

**DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES  
SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y  
CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
ELECTRICIDAD**

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

**TEMA:  
DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES  
SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y  
CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN  
ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES**

**AUTOR:  
JUAN DANIEL PARRA FUELAGAN**

**TUTOR:  
WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS**

**Quito, D.M. noviembre 2021**

Juan Daniel Parra Fuelagan

**DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2021  
Ingeniería Eléctrica

Breve Reseña Histórica e información de contacto



**Juan Daniel Parra Fuelagan** (Y'1997) Realizó sus estudios de nivel secundario en el colegio técnico “Electrónico Pichincha” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en el diseño de un controlador D-STATCOM para la disminución de armónicos y corregir el factor de potencia en el sistema de distribución. [jparraf@est.ups.edu.ec](mailto:jparraf@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Wilson David Pavón Vallejos** (Y'1989). Actualmente es docente a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. Obtuvo su título de tercer nivel en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE como Ingeniero Electrónico en Automatización y Control. Obtuvo su título de cuarto nivel en la Universidad de Newcastle upon Tyne como Magister en Automatización y Control. Candidato a doctor por la Universidad de Ferrara - Italia [wpavon@est.ups.edu.ec](mailto:wpavon@est.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**

©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, Wilson David Pavón Vallejos declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES* realizado por (Juan Daniel Parra Fuelagan), obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., noviembre 2021



.....  
Wilson David Pavón Vallejos CI:  
1719224311

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Juan Daniel Parra Fuelagan, con documento de identificación N° 1726334574, 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: *DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES*, 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 digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito D.M., noviembre 2021



.....  
Juan Daniel Parra Fuelagan

CI: 1726334574

## ÍNDICE GENERAL

Resumen .....	1
Abstract.....	1
1. Introducción .....	2
2. Marco Teórico.....	3
2.1 Distribución eléctrica .....	3
2.2 Armónicos por efecto de cargas no lineales.....	3
2.3 Compensación para mejorar la calidad de energía .....	5
2.4 Compensación tipo D-STATCOM .....	5
3. Planteamiento del problema.....	9
3.1 Escenario para la investigación.....	9
4. Caso de Estudio.....	11
5. Análisis de resultados.....	12
5.1 Caso de estudio 1 .....	12
5.2 Caso de estudio 2 .....	14
6. Conclusiones .....	17
7. Trabajos futuros .....	17
8. Referencias.....	17
9. Estado de Arte.....	21

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Sistema de Distribución Eléctrica equilibrado con corriente por medio de D-STATCOM.....	2
Figura 2 Onda Sinusoidal libre de armónicos .....	3
Figura 3 Onda Sinusoidal con presencia de armónicos .....	4
Figura 4 Pirámide de potencia considerando armónicos .....	5
Figura 5 Esquema unifilar que muestra la impedancia para el armónico de rango h.....	5
Figura 6 Esquema General de un D-STATCOM .....	6
Figura 7 Modo control de corriente de D-STATCOM.....	7
Figura 8 Modo control de voltaje de D-STATCOM .....	7
Figura 9 Componente simétrica secuencia positiva .....	8
Figura 10 Componente simétrica secuencia negativa.....	8
Figura 11 Componente simétrica secuencia cero .....	8
Figura 12 Diseño de D-STATCOM implementado en Matlab/Simulink .....	9
Figura 13 Diagrama de Bloque implementado controlador proporcional PI.....	10
Figura 14 Diagrama de Bloque utilizando estrategia de compensación ISCT.....	10
Figura 15 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos .....	11
Figura 16 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos con compensación D-STATCOM en la barra 7 .....	12
Figura 17 Voltaje trifásico [p.u] de la Barra 1 estado inicial sin compensación.....	12
Figura 18 Voltaje trifásico [p.u] de la carga no lineal estado inicial sin compensación .....	13
Figura 19 Onda de contenido de armónicos THDv estado inicial sin compensación .....	13
Figura 20 Onda de contenido de armónicos THDI estado inicial sin compensación.....	13
Figura 21 Factor de potencia estado inicial sin compensación.....	14
Figura 22 Onda de contenido de armónicos con compensación tipo D-STATCOM en 0.05[seg]. .....	14
Figura 23 Factor de potencia del sistema con compensación en 0.05[seg].....	14
Figura 24 Voltaje [p.u] de sistema IEEE 13 barras modificado, conectado con carga no lineal.....	14
Figura 25 Promedio de Voltaje [p.u] de la barra 7 conectada carga no lineal de alta generación de armónicos .....	15
Figura 26 THDv espectro de armónicos impares sin compensación D-STATCOM .....	15
Figura 27 THDI espectro de armónicos impares sin compensación D-STATCOM.....	15
Figura 28 Factor de potencia en barra 7 sin compensación.....	15
Figura 29 THDv espectro de armónicos impares con compensación D-STATCOM.....	16
Figura 30 THDI espectro de armónicos impares con compensación D-STATCOM.....	16
Figura 31 Factor de potencia en barra 7 con compensación tipo D-STATCOM.....	16
Figura 32 Voltaje [p.u] de sistema IEEE 13 barras modificado, conectado con carga no lineal con compensación tipo D-STATCOM en la barra 7.....	16

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Efectos perjudiciales por efecto Joule .....	3
Tabla 2 Normativa IEEE-519 Distorsión de armónicos de voltaje (THDV) .....	4
Tabla 3 Normativa IEC 61000 Distorsión de armónicos de voltaje (THDV).....	4
Tabla 4 Descripción de fórmulas del D-STATCOM.....	6
Tabla 5 Modo de operación del D-STATCOM.....	7
Tabla 6 Modo de operación de $\beta$ en el controlador .....	8
Tabla 7 Parámetros eléctricos propuestos D-STATCOM .....	9
Tabla 8 Sintonización manual de $K_p$ y $K_i$ para alcanzar el mejor desempeño del sistema.....	10
Tabla 9 Estrategia ISCT .....	10
Tabla 10 Datos de Sistema Eléctrico de Caso .....	11
Tabla 11 Datos de sistema IEEE de 13 barras implementado carga no lineal de alta generación de armónicos. ....	12
Tabla 12 Comparativa de resultados sin/con D-STATCOM caso 1 .....	14
Tabla 13 Comparativa de resultados sin/con D-STATCOM caso 2.....	17

# Diseño de D-STATCOM Controlado por Teoría de Componentes Simétricos Instantáneos (ISCT) para disminuir Armónicos y Corregir el Factor de Potencia en Sistemas de Distribución Eléctrica ante la presencia de Cargas no Lineales

## Resumen

El presente trabajo académico de investigación propone un método de compensación tipo D-STATCOM (Compensador estático de distribución) es mediante la Teoría de Componentes Simétricos Instantáneos (ISCT). Diseñado para la compensación de sistemas de distribución eléctrica desbalanceados, con el fin de reducir la distorsión armónica y corrección de factor de potencia. Esta teoría (ISCT) descompone las señales de corriente y voltaje para análisis de contenido de armónicos. Se planteó 2 casos de análisis donde se integra cargas no lineales con alta generación de armónicos. En el caso 1 se busca analizar la operación del D-STATCOM integrándolo a un sistema trifásico desbalanceado donde se conectará en periodos de tiempo de 0.05[seg]. Los resultados alcanzados fue la disminución de armónicos que se mantiene dentro de los límites mencionados en el documento y la mejora de factor de potencia que oscila entre los 0.85 a 0.97. El caso 2, se analiza un sistema de distribución eléctrica IEEE de 13 barras desbalanceado para demostrar la compensación del D-STATCOM. Como resultado de lo antes mencionado existe corrección del factor de potencia de 0.85 a 0.92 además reducción de distorsión de armónicos de voltaje de 24.49% a 5.19% y de corriente de 19.62% a 10.81% con el objetivo de reducir el porcentaje de armónicos y la mejora de factor de potencia.

**Palabras Clave:** Calidad de energía, carga no lineal, ISCT, D-STATCOM,

THD, factor de potencia.

## Abstract

The present academic research work proposes a compensation method type D-STATCOM (Static Distribution Compensator) is by means of the Instantaneous Symmetric Components Theory (ISCT). Designed for the compensation of unbalanced electrical distribution systems, in order to reduce harmonic distortion and power factor correction. This technique (ISCT) decomposes current and voltage signals for harmonic content analysis. Two analysis cases were proposed where non-linear loads with high harmonic generation are integrated. In case 1, it is sought to analyze the operation of the D-STATCOM by integrating it into an unbalanced three-phase system where it will be connected in periods of time of 0.05 [sec]. The results achieved were the reduction of harmonics that remains within the limits mentioned in the document and the improvement of the power factor that ranges from 0.85 to 0.97. For case 2, an unbalanced IEEE 13-bar unbalanced distribution system was analyzed. As a result, in the case studies there is a power factor correction from 0.85 to 0.92, in addition to a reduction in the distortion of voltage harmonics from 24.49% to 5.19% and the current of the 19.62% to 10.81%. in order to reduce the percentage of harmonics and the power factor improvement.

**Keywords:** Power quality, non-linear load, ISCT, D-STATCOM, THD, power factor

# 1. Introducción

Las empresas de distribución eléctrica son las encargadas de abastecer la demanda y mantener la calidad de la energía con sus usuarios. Esta busca siempre mantener el sistema eléctrico de manera continua es decir sin recortes donde la calidad, confiabilidad y seguridad a los usuarios es indispensable. [1]–[3]

Una de las causas del deterioro de la calidad de la energía se da por las cargas no lineales y dispositivos electrónicos. Los mismos que han suscitado por los avances tecnológicos donde la electrónica juega un rol fundamental en estos dispositivos, además por su gran utilidad todos los usuarios han recurrido a implementarlos.

Consecuentemente existe gran cantidad en los sistemas de distribución eléctrica que cada día va en aumento. [4]–[6]

Estos al generar una onda de intensidad típicamente no sinusoidal que es una mal formación de la corriente eléctrica tanto de voltaje como de corriente, acarrea problemas como, huecos y aumento de voltaje, variación de frecuencia, distorsión armónica, disminución del factor de potencia, impulsos, flickers,

desbalance de fases. (etc.). [7],[8]

Por tal motivo las organizaciones técnicas y agentes reguladores de varios países a nivel mundial han planteado índices para evaluar la calidad de la energía tanto suministrada como la consumida. [9]

Ante la problemática los D-STATCOM (Compensador estático de distribución) son más utilizados para realizar compensación en sistemas trifásicos, considerados una de las técnicas con mayor efectividad al tratarse de la compensación de desbalance en sistemas eléctricos. [10],[11] Debido a él gran desempeño muchos ingenieros se han inclinado por la búsqueda de teorías que busquen la mejora de D-STATCOM.

En ese contexto, se busca con el estudio la implementación de compensación basada en la teoría de componentes simétricas instantáneas.[12]–[14]

En la figura 1 se presenta la implementación del D-STATCOM en un sistema trifásico desbalanceado por cargas no lineales, dividido por usuarios industriales, comerciales y residenciales donde la corriente de compensación circula para la compensación.

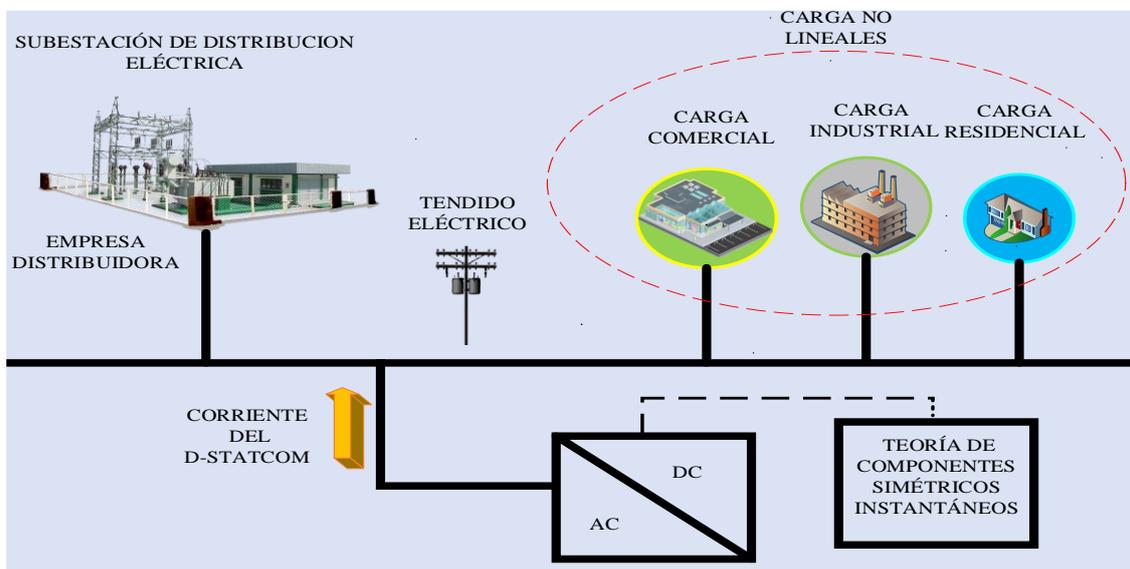


Figura 1 Sistema de Distribución Eléctrica equilibrado con corriente por medio de D-STATCOM

## 2. Marco Teórico

### 2.1 Distribución eléctrica

El sistema de distribución eléctrica es el conjunto de equipos eléctricos que permite el flujo de energía eléctrica a usuarios finales. Las empresas distribuidoras de energía se encargan del despacho de la energía al usuario final, las mismas que se aseguran de mantener, la calidad, confiabilidad y seguridad de la energía.[15], [16]

Para análisis de sistemas de distribución los sistemas de IEEE 13 nodos es denominado como sistema de prueba debido a su pequeña extensión, sus características como banco de condensadores, líneas aéreas, subterráneas y cargas no lineales, permite en las simulaciones llegar a tener un análisis de mayor claridad. [18]

Ahora existe fuentes de generación distribuida donde se integra las Micro-redes estas requieren de un control con cargas no lineales y dispositivos electrónicos de potencia para sus despachos y operaciones. Al estar conectado a la red de distribución estas cargas no lineales y dispositivos electrónicos generan desbalance en los sistemas de distribución.[1][2]

### 2.2 Armónicos por efecto de cargas no lineales

Por la presencia de cargas no lineales y dispositivos electrónicos, independiente de la utilidad industrial, comercial y residencial se genera armónicos.

Los armónicos son denominados múltiplos de la frecuencia fundamental, donde los más cercanos a la fundamental son los más dañinos. [3], [20]

La frecuencia fundamental en países europeos es de 50(Hz) donde existe armónicos de rango 3(150 Hz), rango 5 (250 Hz), de rango 7 (350 Hz) y rango 9 (450 Hz). A raíz de corrientes con

componentes armónicos existen pérdidas por efecto Joule que se relacionan con el factor de potencia de desplazamiento además de grandes pérdidas económicas en los sistemas de distribución .[21]

En la tabla 1 se presenta los problemas por corrientes con componentes armónicos.

Tabla 1 Efectos perjudiciales por efecto Joule

<b>Efecto Joule en sistemas de distribución eléctricos</b>
Incremento de pérdidas por efecto Joule
Sobrecalentamiento en conductores
Sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores
Falla en banco de capacitores y transformadores
Interrupciones en sistemas de telecomunicación

En la figura 2 y 3 se observa las ondas con armónicos y sin armónicos, las cargas con componente no lineal distorsionan las ondas sinusoidales.

La distorsión armónica de voltaje o de corriente ocurre con motores, variadores de velocidad, reactancia de alumbrados, capacitores, convertidores de potencia, entre otros [22], [23].

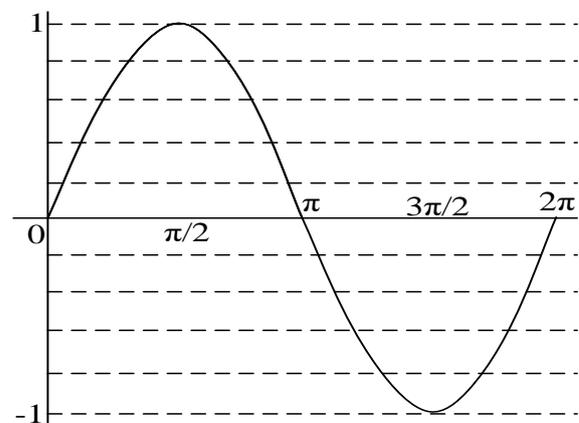


Figura 2 Onda Sinusoidal libre de armónicos

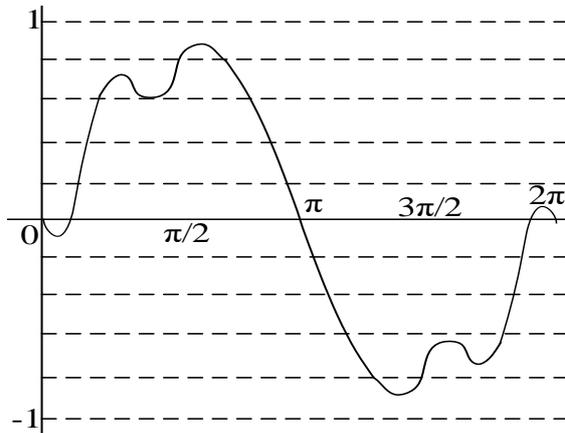


Figura 3 Onda Sinusoidal con presencia de armónicos

La distorsión armónica total (THD) es la suma de todos los armónicos que se genera en el sistema, se analiza por el teorema de Fourier donde la onda debe ser periódica para que exista la descomposición de armónicos.[24]

A causa de (THD) en sistemas de distribución eléctrica los agentes regulatorios y ingenieros que se especializan en el estudio de armónicos participaron para la obtención de normativas.[24]

Se ha realizado normativas para evaluar que limite de (THD) de voltaje y corriente no es perjudicial para deterioro de calidad de la energía, los estándares son IEC 61000 en Europa y ANSI/IEEE 519-1992 en Estado Unidos.[18][25]

En la tabla 2 y 3 se presenta según la norma los límites de THD y orden de los armónicos impares permisibles que el sistema a pesar de tener un porcentaje de THD no sufra ninguna afectación.

Tabla 2 Normativa IEEE-519 Distorsión de armónicos de voltaje (THDV)

Orden de armónico	Normativa IEEE-519
THD	8%
3er armónico	5%
5to armónico	5%
7mo armónico	5%
9no armónico	5%

Tabla 3 Normativa IEC 61000 Distorsión de armónicos de voltaje (THDV)

Orden de armónico	Normativa IEEE-519
THD	8%
3er armónico	5%
5to armónico	6%
7mo armónico	1.5%
9no armónico	2.5%

Para conocer el porcentaje de distorsión armónica en la ecuación (1) donde se evalúa la señal fundamental.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} Y_h^2}}{I_L} * 100 \quad (1)$$

En la ecuación 2 y 3 nos indica la distorsión de la onda de tensión y de corriente, donde se calcula en relación con el contenido de armónicos y la frecuencia fundamental. [26]

$$THDI = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100 \quad (2)$$

$$THDv = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}}{V_L} * 100 \quad (3)$$

$$S = P + jQ \quad (4)$$

La fórmula (4) de la potencia general sin presencia de armónicos.

En la figura 4, se observa la pirámide de potencias para tomar en cuenta los valores fundamentales debido a la aparición de armónicos que es desglosada en las siguientes formulas, esta nace del triángulo de potencia que es basada en la ecuación (4).

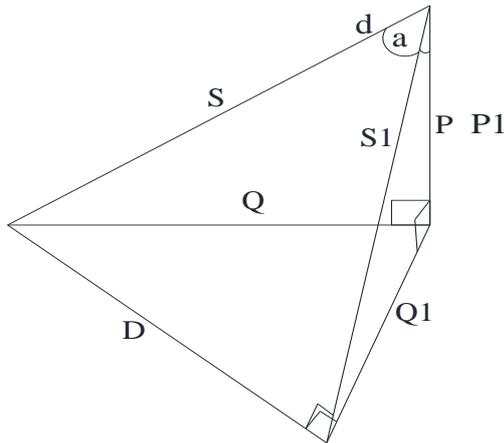


Figura 4 Pirámide de potencia considerando armónicos

En la ecuación (5 y 6) se encuentra la potencia aparente  $S$  como potencia activa  $P$  cuando existen armónicos en el sistema.

En la ecuación (7 y 8) se encuentra la potencia reactiva  $Q$  como potencia reactiva fundamental  $Q1$  cuando existen armónicos en el sistema.[16]

$$S = VI_{rms} = V * \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (5)$$

$$P = P_1 = VI_1 * \cos(\varphi_1) \quad (6)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (7)$$

$$Q_1 = VI_1 * \sin(\varphi_1) \quad (8)$$

En la ecuación (9) existe la distorsión de la onda conocida como potencia distorsionante  $D$ .

Y en la ecuación (10) el factor de potencia de desplazamiento en relación con la pirámide de potencias en la figura (5).

$$D = V * \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (9)$$

$$FP = \frac{P}{S_1} = \cos(\varphi_1) \quad (10)$$

En la figura 5, muestra como existe una impedancia de la línea en el circuito para alimentar una carga no lineal esto provoca un aumento de corriente.[27]

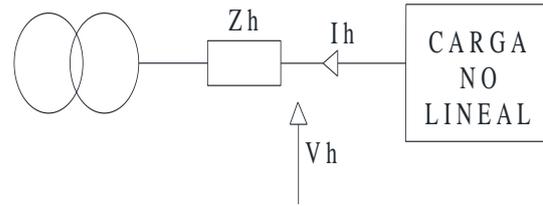


Figura 5 Esquema unifilar que muestra la impedancia para el armónico de rango  $h$

$$V_h = Z_h * I_h \quad (11)$$

En la ecuación (11), un armónico de orden  $h$  genera en la impedancia  $Z_h$  un voltaje con contenido de armónico por consiguiente la carga no lineal recibe también parte de la distorsión de la línea.

En la ecuación (12) se define el factor de potencia que hace relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$Fp = \frac{\text{Potencia Activa (P)}}{\text{Potencia Aparente (S)}} \quad (12)$$

### 2.3 Compensación para mejorar la calidad de energía

En la actualidad las empresas distribuidoras son comprometidas con un problema de calidad de energía debido a la gran cantidad de cargas no lineales y otras cargas. La calidad de la energía eléctrica en distribución se analiza en caída de voltaje y los armónicos por las cargas no lineales.

La caída de voltaje es la disminución de los voltajes rms o valores pico que se presenta en CA donde se genera pérdidas en los diferentes sistemas.-Existen varios métodos de compensación en la actualidad con el fin de entregar una energía de calidad además de cumplir con ciertos parámetros que permite un sistema eficiente.[28]

### 2.4 Compensación tipo D-STATCOM

La compensación tipo D-STATCOM es un compensador centrado en la electrónica de potencia que es conectado

a la red eléctrica en paralelo.[29], [30] El D-STATCOM inyecta corriente compensación y obliga a que la corriente que circula por el sistema lo que ayudara a que las cargas no lineales interfieran con el desequilibrio y generación de armónicos.[12], [14] Los D-STATCOM se compone de una fuente de voltaje DC, VSC,

transformador de acoplamiento el cual actúa como compensador de potencia reactiva cuando el sistema sufre alguna perturbación.

En la figura 6, se visualiza un esquema general del D-STATCOM con sus componentes y sus controladores.[29], [31]

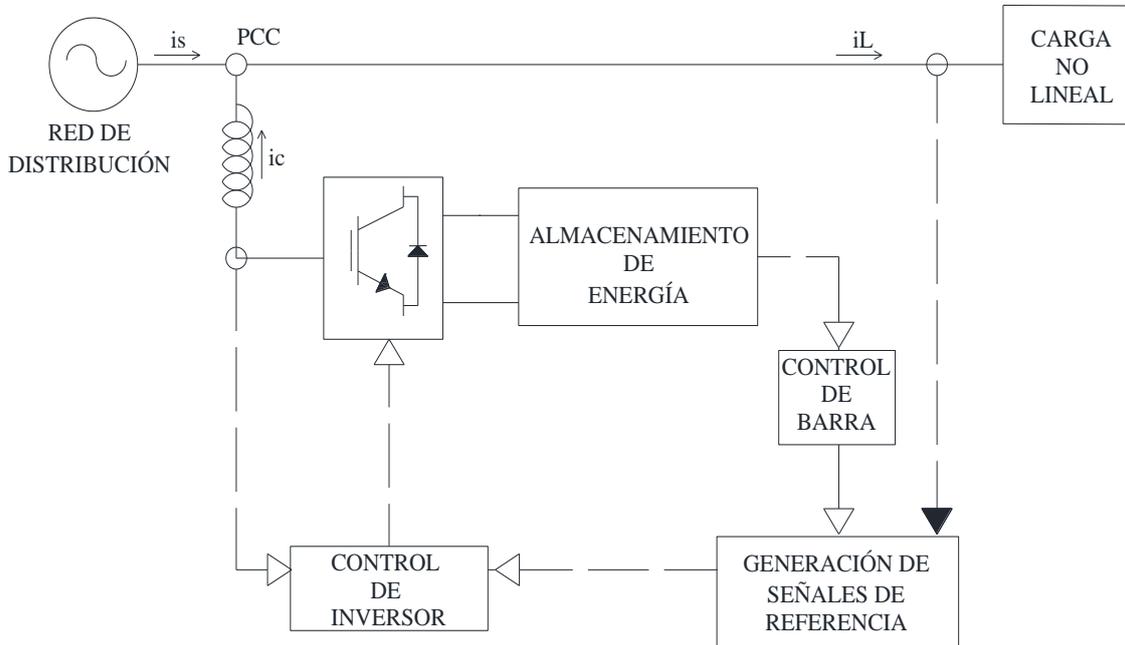


Figura 6 Esquema General de un D-STATCOM

El D-STATCOM para la compensación de armónicos y factor de potencia está basado en tres VSC trifásicos de 4 patas con 6 transistores cada uno con un diodo y un condensador de CC. Para este propósito se implementa las siguientes ecuaciones

$$P_{com} = \frac{|V_{pcc}| * |V_{com}|}{X_{com}} * \sin \delta \quad (13)$$

$$Q_{com} = \frac{|V_{pcc}| * |V_{com}|}{X_{com}} * \cos \delta \dots \dots - \frac{|V_{pcc}|}{X_{com}} \quad (14)$$

Al integrar en la ecuación (13 y 14) la diferencia angular de voltaje  $\delta$  que es definido por:

Si la diferencia angular de voltaje es  $\delta = 0$ .

$$P_{com} = 0 \text{ [W]} \quad (16)$$

$$Q_{com} = \frac{|V_{pcc}| * |V_{com}|}{X_{com}} \text{ [VAR]} \quad (17)$$

En la ecuación 16 y 17, hace referencia a el modo de operación cuando el compensador entrega Q reactiva

Tabla 4 Descripción de fórmulas del D-STATCOM

Nombre	Descripción
$V_{pcc}$	Voltaje en el punto de conexión
$V_{com}$	Voltaje del D-STATCOM
$X_{com}$	Reactancia del D-STATCOM y el sistema
$\delta$	Diferencia angular de voltaje entre D-STATCOM y sistema
$P_{com}$	Potencia activa del D-STATCOM

$Q_{com}$	Potencia reactiva del D-STATCOM
-----------	---------------------------------

Donde el control de variación de voltaje  $\delta$  define el modo de operación del D-STATCOM. Existen 2 tipos de modos de operación del D-STATCOM dependiendo de las necesidades que sufra el sistema para su compensación.

En la figura 7, se presenta el primer modo es el control de corriente que se basa en el almacenamiento de en una bobina la cual cumple con la inyección de corriente de secuencia positiva al punto de conexión conectado en paralelo, una de las ventajas de este modo es la corrección del factor de potencia. [17], [32]–[34]

En la figura 8, se presenta el segundo modo es el control de voltaje se lo cataloga como una VSC la energía se almacena en un condensador donde controlará el PCC o punto de conexión cuando exista huecos de voltaje, desequilibrios de voltaje y THD en la red.[35]

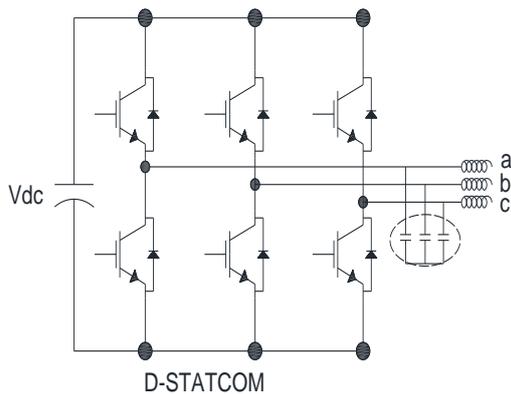


Figura 7 Modo control de corriente de D-STATCOM

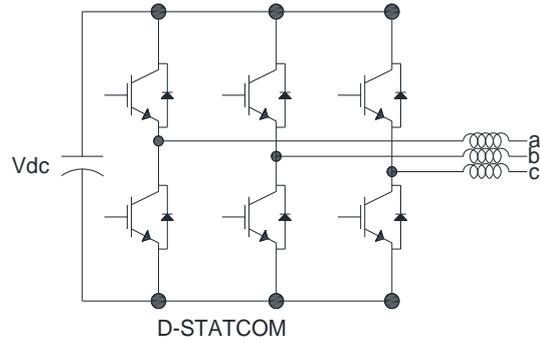


Figura 8 Modo control de voltaje de D-STATCOM

A continuación, se presenta las condiciones de los modos de operación en la tabla 5.[36]

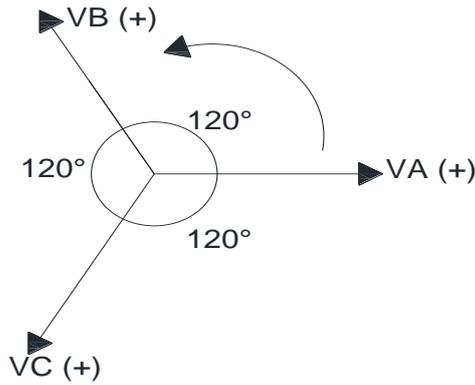
Tabla 5 Modo de operación del D-STATCOM

CONDICION	FUNCIONAMIENTO	
$\text{Ang}(\varphi = \theta)$	Intercambio potencia Q	Reactiva
$ V1  >  V2 $	Absorbe potencia Q	Inductiva
$ V1  <  V2 $	Genera potencia Q	Capacitiva
$\text{Ang}(\varphi < \theta)$	Absorbe potencia P	Eleva V1
$\text{Ang}(\varphi > \theta)$	Inyecta potencia P	Reduce V1

Esta estrategia de ISCT parte de la matriz de transformación de componentes simétricas en la ecuación (18), es utilizada para la descomposición de corrientes y voltajes trifásicos del sistema eléctrico en secuencia positiva, negativa y cero.[37]

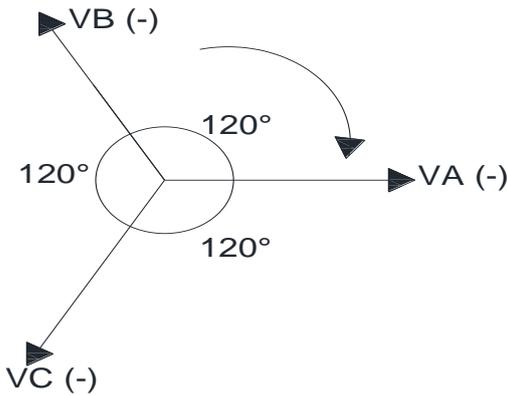
$$\begin{bmatrix} V(+)\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V(-)\end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} V(0)\end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} VA \\ VB \\ VC \end{bmatrix} \quad (18)$$

En la figura 9, 10 y 11 se observa la descomposición fasorial de las componentes simétricas.[37]



Secuencia Positiva (+)

Figura 9 Componente simétrica secuencia positiva



Secuencia Negativa (-)

Figura 10 Componente simétrica secuencia negativa



Secuencia Cero (0)

Figura 11 Componente simétrica secuencia cero

Esta descomposición permite analizar y desarrollar estrategias para la compensación de sistemas eléctricos que sufra de perturbaciones, aparición de THD y corrección de factor de potencia (etc.)

La estrategia ISCT considera los voltajes, corrientes y impedancia de las secuencias es considerada en la siguiente ecuación (16).[37]

El propósito del controlador es obtener las corrientes de la fuente equilibradas

por lo que se considera la secuencia positiva tanto de voltaje como de corriente y es considerada en la ecuación (19) igualando las corrientes de referencia a cero.

$$I_{sa}^* + I_{sb}^* + I_{sc}^* = 0 \quad (19)$$

Donde el factor de potencia se analiza en la siguiente ecuación (20).

$$(V_a + aV_b + a^2V_c) = (I_{sa}^* + aI_{sb}^* + a^2I_{sc}^*) - \varphi \quad (20a)$$

Que se simplifica en:

$$\tan^{-1}(K_1/K_2) = \tan^{-1}(K_3/K_4) - \varphi \quad (20b)$$

Donde:

$$K_1 = \sqrt{\frac{3}{2}}(V_b - V_c)$$

$$K_2 = \frac{3}{2}(V_a)$$

$$K_3 = \sqrt{\frac{3}{2}}(I_{sb}^* - I_{sc}^*)$$

$$K_4 = \frac{(I_{sa}^* - I_{sb}^*)}{\frac{2 - I_{sc}^*}{2}}$$

(20c)

Definiendo así el Angulo

$$\beta = \tan \frac{\varphi}{\sqrt{3}}$$

(20d)

Resolviendo las ecuaciones (20a, 20b, 20c y 20d) el resultado es:

$$\begin{aligned} (V_b - V_c + \beta V_a) * I_{sa}^* + \dots \\ (V_c - V_a + \beta V_b) * I_{sb}^* + \dots \\ (V_a - V_b + \beta V_c) * I_{sc}^* = 0 \end{aligned} \quad (21)$$

Tabla 6 Modo de operación de  $\beta$  en el controlador

$\beta$	Funcionamiento
$\beta = 0$	Las corrientes de la fuente deben estar en fase con el punto de conexión o PCC
$\beta \neq 0$	La fuente suministra o absorbe potencia Q

El propósito es que el compensador actúe cuando al sistema se conecte una carga no lineal de alta generación de armónicos o sufra algún efecto negativo, el D-STATCOM suministra potencia activa de la carga y mitigue las pérdidas que existan.[17], [30], [32]

$$V_a I_{sa}^* + V_b I_{sb}^* + V_c I_{sc}^* = P_{lavg} + P_{loss} \quad (22)$$

Donde  $P_{lavg}$  es la potencia activa filtrada de la carga, este proceso se da mediante un filtro móvil que se encuentra ajustado con un tiempo determinado. [34]

### 3. Planteamiento del problema

Ante la problemática de calidad de la energía por cargas no lineales y dispositivos electrónicos que genera armónicos y reducción del factor de potencia en el sistema de distribución eléctrica. Se diseñará la solución mediante un D-STATCOM que, basado en componentes simétricos instantáneos, permita la descomposición de corrientes y voltajes trifásicas. Al descomponer en componentes simétricas exista una detección de desbalance o THD para el D-STATCOM entre en operación dependiendo de las necesidades del sistema. Esta estrategia nos permite descomponer en secuencia positiva, negativa y cero.

Para la implementación y análisis del compensador se implementará en el

software Matlab/Simulink, por sus características nos permite modelar, controlar y simular cualquier tipo de sistema.

### 3.1 Escenario para la investigación

El escenario de esta investigación se basa en el diseño de un compensador tipo D-STATCOM basado en la teoría de componentes simétricos. [14]

En la tabla 7 se presenta los parámetros eléctricos del D-STATCOM propuestos para la validación de la estrategia.

Tabla 7 Parámetros eléctricos propuestos D-STATCOM

Datos	Valor	Unidad
Condensador de cc	8000	uF
Filtro L	2.3	mH
Filtro C	18	uf
Voltaje de enlace DC	800	V
Transformador del PCC	13.8/1.38	Kv

En la figura 12, se presenta el diseño implementado en el software Matlab/Simulink. Conectado en paralelo con el sistema con una fuente de voltaje en DC. Donde  $I_{sr}$ ,  $I_{sy}$ ,  $I_{sb}$  son las corrientes referencias que se detectan por el controlador.

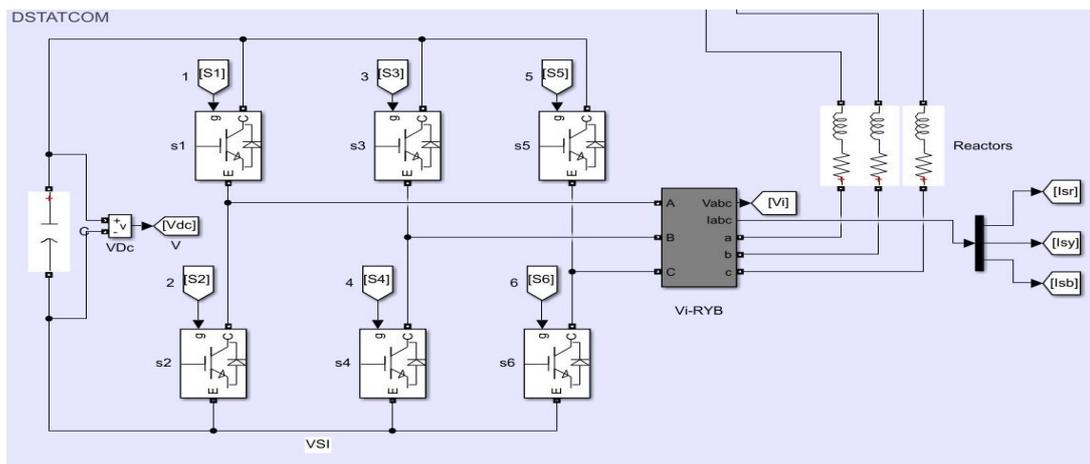


Figura 12 Diseño de D-STATCOM implementado en Matlab/Simulink

Existen 2 pares  $K_{id}$  y  $K_{pd}$ , los mismos que se los denomina controladores integrales de ganancia del D-STATCOM implementando así la estrategia antes mencionada ISCT. En la tabla 7, se detalla los valores de sintonización de los controladores de ganancia.

Tabla 8 Sintonización manual de Kp yKi para alcanzar el mejor desempeño del sistema

Controlador de ganancia	Valores
Ki (V)	800
Kp (V)	1200
Ki (I)	100e-12
Kp (I)	0.6

En la figura 12, hace referencia a el controlador PI implementado en la estrategia.

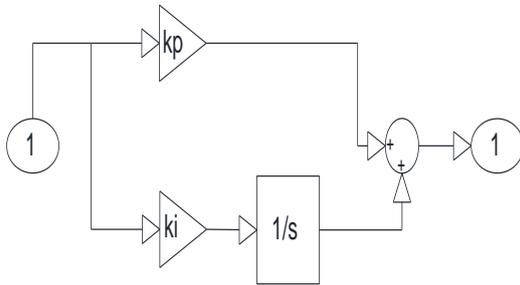


Figura 13 Diagrama de Bloque implementado controlador proporcional PI

$$I_c(s) = \frac{V_{pcc}(s)}{Z_c(s)} - I_{pcc}(s) \quad (23)$$

En la tabla 8, se describe componentes de las fórmulas planteadas.

Tabla 9 Estrategia ISCT

$I_c(s)$	Corriente de la componente simétrica del consumidor
$V_{pcc}(s)$	Voltaje de la componente simétrica del punto de conexión
$I_{pcc}(s)$	Corriente de la componente simétrica del punto de conexión
$Z_c(s)$	Impedancia de componente simétrica

En la figura (13) se muestra el diagrama de bloque del controlador utilizando la estrategia de compensación ISCT.

Donde  $V_{dce} = V_{dc}^* - V_{dc}$  = error de voltaje que exista en el punto de conexión, manteniendo el voltaje de referencia del D-STATCOM sin variación. Además se implementa, los voltajes del sistema ( $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ ), corrientes del sistema ( $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  y  $I_{sc}$ ), corrientes de carga ( $I_{La}$ ,  $I_{Lb}$  y  $I_{Lc}$ ) y el voltaje del D-STATCOM en DC  $V_{dc}$ . [17]

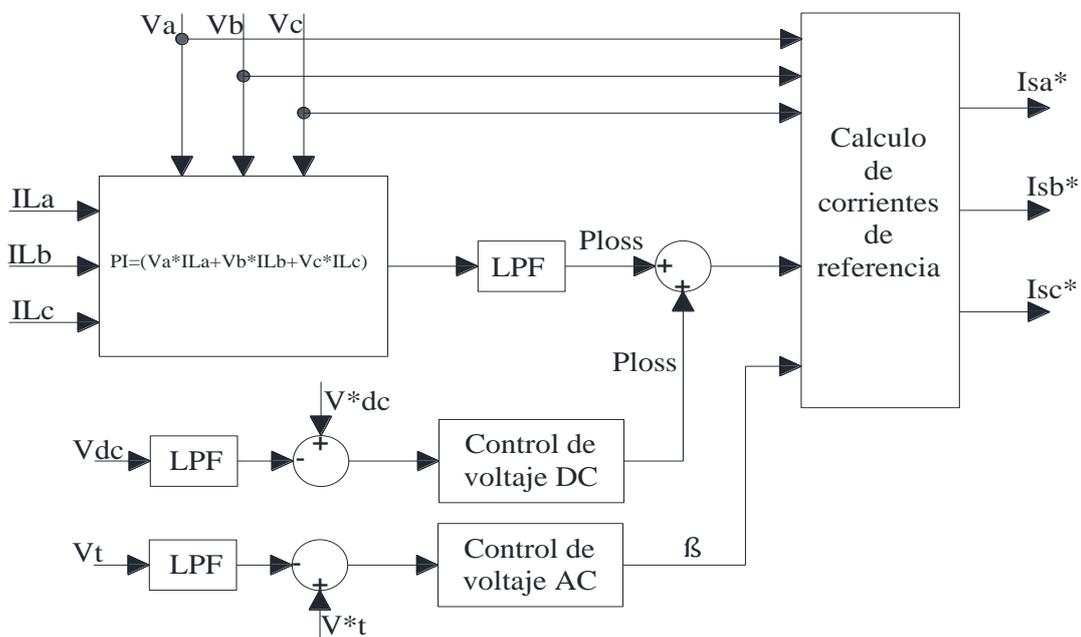


Figura 14 Diagrama de Bloque utilizando estrategia de compensación ISCT

Al momento de la regulación de voltaje cuando exista un desfase entre el sistema eléctrico y el PCC, el controlador proporcional PI debe estimar el  $\beta$  como se estima en la ecuación 22.

$$\beta = K_{pa}V_e + K_{ia} \int V_e dt \quad (22)$$

Donde  $V_e = V_t^* - V_t =$  error de voltaje de referencia y el voltaje que localiza en el punto de conexión o PCC,  $K_{ia}$  y  $K_{pa}$  son los controladores integrales de ganancia del Controlador proporcional PI. La amplitud del voltaje del punto de conexión o PCC se mide mediante la ecuación (23).

$$V_t = \sqrt{\left(\frac{2}{3}\right) * (V_a^2 + V_b^2 + V_c^2)} \quad (23)$$

Al resolver las ecuaciones (17, 19 y 20) que compone la estrategia ISCT

obtendremos:  $I_{sa}^* = \frac{(V_a - (V_b - V_c) * \beta) * Plavg - Ploss}{A}$

$$I_{sb}^* = (V_b - (V_c - V_a) * \beta) * \frac{Plavg - Ploss}{A}$$

$$I_{sc}^* = (V_c - (V_a - V_b) * \beta) * \frac{Plavg - Ploss}{A} \quad (24)$$

Las corrientes de la fuente de referencia ( $I_{sa}^*$ ,  $I_{sb}^*$  y  $I_{sc}^*$ ), son detectadas por el D-STATCOM para la operación y corrección de la señal donde es necesario conocer las corrientes actuales que circulan en el sistema eléctrico ( $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$  y  $I_{sc}$ ).

Con el fin de encontrar los errores existentes se comparan tanto las corrientes de referencia como la del sistema, que producen un desbalance.

Para que el controlador de corriente pueda generar las señales de conmutación y la compensación obteniendo un buen desempeño y rapidez.

#### 4. Caso de Estudio

Se plantea dos casos de estudio con el fin de ejemplificar que ocurre cuando se conecta una carga no lineal. En un sistema trifásico y otro caso

implementado un sistema IEEE de 13 barras desbalanceado por una carga no lineal, para el análisis se desarrolla en estado inicial y con conexión de D-STATCOM.[38]

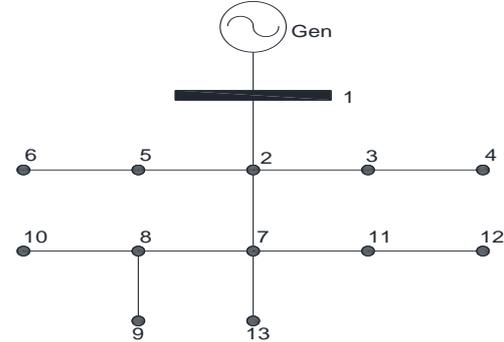


Figura 15 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos

Para el caso 1 se implementa un sistema trifásico el cual se encuentra desbalanceado por una carga no lineal de alta generación de armónicos. Para este caso se analiza el sistema como actúa frente a esta carga no lineal es decir su estado inicial y consecuentemente como actuará el D-STATCOM. Al ser una carga no lineal cuenta con un puente de 6 diodos una resistencia de carga de 50[ohm]. En la tabla 5 se detalla los valores eléctricos del sistema a analizar.

Tabla 10 Datos de Sistema Eléctrico de Caso

Datos	Valor	Unidad
Frecuencia nominal	$2\pi.60$	Rad/s
Voltaje de la red (rms)	13.8	kV
Carga $3\phi$ no lineal	480	V
Resistencia de Diodo ( $R_{on}$ )	1e-1	$\Omega$
Capacitancia del diodo	0.1e-6	F
Resistencia de la carga	50	$\Omega$
Inductancia de la carga	1e-3	H
Transformador de carga no lineal	13.8/480	kV/V

Para el caso 2 se analiza un sistema de distribución IEEE 13 nodos el cual va a estar sometido en uno de sus nodos una carga no lineal de alta generación de armónicos.

En este caso se desea comprobar el desempeño y en que afecta la carga no lineal en el sistema. Al ser una carga no lineal se espera que el sistema sufra de armónicos como una reducción de factor de potencia de ser el caso.

En la figura 17, detalla la conexión de una carga no lineal en el sistema IEEE de 13 barras.

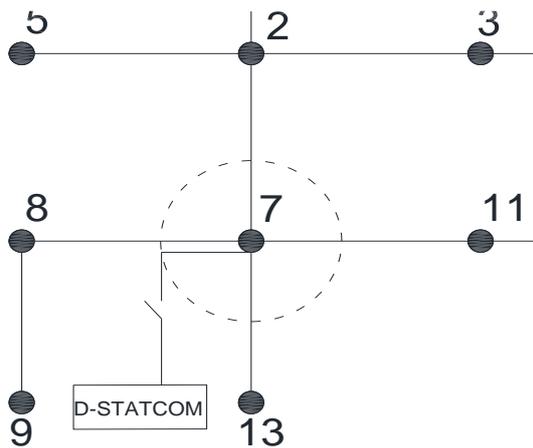


Figura 16 Sistema de Distribución de la IEEE de 13 Nodos con compensación D-STATCOM en la barra 7

Se modifico la barra 7 donde se conectó la carga no lineal.

En la tabla 6 se detalla los valores eléctricos del sistema IEEE 13 nodos a analizar.

Tabla 11 Datos de sistema IEEE de 13 barras implementado carga no lineal de alta generación de armónicos.

Datos	Valor	Unidad
Frecuencia nominal	$2\pi.60$	Rad/s
Voltaje de la red	11.5	kV
Carga 3 $\phi$ no lineal	480	V
Transformador de carga no lineal	13.8/480	kV/V
Resistencia de	$1e-1$	$\Omega$

Diodo ( $R_{on}$ )		
Capacitancia del diodo	$0.1e-6$	F
Resistencia de la carga	50	$\Omega$
Inductancia de la carga	$1e-3$	H
Transformador de carga no lineal	13.8/480	kV/V

## 5. Análisis de resultados

### 5.1 Caso de estudio 1

En la sección posterior se presentó los sistemas a analizar mediante la estrategia de compensación propuesta.

Para el análisis y solución del problema se presenta el sistema en su estado inicial, en la figura 17, el comportamiento del voltaje en p.u de la barra 1 del sistema eléctrico conectando una carga no lineal.

En el sistema se aplica un voltaje rms de 13.8 [kV], es simulado en un tiempo de 0.15 [seg] como se muestra en la imagen. En la figura se puede notar una caída de voltaje que llega a 0.94 [pu], es decir, que no cumple con los límites de voltaje con anterioridad mencionados y se visualiza claramente una distorsión en la onda sinusoidal causada por la carga no lineal.

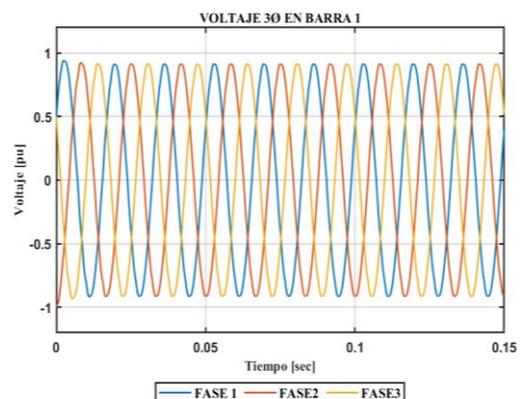


Figura 17 Figura 17 Voltaje trifásico [p.u.] de la Barra 1 estado inicial sin compensación

Ahora, con el fin de analizar el comportamiento de la carga no lineal conectada a la barra 1 del sistema. La figura 18, muestra el comportamiento del voltaje en p.u, solo de la carga que opera a un voltaje rms de 415V.

Donde es más notable la distorsión de la onda sinusoidal de la carga no lineal.

Ahora bien, esto se da por los diferentes niveles de voltaje del sistema y de la carga.

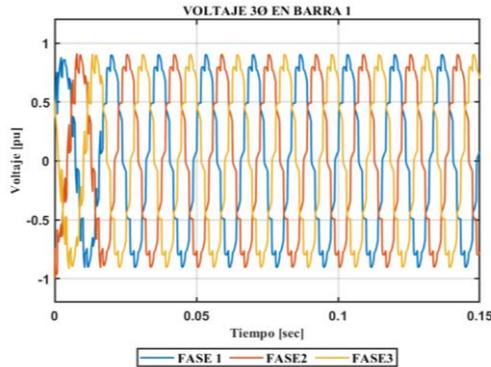


Figura 18 Voltaje trifásico [p.u] de la carga no lineal estado inicial sin compensación

En la gráfica 19, con el fin de realizar un análisis por fases se muestra los Thdv de voltaje trifásico. En la gráfica se simula el sistema en un periodo de 0.20[seg].

La fase 1 al energizarse genera un pico de Thdv que no sobrepasa el límite mencionado en la tabla 2 de 5 %, pero en un transcurso de 0.08 [seg] decae a 2.5%, es decir, que la fase 1 no genera efectos negativos.

En cambio, las otras fases alcanzan un pico de 7.80% en la fase 2 y 6.03% en la fase 3, al igual que la fase 1 la fase 3 empieza a decaer su porcentaje en el mismo periodo de tiempo hasta 2% y en la fase 2 el periodo de tiempo es mayor hasta decaer el porcentaje de Thdv.

Este análisis de fases se realizó para constatar los picos y tiempo que la carga no lineal genera pérdidas o desbalances. Además, que en otros casos los armónicos de voltaje son mucho más alto, es decir, que ocasionarían un daño mayor en la calidad de la energía.

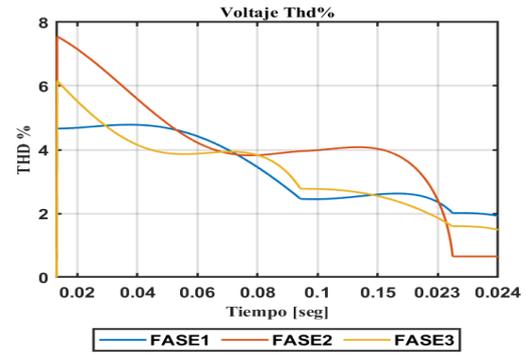


Figura 19 Onda de contenido de armónicos THDv estado inicial sin compensación

En la figura 20, se realiza el mismo análisis que en la figura anterior pero esta vez se analiza los Thdi de corriente trifásico. Para este análisis fasorial los límites de Thdi están entre 8% a 10%, la fase 1 y 3 se mantiene dentro de los límites permisibles, pero en la fase 2 existe un pico alto de 11% claro que al llegar a ese pico la onda decae hasta mantenerse en los límites permisibles.

Al igual que el análisis fasorial de Thdv existen cargas con mayor porcentaje de armónicos lo que perjudicaría al sistema grandemente.

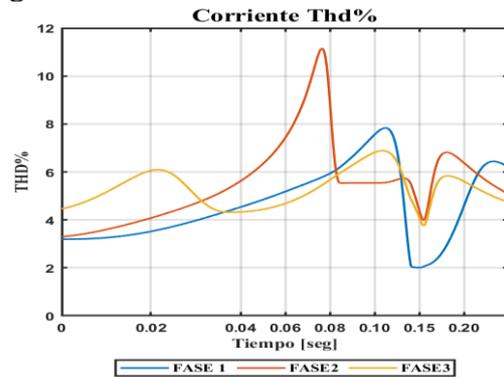


Figura 20 Onda de contenido de armónicos THDI estado inicial sin compensación

En la figura 21, se obtuvo de resultado un factor de potencia de 0.92 existe una disminución esto es a causa de los efectos de la corriente con armónicos. Claro que el sistema no decae, pero existe una disminución que consecuentemente se ve reflejado en el voltaje.

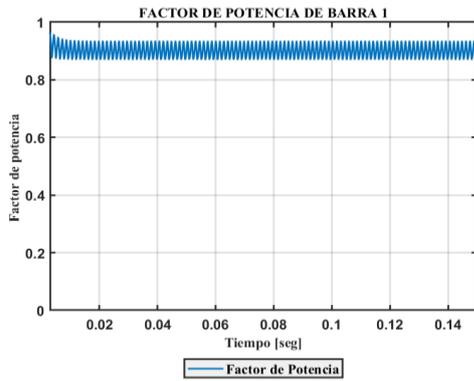


Figura 21 Factor de potencia estado inicial sin compensación

En el sistema se ha conectado D-STATCOM en la figura 22, se obtuvo como resultado la operación del compensador donde se reduce el contenido de armónicos. Con el propósito de analizar el D-STATCOM se implementó un breaker que conecte al compensador en un tiempo de 0.05[seg]. Para este caso el D-STATCOM tiene una demora alrededor de 0.03[seg] para que se cumple la reducción de armónicos.

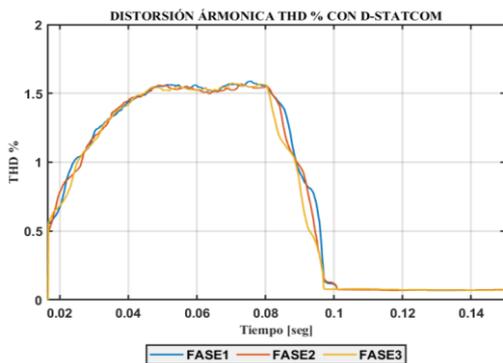


Figura 22 Onda de contenido de armónicos con compensación tipo D-STATCOM en 0.05[seg].

Al mejorar la distorsión armónica también se busca una corrección de factor de potencia en la figura 23, se observa que al partir de 0.05[seg] que el D-STATCOM entra en operación existe un aumento de factor de potencia que oscila entre 0.95 y 0.97. Es decir, que el rendimiento del compensador es efectivo dándonos una mejora en la calidad de la energía.

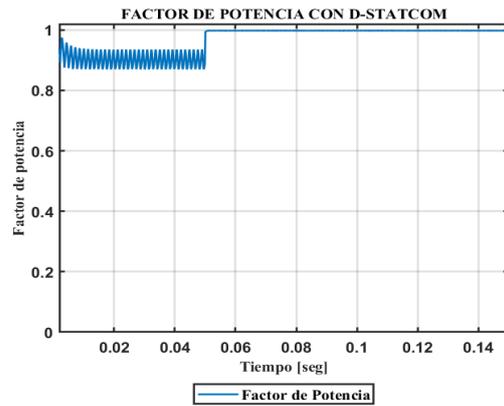


Figura 23 Factor de potencia del sistema con compensación en 0.05[seg]

En la tabla 12 se realiza una comparativa de los resultados obtenidos con y sin D-STATCOM, cabe destacar que para el caso 1 se analiza los THD en cada una de las fases con el fin de poder evaluar cual de las tres fases tienen mayor presencia de armónicos.

Tabla 12 Comparativa de resultados sin/con D-STATCOM caso 1

	SIN D-STATCOM	CON D-STATCOM
FP	0.92	0.97
THD	11%	1.5%

## 5.2 Caso de estudio 2

En este caso se analizará el sistema IEEE de 13 nodos modificado conectado cargas no lineales a la barra 7.

En la figura 24, se visualiza el sistema en su estado inicial representado el voltaje de las 13 barras en [p.u].

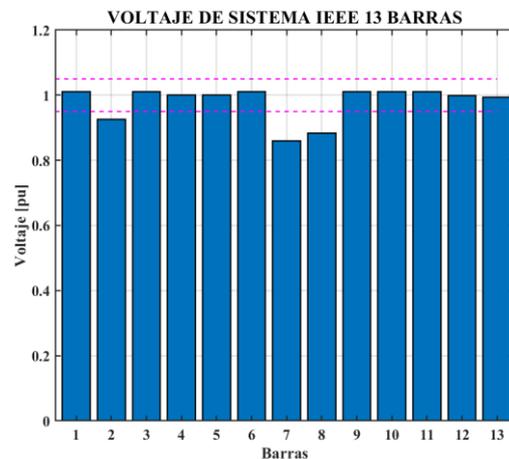


Figura 24 Voltaje [p.u] de sistema IEEE 13 barras modificado, conectado con carga no lineal

Existe una caída de voltaje considerable de 0.859[p.u] en el sistema, en la gráfica se presenta los límites de voltaje de 0.95 a 1.05 delimitado con una línea de color magenta, además el sistema posee caída de voltaje fuera de límites en la barra 2 y 8 debido transformadores y otras cargas que se encuentra conectado el sistema. Pero en la barra 7 se conectó la carga no lineal.

En la figura 25, se visualiza el voltaje de la barra 7 en [p.u]. reiterando la disminución de voltaje de 0.859[p.u].

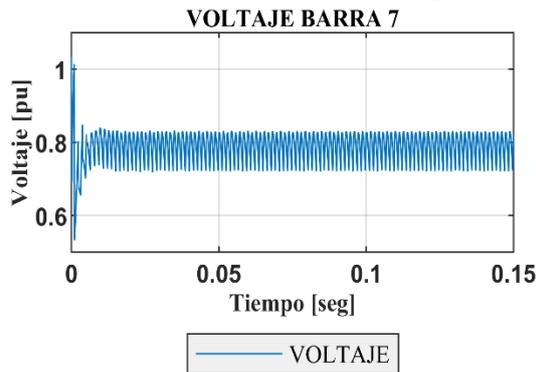


Figura 25 Promedio de Voltaje [p.u] de la barra 7 conectada carga no lineal de alta generación de armónicos

En la figura 26 el resultado obtenido de THD es 22.49%, en esta figura se presenta de forma más clara para realizar análisis de armónicos.

Se visualiza los armónicos impares que existen, dejando afuera a la fundamental para el análisis se busca los armónicos de orden 3, 5, 7 y en ocasiones el 13.

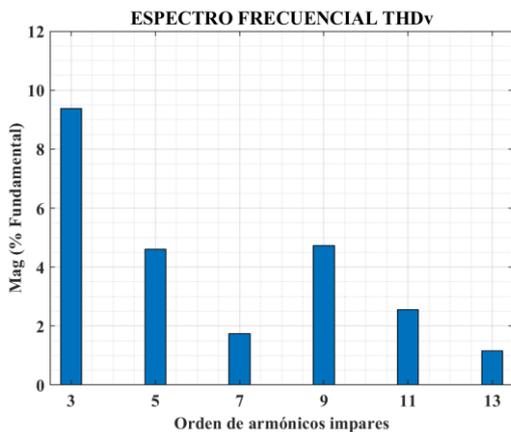


Figura 26 THDv espectro de armónicos impares sin compensación D-STATCOM

Los armónicos que pasa los límites dados por la normativa según la tabla 2 en este caso es el armónico de orden 3.

En la figura 27, obtenemos como resultado un THDI de 19.62% se analiza los armónicos impares. En el armónico 3 y 5 excede el límites dado por la normativa en la tabla 2 y 3.

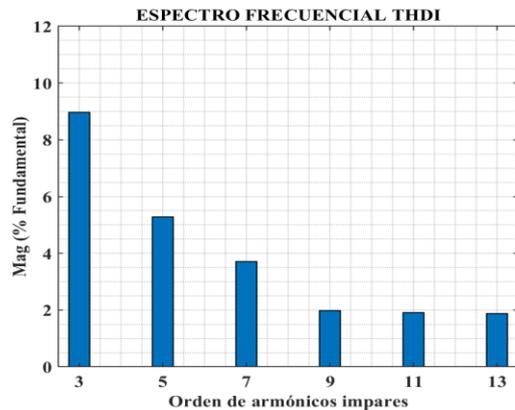


Figura 27 THDI espectro de armónicos impares sin compensación D-STATCOM

En la figura 28, se puede ver el factor de potencia que oscila entre el 0.757 y 0.854, existe una disminución considerable del factor de potencia.

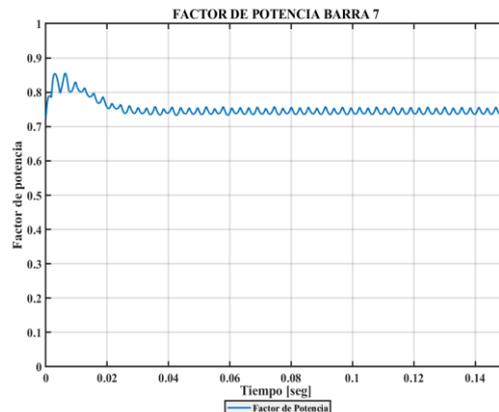


Figura 28 Factor de potencia en barra 7 sin compensación.

En la figura 28, se obtiene como resultado de la compensación de armónicos favorable para el sistema.

Los resultados obtenidos en comparación a el sistema sin D-STATCOM son realmente notorios, en la figura 28 se obtuvo un THDv de 22.49% ahora con el D-STATCOM se observa en

la figura 29 la disminución de THDv de 5.19%.

Claramente se visualiza la disminución del armónico de orden 3 que sobrepasaba los límites dado por la normativa en la tabla 2 y 3.

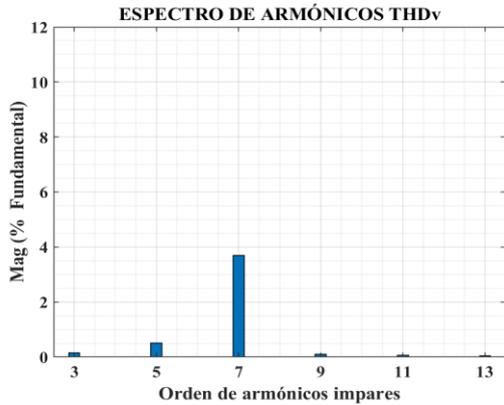


Figura 29 THDv espectro de armónicos impares con compensación D-STATCOM

En la figura 30, con el D-STATCOM los THDI de 10.81% a pesar de esta disminución sigue excediendo los límites del armónico 3, el D-STATCOM se encuentra cumpliendo su propósito de disminuir armónicos.

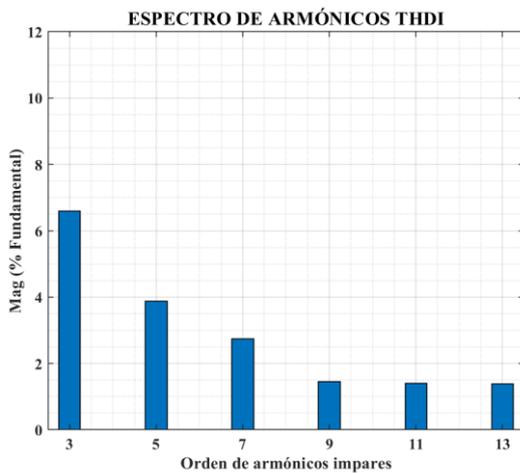


Figura 30 THDI espectro de armónicos impares con compensación D-STATCOM

En la figura 31, su resultado es favorable para el sistema ya que, antes el factor de potencia oscilaba entre 0.854 y 0.757. Ahora con el factor de potencia con el D-STATCOM se obtiene una oscilando entre 0.92 y 0.96.

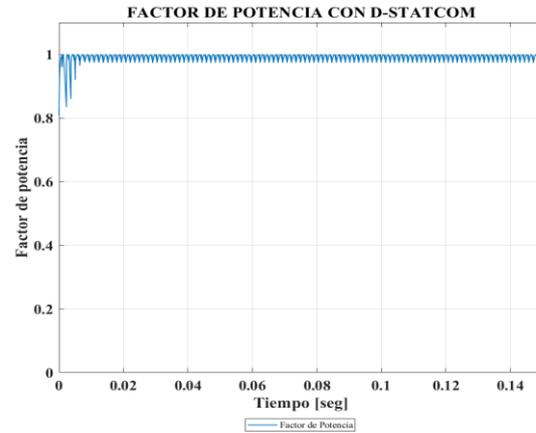


Figura 31 Factor de potencia en barra 7 con compensación tipo D-STATCOM.

Al conectar el D-STATCOM, se obtienen resultados favorables vistos tanto en las figuras además del desempeño del sistema mejora.

En la figura 32 su resultado fue el esperado al reducir y corregir los armónicos y el factor de potencia, la barra 7 donde se hizo el análisis se obtuvo un aumento de voltaje de 0.96[p.u], en comparación del voltaje de la figura 19, el voltaje en la barra 7 se encuentra dentro de los lineamientos puestos de color magenta en la gráfica.

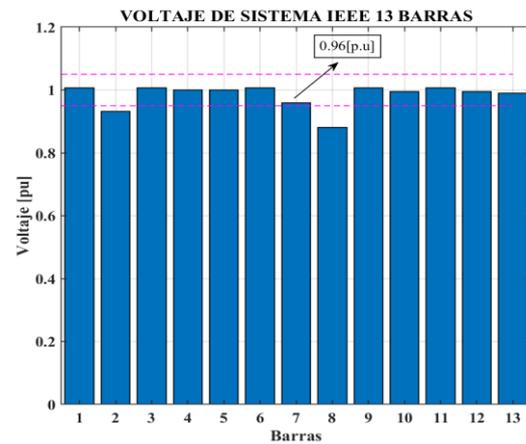


Figura 32 Voltaje [p.u] de sistema IEEE 13 barras modificado, conectado con carga no lineal con compensación tipo D-STATCOM en la barra 7

En la tabla 13, se realiza una comparativa de los resultados obtenidos con y sin D-STATCOM, donde se analiza la distorsión armónica de corriente como la de voltaje además de la mejora que produce en el factor de potencia.

Tabla 13 Comparativa de resultados sin/con D-STATCOM caso 2

	SIN D-STATCOM	CON D-STATCOM
FP	0.854	0.96
THD <sub>v</sub>	22.49%	5.19%
THDI	19.62%	10.81%

## 6. Conclusiones

El diseño del compensador D-STATCOM basado en teoría de componentes simétricas instantáneas pudo ser simulado y modelado mediante la plataforma MATLAB/Simulink con efectividad, reduciendo los armónicos y corrigiendo el factor de potencia. Los resultados arrojados en el análisis del caso 1 conectado una carga no lineal en la barra del sistema, obtuvo una reducción de 1.5% de armónicos y una corrección de factor de potencia de 0.97.

En la implementación del compensador en el sistema de distribución elegido fue de la IEEE de 13 barras desbalanceado por cargas no lineales ocupado para análisis de armónicos y factor de potencia. En la barra 7 se conectó una carga no lineal de alta generación de armónicos. Se obtuvo como resultados, la reducción de armónicos de voltaje 5.19%, armónico de corriente 10.81% y factor de potencia 0.96 demostrando así una mejora considerable en el sistema consecuentemente una mejora en la calidad de la energía.

En el sistema IEEE 13 barras desbalanceado se realizó una comparativa del sistema en su estado inicial dando como resultado en la simulación un porcentaje armónicos de voltaje de 22.49% al conectar el compensador se obtuvo una reducción de 5.19%, los armónicos de corriente en su estado inicial dando como resultado en la simulación 19.62% al conectar el compensador una reducción de 10.81%.

Al analizar el factor de potencia en su

estado inicial se obtuvo como resultado un factor de potencia que oscila entre 0.757 y 0.854, al conectar el compensador se obtuvo una mejora que oscila entre 0.92 y 0.96 obteniendo así grandes resultados que mejoran el sistema a pesar de la carga no lineal de alta generación de armónicos.

Para concluir el compensador diseñado fue de vital impacto su desempeño para las modelaciones futuras al momento de realizar la compensación en armónicos como el factor de potencia y llama la atención su desempeño frente la compensación de voltaje.

## 7. Trabajos futuros

Para trabajos futuros se puede modelar un control más sofisticado hacerlo en función de una carga específica sino en general además un sistema más robusto. Se propone la investigación de D-STATCOM más compactos enfocados para sistemas industriales y comerciales. Implementación el compensador en Micro-Redes para la compensación de generación distribuida.

Para el desempeño D-STATCOM se podría cambiar la funcionalidad proyectándolo hacia compensación de voltaje en sistemas de distribución que cuenten con mayor cantidad de barras.

## 8. Referencias

- [1] W. D. P. Vallejos, "Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control," *2017 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. - Lat. Am. ISGT Lat. Am. 2017*, vol. 2017-Janua, no. September, pp. 1–6, 2017, doi: 10.1109/ISGT-LA.2017.8126705.
- [2] P. Kumar, N. Kumar, and A. K. Akella, "Modeling and Simulation of Different System Topologies for DSTATCOM," *AASRI Procedia*, vol. 5, pp. 249–261, 2013, doi: 10.1016/j.aasri.2013.10.086.

- [3] M. Büyük, M. İnci, A. Tan, and M. Tümay, "Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 177, no. August, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106014.
- [4] Y. Mohammadi, M. H. Moradi, and R. Chouhy Leborgne, "Employing instantaneous positive sequence symmetrical components for voltage sag source relative location," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 151, pp. 186–196, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.030.
- [5] R. Gunasekaran and C. Karthikeyan, "Nonlinear Transformational Optimization (NTO) technique based Total Harmonics Distortion (THD) reduction of line to line voltage for multi-level inverters," *Microprocess. Microsyst.*, vol. 74, 2020, doi: 10.1016/j.micpro.2020.102998.
- [6] K. Elyalaoui, M. Ouassaid, and M. Cherkaoui, "Improvement of THD performance of a robust controller for grid-side energy conversion system based on LCL filter without RC sensor," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 121, no. October 2019, p. 106143, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106143.
- [7] C. Lazaro, J. P. Marques, G. Marchesan, and G. Cardoso, "Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 155, pp. 340–349, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.11.005.
- [8] O. P. Mahela and A. G. Shaik, "Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 83, pp. 229–240, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2016.04.011.
- [9] H. Andrei, P. C. Andrei, L. M. Constantinescu, R. Beloiu, E. Cazacu, and M. Stanculescu, *Electrical power systems*. 2017.
- [10] J. Zhang *et al.*, "Total Harmonic Distortion and Output Current Optimization Method of Inductive Power Transfer System for Power Loss Reduction," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 4724–4736, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2962900.
- [11] E. F. De Oliveira, M. E. De Lima Tostes, C. A. O. De Freitas, and J. C. Leite, "Voltage THD Analysis Using Knowledge Discovery in Databases with a Decision Tree Classifier," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 1177–1188, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2778028.
- [12] S. Karare and V. M. Harne, "Modelling and simulation of improved operation of D-STATCOM in distribution system for power quality improvement using MATLAB Simulink tool," *Proc. Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol. ICECA 2017*, vol. 2017-Janua, no. Icesa, pp. 346–350, 2017, doi: 10.1109/ICECA.2017.8212831.
- [13] E. X. Li, W. X. Sheng, J. P. Sun, and X. L. Meng, "The study on current detecting algorithm based on generalized instantaneous reactive power theory," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, pp. 4–7, 2010, doi: 10.1109/APPEEC.2010.5449392.
- [14] S. Kumar and B. Singh, "Control of 4-leg VSC based DSTATCOM using modified instantaneous symmetrical component theory," *2009 Int. Conf. Power Syst. ICPS '09*, pp. 27–32, 2009, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442769.
- [15] X. Kong, Y. Yuan, H. Huang, and Y. Wang, "Overview of the instantaneous reactive power theory in three-phase systems," *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. DRPT 2015*, no. 5, pp. 2331–2336, 2016, doi: 10.1109/DRPT.2015.7432640.
- [16] E. Li, W. Sheng, X. Wang, and B. Wang, "Combined compensation strategies based on instantaneous reactive power theory for reactive power compensation and load balancing," *2011 Int. Conf. Electr. Control Eng. ICECE 2011 - Proc.*, pp. 5788–5791, 2011, doi: 10.1109/ICECENG.2011.6057765.

- [17] S. Kumar and B. Singh, "Control of 4-leg VSC based DSTATCOM using modified instantaneous symmetrical component theory," *2009 Int. Conf. Power Syst. ICPS '09*, pp. 23–28, 2009, doi: 10.1109/ICPWS.2009.5442769.
- [18] E. S. Oda, A. M. A. El Hamed, A. Ali, A. A. Elbaset, M. A. El Sattar, and M. Ebeed, "Stochastic optimal planning of distribution system considering integrated photovoltaic-based dg and dstatcom under uncertainties of loads and solar irradiance," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 26541–26555, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3058589.
- [19] W. Pavón, E. Inga, and S. Simani, "Optimal routing an ungrounded electrical distribution system based on heuristic method with micro grids integration," *Sustain.*, vol. 11, no. 6, 2019, doi: 10.3390/su11061607.
- [20] F. Shahnia, R. P. S. Chandrasena, A. Ghosh, and S. Rajakaruna, "Application of DSTATCOM for surplus power circulation in MV and LV distribution networks with single-phase distributed energy resources," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 117, pp. 104–114, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.08.010.
- [21] J. Suma and M. K. Mishra, "Instantaneous symmetrical component theory based algorithm for characterization of three phase distorted and unbalanced voltage sags," *Proc. IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 845–850, 2013, doi: 10.1109/ICIT.2013.6505782.
- [22] M. Paul Jeyaraj, M. Senthil Kumar, T. Arun Prasath, S. Muthulakshmi, and S. Aiswariya, "Power factor correction and THD minimization in boost converter with PID controller," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.327.
- [23] S. A. Pasha and N. P. Kumar, "Analysis of THD in three phase two-bus distribution system by Rl & Rc – Loads with upqc," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 1–11, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.047.
- [24] G. Chitalia, M. Pipattanasomporn, V. Garg, and S. Rahman, "Robust short-term electrical load forecasting framework for commercial buildings using deep recurrent neural networks," *Appl. Energy*, vol. 278, no. August, p. 115410, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115410.
- [25] R. Tecnolog, "Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo," vol. 3, no. 9, pp. 76–84, 2016.
- [26] E. Barbie, R. Rabinovici, and A. Kuperman, "Analytical Formulation and Minimization of Voltage THD in Staircase Modulated Multilevel Inverters with Variable DC Ratios," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208861–208878, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038809.
- [27] S. Hsu, A. Ghosh, and A. Joshi, "A New Approach to Load Balancing and Power Factor Correction in Power Distribution System," *A New Approach to Load Balanc. Power Factor Correct. Power Distrib. Syst.*, vol. 18, no. 1, p. 3, 2003.
- [28] S. Munir, Y. W. Li, and H. Tian, "Compensation Using Priority Driven Droop Controller," *CPSS Trans. Power Electron. Appl.*, vol. 5, no. 3, pp. 213–223, 2020.
- [29] M. Mangaraj, A. K. Panda, and T. Penthia, "Supercapacitor supported DSTATCOM for harmonic reduction and power factor correction," *2016 IEEE Students' Conf. Electr. Electron. Comput. Sci. SCEECS 2016*, pp. 2–7, 2016, doi: 10.1109/SCEECS.2016.7509275.
- [30] B. Singh and J. Solanki, "A comparison of control algorithms for DSTATCOM," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 7, pp. 2738–2745, 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2021596.
- [31] A. A. Emhamed and J. Shrivastava, "Electrical load distribution forecasting utilizing support vector model (SVM)," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.03.516.
- [32] M. Badoni, A. Singh, S. Semwal, and Y. Tatte, "Control of DSTATCOM using nonparametric variable step-size NLMS: An experimental study,"

- Electr. Power Syst. Res.*, vol. 199, no. May, p. 107411, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107411.
- [33] C. Kumar, M. K. Mishra, and S. Mekhilef, “A new voltage control strategy to improve performance of DSTATCOM in electric grid,” *CES Trans. Electr. Mach. Syst.*, vol. 4, no. 4, pp. 295–302, 2021, doi: 10.30941/cestems.2020.00036.
- [34] M. Bagheri, V. Nurmanova, O. Abedinia, and M. Salay Naderi, “Enhancing power quality in microgrids with a new online control strategy for DSTATCOM using reinforcement learning algorithm,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 38986–38996, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2852941.
- [35] J. Taghipour, H. Haddad Khodaparast, M. I. Friswell, A. D. Shaw, H. Jalali, and N. Jamia, “Harmonic-Balance-Based parameter estimation of nonlinear structures in the presence of Multi-Harmonic response and force,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 162, no. January 2021, p. 108057, 2022, doi: 10.1016/j.ymsp.2021.108057.
- [36] L. Lin, J. He, and C. Xu, “Analysis on Circulating Current and Split Capacitor Voltage Balance for Modular Multilevel Converter Based Three-phase Four-wire Split Capacitor DSTATCOM,” *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 657–667, 2021, doi: 10.35833/MPCE.2019.000213.
- [37] R. Naidoo, P. Pillay, J. Visser, R. C. Bansal, and N. T. Mbungu, “An adaptive method of symmetrical component estimation,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 158, pp. 45–55, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2018.01.003.
- [38] PES/IEEE, “Resources PES Test Feeder,” *IEEE PES AMPS DSAS Test Feed. Work. Gr.*, 2020.

## 9. Estado de Arte

DISEÑO DE D-STATCOM CONTROLADO POR TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS (ISCT) PARA DISMINUIR ARMÓNICOS Y CORREGIR EL FACTOR DE POTENCIA EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA ANTE LA PRESENCIA DE CARGAS NO LINEALES																								
ITEM	DATOS		TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA							
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	ARMÓNICOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN	D-STATCOM	COMPENSACION POR COMPONENTES SIMÉTRICOS	REDUCCIÓN DE DISTORSIÓN ARMÓNICA (THD)	COMPENSACIÓN DE FACTOR DE POTENCIA	MEJORA DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	DISEÑO DE D-STATCOM POR TEORÍA DE COMPENSACION POR COMPONENTES SIMÉTRICOS	INCIDENCIA DE ARMÓNICOS EN LA RED	CORRECCIÓN DE ARMÓNICOS Y FACTOR DE POTENCIA	INFRAESTRUCTURA	LIMITES DE FACTOR DE POTENCIA	TOTAL HARMONIC DISTORTION (THD)	NIVEL DE ARMÓNICOS	IMPLEMENTACIÓN DE D-STATCOM	IMPLEMENTACIÓN DE TEORÍA POR COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS PARA CARGAS NO LINEALES	SIMULACIONES	SIMULACIÓN DE CASOS DE PRUEBA	IMPLEMENTACIÓN DE D-STATCOM POR TEORÍA DE COMPONENTES SIMÉTRICOS INSTANTÁNEOS	ANÁLISIS DE ARMÓNICOS POR CARGAS NO LINEALES	CAPACIDAD MÁXIMA DEL D-STATCOM ANTE PRESENCIA DE CARGA NO LINEAL DE ALTA GENERACIÓN DE ARMÓNICOS	
1	2017	Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control			☒					☒				☒										
2	2013	Modeling and Simulation of Different System Topologies for DSTATCOM			☒	☒			☒	☒				☒			☒				☒			
3	2019	Improved instantaneous power theory based current harmonic extraction for unbalanced electrical grid conditions	☒			☒					☒	☒		☒								☒		

4	2017	Employing instantaneous positive sequence symmetrical components for voltage sag source relative location				✘		✘	✘			✘										
5	2020	Nonlinear Transformational Optimization (NTO) technique based Total Harmonics Distortion (THD) reduction of line-to-line voltage for multi-level inverters		✘			✘		✘			✘	✘						✘			
6	2020	Improvement of THD performance of a robust controller for grid-side energy conversion system based on LCL filter without RC sensor		✘			✘		✘		✘	✘										✘
7	2017	Waveform asymmetry of instantaneous current signal based symmetrical fault detection during power swing				✘			✘	✘		✘										
8	2016	Power quality improvement in distribution network using DSTATCOM with battery energy storage system	✘		✘				✘									✘			✘	
9	2017	Electrical power systems	✘									✘										
10	2019	Distortion and Output Current Optimization Method of Inductive Power Transfer System for Power Loss Reduction		✘		✘		✘	✘												✘	

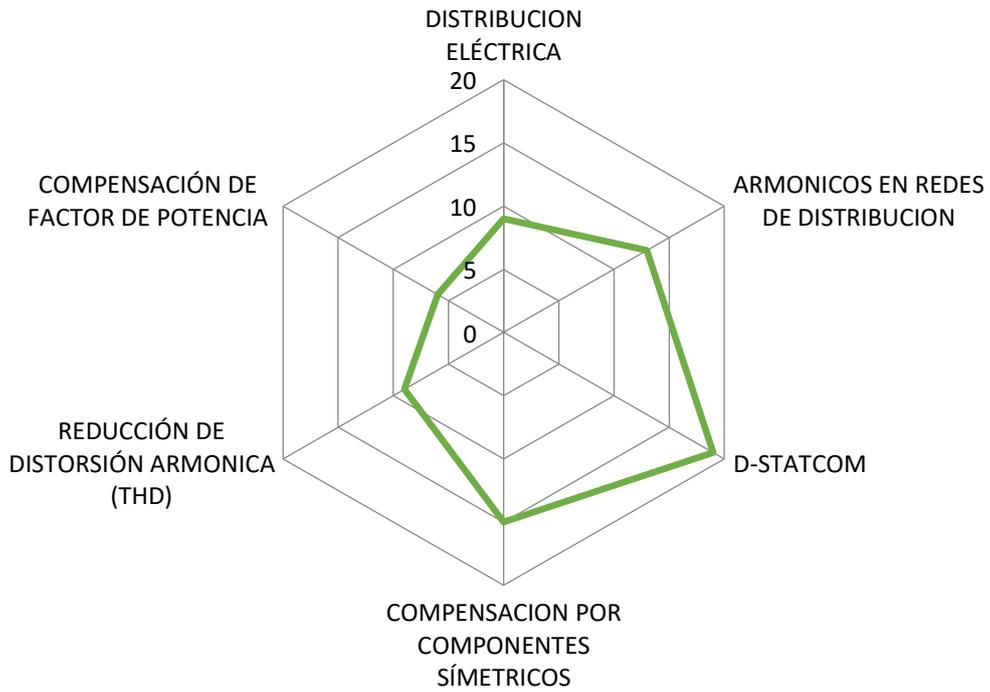
11	2017	Voltage THD Analysis Using Knowledge Discovery in Databases with a Decision Tree Classifier		✗			✗				✗	✗					✗							
12	2017	Modelling and simulation of improved operation of D-STATCOM in distribution system for power quality improvement using MATLAB Simulink tool		✗					✗								✗				✗		✗	✗
13	2010	The study on current detecting algorithm based on generalized instantaneous reactive power theory		✗		✗		✗			✗											✗		
14	2009	Control of 4-leg VSC based DSTATCOM using modified instantaneous symmetrical component theory		✗	✗		✗		✗								✗				✗			✗
15	2016	Overview of the instantaneous reactive power theory in three-phase systems			✗	✗				✗														
16	2011	Combined compensation strategies based on instantaneous reactive power theory for reactive power compensation and load balancing			✗	✗		✗			✗		✗		✗		✗					✗		
17	2019	Control of 8-leg VSC based DSTATCOM using modified instantaneous symmetrical component theory			✗		✗	✗		✗			✗					✗		✗				
18	2021	Stochastic optimal planning of distribution system considering integrated photovoltaic-based dg and dstatcom under uncertainties of loads and solar irradiance			✗	✗			✗				✗											✗
19	2019	Optimal routing an ungrounded electrical distribution system based on heuristic method with micro grids integration	✗		✗								✗											

20	2014	Application of DSTATCOM for surplus power circulation in MV and LV distribution networks with single-phase distributed energy resources			✘					✘									✘		✘		✘	
21	2013	Instantaneous symmetrical component theory-based algorithm for characterization of three phase distorted and unbalanced voltage sags				✘				✘		✘												✘
22	2021	Power factor correction and THD minimization in boost converter with PID controller			✘					✘		✘												✘
23	2021	Analysis of THD in three phase two-bus distribution system by Rl & Rc – Loads with upqc	✘			✘	✘					✘			✘	✘								✘
24	2020	Robust short-term electrical load forecasting framework for commercial buildings using deep recurrent neural networks				✘						✘												
25	2016	Filtro activo de potencia para compensar la distorsión armónica de un sistema fotovoltaico autónomo	✘		✘					✘		✘												
26	2020	Analytical Formulation and Minimization of Voltage THD in Staircase Modulated Multilevel Inverters with Variable DC Ratios			✘										✘	✘								✘

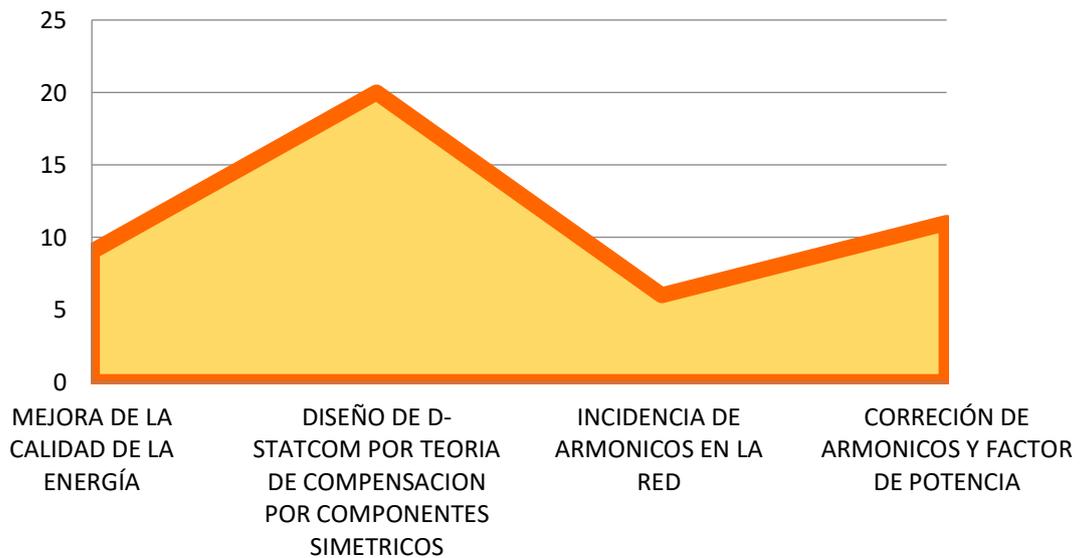


35	2021	Harmonic-Balance-Based parameter estimation of nonlinear structures in the presence of multi-Harmonic response and force		✘	✘	✘				✘				✘	✘		✘				✘		
36	2021	Analysis on Circulating Current and Split Capacitor Voltage Balance for Modular Multilevel Converter Based Three-phase Four-wire Split Capacitor DSTATCOM		✘	✘				✘			✘						✘					
37	2019	An adaptive method of symmetrical component estimation		✘		✘	✘										✘					✘	
38	2021	Resources   PES Test Feeder	✘									✘											
			9	13	19	15	9	6	9	20	6	11	8	9	4	9	6	4	11	3	8	7	6

## Temática



## Formulación del Problema



# Solución propuesta

