

**IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR
MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE
REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA
TOTAL.**



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

**IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR
MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE
REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA
TOTAL.**

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

AUTOR: MARLON FABRICIO CALLACANDO GUAÑA
TUTOR: WILSON DAVID PAVÓN VALLEJOS

Quito - Ecuador
2022

Marlon Fabricio Callacando Guaña

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2022

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



Marlon Fabricio Callacando Guaña (Y'1994). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Instituto Tecnológico Superior "Sucre" en la especialidad de Técnico Industrial Instalaciones, Equipos y Máquinas Eléctricas. Egresado de la carrera de Electricidad de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la reducción de la distorsión armónica total de un sistema de distribución eléctrica desbalanceado a través de la compensación por medio del Inversor Multinivel en cascada y D-STATCOM.

mcallacando@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@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

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO – ECUADOR

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

Yo, Marlon Fabricio Callacando Guaña con documento de identificación N° 1725349755 manifiesto que:

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

Quito, 02 de mayo del año 2022

Atentamente,



Marlon Fabricio Callacando Guaña

1725349755

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

Yo, Marlon Fabricio Callacando Guaña con documento de identificación No. 1725349755, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Implementación del sistema de control con el inversor multinivel en cascada y D-Statcom usando marco de referencia síncrono en un sistema de distribución eléctrica para la reducción de la distorsión armónica total.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 02 de mayo del año 2022

Atentamente,



Marlon Fabricio Callacando Guaña

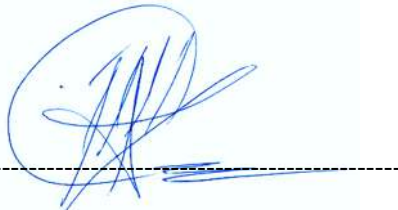
1725349755

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Wilson David Pavón Vallejos con documento de identificación N° 1719224311, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL, realizado por Marlon Fabricio Callacando Guaña con documento de identificación N° 1725349755, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de mayo del año 2022

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke, positioned above a dashed horizontal line.

Ing. Wilson David Pavón Vallejos, Ph.D
1719224311

ÍNDICE GENERAL

Resumen.....	1
Abstract	1
1. Introducción.....	2
2. Marco Teórico.....	3
2.1 Sistema de Distribución Eléctrica	3
2.2 Calidad de la Energía Eléctrica.	4
2.3 Armónicos	5
2.4 D-STATCOM	6
2.5 Componentes de un D-STATCOM.....	6
2.5.1 Inversor DC/AC basados en IGBT.....	7
2.5.2 Filtro LC	7
2.5.3 Bloque de Control	7
2.6 Funcionamiento de un D- STATCOM.....	7
2.7 Inversor Multinivel.....	8
2.8 Marco de referencia síncrono.....	9
3. Planteamiento del Problema	10
3.1. Topología para D-STATCOM.	10
3.2. Sistema de Enlace DC	11
3.3. Caso de Estudio.....	12
4. Análisis de Resultados	13
4.1. Análisis del THDi por Transformada rápida de Fourier (FFT).....	16
5. Conclusiones.....	17
6. Trabajos Futuros	17
7. Referencias.....	18
8. Estado del arte.....	21
9. Resumen de indicadores	24

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Eléctrico de Potencia con MLI D-STATCOM	3
Figura 2. Esquema de un D-STATCOM.....	6
Figura 3. Modo de Operación de un D-STATCOM	7
Figura 4 Inversor en cascada en puente H.	8
Figura 5. Diseño del MLI en cascada D-STATCOM conectado en derivación.	10
Figura 6. Diagrama de Bloques de la estrategia Marco de Referencia Síncrono.....	12
Figura 7. Sistema de Distribución IEEE 13 Barras.....	12
Figura 8. Sistema de Distribución IEEE 13 Barras con MLI D-STATCOM	13
Figura 9. Voltaje trifásico (p.u) en Barra 7 sin carga no lineal.	14
Figura 10. Corriente trifásica (pu) en Barra 7 sin carga no lineal.....	14
Figura 11. Corriente trifásica de la barra 7 con carga no lineal.....	14
Figura 12. Voltaje trifásico de la barra 7 con carga no lineal.	14
Figura 13. THDi (%) de Corriente de la barra 7 sin compensación.....	14
Figura 14. Corriente trifásica (pu) de la Barra 7 después de la compensación.....	15
Figura 15. Voltaje trifásico (pu)de la Barra 7 después de la compensación.....	15
Figura 16. THD (%) de Corriente de la Barra 7 después de la compensación.	15
Figura 17. Espectro Armónico impar de Corriente con compensación MLI D-STATCOM de barra 7.....	16
Figura 18. Magnitud de voltaje en (pu) del sistema después de la compensación MLI D-STATCOM	16
Figura 19. Espectro Armónico impar de voltaje con compensación MLI D-STATCOM de barra 7.....	16

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites de corriente armónica individual según la norma IEC 61000.	5
Tabla 2. Límites de corriente armónica según la norma IEEE 519-1992	6
Tabla 3. Valores Límites de THDi con sus afectaciones	6
Tabla 4. Modos de Operación de un D-STATCOM.....	7
Tabla 5. Conmutación del inversor CHB.....	8
Tabla 6. Ganancia Proporcional e Integral del controlador PI.....	11
Tabla 7. Parámetros Eléctricos del sistema eléctrico analizado.....	12
Tabla 8. Parámetros Eléctricos de la carga no lineal implementada en el sistema	13
Tabla 9. Parámetros Eléctricos del MLI D-STATCOM implementado en la red	13
Tabla 10. Comparación THDi en la barra 7 con y sin compensación MLI D-STATCOM.....	16
Tabla 11. Comparación THDv en la barra 7 con y sin compensación MLI D-STATCOM.....	17

Implementación del sistema de control con el inversor multinivel en cascada y D-STATCOM usando marco de referencia síncrono en un sistema de distribución eléctrica para la reducción de la distorsión armónica total.

Resumen

En la presente investigación se implementa el modelo del Inversor Multinivel en Cascada D-STATCOM basando el control en la estrategia del Marco de Referencia Síncrono para reducir la distorsión armónica total de corriente. Esta distorsión armónica de corriente es producida por la presencia de una carga no lineal conectada a la barra de análisis.

El contenido armónico de la red es evaluado antes y después de implementar la compensación, con rangos de tiempos de conexión y desconexión del compensador, esto con la finalidad de poder diferenciar entre las formas de ondas distorsionadas y las ondas sinusoidales perfectas y de esta manera establecer el funcionamiento de la estrategia.

Para llevar a cabo el desarrollo, simulación y análisis de los resultados de esta investigación, se utilizará la plataforma MATLAB y Simulink, además de que el MLI D-STATCOM se implementará en el sistema de distribución de prueba de la IEEE de 13 barras desbalanceado.

Los resultados que se obtuvo con la compensación en la barra de análisis, muestran una reducción del THDi del 97% aproximadamente, mejorando de esta manera la calidad de energía en presencia de cargas no lineales.

Palabras Claves: Carga no lineal, Distorsión Armónica Total, D-STATCOM, Inversor Multinivel en Cascada, Marco de Referencia Síncrono, Sistema de Distribución eléctrica.

Abstract

In the present work, the D-STATCOM Multilevel Cascade Inverter model is implemented by basing the control on the Synchronous Reference Frame strategy to reduce the current total harmonic distortion. This current harmonic distortion is produced by the presence of a nonlinear load connected to the analysis bus.

The harmonic content of the network is evaluated before and after implementing the compensation, with ranges of connection and disconnection times of the compensator, in order to differentiate between distorted waveforms and perfect sine waves and establish the performance of the strategy.

To carry out the development, simulation and analysis of the results of this research, the MATLAB and Simulink platform will be used, in addition to the MLI D-STATCOM will be implemented in the IEEE test distribution system of 13 unbalanced bars.

The results obtained with the compensation in the analysis bus, show a THDi reduction of about 97%, thus improving the power quality in the presence of nonlinear loads.

Keywords: Nonlinear load, total harmonic distortion, D-STATCOM, cascaded multilevel inverter, synchronous reference frame, electrical distribution system.

1. Introducción

La calidad de energía eléctrica hace referencia a la capacidad del sistema en mantener el voltaje y la corriente en sus valores nominales sin perturbaciones en sus formas de ondas [1]. Sin embargo, la presencia de carga no lineal produce componentes de frecuencia de corrientes no fundamentales que son capaces de provocar inconvenientes como sobrecarga, vibraciones y envejecimiento prematuro en transformadores, motores, alimentadores entre otros, generando pérdidas al sistema de distribución eléctrica y afectando directamente la calidad del suministro eléctrico [1],[2]. Dado estos inconvenientes se han planteado posibles soluciones y una de ellas es la compensación a través del D- STATCOM [3].

El Compensador Síncrono Estático de Distribución (D-STATCOM) es un dispositivo basado en la electrónica de potencia que se conecta en paralelo a la red y es capaz de proporcionar una compensación de potencia reactiva para eliminar armónicos de corriente [4]. El D-STATCOM es el método de compensación más utilizado y eficaz para la reducción de armónicos en las redes de distribución eléctrica [3], [5]. Este dispositivo es capaz de inyectar dinámicamente una corriente de compensación con la amplitud, frecuencia y fase deseada en cualquier nodo de la red de distribución eléctrica, así como lo muestra la figura (1) [4].

Dentro de la estructura del D-STATCOM se encuentra el convertidor de fuente de voltaje (VSC), que sirve para determinar el nivel de la compensación que el dispositivo puede entregar ya sea absorbiendo o inyectando potencia reactiva [5],[6].

Para este documento la topología del

VSC y del D-STATCOM en general, viene relacionada con el multinivel [7]. Los Inversores Multinivel han ido ganando espacio dentro de las topologías empleadas para el funcionamiento del D-STATCOM, debido a que este brinda la posibilidad de obtener un voltaje a partir de los diversos niveles de voltaje DC de cada entrada [7], [6].

Dentro de la topología empleada para el inversor multinivel se encuentra aquella que se basa en el puente H monofásico en cascada con fuentes separadas por cada celda implementada para cada fase.

Esta topología tiene la ventaja de contar con interferencia electromecánica baja y también con frecuencia operativa de conmutación baja [6].

Para mejorar la calidad de la forma de onda de corriente eléctrica se puede conectar varios puentes H en cascada el cual sintetiza el voltaje deseado de varias fuentes DC separadas [8].

En el presente documento se implementa el D-STATCOM con el inversor multinivel en cascada de tres niveles basado en puentes H, para mitigar la distorsión armónica total de la corriente. Esto se implementará en la barra donde se encuentre conectada una carga no lineal y de esta manera mejorar la calidad de energía eléctrica del sistema de distribución.

El trabajo de investigación se encuentra organizado de la siguiente manera:

La sección 2 muestra los conceptos de las variables micro y macro que involucran a la investigación, así como el funcionamiento y características del MLI D-STATCOM.

En la sección 3 se describe el planteamiento del problema donde se presenta la topología de la compensación implementada.

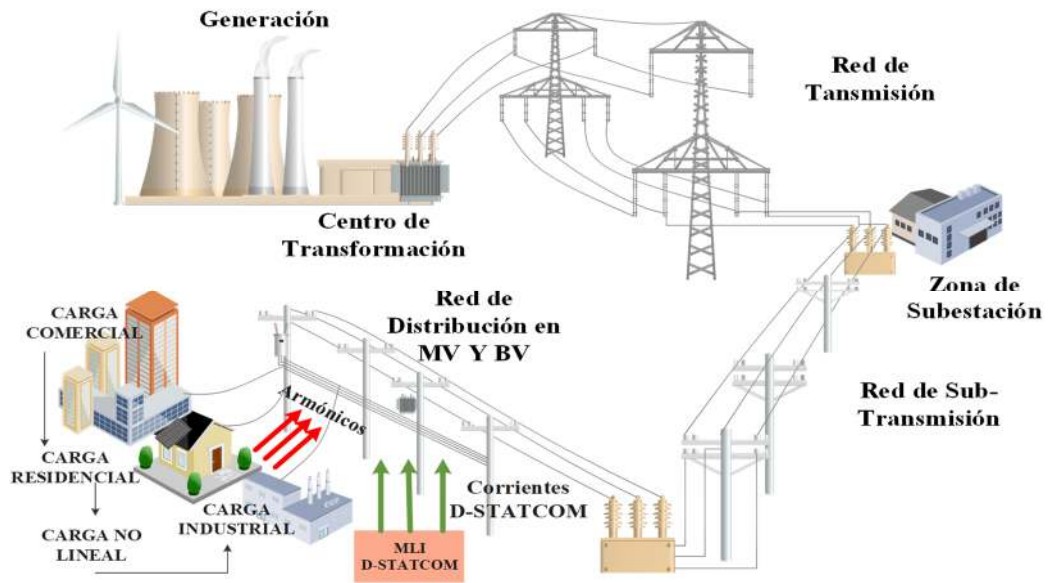


Figura 1. Sistema Eléctrico de Potencia con MLI D-STATCOM

En la sección 4 se encuentra el caso de estudio en el cual se indica el tipo de carga no lineal implementado para desbalancear el sistema.

Para la sección 5 se analiza los resultados obtenidos antes y después de la compensación. En la sección 6 se muestran las conclusiones a las cuales se llegó en base a los resultados de esta investigación, y en la sección 7 se presenta los posibles trabajos futuros.

2. Marco Teórico

2.1 Sistema de Distribución Eléctrica

Para poder llevar la energía eléctrica generada desde los centros de generación hacia los usuarios o consumidores ya sean residenciales, comerciales e industriales, el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) cuenta con varias etapas: Generación, Transmisión, Distribución y Consumidor, así como se muestra en la figura 1 [9].

El sistema de Distribución es la parte del SEP que se encarga de transportar la energía eléctrica desde las subestaciones, donde el nivel de alto

voltaje (HV) del sistema de transmisión se reduce a niveles de medio voltaje (MV) [9],[10].

La energía es transportada a través de cables o líneas primarias en acometidas aéreas o soterradas hacia los centros de transformación locales (transformadores de distribución, ubicados en postes o en cámaras de transformación) en donde el nivel de voltaje se reduce (Bajo Voltaje BV) para el consumo de los usuarios [9],[10].

Los niveles de voltaje que presenta el sistema de distribución en las redes primarias de medio voltaje pueden ser variados dependiendo del punto de conexión en que se encuentre cada ciudad y también de la empresa distribuidora de energía eléctrica [11]. Los valores de la red en medio voltaje (MV) pueden ser: 6.3, 13.2, 22.8 kV conformados por uno, dos o tres conductores de fase y un conductor neutro continuo [12].

En cambio, para la red de bajo voltaje residencial los valores son circuitos secundarios monofásicos de 240/120 V, y para las cargas industriales circuitos secundarios trifásicos

220/127 V [12]. La configuración de las redes de distribución eléctrica es clasificada como: - Sistema Radial: Es aquella en donde los usuarios cuentan con una sola posible vía de alimentación. Son sistemas menos costosos y se las utiliza para abastecer de energía principalmente a cargas dispersas y de baja densidad [9].

- Sistema de anillo abierto: Este sistema tiene dos posibles vías de alimentación, en donde la una vía opera normalmente y la otra vía ofrece una alternativa en caso de falla.

- Sistema de anillo cerrado: Las cargas se suministra de energía a través de dos lados del anillo simultáneamente.

- Sistema Multirradial: Es en donde las cargas se abastecen de más de un alimentador.

Las técnicas de diseño y construcción de redes de distribución de energía están en constante evolución al pasar de los años debido al continuo desarrollo e incremento de las cargas a lo largo de un territorio [10]. Ya que el sistema de distribución es el vínculo por el cual el consumidor obtiene la energía eléctrica para su uso, el diseño adecuado y la continuidad del suministro es esencial para mantener un servicio confiable y de buena calidad [10],[11].

2.2 Calidad de la Energía Eléctrica.

La calidad de la energía está conformada por un conjunto de propiedades, características y estándares bajo las cuales las empresas que proporcionan el servicio eléctrico deben regirse [1].

Las empresas encargadas del sistema de distribución tienen que proporcionar energía eléctrica confiable, continua, estable e ideal a los usuarios o consumidores. La ley y los reglamentos vigentes como la RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-053/18 indican los índices

y límites de calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica que deben regirse las empresas distribuidoras [1], [13].

En el sistema de distribución eléctrico la calidad de energía depende de la forma de onda de voltaje y de corriente que recibe el usuario para el correcto funcionamiento de sus aparatos electrónicos [14].

Es por eso, que dentro de los parámetros de calidad de energía está también la calidad del suministro que garantiza un servicio continuo, con valores de tensiones adecuados, con una frecuencia constante (generalmente de 50Hz o 60Hz), y una forma de onda senoidal pura y libre de armónicas [14].

Cualquier perturbación en los valores de magnitud, frecuencia o en la forma original de la onda generan problemas con la calidad de la energía en sus diferentes etapas.

El incremento de cargas no lineales y la múltiple integración de fuentes de energía en la red, aumenta la probabilidad de problemas de calidad de energía, provocando cualquier perturbación en la corriente, voltaje y frecuencia, afectando los parámetros de operación normal del sistema [15].

Los inconvenientes que conlleva una mala calidad de energía pueden ocasionar pérdidas económicas directas a muchos consumidores, en especial a los consumidores industriales, ya que sus sistemas en la gran mayoría son controlados electrónicamente y estos son sensibles ante cambios en la tensión de la red de alimentación [15],[16].

Aunque la calidad de la energía no se puede medir como tal, varias normas se han sugerido para establecer límites de distorsión armónica entre ellas se encuentran las Normas IEC 61000 en Europa y el IEEE 519-2014 en Estados Unidos [17].

2.3 Armónicos

Las cargas no lineales generadas por el uso de tecnología basadas en la electrónica de potencia, son aquellas que contienen corrientes no proporcionales al voltaje aplicado, absorbiendo corrientes e impulsos bruscos distorsionando su forma de onda y produciendo así los armónicos en la red eléctrica [2],[18].

En [19] los autores hacen referencia a las teorías de Fourier definiendo a los armónicos como un componente de onda sinusoidal de corriente o voltaje con frecuencias que son múltiplos enteros de una frecuencia de potencia fundamental.

Los armónicos pueden llegar a generar problemas de calidad y fiabilidad en la red debido al incremento de corrientes de carga que circula por el conductor eléctrico.

Estos ocasionan daños y sobrecalentamiento en especial en el conductor neutro de un sistema trifásico, también estos pueden provocar pérdida de potencia y fallas prematuras en los equipos eléctricos [19].

La Distorsión Armónica (THD por sus siglas en inglés) es el cambio que presenta la forma de onda de corriente o de voltaje generado por las cargas no lineales en el sistema de distribución eléctrico [20].

El THD es un índice que se usa de forma porcentual para definir el grado de distorsión de una señal de voltaje o corriente que se encuentre entre el armónico de la señal y la amplitud fundamental [21].

El análisis armónico se lo utiliza para comparar los niveles de distorsión producidos por la variación de la impedancia del sistema de distribución y de la cantidad de cargas no lineales conectadas en el sistema [21], [22].

La ecuación para el cálculo del THD expresada en la ecuación (1) es la raíz

cuadrada de la sumatoria de las magnitudes de componentes armónicas entre la componente fundamental [23].

$$THD (\%) = 100 \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_f} \quad (1)$$

Donde:

I_n : Componente armónico.

I_f : Componente fundamental.

n : número del armónico.

Tener dos formas de onda similares muestra un bajo nivel de THD. El nivel de distorsión aceptable depende de la sensibilidad del equipo instalado o de los parámetros y normas de calidad que disponga cada empresa distribuidora [23].

Estas normas están asociadas a estándares nacionales e internacionales que establecen límites de inyección armónica en la red, y de esta manera garantizar una buena calidad de suministro eléctrico.

En la tabla 1 se presenta los límites permitidos de distorsión armónica de corriente individual que señala la norma IEC 61000.

Tabla 1. Límites de corriente armónica individual según la norma IEC 61000.

Orden de Armónicos	Distorsión armónica de corriente permitida (%)
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	2
15	0.7

Para la normativa IEEE 519-1992 se encuentra los límites permitidos de la distorsión armónica total de corriente (THDi) en la tabla 2 [17],[24].

Tabla 2. Límites de corriente armónica según la norma IEEE 519-1992

ISC/I 1	Armónicos de Orden impar					THDi (%)
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20a50	7	3.5	2.5	1.0	0.5	8
50a100	10	4.5	4.0	1.5	0.7	12
100a1k	12	5.5	5.0	2.0	1.0	15
>1k	15	7	6	2.5	1.4	20

En donde:

Isc: corriente máxima de cortocircuito en PCC.

Il: corriente máxima de carga en PCC.

De acuerdo al valor establecido por el THDi las afectaciones en el sistema pueden ser diferentes, la tabla 3 presenta algunas de las afectaciones más comunes.

Tabla 3. Valores Límites de THDi con sus afectaciones

THDi	Afectaciones
THDi <10%	Poco riesgo de sufrir perturbaciones
10% > THDi < 50%	Riesgo de calentamientos en equipos eléctricos
THDi >50%	Riesgo casi seguro de sufrir perturbaciones, calentamiento en conductores, etc.

2.4 D-STATCOM

Los D-STATCOM son fuentes de energía reactiva que requiere de un VSC para su funcionamiento. El D-STATCOM es conectado a la red de distribución a través de un transformador de acoplamiento para crear o absorber continuamente compensación capacitiva y

compensación inductiva de manera controlada [6].

Para poder proporcionar la cantidad adecuada de compensación de corriente reactiva ya sea en adelanto o en retraso los D-STATCOM comprueban continuamente la forma de onda de la línea con respecto a la señal de corriente alterna de referencia [3].

De esta manera reduce la cantidad de fluctuaciones de voltaje, y compensa la potencia reactiva en las redes de distribución eléctrica [3],[25].

EL inversor es el encargado de transformar el voltaje DC por medio del dispositivo de almacenamiento en un conjunto de voltaje de salida AC trifásico. Estos voltajes están en fase y acoplados al sistema AC a través de la reactancia del transformador de acoplamiento [19].

La figura 2 muestra una representación esquemática del D-STATCOM.

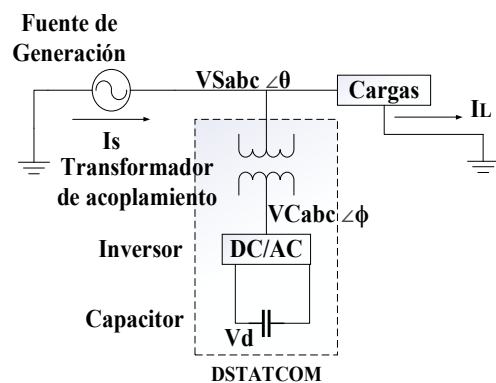


Figura 2. Esquema de un D-STATCOM

Los voltajes de salida son los que permiten un control efectivo de los intercambios de potencia activa y reactiva entre el D- STATCOM y el sistema AC. El inversor conectado en derivación con el sistema AC se puede utilizar con diferentes topologías [19].

2.5 Componentes de un D-STATCOM

Los tres componentes que conforman el D-STATCOM se detallan a continuación.

2.5.1 Inversor DC/AC basados en IGBT

Un inversor DC/AC basado en transistor bipolar de puerta aislada trifásica (IGBT) junto con el compensador síncrono estático de distribución es una alternativa para la compensación de armónicos, ya que estos crean una onda de tensión de salida para controlar la magnitud y ángulo de fase. Dicha onda de tensión de salida controlada produce corriente reactiva ya sea en adelante o en retraso dependiendo de la compensación que requiera el sistema [7].

2.5.2 Filtro LC

Está conformado de una inductancia en serie y una capacitancia en paralelo, teniendo estos un mejor efecto de filtrado que un inductor simple [7].

El filtro LC del D-STATCOM representa una parte importante para su funcionamiento ya que el filtro puede eliminar los armónicos de alta frecuencia de la salida del inversor debido a que la inductancia cambia la tensión de salida del inversor en corriente reactiva [26].

2.5.3 Bloque de Control

El bloque de control es el encargado de conmutar los módulos de onda del D-STATCOM. El Diseño de los módulos de onda se basan en las diversas teorías de control; para este caso la estrategia del marco de referencia síncrono es la utilizada [26].

2.6 Funcionamiento de un D-STATCOM

Las variables que se requiere para poder analizar el funcionamiento del compensador síncrono estático de distribución (D-STATCOM) vienen dadas por la magnitud del voltaje de fase de suministro (V_{sabc}) y el voltaje de salida de fase de D-STATCOM (V_{cabc}) con sus respectivos ángulos de

fase [27].

De acuerdo con los modos de operación mostrados en la tabla 4 y la figura 3, el D-STATCOM está en modo capacitivo cuando este sea capaz de generar potencia reactiva, por tanto, inyecta reactivos al sistema de distribución para liberar las corrientes de alimentación de las corrientes reactivas [28].

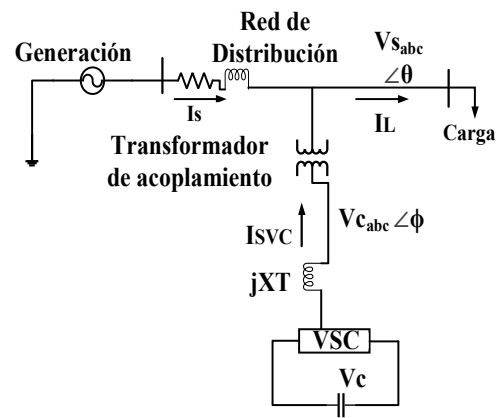


Figura 3. Modo de Operación de un D-STATCOM

En cambio, cuando el D-STATCOM absorbe potencia reactiva este se encuentra en modo inductivo, en este modo el D-STATCOM se comporta como una carga extra en el sistema [28].

Si el D-STATCOM no inyecta ni absorbe ninguna potencia reactiva es porque los voltajes de fase del suministro y el voltaje de salida están en fase y son iguales.

Tabla 4. Modos de Operación de un D-STATCOM

Modo	Función
$V_{sabc} = V_{cabc}$	No inyecta ni absorbe
$V_{cabc} > V_{sabc}$	Modo Capacitivo
$V_{sabc} > V_{cabc}$	Modo Inductivo
$\angle\phi = \angle\theta$	Intercambio de Q
$\angle\theta < \angle\phi$	Absorbe P (eleva V_{sabc})
$\angle\theta > \angle\phi$	Inyecta P (reduce V_{sabc})

2.7 Inversor Multinivel

Los inversores multinivel también son dispositivos de la electrónica de potencia que representan un método de construcción de los convertidores DC/AC, que construyen la onda sinusoidal a partir de escalones desarrollando niveles muy altos de voltaje y de potencia, siendo estos considerados como selectores de tensión. [29].

Según [30], estos inversores se pueden clasificar de acuerdo a su topología:

Inversor de punto neutro enclavado (NPC), inversor de capacitor flotante (FC) y el inversor en cascada de puente H (CHB).

Para este trabajo se profundiza en el inversor en cascada de puente H. El inversor multinivel de puente H en cascada se basa en la conexión en serie de los inversores de puente H con fuentes de entrada separadas, cada fuente puede generar tres niveles de tensión de salida diferente ($\pm VDC$ y 0) [31].

Esta topología cuenta con menos interruptores para generar el nivel de tensión deseado en comparación con las demás topologías; sin embargo, si se desea obtener mejores resultados en términos de reducción de armónicos, se puede utilizar un nivel mayor de inversor multinivel [32]. Cabe mencionar que al aumentar el número de interruptores se puede incrementar el costo, la conducción y las pérdidas de conducción, disminuyendo así la eficiencia del sistema [31],[33].

La figura 4 muestra el modelo del circuito de un inversor en topología de cascada con puente H, con el cual se obtiene 3 niveles de voltaje monofásico [33].

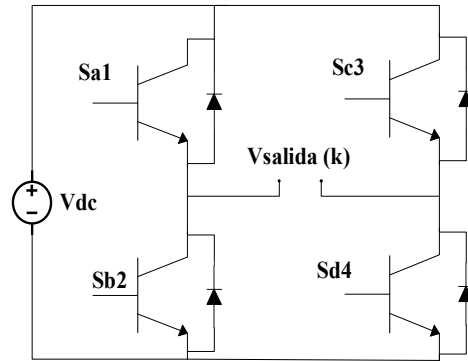


Figura 4 Inversor en cascada en puente H.

La determinación del número de niveles de voltaje de salida (k) está dado por la ecuación 2:

$$k = 2n + 1 \quad (2)$$

Donde:

n : número de puentes H conectados en cascada.

Es decir que con un puente H por cada fase se puede establecer un inversor en cascada de 3 niveles.

En la ecuación 3 el paso de voltaje de cada nivel viene dado por:

$$p = \frac{Vdc}{2n} \quad (3)$$

Donde:

n : número de puentes H conectados en cascada.

La tabla 5 indica la conmutación del puente H en cascada mostrado en la figura 3.

Tabla 5. Conmutación del inversor CHB

Switch Encendido	Nivel de Voltaje
Sa, Sd	Vdc
Sb, Sc	-Vdc
Sb, D	0

2.8 Marco de referencia síncrono.

El Marco de Referencia Síncrono SRF (Synchronous Reference Frame), también conocido como técnica de transformación dq0, es uno de los métodos de control más eficientes para la supresión de los armónicos de voltaje y de corriente que basa su funcionamiento en la transformada de Park [34],[35].

La técnica que utiliza el control SRF es generar vectores unitarios a partir de la tensión del suministro transfiriendo las corrientes distorsionadas (coordenadas a- b-c) a las coordenadas del marco de referencia síncrono de dos fases (dq0) utilizando las funciones seno y cosenos del bucle de bloqueo de fase (PLL) [34].

El PLL (Phase Locked Loop) es el encargado de mantener la

sincronización del convertidor con el voltaje de línea y la corriente de alimentación; además proporciona el ángulo de fase síncrono para el bloque de transformación midiendo la frecuencia del sistema [36].

La técnica de transformación dq0 cambia de manera exacta señales sinusoidales a señales constantes resultando modelos dinámicos relativamente simples para modelar y analizar fenómenos transitorios rápidos que se encuentran en los sistemas de potencia [27].

El PLL ayuda a la transformación de las corrientes de carga de las coordenadas abc (I_{aL} , I_{bL} , I_{cL}) a coordenadas dq0 (I_d , I_q , I_0) así como se muestra en la ecuación (4).

$$\begin{bmatrix} I_{aref} \\ I_{bref} \\ I_{cref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{dc} \\ I_{qc} \\ I_{0c} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{aL} \\ I_{bL} \\ I_{cL} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para mantener las componentes promediadas de naturaleza estable ($\overline{I_{AdL}}$, $\overline{I_{AqL}}$) y evitar respuestas oscilantes ($\widetilde{I_{dL}}$, $\widetilde{I_{qL}}$) de las coordenadas dq0, se utiliza los filtros de paso bajo (LPF); en donde las tensiones de referencia se generan tomando en cuenta las componentes activa, reactivas y nulas en cero para compensar los armónicos de la tensión de carga [5], [34]. Para la ecuación (5) se considera las corrientes del eje en

donde las coordenadas pasan de ser coordenadas dq0 a coordenadas abc dando así una forma de onda con componentes armónicas nulas, estableciéndose como corrientes de referencia I_{aref} , I_{bref} , I_{cref} [26].

Las corrientes de referencia son comparadas con las corrientes de carga para generar la corriente de referencia del D-STATCOM. Con el controlador de histéresis las corrientes de referencia del D-STATCOM se mantienen en valores de referencia [2],[5].

El error producido por la corriente de carga y la de referencia son comparados con una señal triangular para generar las señales de activación de los interruptores IGBT del inversor multinivel de tres niveles en cascada del D-STATCOM [5].

3. Planteamiento del Problema

El incremento progresivo de cargas eléctricas permite encontrar estrategias para mejorar la calidad del suministro eléctrico y de esta manera satisfacer la demanda de energía eléctrica requerida.

Hoy en día una gran cantidad de demanda son producidas por las cargas no lineales, estas cargas son las principales fuentes de armónicos que distorsionan la forma de onda de corriente sinusoidal habitual [28].

La compensación tipo D-STATCOM puede evitar los efectos contraproducentes que se genera por la aparición de los armónicos,

disminuyendo el THDi en la red eléctrica.

3.1. Topología para D-STATCOM.

Un D-STATCOM con CHB (Cascaded H Bridge) de tres niveles que actúa como VSC, consta de tres salidas niveladas (+Vcc, 0, -Vcc) con un puente H conectado en cascada por cada fase en derivación con la línea de distribución a través de una impedancia de acoplamiento. El número de celdas de CHB-MLI por cada fase que requiere el compensador está determinado por la ecuación (6) [6].

$$c = \frac{(m-1)}{2} \quad (6)$$

Donde:

m: niveles de conmutación del CHB.

El MLI D-STATCOM propuesto de la figura 5; se conecta a cada fase a través de una inductancia de acoplamiento, donde V_{Sa} , V_{Sb} , V_{Sc} son los voltajes de fase de la fuente, y las corrientes de derivación de la carga por cada fase son I_{La} , I_{Lb} , I_{Lc} respetivamente [6],[16].

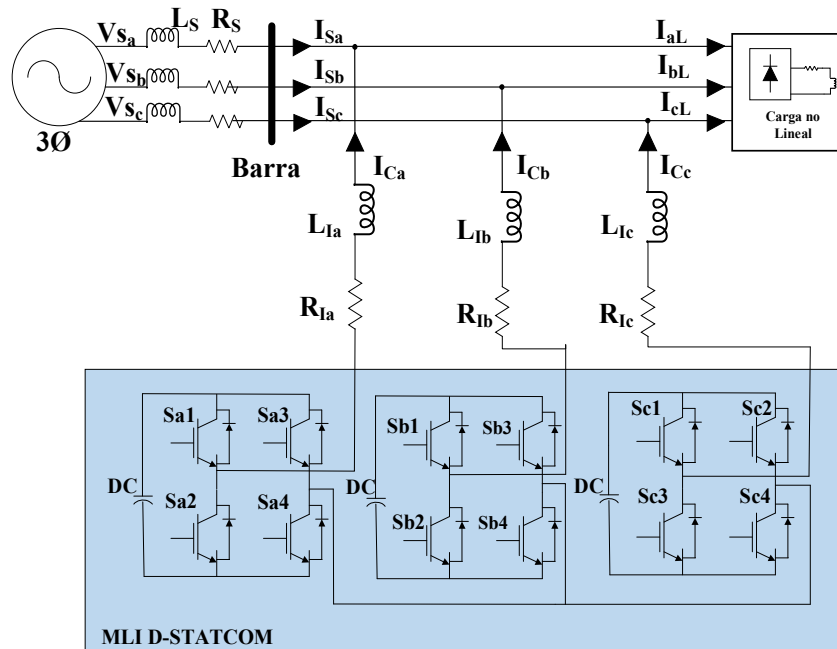


Figura 5. Diseño del MLI en cascada D-STATCOM conectado en derivación.

3.2. Sistema de Enlace DC

Para el estudio se eligió una topología MLI de tres niveles, esto quiere decir que existe un puente H y un capacitor para cada fase, por tanto, hay tres capacitores en total en cada puente H en cascada. Es por eso que, para equilibrar los voltajes en DC de los condensadores durante toda su operación, se adiciona el controlador proporcional Integral (PI) y de esta manera se pueda distribuir la potencia activa entre todos los puentes H para compensar las pérdidas de energía (I_{Dloss}) [6].

La función del controlador PI viene dada por la ecuación matemática (7):

$$i_{dloss} = Kp(V_{dref} - V_{dc}) + K_i \int V_{dcref} - V_{dc} \quad (7)$$

Donde:

Kp : Ganancia Proporcional.

Ki : Ganancia Integral

Los controladores PI implementados tienen los mismos valores de ganancia proporcional (Kp) y ganancia integral (Ki) para que el voltaje del capacitor sea igual al valor de voltaje de referencia del enlace DC.

Utilizando el método de prueba y error se determina los valores de Kp y Ki mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Ganancia Proporcional e Integral del controlador PI.

Controlador de Ganancia	Valores
Kp	1.2×10^{-3}
Ki	7×10^{-4}

En el diagrama de bloques del control basado en Marco de Referencia Síncrono mostrado en la figura 6 se encuentra las corrientes de carga en coordenadas abc, las cuales se transforman en coordenadas dq0 a través de la ecuación 4 [26].

El voltaje de PCC son sincronizadas

con la señal trifásica del PLL. El filtro LPF se utiliza para extraer las componentes Id e Iq.

En el controlador PI se encuentra la diferencia entre el voltaje detectado (V_{dc}) y el voltaje de referencia del condensador (V_{dc_ref}) a su salida se le asocia el componente “d” de las corrientes de cargas Id para obtener Idc [26], [27].

Para obtener Iqc se agrega la componente “q” de la corriente de carga Iq por medio de la diferencia entre la amplitud de voltaje del terminal de carga y el valor de referencia que se alimenta al controlador PI.

Con el fin de mantener una compensación adecuada, resulta conveniente mantener constante la tensión del enlace DC, además de que el controlador PI compensa las pérdidas de corriente activa utilizando los valores de ganancia de la tabla 5.

Las componentes encontradas (Idc, Iqc) se convierten en componentes abc por medio de la transformación de Park.

La tensión de referencia de los terminales PCC se comparan entre la tensión del terminal de referencia y la tensión del terminal detectado, esto viene dado por la ecuación (8).

$$V_t = \sqrt{\frac{2}{3}(v_{sa}^2 + v_{sb}^2 + v_{sc}^2)} \quad (8)$$

En donde:

V_t : voltaje en los terminales de PCC

Para V_t se considera la caída de tensión que puede presentar el sistema a causa de las perturbaciones a las cuales fue sometido El controlador PWM genera los pulsos de conmutación para controlar el MLI, haciendo que las corrientes de fuente de referencia (I_{a_ref} , I_{b_ref} , I_{c_ref}) sigan a las corrientes detectadas (I_{sa} , I_{sb} , I_{sc}).

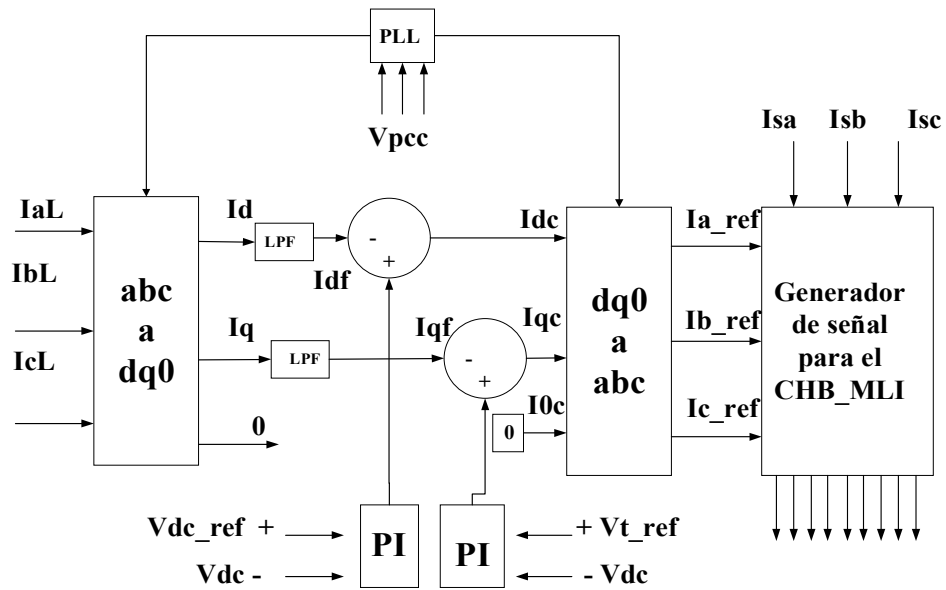


Figura 6. Diagrama de Bloques de la estrategia Marco de Referencia Síncrono

3.3. Caso de Estudio

Para el caso de estudio se analiza el sistema de distribución de la IEEE de 13 barras mostrado en la figura 7, en el cual una de sus barras es sometida a una carga no lineal para identificar los cambios de magnitud en la forma de onda de corriente, así como la distorsión armónica que puede causar dicha carga.

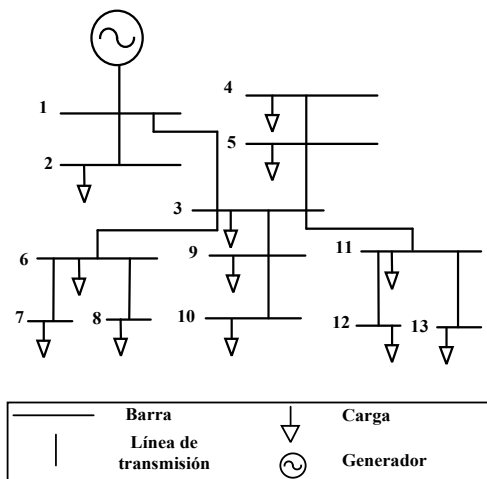


Figura 7. Sistema de Distribución IEEE 13 Barras

Como primer caso de estudio se analiza el comportamiento del sistema IEEE de 13 barras en condiciones normales; el

cual está compuesto por un generador de energía, barras, líneas de transmisión y cargas, en la tabla 7 se detalla los valores del sistema eléctrico presentado.

Tabla 7. Parámetros Eléctricos del sistema eléctrico analizado

Parámetros	Valor	Unidad
Voltaje de la red (V_{rmsph})	13.8	kV
Frecuencia	60	Hz
Resistencia de la Fuente	50	$m\Omega$
Inductancia de la Fuente	1	mH

Para el siguiente caso de estudio se implementa una carga no lineal en la barra 7 del sistema, para observar los cambios y deformaciones que se pueden presentar en la forma de onda de la corriente de la barra de análisis.

La tabla 8 presenta los parámetros de la carga no lineal implementada en la barra de análisis.

Tabla 8. Parámetros Eléctricos de la carga no lineal implementada en el sistema

Parámetros	Valor	Unidad
Voltaje	480	V
Transformador de la carga no lineal	13.8/480	kV/V
Resistencia de la carga no lineal	20	Ω
Capacitancia de la carga no lineal	500	μF
Resistencia de Diodo (R_{on})	1	$\text{m}\Omega$
Inductancia de Diodo (L_{on})	1	$\text{m}\Omega$

En el último caso de estudio se emplea la compensación por medio del MLI D-STATCOM, el cual se conecta junto con la carga no lineal en la barra de análisis, como lo muestra la figura 8; de esta manera se verifica la eficacia de la estrategia al disminuir casi en su totalidad los inconvenientes presentados por la carga no lineal.

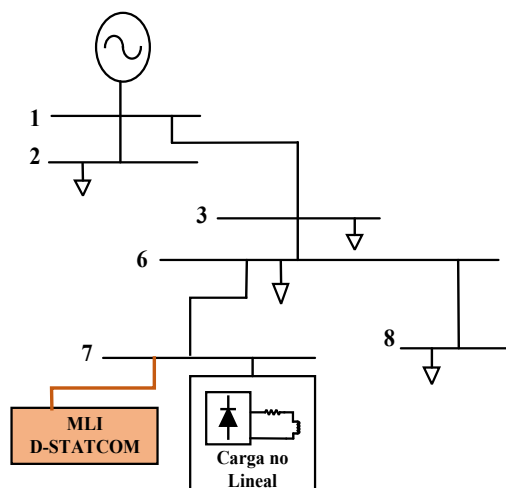


Figura 8. Sistema de Distribución IEEE 13 Barras con MLI D-STATCOM

Los valores de los elementos que conforman el MLI D-STATCOM vienen dados en la tabla 9

Tabla 9. Parámetros Eléctricos del MLI D-STATCOM implementado en la red

Parámetros	Valor	Unidad
Resistencia Impedancia de Acoplamiento	500	$\text{m}\Omega$
Inductancia de la Impedancia de Acoplamiento	3	mH
Voltaje del enlace DC por cada celda	480	V
Resistencia (R_{on}) del puente H por cada Fase	0.1	$\text{m}\Omega$
Resistencia (R_s) del puente H por cada Fase	100	$\text{k}\Omega$

4. Análisis de Resultados

Para el sistema propuesto se analiza el comportamiento en condiciones normales de la barra 7, a la cual, se le implementará una carga no línea para verificar los cambios en las formas de onda de corriente y el aumento del THDi en un tiempo de simulación de 150 (ms). La barra 7 del sistema de prueba de 13 barras de la IEEE en condiciones normales presenta un voltaje de 1(pu) con corrientes de 0.15(pu) con respecto a la corriente base de 200 (A) manteniendo su forma de onda de corriente y de voltaje en condiciones estables y sin perturbaciones; así como se muestra en la figura 9 y la figura 10 respectivamente.

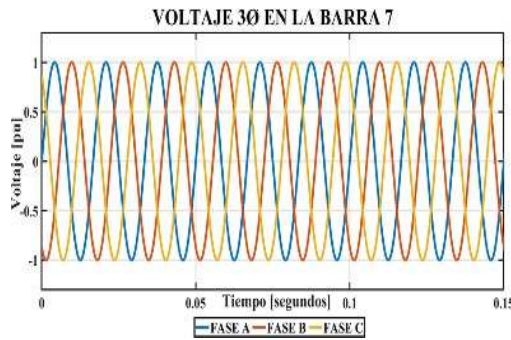


Figura 9. Voltaje trifásico (p.u) en Barra 7 sin carga no lineal.

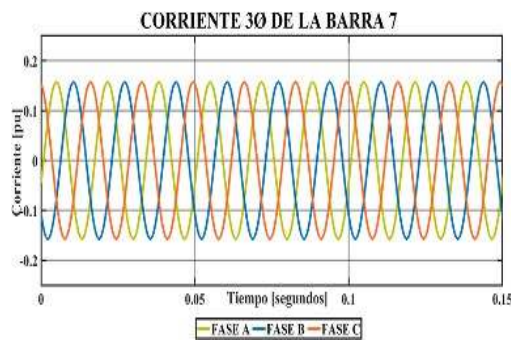


Figura 10. Corriente trifásica (pu) en Barra 7 sin carga no lineal.

Para constatar el rendimiento del sistema ante la presencia de carga no lineal, se conecta como carga no lineal al puente rectificador de diodos con una carga RC, con las características presentadas en la tabla 7. La carga se encuentra conectada en $t=0(s)$ en la barra 7 para verificar los cambios que se puede presentar. Esta carga conectada en dicha barra produce armónicos en forma de onda de corriente de carga que deforman y disminuyen la onda de corriente, como lo muestra la figura 11.

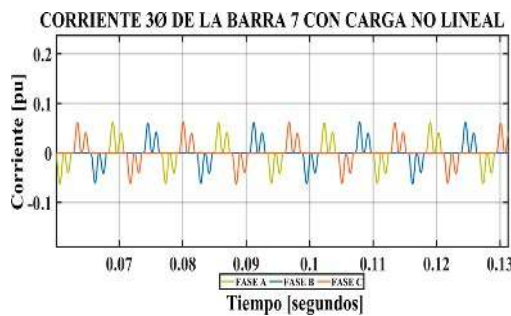


Figura 11. Corriente trifásica de la barra 7 con carga no lineal.

La carga no lineal implementada provoca una deformación menor en la forma de onda de voltaje en comparación a la forma de onda de corriente, así como lo muestra la figura 11 y figura 12.

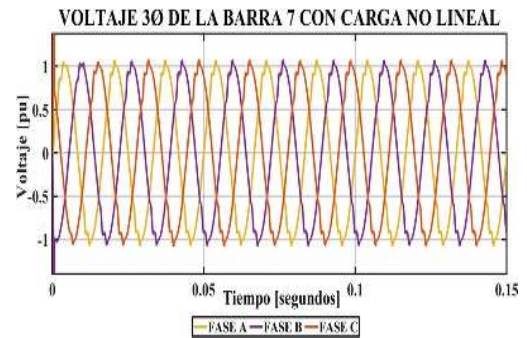


Figura 12. Voltaje trifásico de la barra 7 con carga no lineal.

El THD de voltaje que produce la carga no lineal es del 3.39% aproximadamente, aunque la distorsión armónica es muy baja, esta es capaz de deforma la onda original de voltaje mostrada en la figura 9.

En la figura 13 la distorsión armónica provocada por la carga no lineal ocasiona el incremento del THDi de la barra 7 en un 135.20% en la fase A, 135.24% en la fase B y en la fase C al 134.27 %.

Las fases A, B y C generan un pico de distorsión armónica al momento de la energización, las cuales se estabilizan en un periodo de 500(ms); después de dicho periodo de tiempo el THDi de las 3 fases se mantienen en los valores mencionados.

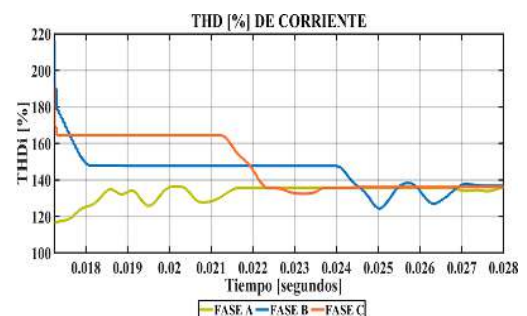


Figura 13. THDi (%) de Corriente de la barra 7 sin compensación.

La fase A empieza con un contenido armónico de corriente del 120% aproximadamente, y al cabo de 10 (ms) empieza el crecimiento del THDi, hasta los valores ya mencionados.

De igual manera la Fase C empieza con un THDi del 165% para posteriormente disminuir e igualar a las demás fases.

En cambio, la Fase B es la que tiene el pico más alto, alcanzando aproximadamente el 180% de THDi al momento de la energización.

Sin embargo, aunque el THDi disminuye después de la energización, los niveles alcanzados son muy altos, que generan efectos negativos según la tabla 3. Para poder suprimir la distorsión armónica de corriente, se conecta en la misma barra de análisis el MLI D- STATCOM, de esta manera se inyecta la corriente de fase en el sistema en oposición a las corrientes armónicas que genera la carga no lineal y así compensar los armónicos de corriente.

La forma de onda de la figura 14 corresponde a la corriente de la barra 7 después de haber inyectado la compensación con el MLI D- STATCOM en donde se aprecia que la forma de onda vuelve a su estado de operación normal libre de distorsión armónica.

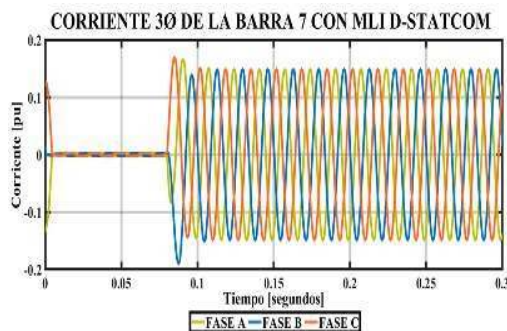


Figura 14. Corriente trifásica (pu) de la Barra 7 después de la compensación.

Para la forma de onda de voltaje pasa algo similar, en donde después de generar la compensación su onda vuelve a los estados iniciales, mostrando una

onda sinusoidal libre de distorsión, así como lo muestra la figura 15.

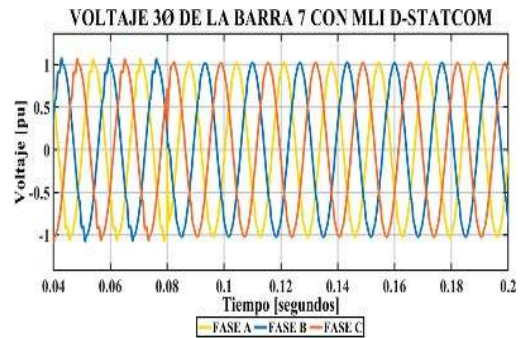


Figura 15. Voltaje trifásico (pu) de la Barra 7 después de la compensación.

El MLI D-STATCOM entra en funcionamiento en $t=80$ (ms) después de haber energizado la barra, este tiempo está determinado por el Breaker trifásico conectado entre la barra de análisis y el compensador con la finalidad de mostrar la diferencia de forma de ondas de corriente que se tiene antes y después de la implementación del MLI D- STATCOM; es decir que entre los tiempos $t=0$ (s) y $t=80$ (ms) existe deformación de la onda de corriente como lo muestra la figura 11, y de ahí en adelante entra en funcionamiento la compensación ya señalada.

Como muestra la figura 16 el THDi de la barra 7 decae considerablemente a valores que se encuentran dentro de las normas mencionadas, obteniendo una mejora en las corrientes de la barra con la carga no lineal y el compensador conectados simultáneamente.

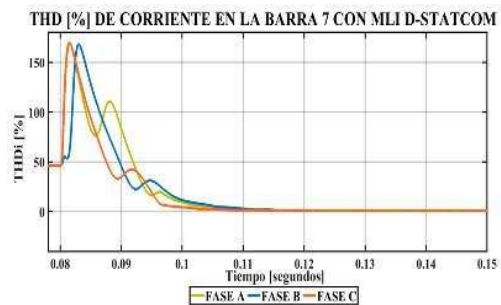


Figura 16. THD (%) de Corriente de la Barra 7 después de la compensación.

Los valores de THDi y de THDv encontrados después de la compensación se encuentra en la tabla comparativa 10 y tabla 1.

4.1. Análisis del THDi por Transformada rápida de Fourier (FFT)

Para complementar el análisis, la distorsión armónica total también puede ser encontrada con la ayuda del análisis FFT, con el cual se visualiza el orden los armónicos impares de la señal, tomando en cuenta que la componente fundamental es de 60[Hz] y la amplitud pico de la componente fundamental en presencia de carga no lineal y sin compensación es de 0.003048 [pu].

La figura 17 muestra un alto componente armónico impar (1,3,5,7,9,11,13,15) y carece de armónicos pares, obteniendo un THDi de 132% que claramente sobrepasan los niveles permitidos de acuerdo a las normativas mencionadas, siendo el armónico de orden 3 el más alto con 32.36%.

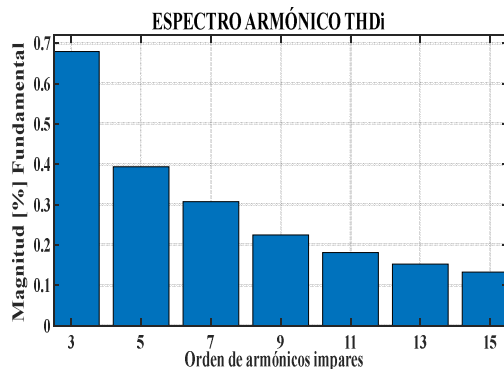


Figura 17. Espectro Armónico impar de Corriente con compensación MLI D-STATCOM de barra 7

Con esto la distorsión armónica total de la corriente en la barra 7 después de la compensación se ve reducida a un 2.38%, manteniendo valores de magnitud de voltaje estable en el sistema entre 0.95 pu y 1.05 pu; así como el

THDv de 1.5% esto se puede apreciar en las figuras 19 y 20 respectivamente.

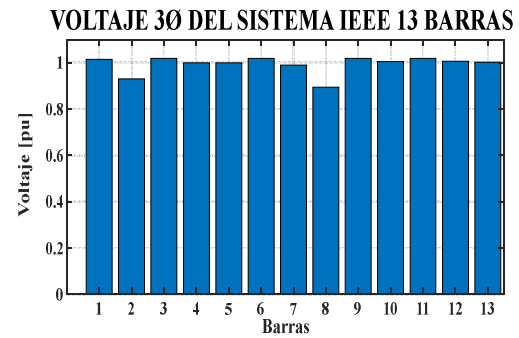


Figura 18. Magnitud de voltaje en (pu) del sistema después de la compensación MLI D-STATCOM

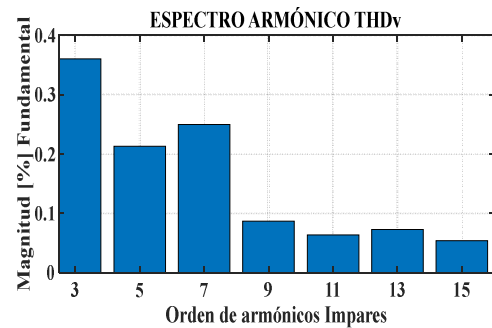


Figura 19. Espectro Armónico impar de voltaje con compensación MLI D-STATCOM de barra 7

Para la tabla mostrada, se realiza un análisis comparativo de el THD de corriente en la barra analizada antes y después de haber conectado y energizado el MLI D-STATCOM con la presencia de carga no lineal.

Tabla 10. Comparación THDi en la barra 7 con y sin compensación MLI D-STATCOM

THD DE CORRIENTE (%)		
Fase	Antes de la compensación	Después de la compensación
A	135.20%	2.38%
B	135.24%	2.41%
C	134.27%	2.36%

Tabla 11. Comparación THDv en la barra 7 con y sin compensación MLI D-STATCOM

THD DE VOLTAJE (%)		
Fases	Antes de la compensación	Después de la compensación
Fase A	3.391%	1.56%
Fase B	3.388%	1.6%
Fase C	3.368%	1.53%

5. Conclusiones

La capacidad de mejorar la distorsión armónica total de corriente (THDi) del inversor multinivel en cascada de tres niveles D-STATCOM analizado bajo el esquema de control con la técnica del marco de referencia síncrono en presencia de una carga no lineal en el sistema IEEE de 13 barras el cual fue modelado y simulado en el

software MATLAB/Simulink, es eficiente para mejorar los niveles de calidad de la energía en el sistema de distribución.

El MLI D-STATCOM reduce casi en su totalidad el THDi en cada una de las líneas de la barra 7 cuando en esta se encuentra conectada una carga no lineal, además de que la corriente recupera su magnitud inicial de 200 (A) luego de la compensación.

Las formas de ondas tanto de corrientes como de voltajes de la barra 7 con carga no lineal muestran señales sinusoidales perfectas luego de la implementación del MLI D-STATCOM según los resultados obtenidos.

Los valores de corrientes no se ven afectados después de la conexión del compensador, así mismo los voltajes mantienen su magnitud de operación

normal entre 0.95 pu y 1.05 pu en cada una de las barras del sistema.

La carga no lineal implementada no afecta notoriamente al THD de voltaje, sin embargo, la implementación de la compensación atares del MLI D-STATCOM reduce el THDv a casi su totalidad, teniendo el 1% de distorsión.

En cuanto al THDi que si se ve más afectado por la carga no lineal se encuentra muy por debajo de los límites máximos establecidos por las normas y parámetros de calidad de la energía IEEE 519 y ISO 61000 que se tomaron de referencia, siendo el THDi más alto de 46.13% sin la compensación y 0.98% después de la compensación. Así mismo el armónico de tercer orden que es el más alto con 32.36% se ve reducido a un 0.67% en una frecuencia fundamental de 60Hz.

Es por esto que resulta una estrategia eficaz la implementación del MLI D-STATCOM para mejorar la calidad de energía ya que su funcionamiento permite reducir notablemente el THDi que generan las cargas no lineales en el sistema.

6. Trabajos Futuros

Para trabajos futuros se puede sugerir la investigación, modelamiento y simulación del Inversor Multinivel en cascada y D- STATCOM con diferentes topologías.

Se puede comparar el desempeño del compensador con diferentes niveles, es decir implementar el MLI D-STATCOM de 5,7,11y32 niveles ante presencia de carga no lineal.

Probar la eficiencia del inversor multinivel en cascada en cualquier otra topología en una micro-red eléctrica.

7. Referencias

- [1] A. A. Sallam and O. P. Malik, *Electric distribution systems*. 2018.
- [2] Julian and R. Fernández, *Instalaciones de distribución*, 1era edici. Madrid: Paraninfo, 2020.
- [3] S. M. De Oca, P. Belzarena, and P. Monzon, “Benefits of optimal demand response in distribution networks in a competitive retail market,” *2017 Ieee Urucon, Urucon 2017*, vol. 2017-Decem, pp. 1–4, 2017, doi: 10.1109/URUCON.2017.8171886.
- [4] M. O. Marco Sosa MBA, Carlos Maldonado MBA, “EEQ, Normas Para sistemas de distribucion, Parte A.” Quito, pp. 1–15, 2014.
- [5] Y. Naderi, S. H. Hosseini, S. Ghassem Zadeh, B. Mohammadi-Ivatloo, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, “An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 93, no. May, pp. 201–214, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.05.013.
- [6] H. Andrei, P. C. Andrei, L. M. Constantinescu, R. Beloiu, E. Cazacu, and M. Stanculescu, “Electrical power systems,” *Power Syst.*, vol. 2, pp. 3–47, 2017, doi: 10.1007/978-3-319-51118-4_1.
- [7] X.-P. Zhang and Z. Yan, “Energy Quality: A Definition,” *IEEE Open Access J. Power Energy*, vol. 7, no. July, pp. 430–440, 2020, doi: 10.1109/oajpe.2020.3029767.
- [8] R. P. B. da Silva, R. Quadros, H. R. Shaker, and L. C. P. da Silva, “Effects of mixed electronic loads on the electrical energy systems considering different loading conditions with focus on power quality and billing issues,” *Appl. Energy*, vol. 277, no. July, p. 115558, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115558.
- [9] K. R. Shandilya and U. S. Patel, “Mitigation of total harmonic distortion using cascaded MLI-DSTATCOM in distribution network,” *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPCSI 2017*, pp. 2439–2445, 2018, doi: 10.1109/ICPCSI.2017.8392155.
- [10] A. Rahmani and A. Deihimi, “Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 178, no. October 2019, p. 106046, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106046.
- [11] A. Y. Solanki and S. R. Vyas, “A Review on Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices,” pp. 287–290, 2021.
- [12] W. Rohouma, R. S. Balog, A. A. Peerzada, and M. M. Begovic, “D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads,” *Renew. Energy*, vol. 145, pp. 1449–1464, 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.05.134.
- [13] A. Rahmani and A. Deihimi, “Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 178, no. April 2019, p. 106046, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106046.
- [14] S. Maurya, D. Mishra, K. Singh, A. K. Mishra, and Y. Pandey, “An

- Efficient Technique to reduce Total Harmonics Distortion in Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter,” *Proc. 2019 3rd IEEE Int. Conf. Electr. Comput. Commun. Technol. ICECCT 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/ICECCT.2019.8869424.
- [15] A. C. Normativa, “ANEXO C. Normativa y legislación,” pp. 33–42, 1998.
- [16] “Regulación No. CONELEC - 003/08 Página 1 de 22,” no. 15, pp. 1–22, 2008.
- [17] I. Mehouchi, M. Abbes, and S. Chebbi, “Design of a high power D-STATCOM based on the isolated dual-converter topology,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 106, no. September 2017, pp. 401–410, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2018.10.025.
- [18] P. M. Saradva, K. T. Kadivar, M. H. Pandya, and A. J. Rana, “Application of D-STATCOM to control power flow in distribution line,” *2016 Int. Conf. Energy Effic. Technol. Sustain. ICEETS 2016*, pp. 479–484, 2016, doi: 10.1109/ICEETS.2016.7583802.
- [19] 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.
- [20] P. E. Melin *et al.*, “Analysis and control strategy for a current-source based D-STATCOM towards minimum losses,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 116, no. September 2019, p. 105532, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105532.
- [21] A. R. Gupta and A. Kumar, “Optimal placement of D-STATCOM using sensitivity approaches in mesh distribution system with time variant load models under load growth,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 9, no. 4, pp. 783–799, 2018, doi: 10.1016/j.asej.2016.05.009.
- [22] J. C. Mendoza-Niebles, L. D. Pabon-Fernandez, E. A. Caicedo-Peñaranda, A. Pardo-García, and J. L. Díaz-Rodríguez, “Control síncrono de potencia de un D-STATCOM de bajo costo,” *Aibi Rev. Investig. Adm. e Ing.*, vol. 8, no. 3, pp. 108–117, 2020, doi: 10.15649/2346030x.881.
- [23] A. Luis and E. Ituarte, “El inversor multinivel en cascada: constitución y rol en las plantas fotovoltaicas de Jujuy.” pp. 44–50, 2018.
- [24] Abdullah M. Noman; Abdullrahman A. Al-Shamma’a; Khaled E. Addoweesh; Ayman A. Alabduljabbar and Abdullrahman I. Alolah, “Cascaded Multilevel Inverteter Topology.pdf.” 11 April 2018, 2018.
- [25] J. A. Araque Gallardo, J. L. Diaz Rodriguez, and A. P. Garcia, “THD optimization of a single phase cascaded multilevel converter using PSO technique,” *2013 Power Electron. Power Qual. Appl. PEPQA 2013 - Proc.*, no. November 2017, 2013, doi: 10.1109/PEPQA.2013.6614944.
- [26] K. T. Maheswari, R. Bharanikumar, V. Arjun, R. Amrishi, and M. Bhuvanesh, “A comprehensive review on cascaded H-bridge multilevel inverter for medium voltage high power applications,” *Mater. Today Proc.*, vol.

- 45, pp. 2666–2670, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.11.519.
- [27] V. R. Kota and S. Vinnakoti, “SRF-based control of unified power quality conditioner for power quality enhancement,” *Int. Conf. Electr. Electron. Signals, Commun. Optim. EESCO 2018*, no. January, 2018, doi: 10.1109/EESCO.2015.7253768.
- [28] D. r. r, d. puerto-flores, and p. z. h, “diseño de un controlador lineal con active-reactive power flow in grid-connected converter with lcl filter,” vol. 18, pp. 1–12, 2020.
- [29] Sujono, I. Sudiharto, and O. A. Qudsi, “Application of D-STATCOM to reduce unbalanced load using synchronous reference frame theory,” *EECCIS 2020 - 2020 10th Electr. Power, Electron. Commun. Control. Informatics Semin.*, no. 3, pp. 65–70, 2020, doi: 10.1109/EECCIS49483.2020.9263476.
- [30] Y. Levron and J. Belikov, “Lecture 2: The Direct-Quadrature-Zero (DQ0) Transformation,” vol. 1, no. 2, pp. 1–21, [Online]. Available: https://a-lab.ee/sites/default/files/PS_Lecture_2.pdf
<https://a-lab.ee/projects/dq0-dynamics>.
- [31] V. R. Kota and S. Vinnakoti, “Synchronous reference frame based control of MLI-STATCOM in power distribution network,” *2018 IEEE Power Energy Conf. Illinois, PECEI 2018*, 2018, doi: 10.1109/PECEI.2016.7459247.
- [32] B. G. Elizabeth Cherian, “Minimizing Harmonics and Transformer Derating Low Voltage Distribution Networks by DC Distribution,” *ICETIETR*, pp. 5–10, 2018.
- [33] R. Pandey, R. Nath Tripathi, and T. Hanamoto, “Comprehensive Analysis of LCL Filter Interfaced Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter-Based DSTATCOM.pdf.” 2017.

8. Estado del arte

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.																		
ITEM	AÑO	DATOS TÍTULO DEL ARTÍCULO	TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA	
			SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	ARMÓNICOS	D-STATCOM	INVERSOR MULTINIVEL	MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	TOPOLOGÍA DEL MLI D-STATCOM	REDUCCIÓN DEL THDi	MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	LÍMITES DE THDi	NORMATIVAS DEL THDi	INFRAESTRUCTURA	IMPLEMENTACIÓN DEL MLI D-STATCOM	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DEL MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	SIMULACIONES	SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DESBALANCEADO
1	1998	ANEXO C. Normativa y legislación		☒	☒													
2	2008	Regulación No. CONELEC - 003/08 Página 1 de 22			☒						☒	☒						☒
3	2011	Cascaded multilevel converter based DSTATCOM using p-q theory with DC link voltage balancing		☒				☒									☒	
4	2013	THD optimization of a single phase cascaded multilevel converter using PSO technique,								☒	☒							
5	2014	EEQ, Normas Para sistemas de distribución, Parte A.	☒															
6	2016	Application of D-STATCOM to control power flow in distribution line,					☒								☒			
7	2017	Design of a high power D-STATCOM based on the isolated dual-converter topology					☒					☒				☒	☒	☒
8	2017	Applications of DSTATCOM to regulate voltage on a distribution network,					☒									☒		☒
9	2017	Comprehensive Analysis of LCL Filter Interfaced Cascaded H-Bridge Multilevel Inverter-Based DSTATCOM					☒	☒					☒			☒	☒	☒
10	2017	Modelling and simulation of improved operation of D-STATCOM in distribution system for power quality improvement using MATLAB Simulink tool					☒								☒	☒	☒	
11	2017	Benefits of optimal demand response in distribution networks in a competitive retail market,	☒															
12	2017	Electrical power systems,		☒														

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTICULO	DATOS				TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS		RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA		
			SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	ARMÓNICOS	D-STATCOM	INVERSOR MULTINIVEL	MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	TOPOLOGÍA DEL MLI D-STATCOM	REDUCCIÓN DEL THDi	MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	LÍMITES DE THDi	NORMATIVAS DEL THDi	INFRAESTRUCTURA	IMPLEMENTACIÓN DEL MLI-D-STATCOM	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DEL MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	SIMULACIONES	SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DESBALANCEADO	ACOPAMIENTO DEL MLI D-STATCOM EN LA BARRA DE ANÁLISIS
13	2017	Standalone photovoltaic system, using a single stage boost DC/AC power inverter controlled by a double loop control																	
14	2017	Lecture 2 : The Direct-Quadrature-Zero (DQ0) Transformation																	
15	2018	An overview of power quality enhancement techniques applied to distributed generation in electrical distribution networks																	
16	2018	Mitigation of total harmonic distortion using cascaded MLI-DSTATCOM in distribution network																	
17	2018	Synchronous reference frame based control of MLI-STATCOM in power distribution network																	
18	2018	Electric distribution systems																	
19	2018	RESOLUCIÓN Nro. ARCONEL-053/18,																	
20	2018	Optimal placement of D-STATCOM using sensitivity approaches in mesh distribution system with time variant load models under load growth																	
21	2018	El inversor multinivel en cascada : constitución y rol en las plantas fotovoltaicas de Jujuy																	
22	2018	Cascaded Multilevel Inverteter Topology																	
23	2018	SRF-based control of unified power quality conditioner for power quality enhancement,																	
24	2018	Minimizing Harmonics and Transformer Derating Low Voltage Distribution Networks by DC Distribution																	

IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL CON EL INVERSOR MULTINIVEL EN CASCADA Y D-STATCOM USANDO MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.

ITEM	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS		RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
	AÑO	TÍTULO DEL ARTICULO	SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	ARMÓNICOS	D-STATCOM	INVERSOR MULTINIVEL	MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	TOPOLOGÍA DEL MLI D-STATCOM	REDUCCIÓN DEL THDi	MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA	LÍMITES DE THDi	NORMATIVAS DEL THDi	INFRAESTRUCTURA	IMPLEMENTACIÓN DEL MLI D-STATCOM	IMPLEMENTACIÓN DE LA ESTRATEGIA DEL MARCO DE REFERENCIA SÍNCRONO	SIMULACIONES	SIMULACION DEL SISTEMA ELÉCTRICO DESBALANCEADO	ACOPAMIENTO DEL MLI D-STATCOM EN LA BARRA DE ANÁLISIS	ANÁLISIS DE L THDi DESPUES DE LA COMPENSACIÓN
25	2019	Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX			☒										☒					
26	2019	An Efficient Technique to reduce Total Harmonics Distortion in Cascaded H- Bridge Multilevel Inverte			☒					☒										
27	2019	Analysis and control strategy for a current-source based D-STATCOM towards minimum losses				☒	☒							☒					☒	
28	2020	Instalaciones de distribución	☒																	
29	2020	Energy Quality: A Definition		☒						☒										
30	2020	Effects of mixed electronic loads on the electrical energy systems considering different loading conditions with focus on power quality and billing issues		☒							☒									
31	2020	Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX		☒	☒						☒									☒
32	2020	D-STATCOM for harmonic mitigation in low voltage distribution network with high penetration of nonlinear loads			☒	☒			☒					☒		☒			☒	
33	2020	Control síncrono de potencia de un D-STATCOM de bajo costo				☒	☒	☒												

9. Resumen de indicadores

