$

$$\theta_j = 0$$

$$\theta_{dstj} = 0$$

Flujo óptimo de potencia para el sistema en condiciones iniciales en GAMS.

Resolución del modelo de optimización planteado en GAMS.

**Set FO** minimización de pérdidas  $P_{loss}$ .

$$FO: \text{Min } P_{loss} = \sum_{i=1}^n Pg_i - \sum_{j=1}^m (Pd_j + Pdst_j)$$

**Set Variable binaria.**

$$U_{dst} \in \{0,1\}$$

**Set Restricciones de igualdad.**

**Balance de Potencia Activa.**

$$\sum_{i=1}^n Pg_i - \sum_{j=1}^m Pd_j = \sum_{j=1}^m |V_i| \cdot |V_j| \cdot (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij})$$

**Balance de Potencia Reactiva.**

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n Qg_i - \sum_{j=1}^m (Qd_j - Qdst_j) \\ = \sum_{j=1}^m |V_i| \cdot |V_j| \cdot (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{aligned}$$

**Potencia Activa y Reactiva del D-STATCOM.**

$$Pdst_j = 0$$

$$Qdst_j = \left[ \frac{V_j \cdot V_{dstj}}{X_{dst}} \cos(\theta_{dst} - \theta_j) - \frac{V_j^2}{X_{dst}} \right] \cdot U_{dst}$$

**Set Restricciones de desigualdad**

**Rango de voltaje tolerable.**

$$V_{min_j} \leq V_j \leq V_{max_j}$$

**Número máximo de D-STATCOM incluidos.**

$$\sum_{j=1}^n U_{dst} \leq N_{maxDST}$$

**Paso 5:** Análisis de los resultados; voltajes, ángulos y pérdidas; comparando el sistema optimizado con el sistema sin compensar.

**Paso 6: Fin.**

---

## 4.3 Pseudocódigo para el análisis de la incidencia de armónicos en el sistema

Para la resolución del modelo matemático que analice la incidencia de los armónicos en la red se presenta el siguiente pseudocódigo.

---

### Pseudocódigo penetración armónica simple e índices de distorsión

---

**Paso 1: Inicio**

**Paso 2:** Ingreso de datos obtenidos de los flujos de potencia considerando el modelo óptimo con la inclusión del D-STATCOM.

**Paso 3:** Asignación de  $V_i^h$  y  $THD_v$  como variables.

**Paso 4:** Cálculos y Desarrollo

Cálculo de la matriz  $Z_{bus}^h$  para cada una de las frecuencias armónicas consideradas.

$$Z_{bus}^h = \begin{bmatrix} Z_{ii}^h & Z_{ij}^h & \dots & Z_{in}^h \\ Z_{ji}^h & Z_{jj}^h & \dots & Z_{jn}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{ni}^h & Z_{nj}^h & \dots & Z_{nn}^h \end{bmatrix}$$

Cálculo de las corrientes armónicas según el espectro armónico de las fuentes contaminantes en función de la corriente de carga obtenida a partir de los flujos de potencia.

Cálculo de los voltajes para cada frecuencia armónica.

$$V_i^h = Z_{bus}^h \cdot I_i^h$$

Cálculo del índice de distorsión armónica total.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h^2)}}{V_1}$$

**Paso 5:** Análisis de los resultados obtenidos en el modelo con la inclusión del D-STATCOM.

**Paso 6:** Fin

## 5. Casos de Estudio y Análisis de Resultados

En esta sección se examinan los resultados obtenidos al aplicar el modelo matemático de optimización planteado en comparación con el sistema en condiciones iniciales; para dicho objeto el modelo es aplicado en los sistemas radiales de distribución de la IEEE de 33 y 69 barras. La comparación entre el sistema en condiciones iniciales y el sistema compensado se basa en analizar la medida en que la inclusión de los D-STATCOM mejoran el nivel de voltaje en cada uno de los nodos de la red, y la reducción de pérdidas de potencia activa que se logra; estas dos medidas son reflejo de la compensación de potencia reactiva, objetivo fundamental del presente trabajo de investigación.

### 5.1 Sistema de distribución IEEE de 33 barras en condiciones iniciales

Los resultados del sistema en condiciones iniciales son estimados a partir de un flujo de potencia óptimo simulado en un software computacional; de dicho procedimiento se obtienen los valores de voltaje, ángulo, potencias y pérdidas; estos valores serán

comparados con los datos obtenidos al aplicar el modelo de optimización.

La figura 3 presenta el diagrama unifilar del sistema de distribución radial de la IEEE de 33 barras considerado como primer caso de estudio; el cual está conformado por barras, líneas de conexión, cargas y un alimentador encargado de suministrar la potencia activa y reactiva requerida por las cargas. Dicho sistema tiene un nivel de voltaje de 13.8 kV y una carga total de 3715 kW – 1800 kVAR.

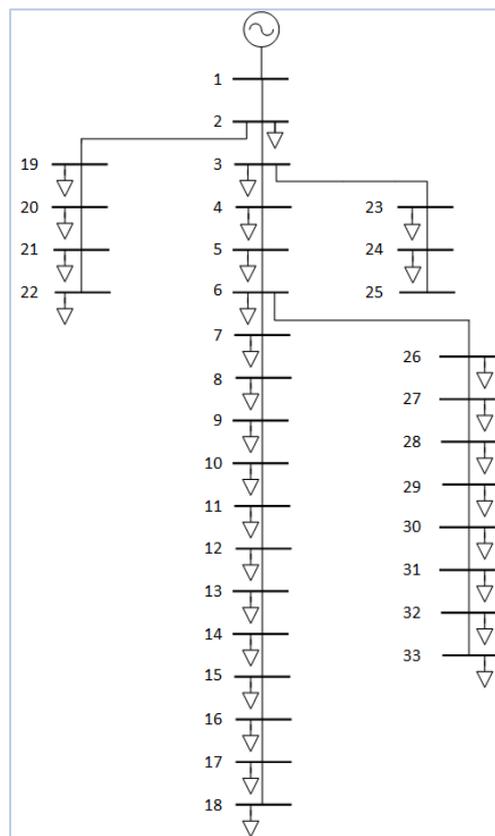


Figura 3. Diagrama de 33 barras de la IEEE

Para correr un flujo de potencia necesario para obtener los datos de voltaje, ángulo, potencias y pérdidas, es fundamental caracterizar el sistema, por ello en las tablas 14 y 15 descritas en el anexo 1, se muestran los datos de las líneas y de las cargas respectivamente. Como resultado del flujo de potencia óptimo considerado como condición inicial del sistema, en la tabla 4 se muestran los valores de voltaje (pu), asociados a cada nodo.

Tabla 4: Voltajes en pu del sistema en condiciones iniciales

nodo	$V_{pu}$	nodo	$V_{pu}$
1	1.000	18	0.943
2	0.998	19	0.997
3	0.987	20	0.996
4	0.981	21	0.995
5	0.976	22	0.995
6	0.964	23	0.984
7	0.963	24	0.979
8	0.958	25	0.976
9	0.956	26	0.963
10	0.952	27	0.961
11	0.952	28	0.956
12	0.950	29	0.952
13	0.948	30	0.950
14	0.946	31	0.948
15	0.945	32	0.947
16	0.944	33	0.947
17	0.944	-	-

En la figura 4 se puede apreciar que el perfil de voltaje en general se encuentra en rangos aceptables, pero existen algunos nodos en los que el voltaje se encuentra fuera de los límites definidos por lo que resulta necesaria la aplicación de alguna estrategia de compensación, para el caso de esta investigación es factible la inclusión del D-STATCOM para que mediante la compensación de potencia reactiva mejore los niveles de voltaje en cada uno de los nodos.

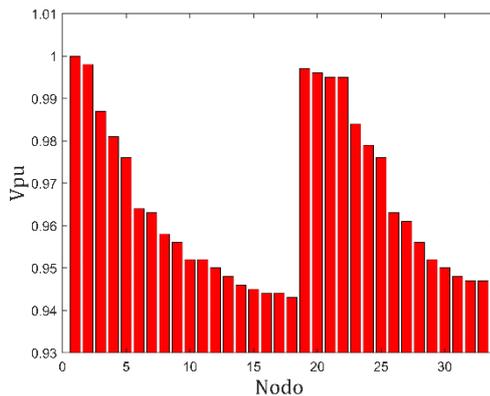


Figura 4. Voltajes para el Sistema de 33 barras de la IEEE en condición inicial

## 5.2 Sistema de distribución IEEE de 33 barras, con la inclusión del D-STATCOM

Con la implementación del modelo matemático se obtuvieron los valores

de voltaje que se presentan en la tabla 5.

Tabla 5: Voltajes en pu del sistema con D-STATCOM

nodo	$V_{pu}$	nodo	$V_{pu}$
1	1.000	18	0.960
2	0.998	19	0.997
3	0.989	20	0.996
4	0.984	21	0.995
5	0.980	22	0.995
6	0.971	23	0.987
7	0.970	24	0.983
8	0.967	25	0.981
9	0.965	26	0.970
10	0.963	27	0.969
11	0.963	28	0.966
12	0.962	29	0.964
13	0.960	30	0.963
14	0.960	31	0.960
15	0.960	32	0.960
16	0.960	33	0.960
17	0.960	-	-

En la figura 5 se puede observar que el perfil de voltaje del sistema de distribución radial IEEE de 33 barras mejoró de una manera significativa con la implementación del modelo matemático de optimización que considera la inclusión de los D-STATCOM; se nota una mejoría en el voltaje, especialmente en los nodos donde se conectan los D-STATCOM.

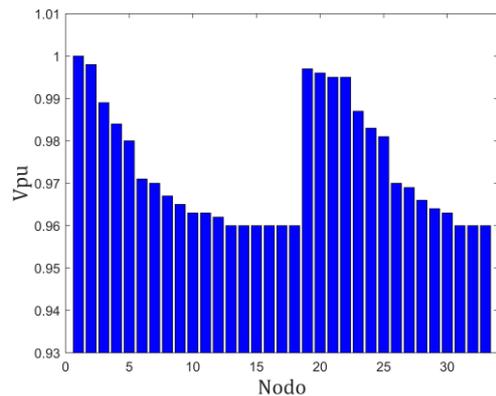


Figura 5. Voltajes en pu para el Sistema de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM

La compensación de potencia reactiva que implica la mejora del perfil de voltaje y la minimización de pérdidas se logra mediante la inclusión en el sistema de 3 dispositivos D-STATCOM que se integran a los nodos

18, 25 y 30. Dicho resultado se ilustra en la figura 6.

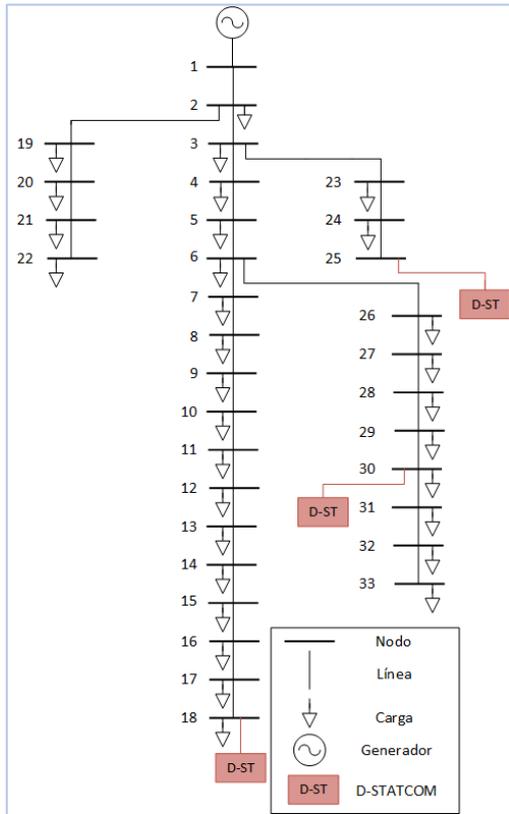


Figura 6. Diagrama de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM

A través de la optimización resuelta se obtiene no solamente una óptima ubicación de los D-STATCOM sino también un óptimo dimensionamiento, es decir, los resultados de la optimización entregan además los valores de potencia reactiva que el D-STATCOM intercambia con el sistema. Aquello se muestra en la tabla 6.

Tabla 6: Ubicación y dimensionamiento de los D-STATCOM

	Nodo	Q (kVAR)
<b>DST1</b>	18	494
<b>DST2</b>	25	455
<b>DST3</b>	30	676

Para lograr un control dinámico en la potencia reactiva de las cargas del sistema por parte del D-STATCOM, el

modelo matemático de optimización consideró que los voltajes del dispositivo sean adaptables a las necesidades del sistema, es decir, que el modelo determine si es necesario absorber o inyectar reactivos para garantizar una compensación reactiva óptima en función del valor del voltaje de cada D-STATCOM que se conecta a la red. Los resultados mostrados en la tabla 7 nos indican que el D-STATCOM está en modo capacitivo, inyectando reactivos al sistema.

Tabla 7: Voltajes en pu de los D-STATCOM

D-STATCOM	V (pu)
<b>D-ST1</b>	0.971
<b>D-ST2</b>	0.991
<b>D-ST3</b>	0.976

En la figura 7 se muestra gráficamente la compensación reactiva que se obtiene a través de la implementación del modelo de optimización; en color azul se muestra la potencia reactiva inyectada por el generador, en color rojo la potencia reactiva inyectada por los D-STATCOM y en color verde la potencia reactiva consumida por las cargas.

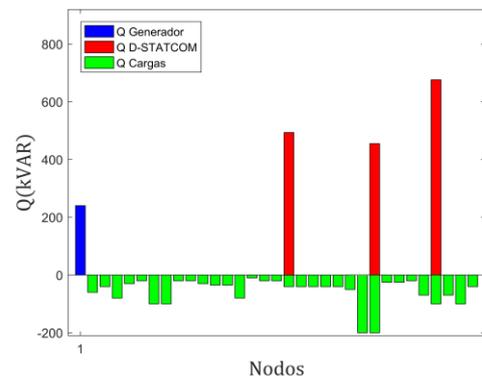


Figura 7. Potencia Reactiva abastecida y consumida

La figura 8 muestra una comparación entre los voltajes del sistema sin compensar y los voltajes del sistema con los D-STATCOM integrados; se puede observar claramente que la

inclusión de dichos dispositivos mejora de manera notable el perfil de voltaje.

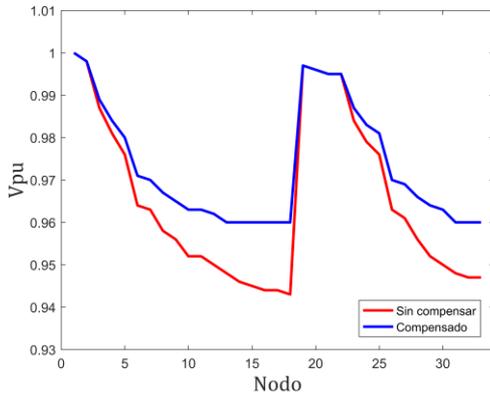


Figura 8. Voltajes en pu del sistema sin compensar y compensado

Al realizar una compensación reactiva se tiene una reducción de pérdidas eléctricas activas, las cuales fueron función objetivo para resolver el problema de optimización; estas disminuyeron en un 11.4% en comparación con el sistema en condiciones iniciales; en la tabla 8 se muestra lo mencionado.

Tabla 8: Pérdidas de Potencia Activa

Sistema	Pérdidas (kW)
Condición Inicial	125
Compensado D-STATCOM	109

En la figura 9 se muestra gráficamente la reducción de pérdidas activas resultantes de la integración de los D-STATCOM.

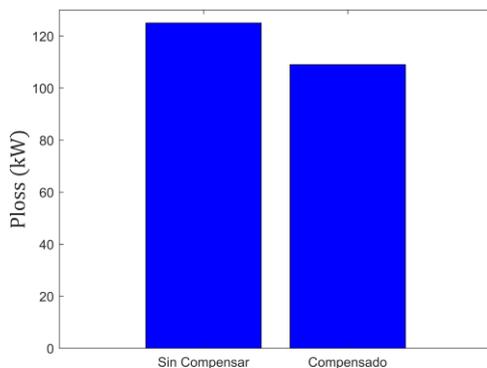


Figura 9. Pérdidas de Potencia activa

### 5.3 Incidencia de armónicos en el Sistema de distribución IEEE de 33 barras

Para analizar el impacto de los armónicos causados por la inclusión de los D-STATCOM en el sistema de distribución radial de la IEE de 33 barras se considera que el dispositivo está caracterizado por un rectificador de 6 pulsos; el espectro armónico típico se presenta en la figura 10.

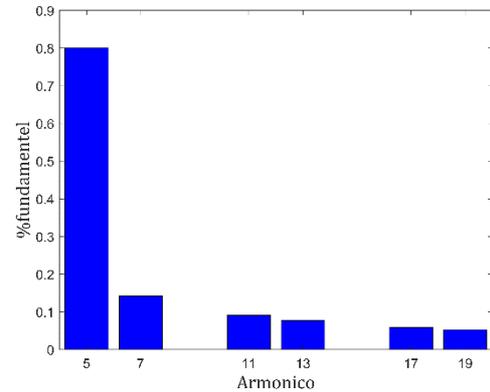


Figura 10. Espectro armónico Rectificador de 6 pulsos

El modelo de optimización determina que los D-STATCOM deben ser incluidos en los nodos 18, 25 y 30; como objeto de análisis se propone analizar el espectro armónico de voltaje en los nodos en los cuales fue implementado el D-STATCOM y los nodos próximos a estos.

En la figura 11 se presenta el espectro armónico de voltaje producido por la inclusión del D-STATCOM en el nodo 18.

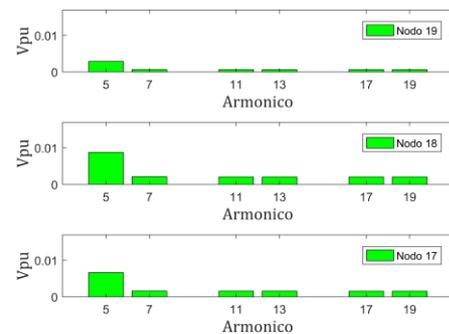
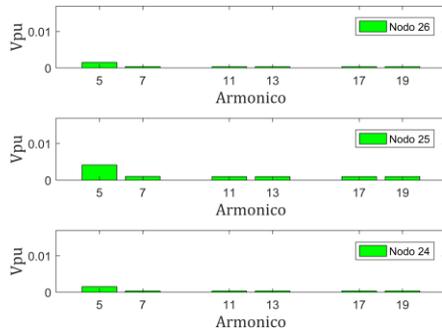
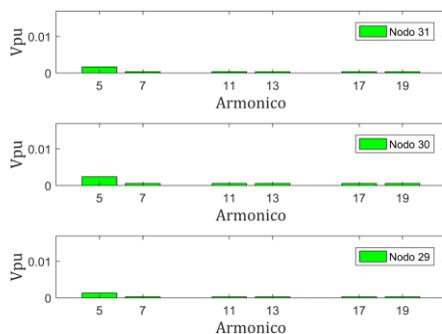


Figura 11. Voltajes armónicos en los nodos 17, 18 y 19

De igual manera en las figuras 12 y 13 se muestra el espectro armónico de voltaje producido por la conexión de los D-STATCOM en los nodos 25 y 30 respectivamente.

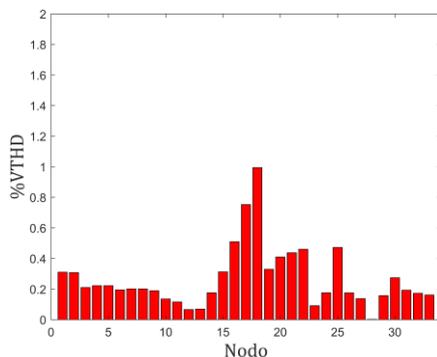


**Figura 12.** Voltajes armónicos en los nodos 24, 25 y 26



**Figura 13.** Voltajes armónicos en los nodos 29, 30 y 31

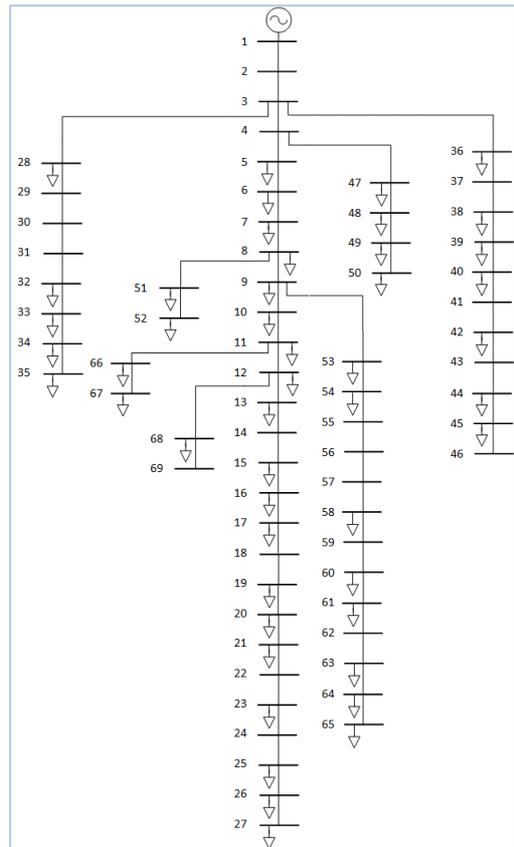
En la figura 14 se presenta el nivel de distorsión armónica total de voltaje, el cual se encuentra por debajo del nivel establecido por la norma IEEE 519, el cual para voltajes inferiores a 69 kV es del 3%. Para caso de estudio propuesto el máximo nivel de distorsión armónica total de voltaje es de 0.994% y ocurre en el nodo 18.



**Figura 14.** %THD en los 33 nodos del sistema

## 5.4 Sistema de distribución IEEE de 69 barras en condiciones iniciales

La figura 15 presenta el diagrama unifilar del sistema de distribución radial de la IEEE de 69 barras de 12.66 kV considerado como segundo caso de estudio. Este sistema tiene una carga total de 3800 kW y 2690 kVAR.



**Figura 15.** Diagrama de 69 barras de la IEEE

En las tablas 16 y 17 incluidas en el anexo 2, se presentan los datos de las líneas y cargas para el sistema de 69 barras; información necesaria para el cálculo de los flujos de potencia requeridos para analizar el sistema.

En la tabla 9 se muestran los valores de voltaje para cada nodo, obtenidos a partir del flujo de potencia del sistema en condiciones iniciales; dicha información obtenida será comparada con los datos resultantes con el modelo de optimización para analizar su mejoría.

Tabla 9: Voltajes en pu del sistema en condiciones iniciales

nodo	$V_{pu}$	nodo	$V_{pu}$
1	1.000	36	0.998
2	0.998	37	0.998
3	0.998	38	0.998
4	0.998	39	0.998
5	0.998	40	0.998
6	0.991	41	0.997
7	0.981	42	0.997
8	0.977	43	0.998
9	0.975	44	0.997
10	0.973	45	0.997
11	0.972	46	0.997
12	0.967	47	0.998
13	0.964	48	0.997
14	0.961	49	0.995
15	0.960	50	0.995
16	0.959	51	0.977
17	0.959	52	0.977
18	0.959	53	0.975
19	0.956	54	0.972
20	0.956	55	0.967
21	0.955	56	0.963
22	0.954	57	0.941
23	0.957	58	0.929
24	0.957	59	0.925
25	0.957	60	0.918
26	0.957	61	0.913
27	0.957	62	0.912
28	0.998	63	0.912
29	0.998	64	0.908
30	0.998	65	0.908
31	0.998	66	0.972
32	0.998	67	0.972
33	0.998	68	0.968
34	0.998	69	0.968
35	0.997	-	-

En la figura 16 se logra observar que existen algunos nodos en el sistema los cuales presentan niveles de voltaje bajos inferiores a 0.95 (pu), por lo que es necesaria la compensación reactiva.

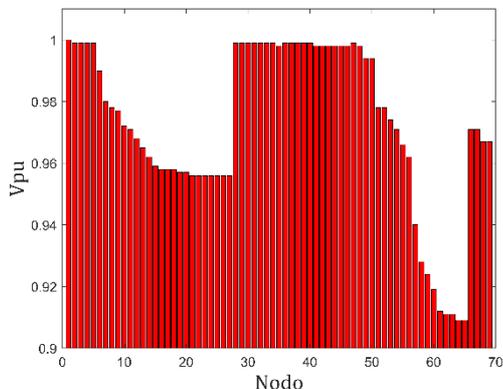


Figura 16. Voltajes para el Sistema de 69 barras de la IEEE en condición inicial

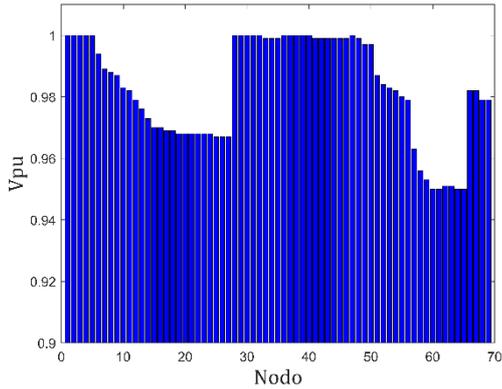
## 5.5 Sistema de distribución IEEE de 69 barras, con la inclusión del D-STATCOM

Con la integración de los D-STATCOM en el sistema se logró mejorar los niveles de voltaje en cada nodo; dichos valores se muestran en la tabla 10.

Tabla 10: Voltajes en pu del sistema con D-STATCOM

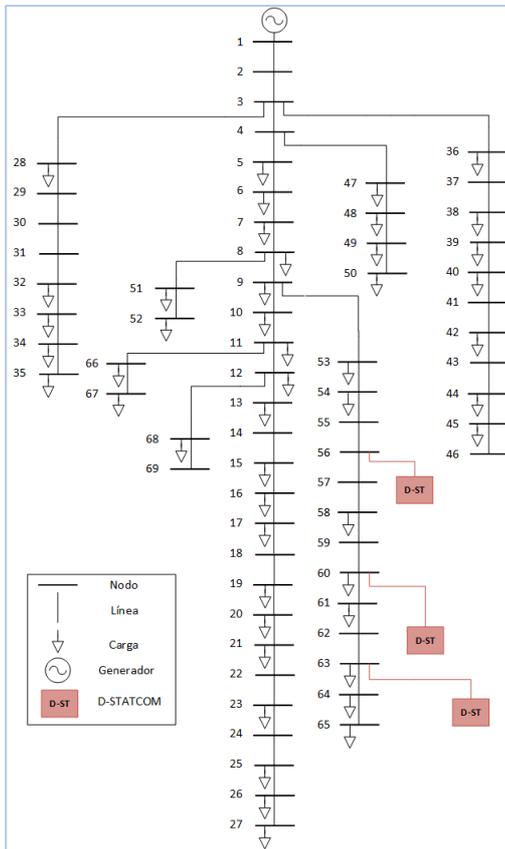
nodo	$V_{pu}$	nodo	$V_{pu}$
1	1.000	36	1.000
2	1.000	37	1.000
3	1.000	38	1.000
4	1.000	39	1.000
5	1.000	40	1.000
6	0.994	41	0.999
7	0.989	42	0.999
8	0.988	43	0.999
9	0.987	44	0.999
10	0.983	45	0.999
11	0.982	46	0.999
12	0.979	47	1.000
13	0.976	48	0.999
14	0.973	49	0.997
15	0.970	50	0.997
16	0.970	51	0.987
17	0.969	52	0.984
18	0.969	53	0.983
19	0.968	54	0.982
20	0.968	55	0.980
21	0.968	56	0.979
22	0.968	57	0.963
23	0.968	58	0.956
24	0.968	59	0.953
25	0.967	60	0.950
26	0.967	61	0.950
27	0.967	62	0.951
28	1.000	63	0.951
29	1.000	64	0.950
30	1.000	65	0.950
31	1.000	66	0.982
32	1.000	67	0.982
33	0.999	68	0.979
34	0.999	69	0.979
35	0.999	-	-

En la figura 17 se ilustra gráficamente que el perfil de voltaje mejoró de manera significativa con la implementación del modelo matemático de optimización. Los valores de voltaje se mantienen en los rangos establecidos de 0.95 – 1.05 (pu).



**Figura 17.** Voltajes en pu para el Sistema de 33 barras de la IEEE con D-STATCOM

El resultado de la optimización indica colocar 3 D-STATCOM en los nodos 56,60 y 63 como se muestra en la figura 18.



**Figura 18.** Diagrama de 69 barras de la IEEE con D-STATCOM

La potencia reactiva intercambiada entre el sistema y el D-STATCOM, resultado de la aplicación del algoritmo de optimización propuesto, el cual considera la inclusión del dispositivo; se muestra en la tabla 11.

Tabla 11: Ubicación y dimensionamiento de los D-STATCOM

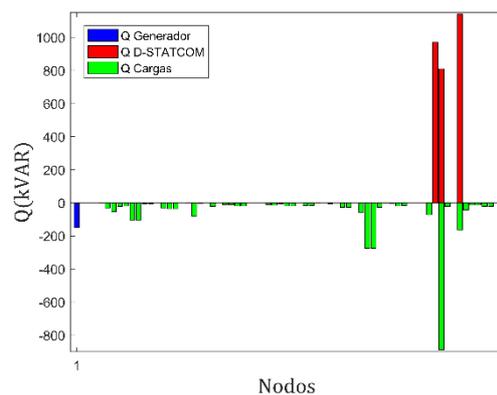
	Nodo	Q (kVAR)
<b>DST1</b>	56	970
<b>DST2</b>	60	810
<b>DST3</b>	63	1140

Los valores de voltaje de cada D-STATCOM los cuales indican que el dispositivo se encuentra operando en modo capacitivo se pueden ver en la tabla 12.

Tabla 12: Voltajes en pu de los D-STATCOM

D-STATCOM	V (pu)
<b>DST1</b>	0.998
<b>DST2</b>	0.966
<b>DST3</b>	0.974

En la figura 19 se muestra la compensación reactiva realizada por los D-STATCOM en el sistema; en color azul se muestra la potencia reactiva consumida por el generador, en color rojo la potencia reactiva inyectada por los D-STATCOM y en color verde la potencia reactiva consumida por las cargas.



**Figura 19.** Potencia Reactiva abastecida y consumida

Los resultados de la compensación reactiva mediante la implementación de los D-STATCOM fueron satisfactorios, prueba de ello se muestra en la figura 20 una comparación entre los voltajes (pu) del sistema en

condiciones iniciales y el sistema compensado; se observa que el perfil de voltaje mejoró en gran medida.

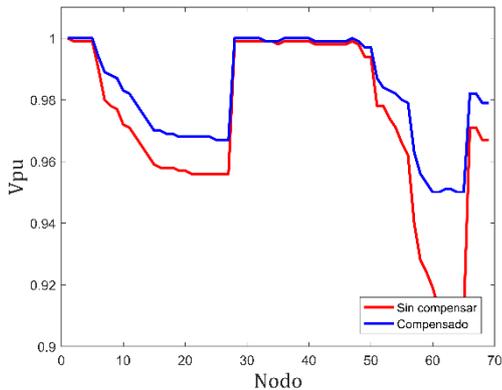


Figura 20. Voltajes en pu del sistema sin compensar y compensado

Con la compensación reactiva las pérdidas eléctricas activas disminuyeron en un 15.55%, este resultado se muestra en la tabla 13.

Tabla 13: Pérdidas de Potencia Activa

Sistema	Pérdidas (kW)
Condición Inicial	225
Compensado D-STATCOM	190

En la figura 21 se ilustra gráficamente la reducción de pérdidas debido a la compensación reactiva.

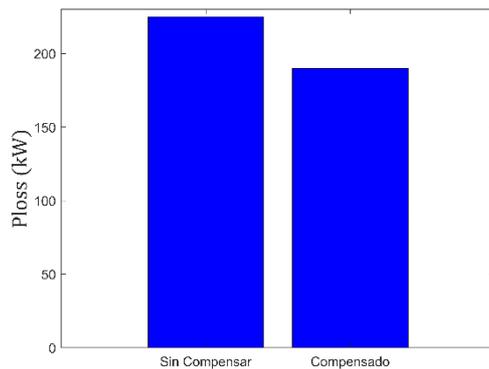


Figura 21. Pérdidas de Potencia activa

## 5.6 Incidencia de armónicos en el Sistema de distribución radial IEEE de 69 barras

Considerando el mismo modelo de D-STATCOM caracterizado por un rectificador de 6 pulsos, y teniendo como resultado de la optimización que los D-STATCOM son conectados en los nodos 56, 60 y 63; los voltajes armónicos para cada nodo en cuestión y los nodos próximos a estos se presentan en las figuras 22, 23 y 24.

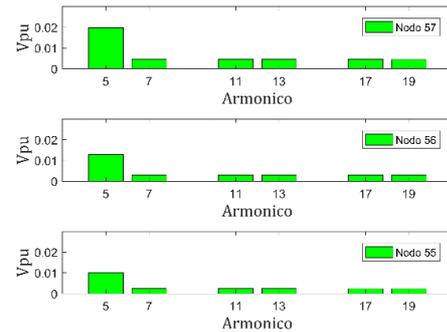


Figura 22. Voltajes armónicos en los nodos 55, 56 y 57

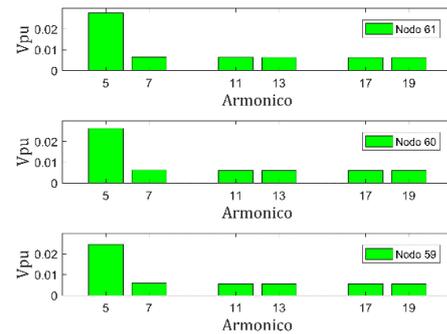


Figura 23. Voltajes armónicos en los nodos 59, 60 y 61

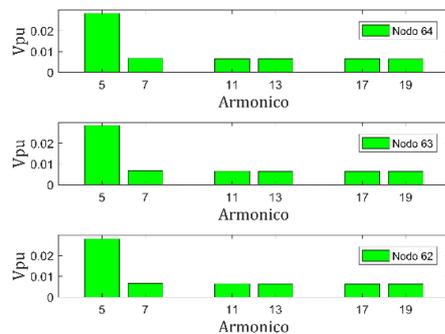


Figura 24. Voltajes armónico en los nodos 62, 63 y 64

La distorsión armónica total de voltaje se muestra en la figura 25, se puede

observar que en algunos nodos el valor supera los límites establecidos por la norma IEEE 519; el valor máximo es de 3.2847% y ocurre en el nodo 63; estos valores producen afectaciones negativas para el sistema por lo que se consideraría importante realizar una mitigación de dichos valores de armónicos mediante la implementación de un modelo matemático que considere al D-STATCOM como filtro de armónicos; o a su vez aplicar otra estrategia de filtrado de armónicos.

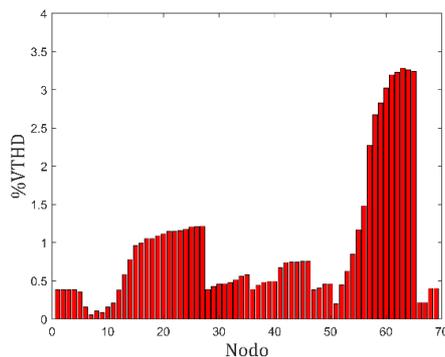


Figura 25. %THD en los 69 nodos del sistema

## 6. Trabajos Futuros

Se recomienda estudiar como continuación de esta investigación, de qué manera incide la compensación de potencia reactiva mediante la inclusión de los D-STATCOM, considerando distintos escenarios de estudio para los dos sistemas de distribución propuestos; analizando la respuesta del modelo de optimización ante situaciones de demanda mínima y demanda máxima.

Se sugiere también como estudio posterior a este trabajo, plantear como función objetivo del modelo de optimización, la minimización de costos de implementación de los D-STATCOM.

Para mejorar el modelo de optimización propuesto se recomienda modelar los D-STATCOM

considerando su característica de filtrado de armónicos.

## 7. Conclusiones

Mediante la implementación del modelo matemático de optimización planteado se logró realizar una compensación de potencia reactiva, mejorando el perfil de voltaje y minimizando las pérdidas activas del sistema; con el algoritmo se encontró soluciones óptimas de ubicación y dimensionamiento para los D-STATCOM, tanto para el sistema de 33 barras y el de 69 barras de la IEEE. Los resultados arrojados por el modelo consideran colocar los dispositivos electrónicos en los nodos 18, 25 y 30 con una reducción del 11.4% de pérdidas activas para el sistema de 33 nodos; y en los nodos 56, 60 y 63 obteniendo una reducción de pérdidas activas del 15.55% para el caso del sistema de 69 nodos. El perfil de voltaje para ambos casos de estudio se lo reguló en el rango de 0.95 y 1.05 pu; lo que conlleva a una mejora en la estabilidad del sistema y en general mejora la eficiencia del mismo.

La investigación consideró la implementación de un dispositivo FACTS para la compensación de potencia reactiva, a pesar de que existen otras estrategias para resolver el mismo problema, debido a que estos elementos son capaces realizar un control en la dinámica del sistema y controlar el flujo de potencia; acción que permite al D-STATCOM conocer si se necesita inyectar o absorber potencia reactiva de la red, garantizando una óptima compensación.

Al analizar la incidencia de los armónicos en la red de distribución, se considera viable la inclusión de los D-STATCOM para el caso del sistema de

33 barras ya que el nivel de distorsión armónica total de voltaje se encuentra por debajo de los límites establecidos por la norma 519 de la IEEE siendo en el nodo más alto de 0.994%. Por el contrario, para el caso del sistema de 69 barras no es factible incluir los D-STATCOM debido a que se tiene un porcentaje de distorsión armónica total de voltaje del 3.2847% en el nodo mayor, valor que excede el límite de la norma, causando perjuicios significativos a la red, reduciendo la calidad de electricidad abastecida; se consideraría viable la implementación del dispositivo si se modela el mismo también como filtro de armónicos, o además del algoritmo de optimización planteado se añade una estrategia de filtrado de armónicos.

## 8. Referencias

- [1] S. R. Castaño, *Redes de Distribución de Energía*. 2004.
- [2] A. Águila Téllez, G. López, I. Isaac, and J. W. González, "Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review," *Heliyon*, vol. 4, no. 8, p. e00746, 2018.
- [3] J. L. A. Islas, "CALIDAD DE ENERGÍA Y SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA," no. 01, pp. 29–54, 2013.
- [4] V. S. Tejwani, S. G. T. U. Ahmedabad, and H. B. Kapadiya, "Power quality improvement in power distribution system using d-statcom," no. 7, 2013.
- [5] K. Yang, Y. Gong, P. Zhang, and Z. Liu, "A Reactive Power Compensation Method Based on Tracing the Power Flow and Loss Function of Power System," 2015.
- [6] H. Radmanesh, "Voltage Sag and Harmonic Analysis in Distribution Network," no. May, pp. 102–105, 2016.
- [7] E. Engineering and M. Jaipur, "Reactive Power Compensation and Power Factor Improvement using Fast Active Switching Technique," 2016.
- [8] J. A. Castrillon, J. S. Giraldo, C. A. Castro, and S. Member, "Mixed Integer Linear Programming Formulation for Optimal Reactive Compensation and Voltage Control of Distribution Power Systems," no. 1, 2017.
- [9] M. Mahdavian, M. Janghorbani, E. Ganji, and I. Eshaghpour, "Voltage Regulation in Transmission Line by Shunt Flexible AC Transmission System Devices," vol. 00, no. c, pp. 107–110, 2017.
- [10] P. Kumar, "Application of Fact Devices for Voltage Stability in a Power System," 2015.
- [11] B. Fani and M. Mahdavian, "Applications of DSTATCOM to Regulate Voltage on a Distribution Network," no. 1, pp. 19–22, 2017.
- [12] V. M. Awasthi and V. A. Huchche, "Reactive Power Compensation using D-STATCOM," *Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain.*, pp. 583–585, 2016.
- [13] T. Chugh and A. Singh, "Reactive Power Compensation using D-Statcom with Fuzzy Logic Supervision," *1st IEEE Int. Conf. Power Electron. Intel. Control Energy Syst.*, pp. 1–6, 2016.
- [14] B. Ismail, M. M. Naain, N. Izzri, A. Wahab, L. J. Awalín, and I. Alhamrouni, "Optimal Placement of DSTATCOM in Distribution Network Based on

- Load Flow and Voltage Stability Indices Studies,” pp. 0–5, 2017.
- [15] P. R. Kasari and M. Paul, “Analysis of D-STATCOM for Power Quality Enhancement in Distribution Network,” pp. 1421–1426, 2017.
- [16] R. Sirjani and A. Rezaee Jordehi, “Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 77, no. April, pp. 688–694, 2017.
- [17] A. K. Tagore and A. R. Gupta, “Impact of DG and D-STATCOM allocation in radial distribution system for reducing harmonics,” *2017 8th Int. Conf. Comput. Commun. Netw. Technol.*, pp. 1–5, 2017.
- [18] S. A. Taher and S. A. Afsari, “Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 34–44, 2014.
- [19] T. Yuvaraj, K. R. Devabalaji, and K. Ravi, *Optimal Placement and Sizing of DSTATCOM Using Harmony Search Algorithm*, vol. 79. Elsevier B.V., 2015.
- [20] D. Jia, T. Wei, and Q. Huo, “The Interaction analysis between power grid and DSTATCOM,” pp. 1–6, 2014.
- [21] J. Grainger and W. Stevenson, *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill, 1996.
- [22] J. Prajapati, V. Patel, and H. Patel, “Load Flow , Short Circuit and stability Analysis Using Matlab INTRODUCTION,” vol. 1, no. 5, 2017.
- [23] J. L. Choque, D. Rodas, and S. Member, “Distribution Transformer Modeling for Application in Three-Phase Power Flow Algorithm,” vol. 7, no. 2, pp. 196–202, 2009.
- [24] G. H. M. Sianipar, G. A. Setia, and M. F. Santosa, “Implementation of Axis Rotation Fast Decoupled Load Flow on Distribution Systems,” pp. 257–261, 2016.
- [25] J. S. Sandhya and V. B. Raju, “General Purpose Efficient Power Flow Model Representation of Network from Generation Bus to Load Bus,” pp. 1–6, 2013.
- [26] M. Abokrishna, A. Diaa, A. Selim, and S. Kamel, “Development of Newton-Raphson Power-flow Method Based on Second Order Multiplier,” no. December, pp. 19–21, 2017.
- [27] W. Wang, “Implementation of A Novel Unified Power Flow Controller into Newton-Raphson Load Flow,” 2017.
- [28] B. C. Neagu, G. Georgescu, and O. Ivanov, “The Impact of Harmonic Current Flow on Additional Power Losses in Low Voltage Distribution Networks,” *2016 Int. Conf. Expo. Electr. Power Eng. (EPE 2016)*, no. Epe, pp. 20–22, 2016.
- [29] C. Lombard and A. P. J. Rens, “Evaluation of system losses due to harmonics in medium voltage distribution networks,” *2016 IEEE Int. Energy Conf. ENERGYCON 2016*, 2016.
- [30] R. Vick, “CHOSEN ASPECTS FOR HARMONIC ANALYSIS IN DISTRIBUTION NETWORKS,” no. 1262, pp. 10–13, 2013.
- [31] M. N. D. Dang, N. Al-mutawaly, and J. Lepoutre, “From Transmission to Distribution Networks - Harmonic Impacts on Modern Grid,” pp. 452–459, 2015.

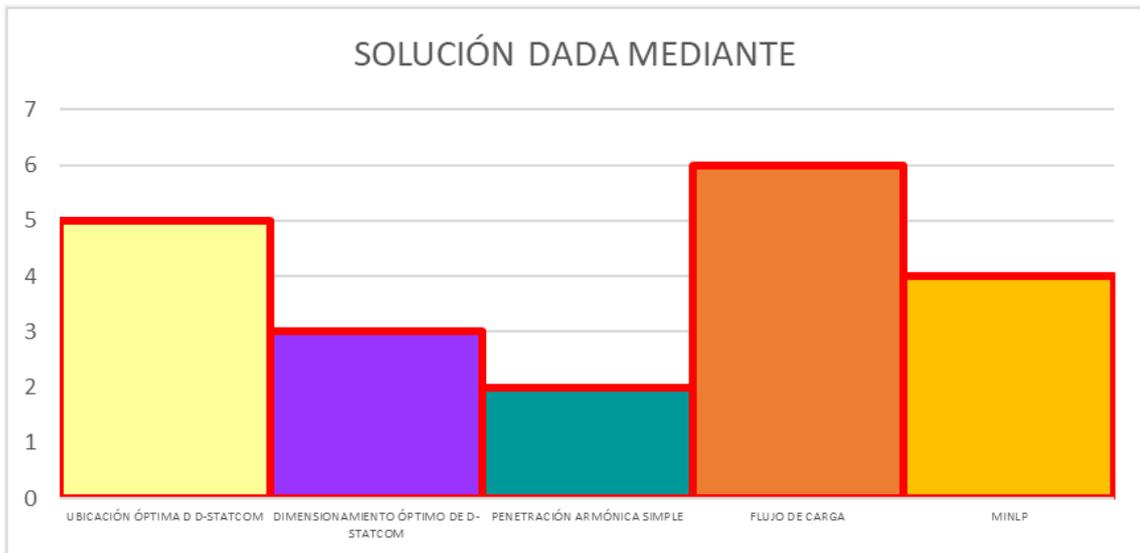
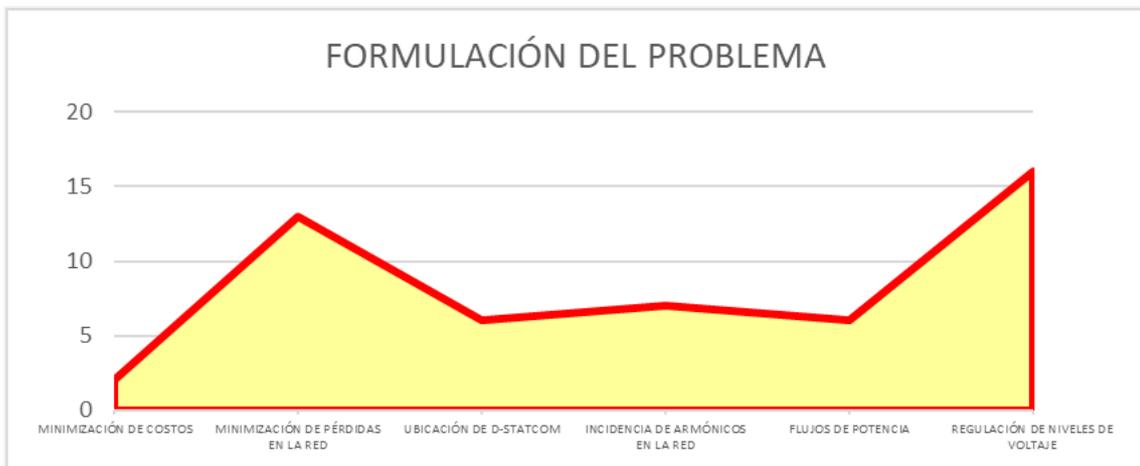
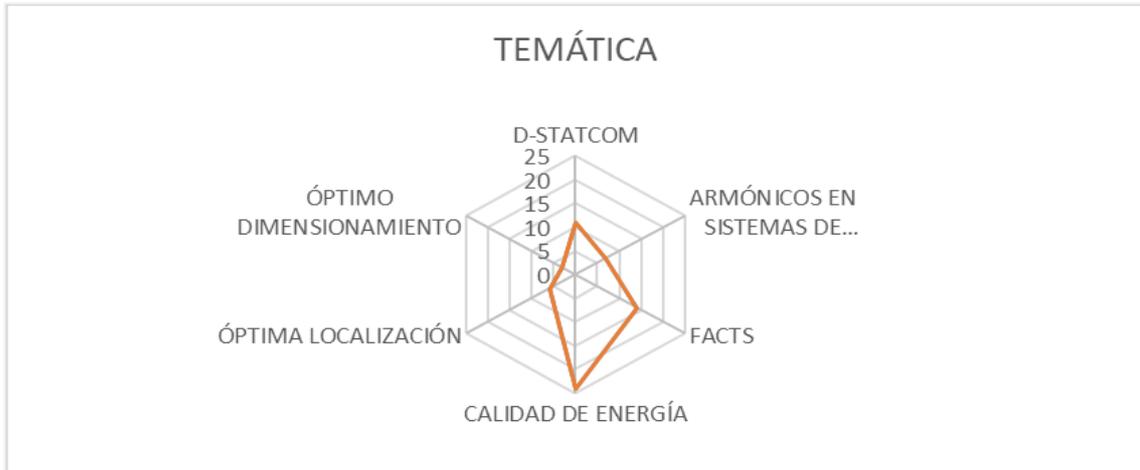
## 8.1 Estado del arte

ÓPTIMA UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE D-STATCOM PARA LA COMPENSACIÓN DE POTENCIA REACTIVA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN CONSIDERANDO LA INCIDENCIA DE ARMÓNICOS.																										
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
			D-STATCOM	ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FACTS	CALIDAD DE ENERGÍA	ÓPTIMA LOCALIZACIÓN	ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA RED	UBICACIÓN DE D-STATCOM	INCIDENCIA DE ARMÓNICOS EN LA RED	FLUJOS DE POTENCIA	REGULACIÓN DE NIVELES DE VOLTAJE	NIVEL DE TENSIÓN	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	THDV	NIVEL DE ARMÓNICOS	ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	FLUJO DE CARGA	PENETRACIÓN ARMÓNICA	SIMULACIONES	UBICACIÓN ÓPTIMA D-STATCOM	DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE D-STATCOM	PENETRACIÓN ARMÓNICA SIMPLE	FLUJO DE CARGA
1	1996	Análisis de Sistemas de Potencia		✗		✗								✗	✗	✗		✗	✗						✗	
2	2004	Redes de Distribución de Energía				✗	✗				✗	✗	✗	✗				✗							✗	
3	2009	Distribution Transformer Modeling for Application in Three-Phase Power Flow Algorithm					✗				✗	✗	✗					✗							✗	
4	2013	Calidad de Energía y Sistemas Eléctricos de Potencia		✗		✗				✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗		✗							✗	
5	2013	General Purpose Efficient Power Flow Model Representation of Network from Generation Bus to Load Bus				✗				✗		✗	✗					✗							✗	
6	2013	Power Quality Improvement in Power Distribution System Using D-Statcom	✗		✗	✗				✗	✗		✗	✗							✗					
7	2013	Chosen Aspects for Harmonic Analysis in Distribution Networks		✗		✗										✗	✗			✗				✗		

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	D-STATCOM	ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FACTS	CALIDAD DE ENERGÍA	ÓPTIMA LOCALIZACIÓN	ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA RED	UBICACIÓN DE D-STATCOM	INCIDENCIA DE ARMÓNICOS EN LA RED	FLUJOS DE POTENCIA	REGULACIÓN DE NIVELES DE VOLTAJE	NIVEL DE TENSIÓN	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	THDV	NIVEL DE ARMÓNICOS	ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	FLUJO DE CARGA	PENETRACIÓN ARMÓNICA	SIMULACIONES	UBICACIÓN ÓPTIMA D-STATCOM	DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE D-STATCOM	PENETRACIÓN ARMÓNICA SIMPLE	FLUJO DE CARGA	MINLP	
8	2014	The Interaction Analysis Between Power Grid and DSTATCOM	☒	☒	☒	☒						☒					☒	☒				☒						
9	2014	Optimal location and sizing of DSTATCOM in distribution systems by immune algorithm	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒				☒	☒			☒	
10	2015	From Transmission to Distribution Networks - Harmonic Impacts on Modern Grid		☒		☒						☒					☒	☒			☒	☒			☒			
11	2015	Application of Fact Devices for Voltage Stability in a Power System			☒	☒								☒	☒	☒						☒						
12	2015	A Reactive Power Compensation Method Based on Tracing the Power Flow and Loss Function of Power System				☒				☒			☒	☒	☒							☒				☒		
13	2015	Optimal Placement and Sizing of DSTATCOM Using Harmony Search Algorithm	☒		☒	☒	☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒	☒			☒				☒	☒				
14	2016	Reactive Power Compensation using D-STATCOM	☒		☒	☒				☒				☒	☒	☒						☒						
15	2016	Reactive Power Compensation using D-Statcom with Fuzzy Logic Supervision	☒		☒	☒				☒				☒	☒	☒						☒						
16	2016	Reactive Power Compensation and Power Factor Improvement using Fast Active Switching Technique			☒	☒				☒				☒	☒	☒						☒						
17	2016	Evaluation of system losses due to harmonics in medium voltage distribution networks		☒		☒				☒		☒				☒	☒	☒				☒						
18	2016	The Impact of Harmonic Current Flow on Additional Power Losses in Low Voltage Distribution Networks		☒		☒				☒		☒				☒		☒			☒	☒						
19	2016	Voltage Sag and Harmonic Analysis in Distribution Network		☒		☒						☒		☒	☒		☒	☒				☒						
20	2016	Implementation of Axis Rotation Fast Decoupled Load Flow on Distribution Systems				☒							☒		☒					☒						☒		

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	D-STATCOM	ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	FACTS	CALIDAD DE ENERGÍA	ÓPTIMA LOCALIZACIÓN	ÓPTIMO DIMENSIONAMIENTO	MINIMIZACIÓN DE COSTOS	MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN LA RED	UBICACIÓN DE D-STATCOM	INCIDENCIA DE ARMÓNICOS EN LA RED	FLUJOS DE POTENCIA	REGULACIÓN DE NIVELES DE VOLTAJE	NIVEL DE TENSIÓN	PÉRDIDAS DE POTENCIA ACTIVA	THDV	NIVEL DE ARMÓNICOS	ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN	FLUJO DE CARGA	PENETRACIÓN ARMÓNICA	SIMULACIONES	UBICACIÓN ÓPTIMA D-STATCOM	DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE D-STATCOM	PENETRACIÓN ARMÓNICA SIMPLE	FLUJO DE CARGA	MINLP
21	2017	Development of Newton-Raphson Power-flow Method Based on Second Order Multiplier				✗							✗		✗					✗						✗	
22	2017	Applications of DSTATCOM to Regulate Voltage on a Distribution Network	✗		✗	✗				✗				✗	✗	✗						✗					
23	2017	Optimal Placement of DSTATCOM in Distribution Network Based on Load Flow and Voltage Stability Indices Studies	✗		✗	✗	✗			✗	✗			✗	✗	✗			✗				✗				✗
24	2017	Analysis of D-STATCOM for Power Quality Enhancement in Distribution Network	✗		✗	✗								✗	✗							✗					
25	2017	Voltage Regulation in Transmission Line by Shunt Flexible AC Transmission System Devices			✗	✗								✗	✗							✗					
26	2017	Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review	✗		✗	✗	✗	✗		✗	✗			✗	✗	✗			✗			✗	✗	✗			✗
27	2017	Impact of DG and D-STATCOM allocation in radial distribution system for reducing harmonics	✗	✗	✗	✗	✗				✗	✗		✗	✗		✗	✗	✗				✗				
28	2017	Mixed Integer Linear Programming Formulation for Optimal Reactive Compensation and Voltage Control of Distribution Power Systems					✗			✗			✗	✗	✗	✗			✗			✗				✗	✗
29	2017	Load Flow , Short Circuit and stability Analysis Using Matlab				✗							✗		✗					✗						✗	
30	2017	Implementation of A Novel Unified Power Flow Controller into Newton-Raphson Load Flow				✗							✗		✗					✗						✗	
			11	7	14	24	6	3	2	13	6	7	6	16	20	13	6	7	6	4	3	16	5	3	2	6	4

## 8.2 Resumen de indicadores



## 9. Anexos

### 9.1 Anexo 1

Tabla 14: Datos de líneas del sistema de distribución IEEE de 33 nodos

$n_i$	$n_j$	$RL(ohm)$	$XL(ohm)$
1	2	0.092	0.048
2	3	0.493	0.255
3	4	0.366	0.189
4	5	0.381	0.197
5	6	0.819	0.424
6	7	0.187	0.097
7	8	0.819	0.424
8	9	0.366	0.189
9	10	0.819	0.424
10	11	0.197	0.102
11	12	0.374	0.194
12	13	0.819	0.424
13	14	0.542	0.280
14	15	0.591	0.306
15	16	0.746	0.386
16	17	0.819	0.424
17	18	0.732	0.379
2	19	0.164	0.085
19	20	0.819	0.424
20	21	0.410	0.212
21	22	0.709	0.367
3	23	0.451	0.233
23	24	0.898	0.465
24	25	0.899	0.465
6	26	0.203	0.105
26	27	0.284	0.147
27	28	0.819	0.424
28	29	0.804	0.416
29	30	0.506	0.262
30	31	0.819	0.424
31	32	0.311	0.161
32	33	0.341	0.176

Tabla 15: Valores de cargas del sistema de distribución radial IEEE de 33 nodos

Nodo	$P_{carga} (kW)$	$Q_{carga} (kVAR)$
1	-	-
2	100	60
3	90	40
4	120	80
5	60	30
6	60	20
7	200	100
8	200	100
9	60	20
10	60	20
11	45	30
12	60	35
13	60	35
14	120	80
15	60	10
16	60	20
17	60	20
18	90	40
19	90	40
20	90	40
21	90	40
22	90	40
23	90	50
24	420	200
25	420	200
26	60	25
27	60	25
28	60	20
29	120	70
30	200	100
31	150	70
32	210	100
33	60	40

## 9.2 Anexo 2

Tabla 16: Datos de líneas del sistema de distribución IEEE de 69 nodos

$n_i$	$n_j$	$RL(ohm)$	$XL(ohm)$
1	2	0.0005	0.0012
2	3	0.0005	0.0012
3	4	0.0015	0.0036
4	5	0.0251	0.0294
5	6	0.3660	0.1864
6	7	0.3811	0.1941
7	8	0.0922	0.0470
8	9	0.0493	0.0251
9	10	0.8190	0.2707
10	11	0.1872	0.0619
11	12	0.7114	0.2351
12	13	1.0300	0.3400
13	14	1.0440	0.3450
14	15	1.0580	0.3496
15	16	0.1966	0.0650
16	17	0.3744	0.1238
17	18	0.0047	0.0016
18	19	0.3276	0.1083
19	20	0.2106	0.0690
20	21	0.3416	0.1129
21	22	0.0140	0.0046
22	23	0.1591	0.0526
23	24	0.3463	0.1145
24	25	0.7488	0.2475
25	26	0.3089	0.1021
26	27	0.1732	0.0572
3	28	0.0044	0.0108
28	29	0.0640	0.1565
29	30	0.3978	0.1315
30	31	0.0702	0.0232
31	32	0.3510	0.1160
32	33	0.8390	0.2816
33	34	1.7080	0.5646
34	35	1.4740	0.4873
3	36	0.0044	0.0108
36	37	0.0640	0.1565
37	38	0.1053	0.1230
38	39	0.0304	0.0355
39	40	0.0018	0.0021
40	41	0.7283	0.8509
41	42	0.3100	0.3623

$n_i$	$n_j$	$RL(ohm)$	$XL(ohm)$
42	43	0.0410	0.0478
43	44	0.0092	0.0116
44	45	0.1089	0.1373
45	46	0.0009	0.0012
4	47	0.0034	0.0084
47	48	0.0851	0.2083
48	49	0.2898	0.7091
49	50	0.0822	0.2011
8	51	0.0928	0.0473
51	52	0.3319	0.1114
52	53	0.1740	0.0866
53	54	0.2030	0.1034
54	55	0.2842	0.1447
55	56	0.2813	0.1433
56	57	1.5900	0.5337
57	58	0.7837	0.2630
58	59	0.3042	0.1006
59	60	0.3861	0.1172
60	61	0.5075	0.2585
61	62	0.0974	0.0496
62	63	0.1450	0.0738
63	64	0.7105	0.3619
64	65	1.0410	0.5302
11	66	0.2012	0.0611
66	67	0.0047	0.0014
12	68	0.7394	0.2444
68	69	0.0047	0.0016

Tabla 17: Valores de cargas del sistema de distribución radial IEEE de 69 nodos

<b>Nodo</b>	<b><math>P_{carga}</math> (kW)</b>	<b><math>Q_{carga}</math> (kVAR)</b>
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	-	-
5	2.6	2.2
6	40.4	30
7	75	54
8	30	22
9	28	19
10	145	104
11	145	104
12	8	5
13	8	5.5
14	-	-
15	45.5	30
16	60	35
17	60	35
18	-	-
19	1	0.6
20	114	81
21	5	3.5
22	-	-
23	28	20
24	-	-
25	14	10
26	14	10
27	26	18.6
28	26	18.6
29	-	-
30	-	-
31	-	-
32	14	10
33	9.5	14
34	6	4
35	26	18.55
36	26	18.55
37	-	-
38	24	17
39	24	17
40	1.2	1
41	-	-
42	6	4.3
43	-	-
44	39.22	26.3

<b>Nodo</b>	<b><math>P_{carga}</math> (kW)</b>	<b><math>Q_{carga}</math> (kVAR)</b>
45	39.22	26.3
46	-	-
47	79	56.4
48	384.7	274.5
49	384.7	274.5
50	40.5	28.3
51	3.6	2.7
52	4.35	3.5
53	26.4	19
54	24	17.2
55	-	-
56	-	-
57	-	-
58	100	72
59	-	-
60	1244	888
61	32	23
62	-	-
63	227	162
64	59	42
65	18	13
66	18	13
67	28	20
68	28	20
69	-	-