

**UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR  
MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA  
MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO  
EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA  
EXHAUSTIVA**





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

**UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR  
MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA  
MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO  
EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA  
EXHAUSTIVA**

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

AUTOR: MARLON ANTHONY HIDROBO  
BENAVIDES  
TUTOR: ALEXANDER ÁGUILA TÉLLEZ

Quito -Ecuador  
2022

Marlon Anthony Hidrobo Benavides

**UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito-Ecuador 2022  
Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Marlon Anthony Hidrobo Benavides** (Y'1991 – M'05). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Institución Educativa Particular “Checa” de la ciudad de Quito. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la ubicación óptima del convertidor modular multinivel para la mejora del perfil de voltaje en líneas de transmisión considerando el algoritmo de búsqueda exhaustiva. [mhidrobo@est.ups.edu.ec](mailto:mhidrobo@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Alexander Águila Téllez** (Y'1981 – M'09). En 2005 se gradúa de Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Camagüey - Cuba. En el año 2010 recibe su título de Máster en Eficiencia Energética, otorgado por la Universidad de Ciego de Ávila, Cuba. En 2019 se gradúa de una segunda maestría en Ingeniería en la Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia y en 2021 logra la obtención del grado de PhD (Magna Cum Laude) en Ingeniería con mención en sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica en esta misma Universidad. Es miembro del grupo de investigación en Redes Eléctricas Inteligentes (GIREI) de la Universidad Politécnica Salesiana, miembro activo de IEEE e investigador acreditado por la Senescyt. Revisor de varias revistas indexadas. Ha publicado numerosos artículos de alto impacto científico. Ha participado como expositor en conferencias nacionales e internacionales y cuenta con experiencia laboral en empresas eléctricas y de diseño de redes eléctricas. Actualmente es docente y director de la carrera de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Politécnica Salesiana sede Quito. [aaguila@ups.edu.ec](mailto:aaguila@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO – ECUADOR

## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marlon Anthony Hidrobo Benavides con documento de identificación N° 1722598651 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, 12 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Marlon Anthony Hidrobo Benavides

1722598651

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

Yo, Marlon Anthony Hidrobo Benavides con documento de identificación No. 1722598651, 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 : “Ubicación óptima del convertidor modular multinivel (mmc) para la mejora del perfil de voltaje en líneas de transmisión considerando el algoritmo de búsqueda exhaustiva”, 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, 12 de septiembre del año 2022

Atentamente,



---

Marlon Anthony Hidrobo Benavides

1722598651

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alexander Águila Téllez con documento de identificación N°1755983184, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA, realizado por Marlon Anthony Hidrobo Benavides con documento de identificación N°1722598651, 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, 12 de septiembre del año 2022

Atentamente,



-----  
Ing. Alexander Águila Téllez, Ph.D

1755983184

## ÍNDICE GENERAL

1	Introducción .....	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Sistemas de Transmisión Eléctrica .....	3
2.2	Líneas de Transmisión.....	5
2.3	Parámetros de línea .....	5
2.3.1	Niveles y límites de tensión .....	5
2.4	Convertidores de Potencia .....	5
2.5	Topología MMC.....	6
2.6	Topología Submódulos .....	6
2.7	Estaciones Convertidoras.....	6
2.8	Tecnología LCC .....	6
2.9	Tecnología VSC.....	7
2.10	Tecnologías de modulación y control .....	7
2.11	Frecuencia Fundamental .....	7
2.12	Conmutación alta frecuencia.....	8
2.13	Módulos IGBT .....	8
3	Formulación del problema.....	9
3.1	Algoritmo de búsqueda exhaustiva.....	9
4	Metodología.....	10
4.1	Casos de estudio 1 .....	10
4.2	Casos de estudio 2.....	11
5	Análisis de resultados .....	11
5.1	Caso 1.....	11
5.2	Caso 2.....	12
6	Conclusiones.....	15
6.1	Trabajos futuros .....	16
7	Referencias.....	16
7.1	Matriz de Estado del Arte .....	21
7.2	Resumen de Indicadores.....	26
8	Anexos.....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo MMC [autor]. .....	6
Figura 2. Diagrama sintetizado LCC [autor]. .....	7
Figura 3. Diagrama sintetizado VSC. ....	7
Figura 4. Clasificación de estrategias de conmutación en MMC. ....	7
Figura 5. Modulación escalera. ....	8
Figura 8. Voltajes iniciales Sistema 9 barras. ....	12
Figura 9. Resultados perfil de voltaje implementado MMC para cada barra. ....	12
Figura 10. Comparación del perfil de voltaje base con modelo implementado MMC del sistema de 9 barras. ....	12
Figura 11. Voltajes iniciales Sistema 14 barras. ....	13
Figura 12. Perfil de voltaje del sistema de 14 barras de los escenarios del 1 al 10. ....	13
Figura 13. Perfil de voltaje del sistema de 14 barras de los escenarios del 11 al 20. ....	14
Figura 14. Irrupción del perfil de voltaje en la barra del del sistema de 14 barras. ....	14
Figura 15. Comparación del perfil de voltaje base con modelo implementado MMC del sistema de 14 barras. ....	15
Figura 16. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte. ....	26
Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte. ....	26
Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte. ....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de niveles de voltaje. ....	5
Tabla 2. Límites de tensión. ....	5
Tabla 3. Comparación de módulos. ....	8
Tabla 4. Valores iniciales de voltaje del sistema de 9 barras IEEE. ....	11
Tabla 5. Tabla de desviaciones media y promedio del sistema 9 barras. ....	12
Tabla 6. Valores iniciales de voltaje del sistema de 14 barras IEEE ....	13
Tabla 7. Tabla de desviaciones media y promedio del sistema 14 barras. ....	14
Tabla 8: Matriz de estado del arte. ....	21
Tabla 9. Datos de voltajes y corrientes del sistema IEEE de 9 barras. ....	27
Tabla 10. Datos de voltajes y corrientes del sistema IEEE de 14 barras. ....	27

# UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

## Resumen

El desarrollo de la electrónica de potencia relacionada a las tecnologías de conversión para uso en transmisión DC proporcionaría gran interés de inserción por sus beneficios de aplicación. Motivo por el cual, en el presente artículo se ubica de forma óptima un Convertidor Modular Multinivel (MMC) con la capacidad de actuar a niveles elevados de tensión dentro de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP). El uso de estas tecnologías de conversión MMC llega como alternativa de inserción de la electrónica de potencia a cambio de los sistemas de transmisión convencionales, de esta forma se busca mejorar la metodología de transmisión en corriente alterna sin tener algún tipo de inconveniente que afecte la calidad de servicio al SEP. En esta tesis se plantea mejorar los perfiles de voltaje en los nodos del sistema con la implementación del dispositivo MMC en cada una de las líneas para después realizar el análisis de cada escenario de estudio y finalmente aplicar un algoritmo de búsqueda exhaustiva el cual arroja una solución óptima al problema enfocándose en niveles y rangos admisibles de voltaje. La simulación de esta tesis será realizada en dos sistemas de prueba del IEEE, de 9 y 14 barras respectivamente dentro del software Matlab Simulink y finalmente el análisis de datos para la ubicación óptima del dispositivo se la desarrollará en tablas de Excel.

**Palabras Clave:** Ubicación Óptima, Convertidor Modular Multinivel, Perfil de Voltaje, Sistema de Transmisión, Algoritmo de Búsqueda Exhaustiva.

## Abstract

The development of power electronics related to conversion technologies for use in DC transmission would provide great insertion interest for its application benefits. For this reason, in this article a Modular Multilevel Converter (MMC) with the capacity to operate at high voltage levels within a Power Electrical System (SEP) is optimally located. The use of these MMC conversion technologies comes as an alternative for the insertion of power electronics in exchange for conventional transmission systems, thus seeking to improve the methodology of alternating current transmission without having any inconvenience that affects the quality of service to the SEP. In this thesis we propose to improve the voltage profiles at the nodes of the system with the implementation of the MMC device in each of the lines and then perform the analysis of each study scenario and finally apply an exhaustive search algorithm which yields an optimal solution to the problem focusing on admissible voltage levels and ranges. The simulation of this thesis will be performed on two IEEE test systems of 9 and 14 bars respectively within Matlab Simulink software and finally the data analysis for the optimal device placement will be developed in Excel tables.

**Keywords:** Optimal Location, Multilevel Modular Converter, Voltage Profile, Transmission System, Exhaustive Search Algorithm.

# 1 Introducción

En los últimos años el incremento de la demanda ha provocado la expansión del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) a gran escala, razón por la que el abastecimiento energético a futuro será un reto por cumplir [1]. Si bien es cierto la gran mayoría de los sistemas de transmisión de energía a nivel mundial a pesar de presentar pérdidas en transmisión entre ellas la presencia de reactivos, se encuentran diseñados para su uso en Corriente Alterna (AC) [2].

Motivo por el cual la inserción de fuentes de energía renovables como plan estratégico de mejora en transmisión mediante el uso de sistemas de Corriente Continua en Alta Tensión (HVDC) es una solución factible, no obstante, no siempre se valora a una red HVDC mejor que una AC.

Se considera al SEP como parte de la estructura básica y, por ende, tiene que ser configurado de la mejor manera y apto para ser eficiente bajo criterios de calidad, perfiles de voltaje y haciendo énfasis en las pérdidas mediante un análisis previo [2].

Actualmente los sistemas HVDC no son muy utilizados, sin embargo, con la ayuda de la electrónica de potencia y su gradual avance tecnológico, permiten hoy en día realizar un análisis técnico con la finalidad de elegir el tipo de tecnología a usar dentro de sus estaciones convertidoras y transmisión [3].

La respuesta a la transmisión DC son las desventajas que presentan los sistemas de convencionales AC, un factor importante a considerar son sus pérdidas en línea, es decir, al aumentar distancias de transmisión las pérdidas incrementan por su efecto inductivo [1], [4], [5]. De igual forma como parte del problema hay que tener en cuenta las compensaciones que los sistemas en AC requieren para solventar problemas de estabilidad y carga [6],[7].

Como mecanismo de respuesta se pretende disminuir efectos no deseados de la transmisión AC con la aplicación de sistemas HVDC, quienes reducen

notoriamente pérdidas técnicas y económicas, cabe recalcar que dentro de estos sistemas a diferencia de los AC no existe la necesidad de introducir potencias reactivas y compensación.

Países desarrollados están optando por la implementación de energías renovables a la red, respaldando el uso de sistemas HVDC. Por un lado, sus sistemas presentan una complejidad que al incrementar las interconexiones y sus problemas económicos limitan proveer un suministro confiable [8] [9].

La viabilidad es un parámetro importante para implementación de sistemas HVDC ya que, al ser una tecnología de la electrónica de potencia en continuo desarrollo aún existen limitaciones, a pesar de esto, el estudio de estos sistemas nos permite utilizar la tecnología más adecuada para obtener beneficios asociados a la calidad sin que se vean afectados parámetros como la eficiencia del servicio [10].

Hoy en día existe el propósito de presentar un modelo el cual promueva la mejora de perfiles de voltaje, y así solucionar problemas de interconexiones a la red con la implementación de Convertidores Modulares Multinivel (MCC) para transmisión DC [11]. El convertidor multinivel ha sido utilizado comúnmente en sistemas de transmisión en DC, por el hecho de presentar modularidad a la red y debido a su configuración ha sido motivo para ser calificada como una tecnología utilizable [12].

El problema sobre la viabilidad del uso de esta tecnología MMC, se presenta cuando se toma a consideración parámetros de ubicación, dado el caso se tiene como objetivo presentar un análisis óptimo dentro del cual, mediante el uso de un algoritmo, se explore distintos escenarios de simulación y posteriormente se analice el mejor resultado sobre la ubicación del dispositivo dentro del sep.

Se conoce que la aplicación de los dispositivos convertidores dentro de la

tecnología HVDC se han transformado en una de las soluciones admisibles debido a sus capacidades de conversión y transmisión a largas distancias, permitiendo la inserción de las energías renovables.

Los enlaces DC pueden también presentar bidireccionalidad de flujos eléctricos, por lo que la interconexión e intercambio de energía pueden llegar a ser beneficiosos para equilibrar la oferta y demanda [13]. Como ejemplo de los enlaces existe la aplicación en un parque eólico en Alemania el cual presenta conexión MMC-HVDC [11].

Otros autores presentan a los convertidores multinivel como parte de la tecnología VSC preferiblemente usada para transmisión de corriente directa en alto voltaje, debido a los problemas de conmutación que presentan otras tecnologías [14].

Se propone desarrollar el análisis mediante un algoritmo de búsqueda exhaustiva, donde la ubicación óptima bajo ciertos parámetros será la principal causa. Al ser un problema que está condicionado bajo ciertos parámetros técnicos, nos entregará como resultado soluciones viables dependiendo las directrices tomadas a consideración [13].

El presente trabajo, mediante un algoritmo basado en fuerza bruta permite ubicar de forma óptima un dispositivo de conversión dentro de un sistema a prueba. Al identificar los resultados se procede ver la viabilidad y conectar al sistema. Mediante un análisis se procede a verificar que la aplicación del MMC denota una mejora en los perfiles de voltaje y aporte al sistema.

## **2 Marco teórico**

El constante crecimiento del SEP y la inserción de energías renovables son factores importantes considerados para el estudio y análisis de nuevas tecnologías de transmisión. El desarrollo de la electrónica de potencia ha dado como solución la incorporación de sistemas HVDC que contemplan la implementación de un

dispositivo MMC y bajo el criterio de búsqueda exhaustiva encontrar la ubicación óptima del dispositivo dentro de cualquier sistema.

### **2.1 Sistemas de Transmisión Eléctrica**

El uso de corriente alterna AC para sistemas de transmisión tiene alto grado de empleabilidad en los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo, una alternativa de transmisión en corriente directa DC son los enlaces de transmisión en alto voltaje HVDC los cuales se presentan como interconexiones a la red [9]. Durante los últimos años la inserción de energías renovables dentro de fuentes de energía eléctrica a nivel mundial se ha ido ampliando, por lo cual, como plan estratégico de mejora en transmisión se ha promovido el uso de estos sistemas, los cuales no son muy empleado a nivel mundial, no obstante, es presentada como una disyuntiva al problema [9].

Hoy en día se han realizado estudios acerca de la transmisión DC y los beneficios que representa, aunque, al momento de conversión es probable que requieran de cambios en la estructura física del sistema [15]. Bajo esta circunstancia se puede considerar las ventajas que puede presentar un sistema de conversión multinivel y transmisión HVDC por su grado de adaptabilidad y calidad en sus salidas de voltaje [10].

La transmisión de energía HVDC en largas distancias se ha consolidado como un medio eficaz, fundamentándose en su tecnología de convertidores de línea conmutada (LCC) y su principio de funcionamiento de tiristores de conmutación mediante pulsos en sus estaciones convertidoras, no obstante, las fallas de conmutación simultáneas de la tecnología provocarían afectaciones de estos sistemas por lo que se optaría por el estudio de otras tecnologías como lo es un convertidor de fuente de voltaje (VSC), si bien no deja de ser una tecnología en

desarrollo, a diferencia de un LCC es considerablemente madura con un principio de funcionamiento de IGFB [12], [16].

Los circuitos VSC nos presentan una variedad de configuraciones que dependerán de cada uno de sus parámetros de conmutación para ofrecer eficiencias, el primer circuito en resaltar es el VSC de dos niveles, cuyo diagrama esquemático es el más básico y se encuentra definido por convertidores de medio puente. Luego tenemos a considerar un VSC trifásico de tres niveles donde se encuentra constituido por tres convertidores H conectadas en paralelo, tomando en cuenta que se puede optar por otra configuración conocida comúnmente como VSC trifásico con sujeción en el punto neutro (NPC) [12]. Finalmente tenemos los Convertidores Modulares Multinivel (MCC) los cuales internamente presentan una configuración de medio puente dentro de cada submódulo y se encuentran ubicados en cada brazo de su sistema.

El convertidor multinivel ha sido utilizado comúnmente en sistemas de transmisión en DC, por el hecho de presentar modularidad a la red y debido a su configuración ha sido motivo para ser calificada como una tecnología utilizable. Los convertidores multinivel forman parte de la tecnología VSC preferiblemente usada para transmisión de corriente directa en alto voltaje, y se ha ido mejorando gradualmente debido a los problemas de conmutación que presentan los LCC, haciendo énfasis sobre los beneficios que presenta sobre el control independiente de potencias activas y reactivas [12], [14], [17].

Hoy en día en varios países europeos han aplicado el desarrollo de las tecnologías MMC-HVDC que habitualmente están constituidas por un convertidor de potencia, elemento del sistema donde se pueden provocar inconvenientes al momento de su activación, así lo define [11]. De igual forma para el diseño e implementación de estos convertidores de línea conmutada, hay

que hacer énfasis en los tipos de cables a usar [15].

La tecnología VSC y LCC tanto la una como la otra presentan pros y contras, por el hecho de ser un sistema de transmisión aéreo y se encuentran propensos a fallas eléctricas, donde se menciona en [15] que dentro de la tecnología LCC ante una falla puede suceder una perturbación transitoria, situación que no se da en la tecnología VSC, donde se puede presentar perturbaciones que generen mayores inconvenientes [15].

Si observamos la electrónica de potencia que conllevan estas tecnologías, podemos apreciar elementos como los tristoros, que llegan a ser componentes esenciales, presentándose como los dispositivos mayormente usados en conmutación de energía, debido a su robustez y eficiencia que presenta, generalmente un tristor se le puede considerar como un diodo controlable [15].

La energía eléctrica se encuentra vinculada con la calidad de vida de distintos poblados, siendo así parte fundamental en el desarrollo energético, donde fortalece el crecimiento económico de una sociedad con bajo la intervención de electricidad.

Se puede definir a un sistema de transmisión eléctrica como una extensa red la cual se encuentra estructurada por varios elementos que permite el transporte de electricidad entre un punto de generación y una subestación para su próxima distribución [18]. En los parámetros de diseño del proceso de planificación, se debe considerar que dichos sistemas sean aptos para intercambios internacionales de energía, comprendiendo durante su operación, altos niveles de voltaje [19].

Dentro de la infraestructura que comprende un sistema de transmisión eléctrica se encuentran elementos de transformación, disyuntores, líneas de transmisión, entre otros, etc. Sin embargo, la estructura de estos elementos es planificada a punto de mostrar fiabilidad al sistema [19]

## 2.2 Líneas de Transmisión

Las líneas de transmisión son un medio de transporte de la electricidad, constituyen un medio físico que se encuentra comprendido por conductores eléctricos diseñados de manera geométrica y que dependen de características que se parametrizan mediante un análisis previo [20].

En el análisis de líneas de transmisión se hace hincapié en el resultado de ecuaciones matemáticas que caractericen condiciones propias del sistema, es decir, dependiendo la geometría de la línea y el diseño a establecerse. Dentro de una línea de transmisión existen parámetros que están sujetos a variaciones con respecto a las dimensiones físicas del diseño [20].

## 2.3 Parámetros de línea

Los parámetros de la línea se utilizan para modelar la línea de transmisión y realizar cálculos de diseño. Se encuentran definidos por las características propias y con la finalidad de transportar energía con menor porcentaje de pérdidas [21].

La resistencia  $R$  se encuentra expresada en  $[\Omega/m]$  la cual depende de la resistividad y frecuencia que presentan los conductores. El efecto piel se produce debido a las altas frecuencias, consecuentemente se eleva la resistencia. Se aclara que existe una variación de resistencia debido a la temperatura de funcionamiento. [20][22]

Inductancia; Los conductores que portan corriente variable en el tiempo inducen un voltaje debido a que su flujo magnético cambia alrededor del conductor [20] [21].

Capacitancia; La separación que existe entre las líneas de transmisión mediante un dieléctrico es el resultado de un condensador, y se produce debido a la diferencia de potencial que existe entre ellas, considerando que su capacidad será definida dependiendo el área del conductor, separación y material, comúnmente el

resultado al ser pequeño se lo suele depreciar. [20] [21].

Conductancia; Variable que tienen los conductores al presentar pérdidas por resistividad y fugas en los dieléctricos al no ser materiales completamente aislantes. [20]

### 2.3.1 Niveles y límites de tensión

En las líneas de transmisión los niveles de voltaje usados varían dependiendo las características del sistema, siempre y cuando se encuentren en los límites de variaciones establecidos por las entidades reguladoras [23]. Dentro de la clasificación las líneas de transmisión son consideradas alto voltaje y se considera medio y bajo voltaje a las de distribución como se muestra en la Tabla 1 [24].

Tabla 1. Clasificación de niveles de voltaje.

Niveles de Tensión	
Bajo Voltaje	$< 1$ [kV]
Medio Voltaje	$1$ [kV] $< [V] < 132$ [kV]
Alto Voltaje	$\geq 132$ [kV]

Existen condiciones establecidas en por unidad para sistemas los cuales incumplan con la demanda establecida, es decir, se excluyen soluciones que no cumplan con los siguientes límites [25].

Tabla 2. Límites de tensión.

Límite de Tensión	
[pu]	$0.94 \leq V_i \leq 1.05$

## 2.4 Convertidores de Potencia

Los convertidores de potencia han llegado a presentar características importantes como modularidad y escalabilidad capaces de actuar ante cualquier eventualidad y entregando alta eficiencia que es primordial en el manejo de altas potencias. Hoy en día la principal topología usada en sistemas es Convertidor Modular Multinivel (MMC) [26], [27].

## 2.5 Topología MMC

Existen varios modelos aptos para la conexión con un sistema de potencia, sin embargo, para un modelo MMC se muestra un modelo más sintetizado, es decir, denota una topología arreglada por submódulos y ramas [28].

Dentro de la topología MMC que se presenta en la Figura 1 da a conocer sus módulos y submódulos, tomando en cuenta que cada SM proporciona una topología básica dentro del sistema y conocer que también abarca interruptores internos.

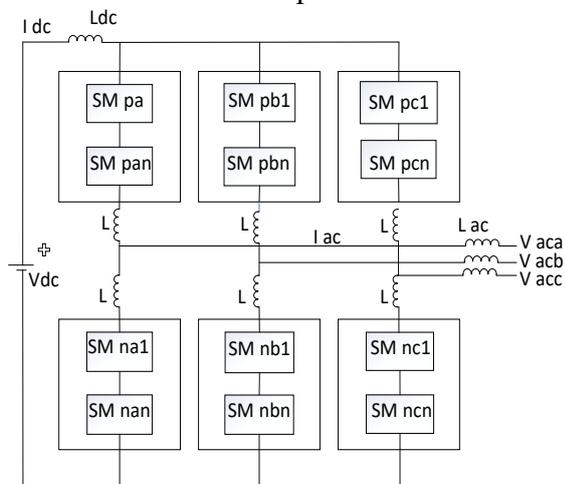


Figura 1. Modelo MMC [autor].

La gran cantidad de interruptores que puede llegar a ofrecer estas topologías forman parte de las herramientas de modelación, representando a miles de interruptores IGBT [29].

## 2.6 Topología Submódulos

Se relaciona con la parte interna de la representación esquemática de un MMC, es decir, forma parte de los SM detallados en la Figura 1 y pueden componerse de varios circuitos dentro de los cuales encontramos medio puente y puente completo [26].

### Módulos de Potencia

Son parte de la estructura esquemática de un MMC. Dentro de este sistema se componen de seis ramas de conversión, tales que, abarcan varios módulos de potencia y un convertidor que se lo puede encontrar conectado en serie [30].

A causa de que en los sistemas HVAC exista limitaciones considerables para la transmisión, dentro de la instauración de sistemas HVDC, se usa dos tecnologías convertidoras mediante la aplicación de un MMC, una tecnología de convertidor de línea conmutada (LCC) y convertidor de fuente de voltaje (VSC) [31].

## 2.7 Estaciones Convertidoras

Los sistemas de transmisión de corriente directa en alta tensión por diversas características se presentan como eficaz, sin embargo, el ámbito económico en procesos de conversión se ve parcialmente en incremento por sus particularidades físicas [32].

### Ventajas de uso HVDC

- Beneficios ambientales.
- Disminución de injerencia electromagnética.
- Bajo ruido.

A causa de que en los sistemas HVAC exista limitaciones considerables para la transmisión, dentro de la instauración de sistemas HVDC, se usa dos tecnologías convertidoras mediante la aplicación de un MMC, una tecnología de convertidor de línea conmutada (LCC) y convertidor de fuente de voltaje (VSC) [31].

## 2.8 Tecnología LCC

Line Commutated Converter (LCC), es una tecnología fundamentada en tiristores usada en la transmisión corriente directa en alto voltaje, la cual forma parte de las estaciones rectificadoras de gran capacidad y construcción a menor costo en áreas ricas en energía [31], [33].

Una de las topologías mayormente usada es la de punto a punto que consta únicamente de una línea de transmisión entre dos estaciones, entre las cuales se puede encontrar conexiones monopolares y bipolares [30].

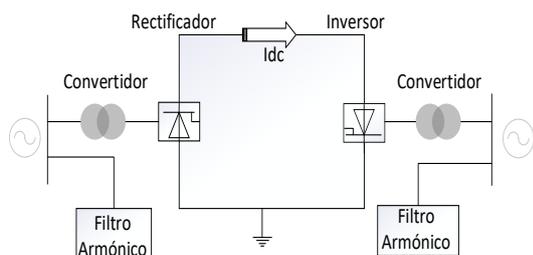


Figura 2. Diagrama sintetizado LCC [autor].

La figura 2 pertenece a un sistema simplificado de configuración punto a punto y con conexión monopolar [30].

## 2.9 Tecnología VSC

Voltage Sourced Converter (VSC), es una tecnología basada en electrónica de potencia que presenta en su interior convertidores auto conmutados, dando como solución innovadora a sistemas de HVDC [34].

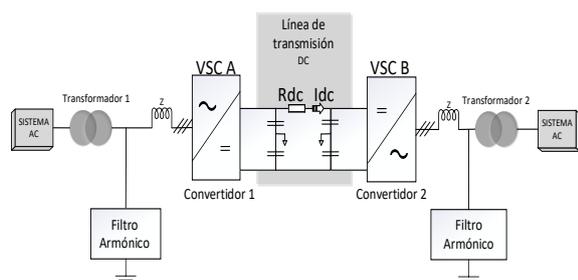


Figura 3. Diagrama sintetizado VSC.

La aplicación de la electrónica de potencia con el uso de convertidores auto conmutados, presentan ventajas en transmisión en corriente directa, permitiendo un control independiente de potencias activas y reactivas e incluso llegar a alimentar redes débiles [34].

### Ventajas de uso VSC

- Se caracteriza por ser relativamente desarrollada
- En lo económico se encuentra comercialmente disponible.
- Es mucho más práctico conectarse a una línea HVDC a comparación de otras alternativas de conversión.
- Todas las estaciones de este tipo se fundamentan en la tecnología de medio puente.

En los VSC se usa módulos IGBT con la finalidad de dar confiabilidad al ser componentes que bajo análisis han demostrado ser de gran rédito. Sin dejar de lado los resultados beneficiosos con respecto a pérdidas de conmutación [30].

## 2.10 Tecnologías de modulación y control

Existen estrategias de conmutación las cuales se utilizan con este tipo de convertidores, principalmente se encuentran divididas en dos, dentro de las cuales están organizadas como se presenta en la figura 4.

Los convertidores multinivel brindan varias estrategias de conmutación, es decir existe una gran cantidad de métodos de modulación programables que permiten disminuir un circuito de control en la conversión multinivel [35].



Figura 4. Clasificación de estrategias de conmutación en MMC.

El objetivo primordial de la modulación es mejorar la forma de onda sinusoidal, dando por hecho el mejoramiento de problemas de contenido armónico y minorando el impacto de las pérdidas por conmutación en todos los submódulos [36],[37]. La estructura de los convertidores multinivel se basa en tener por lo menos dos células de conmutación por lo que a comparación de los bi-nivel lo hace más complicada [38].

### 2.10.1 Frecuencia Fundamental

También denominada frecuencia fundamental baja, presenta como resultado una forma de onda sinusoidal que se

aproxima a una forma de onda escalera, sin embargo, aumenta el número de componentes y para su diseño se debe relacionar su eficiencia con su costo [39].

### Modulación escalera

La conmutación escalera es una de las más frecuentes para la aplicación de MMC, teniendo como finalidad reducir el contenido armónico y ofreciendo ventajas de sencillez para emplear, de tal forma se compone una topología que origina una secuencia de activación de los componentes, y que da como resultado una forma de onda tipo escalera deseada mostrada en la figura 5 [35].

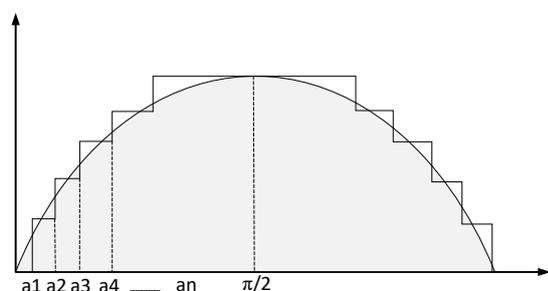


Figura 5. Modulación escalera.

### Eliminación selectiva de armónicos (SHE)

Esta metodología radica en la inserción de un armónico, con la finalidad de eliminar armónicos en la señal de salida del inversor, todo esto bajo un análisis de series de Fourier [36].

#### 2.10.2 Conmutación alta frecuencia

Dentro del análisis de alta frecuencia se encuentra una subdivisión de dos modulaciones, una modulación por pulso (PWM) y modulación vectorial (SVM) basada en vectores de tensión [35].

### Modulación sinusoidal (PWM)

Técnica basada en ancho de pulso, con un principio de funcionamiento de comparación, de tal forma que analiza dos señales, una sinusoidal moduladora con una portadora, para emitir y decidir sobre el accionar de los interruptores de conmutación del convertidor. También

presenta una estructura que permite integrar diferentes señales, de igual forma, es muy usada en aplicaciones industriales por su peculiar característica de modulación [35], [40].

### Ventajas de uso

- Permite insertar distintas moduladoras y portadoras.
- Denota simplicidad en su estructura.

### Modulación vectorial (SVM)

Esta técnica denominada modulación del vector espacial, es muy destinada a la aplicación de convertidores corriente directa y corriente alterna, su principio de funcionamiento depende de los estados de sus vectores. El análisis de vectores busca tener armónicos reducidos en la salida y equilibrar las capacidades del MMC [35], [40].

### 2.11 Módulos IGBT

MMC presenta en su estructura submódulos internos conectados en serie, de estos la mayoría de los casos presentan un Transistor Bipolar de Puerta Aislada (IGBT), quienes se hacen presentes en topologías de medio puente y puente completo con una configuración de diodos antiparalela [41][42].

Los IGBT forman parte del monitoreo de los submódulos (SM) de los MMC, son de mucha importancia para la seguridad y estabilidad en operación, sin embargo, presentan deterioro gradual conforme pasa el tiempo, dando como beneficio, el brindar información sobre su vida útil dentro del sistema y así propiciar labores de mantenimiento al MMC evitando fallas futuras [43].

Tabla 3. Comparación de módulos

	Especificaciones de los chips		
	Tipo	Grosor mm	Área mm <sup>2</sup>
IGBT	50A/1200V	0.12	37.9
Diodo	50A/1200V	0.12	26.8
RC-IGBT	50A/1200V	0.12	48.7

Se toma en cuenta el desgaste que presentan los IGBT ya que estos se juegan un rol asociado a la variación de la temperatura, la cual es la principal causa de degradación y envejecimiento del chip y por ende del submódulo de potencia [43].

En el análisis para su diseño, es necesario considerar argumentos técnicos como su aislamiento, su dimensión física, precisión, y costos, de igual forma existen parámetros que son de suma importancia tales como voltajes de brazo, corrientes de brazo, sensores. Por otro lado, se podría decir que existen indicaciones de IGBT analizadas y normalizadas. Los módulos IGBT son muy elementales dentro de un MMC, pues presentan estructuras multicapas, las cuales poseen coeficientes térmicos [43], [44].

### 3 Formulación del problema

Para solventar el problema de perfiles de voltaje en las barras de un sistema, en este trabajo se pretende implementar un dispositivo MMC en una de sus líneas de transmisión, si bien es cierto se conoce que el MMC es un dispositivo apto para uso en sistemas de potencia, sin embargo, no es factible implementar un enlace HVDC en todas las conexiones nodo a nodo que compone un sistema, debido a la consideraciones físicas y económicas que conllevaría, sumado a esto no existe beneficio similar para la aplicación en todas sus líneas. Siendo esta la situación, es necesario aplicar un algoritmo de búsqueda el cual analice de manera óptima el espacio de muestra en base a sus voltajes y mediante un análisis minucioso identificar el lugar adecuado para su correcta implementación.

#### 3.1 Algoritmo de búsqueda exhaustiva

Existe gran número de algoritmos que analizan de manera precisa las posibles soluciones dependiendo su estrategia de selección, sin embargo, los algoritmos de búsqueda exhaustiva o también llamados de fuerza bruta son capaces de reconocer todas

las combinaciones factibles de los elementos y de acuerdo con su función objetivo procura buscar la mejor solución de manera recursiva [45].

El algoritmo de búsqueda exhaustiva requiere de tiempo de simulación, es decir, al ser un método que explora las soluciones con respecto al espacio de búsqueda implica realizar el análisis con los resultados obtenido. Existen varias formas de analizar bajo la intervención de este algoritmo, para el desarrollo de esta investigación se aplicó la formulación en Excel mediante la extracción de datos de simulación y la visualización de resultados. Cabe recalcar que es un método con alto grado de precisión debido a que su dimensión de búsqueda para los escenarios que se pretenden simular es relativamente pequeña [46]–[48].

Dentro del análisis de fuerza bruta se considera las variables calculadas y los límites establecidos para cada escenario, de igual forma se considera la desviación media de tensión (*DPV*) determinada por la ecuación (1). También se toma en consideración la máxima desviación de tensión definida en la ecuación (2) [47][49], [50].

Función Objetivo (FO)

*FO1 = Desviación media de tensión*

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

*FO1 = Desviación máxima de tensión*

$$DMV = \max_{1 \leq i \leq n} |V_{di} - V_i| \quad (2)$$

Donde:

***n*** Número de nodos del sistema.

***V<sub>di</sub>*** Voltaje deseado en el bus *i* [*pu*]

***V<sub>i</sub>*** Voltaje en el bus *i* [*pu*]

Restricciones

$$DPV \leq 0.04 \quad (3)$$

$$DMV \leq 0.05 \quad (4)$$

$$0.95 \leq V_i \leq 1.05 \quad (5)$$

El desarrollo matemático basado en búsqueda exhaustiva plantea como objetivo encontrar la ubicación óptima del dispositivo MMC dentro del sistema y mediante un análisis determinar el mejor escenario de simulación sin violar los límites de tensión definidos en la tabla 2. Dentro del sistema de potencia es muy importante tomar a consideración la expansión que se tiene gradualmente, lo cual provoca la disminución de voltaje en sus barras y en consecuencia denota problemas en sus límites de operación permitidos [51]. El propósito de insertar en el sistema tecnologías de electrónica de potencia es la mejora del perfil de voltaje en base a un estudio previo dentro del cual se resalte la viabilidad, el dimensionamiento y la posterior ubicación óptima dentro del sistema mediante el algoritmo de búsqueda exhaustiva.

## 4 Metodología

En base a dos casos de estudio de sistemas de transmisión se implementará un modelo obtenido del Mathworks de un “HVDC convertidor modular multinivel” [52]. Este modelo está íntegramente constituido por dos dispositivos MMC, uno de rectificación y otro de inversión los cuales tienen la capacidad de convertir la transmisión AC/DC y DC/AC respectivamente. De esta forma se plantea implementar en dos sistemas de 9 y 14 barras del IEEE.

Al examinar que no siempre se van a obtener perfiles de voltajes deseados para cada línea y apreciar el mejor escenario de simulación se considerará un algoritmo de búsqueda exhaustiva como modelo que establezca la ubicación óptima del modelo de transmisión DC, y en base a los datos obtenidos de la simulación se analizará las restricciones establecidas por el algoritmo y si se cumple con los límites de tensión admitidos nos permitirá encontrar la

ubicación óptima del elemento de conversión.

### Algoritmo de búsqueda exhaustiva

Algoritmo de búsqueda exhaustiva	
<b>Inicio</b>	
Paso 1:	Ingreso de datos de flujo del SEP
Paso 2:	Ingreso de variables Entradas → $V_{di}$ , $V_i$ , $n$
Paso 3:	Salida de variables Salidas → FO1, FO2
Paso 4:	Desviación media de tensión FO1 → DPV Cálculo de la DPV (1)
Paso 5:	Desviación máxima de tensión FO2 → DMV Cálculo de la DMV (2)
Paso 6:	Restricciones $DPV \leq 0.04$ (3) $DMV \leq 0.05$ (4) $0.95 \leq V_i \leq 1.05$ (5)
Paso 7:	Gráfica de perfil de tensión
Paso 8:	Ubicación óptima del dispositivo MMC
<b>Fin</b>	

### 4.1 Casos de estudio 1

Para el desarrollo del primer caso de estudio se pretende incorporar los elementos de conversión para cada una de las líneas de transmisión del sistema de 9 barras del IEEE mostrada en la figura 6 y que se encuentra compuesto por 3 fuentes de generación con 3 cargas. Con esta configuración se simulará los flujos para 6 posibles escenarios obtenidos del sistema a prueba, recalando que se crea 1 escenario para cada línea existente y posteriormente se procede a realizar su respectivo análisis.

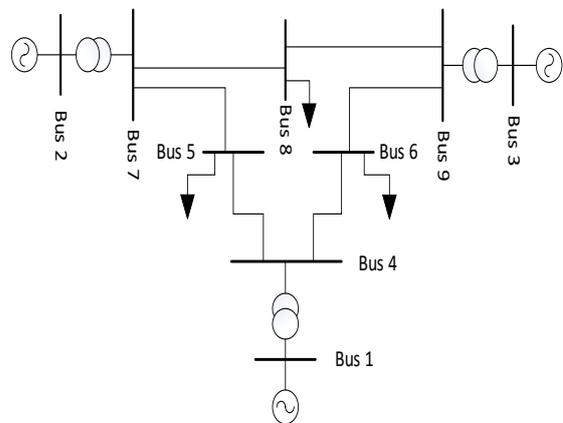


Figura 6. Modelo de prueba de 9 barras modificado del IEEE.

## 4.2 Casos de estudio 2

En el segundo caso de estudio de igual forma se pretende incorporar los elementos de conversión para cada una de las líneas de transmisión del sistema de 14 barras del IEEE mostrada en la figura 7 y que se encuentra compuesto por 5 fuentes de generación con 11 cargas. Con esta configuración se simulará los flujos para 20 posibles escenarios obtenidos del sistema, de igual forma ratificar la existencia de 1 escenario por cada línea de transmisión existente y posterior a esto se procede a realizar su respectivo análisis.

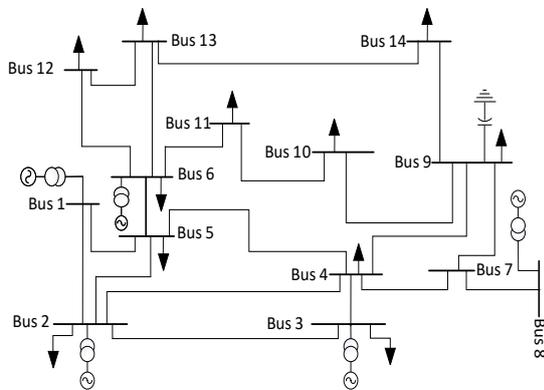


Figura 7. Modelo de prueba de 14 barras modificado del IEEE.

## 5 Análisis de resultados

La ubicación óptima del convertidor modular multinivel se lo realiza conforme a los datos obtenidos durante las simulaciones del elemento en cada línea de transmisión, considerando los límites de voltaje y su configuración interna para los cuales han sido diseñados por el autor.

El análisis previo se lo plantea mediante un estudio del algoritmo el cual revisa todo el espacio de búsqueda de las posibles soluciones para posteriormente elegir el mejor escenario de aplicación del dispositivo.

### 5.1 Caso 1

En primera instancia se ha considerado un sistema base de 9 barras mostrado en la figura 6, dentro del cual para su respectivo

análisis de voltaje con la simulación de flujos de potencia en el software Matlab Simulink se obtuvieron valores de voltajes y corrientes en condiciones iniciales los mismos que se encuentran expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Valores iniciales de voltaje del sistema de 9 barras IEEE.

Valores iniciales de voltaje			
Barra	Voltajes [V]	Voltajes PU	Corrientes [A]
1	16500	1	4909.023
2	18000	1	3808.597
3	13800	1	4579.229
4	215768.995	0.93812	351.4885
5	212737.921	0.92494	125.4841
6	210524.364	0.91532	152.3906
7	220599.544	0.95912	297.4
8	212983.037	0.92605	222.3161
9	221638.111	0.96364	165.4122

El objetivo del trabajo se basa en la mejora de los perfiles de voltaje de un sistema a prueba bajo la intervención de un dispositivo convertidor e inversor MMC, el cual transmita en DC, por tal motivo para este análisis se presentan 6 escenarios de simulación los mismos que representan las 6 líneas de conexión entre sí que expone el sistema.

Para este caso de estudio se puede observar en la figura 7 que los niveles de voltaje de las barras 4,5,6,8 no entran dentro de los rangos admisibles de voltaje exhibidos en la tabla 2.

Al obtener como resultado los perfiles de voltaje ilustrados en la figura 8 y su respectivo análisis para la mejora de perfiles se procede a implementar el elemento de conversión e inversión multinivel dentro del sistema.

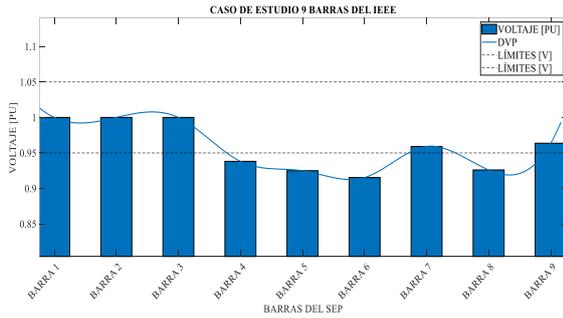


Figura 8. Voltajes iniciales Sistema 9 barras.

En la figura 9 se puede apreciar a simple vista que el voltaje ha mejorado, sin embargo, para determinar el lugar óptimo del dispositivo se procede a realizar el análisis con la aplicación del algoritmo de búsqueda exhaustiva, dentro del cual se presentaron datos reales del sistema y con el resultado de desviación media y promedio de los 6 escenarios mostrados en la tabla 5 se procede a ubicar el dispositivo de manera óptima y considerando los límites de voltaje para cada barra.

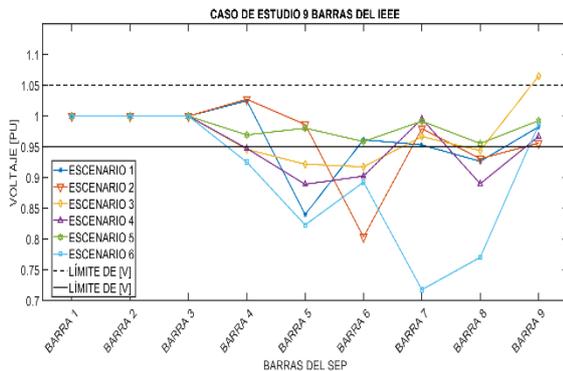


Figura 9. Resultados perfil de voltaje implementado MMC para cada barra.

La tabla 5 se puede definir como el análisis de desviaciones al observar que los resultados de todo el espacio de búsqueda presentan variaciones para cada escenario de simulación, de esta forma el escenario que presente menos desviación promedio y máxima será la mejor elección para la mejora de perfil de voltaje. Para el caso de 9 barras se considera el escenario 5 como la ubicación óptima del dispositivo debido a los resultados y el análisis anterior, finalmente se añadiría el dispositivo a la línea de transmisión 7-8 que corresponde al escenario 5 de simulación.

Tabla 5. Tabla de desviaciones media y promedio del sistema 9 barras.

Análisis de desviaciones				
Escenarios	DPV	DMV	0.95	1.05
1	0.04014	0.1599	0.8401	1.0250
2	0.04125	0.1967	0.8033	1.0274
3	0.04101	0.0824	0.9176	1.0652
4	0.04538	0.1109	0.8891	1.0000
5	0.01684	0.0445	0.9555	1.0000
6	0.09834	0.2822	0.9555	1.0000

Dentro de la Figura 10 se realiza la comparación de perfil de voltaje base del sistema con respecto al modelo óptimo escogido con los resultados del algoritmo de búsqueda exhaustiva, se puede divisar una mejora significativa y considerando los límites de voltaje mínimos y máximos establecidos. De igual forma mediante la curva de variación de voltaje promedio se puede distinguir las mejoras.

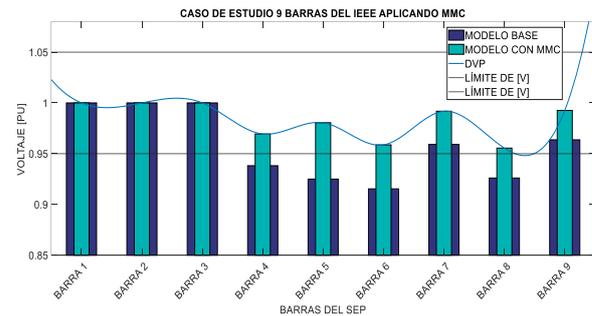


Figura 10. Comparación del perfil de voltaje base con modelo implementado MMC del sistema de 9 barras.

## 5.2 Caso 2

Como segundo caso de estudio se ha considerado un sistema de 14 barras mostrado en la figura 7, mediante el cual para su respectivo análisis de voltaje con la simulación de flujos de potencia en el mismo software Matlab Simulink se obtuvieron los valores de voltajes y corrientes en condiciones iniciales los mismos que se encuentran expuestos en la tabla 6.

Tabla 6. Valores iniciales de voltaje del sistema de 14 barras IEEE

Valores iniciales de voltaje			
Barra	Voltajes [V]	Voltajes PU	Corrientes [A]
1	221380.3474	0.9625	403.6305
2	218436.2824	0.9497	79.7462
3	213487.9129	0.9282	237.9810
4	213428.6082	0.9280	205.8378
5	214179.2350	0.9312	221.9565
6	216785.5131	0.9425	24.3502
7	217087.9115	0.9439	119.6064
8	217603.9728	0.9461	76.1102
9	216886.3035	0.9430	34.7856
10	216774.9390	0.9425	9.3800
11	216737.3275	0.9423	16.9435
12	216617.7240	0.9418	24.3509
13	216577.1732	0.9416	4.1906
14	216526.5549	0.9414	13.5040

El objetivo en el sistema propuesto de 14 barras es establecer la correcta ubicación de un MMC dentro del sistema, tomando en consideración el mismo análisis anterior de perfiles de voltaje con la aplicación del algoritmo, para lo cual se procede a extraer datos de flujos del SEP, dando como resultado 20 escenarios de simulación, debido a que el sistema abarca 20 líneas de transmisión y durante el proceso de simulación se establece el MMC para cada línea.

En la figura 11 se puede observar que la mayoría de las barras no cumple los lineamientos de perfiles de voltaje, es decir están por debajo de los requerimientos del sistema, por lo tanto, se procede a realizar el análisis de ubicación óptima del dispositivo MMC para cada línea de transmisión, es decir, existirán 20 escenarios de simulación.

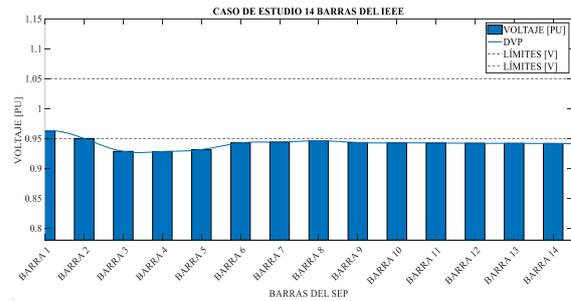
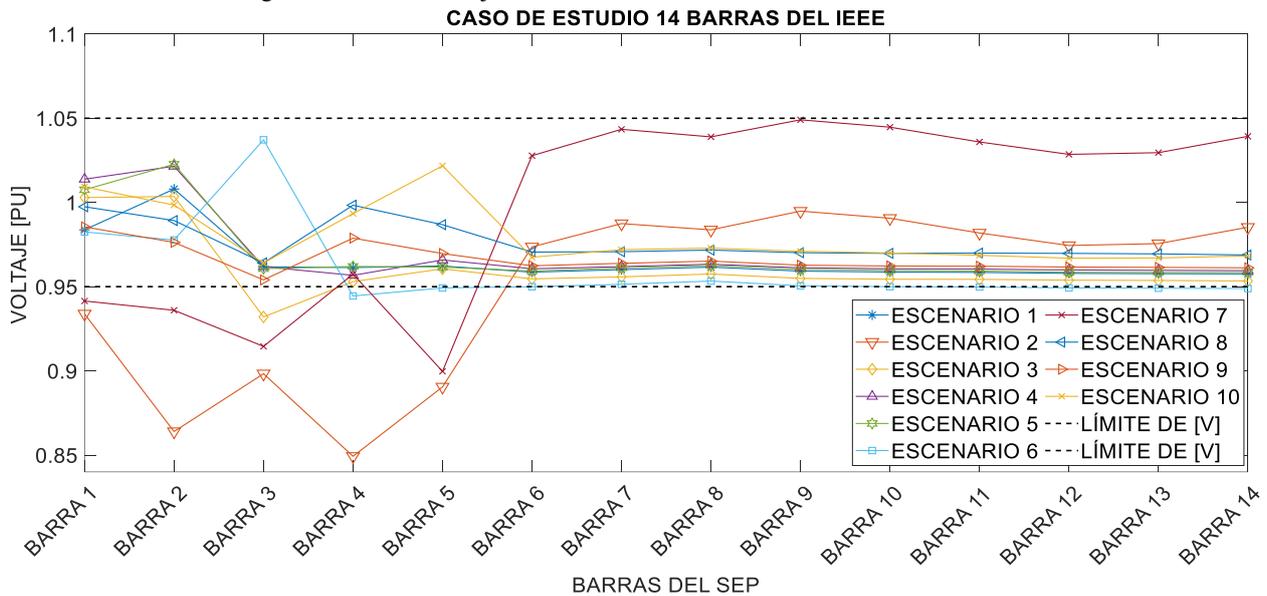


Figura 11. Voltajes iniciales Sistema 14 barras.

En la Figura 12 se presenta el caso de 14 barras graficado para 10 escenarios de los 20 existentes, podemos observar que varias simulaciones se encuentran dentro del rango admisible de voltaje, sin embargo, existen escenarios de simulación para los cuales no cumplen los límites establecidos como lo es en el caso del escenario 2 y 7 que son los que evidentemente violan los niveles de repetición para la variable de voltaje, sumado a esto se tiene que tomar en

Figura 12. Perfil de voltaje del sistema de 14 barras de los escenarios del 1 al 10.



consideración las variaciones media y promedio obtenidas mediante el algoritmo de fuerza bruta. También podemos analizar escenarios como el 3 y 6 que se encuentran al borde del rango admisible, de igual forma como alternativa de aplicación quedarían descartados.

Tabla 7. Tabla de desviaciones media y promedio del sistema 14 barras.

Análisis de desviaciones				
Escenarios	DPV	DMV	0.95	1.05
1	0.03636	0.04244	0.95756	1.008
2	0.06691	0.20953	0.79047	0.995
3	0.04060	0.06799	0.93201	1.004
4	0.03596	0.04328	0.95672	1.022
5	0.03630	0.04157	0.95843	1.023
6	0.04508	0.05554	0.94446	1.037
7	0.04915	0.10029	0.89971	1.049
8	0.02379	0.03590	0.96410	0.998
9	0.03378	0.04599	0.95401	0.985
10	0.02506	0.03593	0.96407	1.022
11	0.01965	0.05880	0.94120	1.010
12	0.01877	0.05497	0.94503	1.014
13	0.01757	0.05544	0.94456	1.013
14	0.04362	0.07702	0.94295	1.077
16	0.02521	0.04961	0.95039	1.033
17	0.04763	0.09502	0.96033	1.095
18	0.01797	0.05632	0.94368	1.011
19	0.03266	0.06210	0.95166	1.062
20	0.02906	0.05082	0.94918	1.048

En la figura 13 se exponen escenarios del 11 al 20 dentro de la cual se puede apreciar a simple vista que los escenarios 14 16 y 18 sobrepasan los límites establecidos, de igual forma con la ayuda de las magnitudes reales presentadas en la tabla 7 se puede corroborar este análisis. Sin embargo, para una mejor percepción de la barra 3 la cual se encuentra acumulado de muestras se presenta la figura 14 para observar con mejor detalle que los escenarios de simulación 11, 12, 13, 17, 19 y 20 exhiben resultados inferiores a los límites de tensión establecidos, de tal manera que también dejarían de ser considerados como escenarios óptimos de ubicación del MMC.

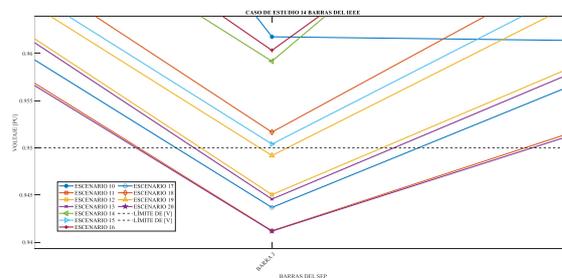


Figura 14. Irrupción del perfil de voltaje en la barra del sistema de 14 barras.

En base al análisis de búsqueda exhaustiva de todos los escenarios el algoritmo nos da como ubicación óptima el escenario 13 por

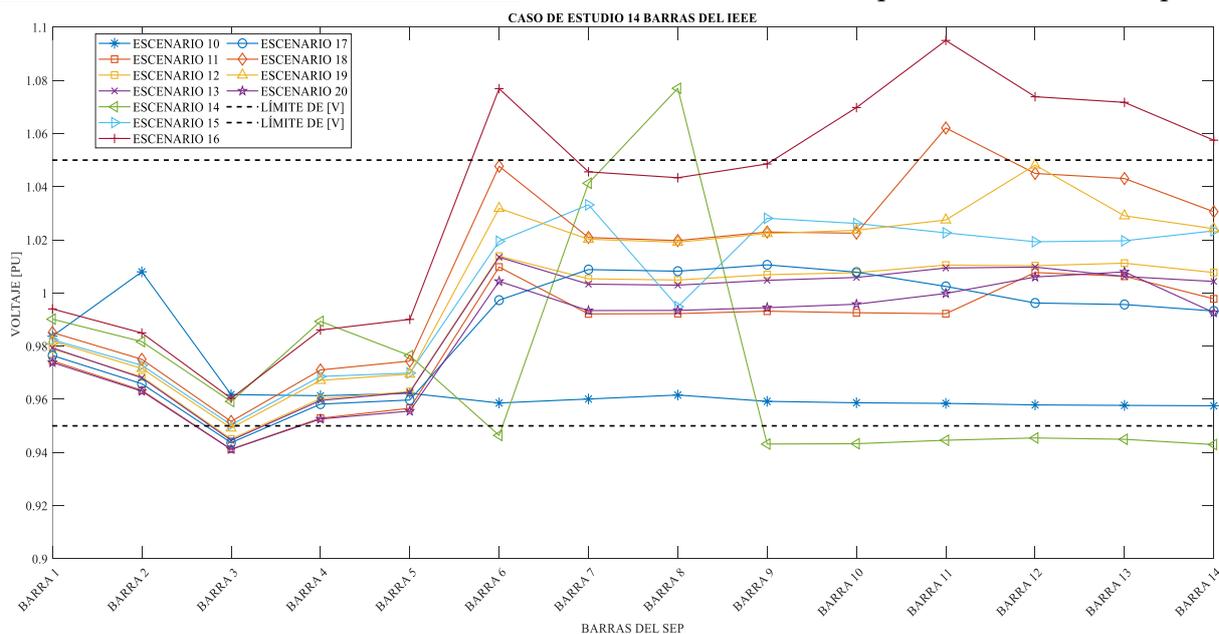


Figura 13. Perfil de voltaje del sistema de 14 barras de los escenarios del 11 al 20.

de todos los escenarios el algoritmo nos da como ubicación óptima el escenario 13 al presentar menor desviación media y promedio, no obstante, previamente se descartó el escenario 13 por que irrumpía los límites de repetición para la variable de voltaje, por medio de este análisis el algoritmo da como segunda mejor solución de ubicación óptima del elemento MMC al escenario 8, el cual cumple con los límites para la variable de voltaje y presenta menor desviación media y promedio.

Finalmente, en la figura 15 se presenta la comparación del perfil de voltaje del caso base con respecto al MMC ubicado en la línea de transmisión 4-7 del sistema de 14 barras del IEEE en base al análisis de búsqueda exhaustiva.

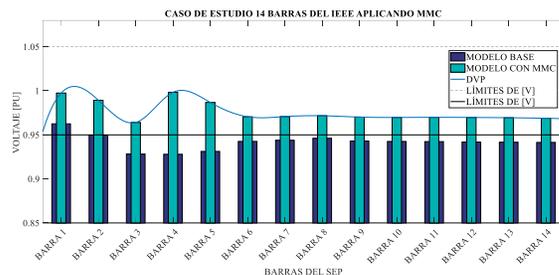


Figura 15. Comparación del perfil de voltaje base con modelo implementado MMC del sistema de 14 barras.

## 6 Conclusiones

A través de los resultados obtenidos y su posterior análisis a lo largo del presente trabajo, se puede aseverar las siguientes conclusiones:

- El desarrollo de la electrónica de potencia y el análisis de tecnologías de conversión VSC y LCC representan una solución viable dentro de sistemas de transmisión interconectados. Es decir, es evidente que hoy en día por el gran desarrollo de estas tecnologías sean planteadas como soluciones ejecutables en proyectos de transmisión debido a sus beneficios de operación y aportes al sistema.

- Los modelos de prueba son admisibles para aplicar elementos de conversión en sus líneas de transmisión; sin embargo, en base al análisis de resultados se evidenció que la aplicación del elemento convertidor no siempre significa beneficios al sistema y si lo es se lo necesita ubicar de forma óptima en el mejor escenario de simulación. Por tal motivo el uso del algoritmo de búsqueda exhaustiva es el encargado de revisar todo el espacio de búsqueda y definir la mejor solución para así seleccionar el lugar óptimo del MMC después de un análisis de resultados.
- La implementación de un dispositivo de conversión e inversión en sistemas de transmisión se ejecutó mediante el software Matlab Simulink, dando como resultado la inserción del dispositivo dentro de dos sistemas a prueba del IEEE, donde parte del proceso correspondía la colocación del dispositivo para cada línea de transmisión y mediante la extracción de datos se pudo evidenciar las variaciones del perfil de voltaje en cada barra del sistema para cada escenario de simulación.
- Finalmente, se constató bajo un análisis de resultados que el perfil de voltaje en varios escenarios de simulación presenta mejoras; no obstante, existen límites de repetición para la variable de voltaje los cuales no se pueden violentar y es ahí cuando hay que considerar la intervención del algoritmo de búsqueda exhaustiva, el cual nos suministraba información suficiente para escoger el mejor escenario de ubicación del dispositivo sin sobrepasar límites de voltaje establecidos.

## 6.1 Trabajos futuros

En base al análisis realizado a lo largo de la presente investigación y los resultados obtenidos, para el avance del trabajo se recomienda el minucioso estudio de varios parámetros del sistema.

Se sugiere la implementación del dispositivo de conversión multinivel, considerando diferentes niveles de voltaje del sistema.

Se sugiere el análisis de variables de factor de potencia, THD, pérdidas en cada barra del sistema.

## 7 Referencias

- [1] S. Hoyos, J. González Sanchez, H. Cardona Restrepo, I. Isaac, and G. López Jiménez, "Tecnología modular multilevel converter (MMC) en sistemas HVdc," *Revista Investigaciones Aplicadas*, vol. 7, no. 1, pp. 37–47, 2013.
- [2] L. N. C. Yancoba and Ing. J. G. G. Padilla, "Estudio Técnico Comparativo De Sistemas De Transmisión De Corriente Directa (HVDC) Y Sistemas De Transmisión De Corriente Alterna (HVAC)," pp. 6–18, 2017.
- [3] G. Li *et al.*, "Power reversal strategies for hybrid LCC/MMC HVDC systems," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 6, no. 1, pp. 203–212, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2019.01050.
- [4] A. A. Tellez, D. F. C. Galarza, and L. O. Matos, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015, doi: 10.1109/TLA.2015.7273776.
- [5] A. Aguila and J. Wilson, "Technical and Economic Assessment of the Implementation of Measures for Reducing Energy Losses in Distribution Systems," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 73, no. 1, p. 012018, Jul. 2017, doi: 10.1088/1755-1315/73/1/012018.
- [6] R. Rosero, "Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos," *Innovation & Development in Engineering and Applied Sciences*, vol. 2, no. 1, p. 19, 2020, doi: 10.53358/ideas.v2i1.363.
- [7] F. A. Castillo Munoz, A. Aguila Tellez, and J. W. Gonzalez Sanchez, "Analysis of Stability of Tension and Losses of Electric Power in Distribution Networks with Distributed Generation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 14, no. 11, pp. 4491–4498, 2016, doi: 10.1109/TLA.2016.7795819.
- [8] C.-K. K. Korea, V. K. Sood, G.-S. Jang, S.-J. L. Korea, and S.-J. Lee, *HVDC Transmission Power Conversion Applications in Power Systems*, vol. 305. 2017. doi: 10.1016/j.powtec.2016.09.086.
- [9] J. L. T. Rivera and C. A. B. Singaña, "Minimización de pérdidas en sistemas de transmisión hvdc multi-terminal usando la técnica de optimización mvmo," pp. 0–26, 2019.
- [10] Y. Liu, Z. Lin, K. Xiahou, Y. Lin, and Q. H. Wu, "Equivalent hamiltonian equations modelling and energy function construction for MMC-HVDC in hybrid AC/DC power systems," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 7, no. 4, pp. 821–831, 2020, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.01130.
- [11] L. He, "Effects of pre-insertion resistor on energization of MMC-HVDC stations," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, vol.

- 2018-Janua, pp. 1–5, 2018, doi: 10.1109/PESGM.2017.8273916.
- [12] N. R. Chaudhuri, B. Chaudhuri, R. Majumder, and A. Yazdani, *Multi-Terminal Direct-Current Grids Modeling, Analysis, And Control*. Wiley, 2014.
- [13] D. A. M. Acevedo, Ph. D. S. Andrés Escobar Mejía, and MSc. Ana Julieth Marín Hurtado, “Implementation Of Control Schemes on a Dc-Ac Terminal Based on a HVDC-MMC,” *Fullfillment of the requirements for the Master Degree in Electrical engineering Main*, no. 8.5.2017, p. 125, 2022.
- [14] M. Yan, Z. Zhang, Z. Xu, L. Chen, G. Cheng, and Q. Wang, “Comparative study on DC line fault transient characteristics of four typical MMC-HVDC configurations,” *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, vol. 2019-Decem, no. Mmc, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/APPEEC45492.2019.8994581.
- [15] D. Jovic and K. Ahmed, *High Voltage Direct Current Transmission Converters, Systems and DC Grids*. Aberdeen, 2015.
- [16] G. Tang, Z. Xu, and Y. Zhou, “Impacts of three MMC-HVDC configurations on AC system stability under DC line faults,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 29, no. 6, pp. 3030–3040, 2014, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2315666.
- [17] C. Zou *et al.*, “Analysis of Resonance between a VSC-HVDC Converter and the AC Grid,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 12, pp. 10157–10168, 2018, doi: 10.1109/TPEL.2018.2809705.
- [18] U.S. Department of Energy, “Annual U.S. Transmission Data Review,” *U.S. Department of Energy*, no. March, 2018.
- [19] ESB Networks and EirGrid, “Electricity Transmission Performance Report 2018,” *Eirgrid, The currente. The future*, pp. 14–18, 2017.
- [20] Constantino Pérez Vega, “Capítulo 9 Líneas de Transmisión,” (*Dpto. de Ingenieria de Comunicaciones*), pp. 279–320, 2019.
- [21] M. Reta-Hernández, “Transmission Line Parameters,” *Electric Power Generation, Transmission, and Distribution: The Electric Power Engineering Handbook*, pp. 14-1-14–36, 2019, doi: 10.1201/9781315222424-14.
- [22] O. O. W. Wilfrido and C. Á. L. Gerardo, “Diseño Construcción de la Línea de Subtransmisión A 69 Kv Songa.,” *Universidad Politecnica Salesiana*, p. 152, 2019.
- [23] M. H. Athari and Z. Wang, “Interdependence of Transmission Branch Parameters on The Voltage Levels,” *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, vol. 2018-Janua, no. September 2017, pp. 2757–2765, 2018, doi: 10.24251/hicss.2018.348.
- [24] M. González, L. Javier, and C. Pérez, “Requerimientos Materiales de la Transmisión Y Distribución de la Electricidad Para la Transición de Energía,” *Ingeniería en Organización Industrial Requerimientos*, 2021.
- [25] L. Ortiz, R. Orizondo, A. Aguila, J. W. Gonz, I. Isaac, and J. L. Gabriel, “Heliyon Hybrid AC / DC microgrid test system simulation: grid-connected mode,” *Heliyon*, vol. 5, no. August, p. 21, 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e02862.
- [26] J. E. P. Barrón, “Análisis e Implementación De Estructuras De

- Comunicación De Datos Para El Control De Un Convertidor Modular Multinivel,” *Instituto Tecnológico de Ciudad Madero*, 2017.
- [27] C. H. Park, B. B. Negesse, J. M. Kim, and C. K. Kim, “Back-to-Back 31 Level Modular Multilevel Converter with Ethercat Communication,” *2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2019*, pp. 1032–1039, 2019, doi: 10.1109/ECCE.2019.8913080.
- [28] Á. A. C. Henríquez, “Soporte de Frecuencia para Redes de Baja Inercia Conectadas a Estaciones HVDC-MMC,” *Universidad Técnica Federico Santa Rita*, 2018.
- [29] M. H. T. Systems, V. Sood, X. Wang, J. Cano, and A. Mehrizi-sani, “2,” *IEEE Transactions on Power Delivery Dynamic*, vol. 28, no. 3, pp. 1723–1730, 2016.
- [30] S. Hoyos, J. González Sanchez, H. Cardona Restrepo, I. Isaac, and G. López Jiménez, “Tecnología Modular Multilevel Converter (MMC) en Sistemas HVdc,” *Revista Investigaciones Aplicadas*, vol. 7, no. 1, pp. 37–47, 2013.
- [31] N. M. Haleem, A. D. Rajapakse, A. M. Gole, and I. T. Fernando, “Investigation of Fault Ride-Through Capability of Hybrid VSC-LCC Multi-Terminal HVDC Transmission Systems,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 34, no. 1, pp. 241–250, 2019, doi: 10.1109/TPWRD.2018.2868467.
- [32] M. A. Perez, S. Bernet, J. Rodriguez, S. Kouro, and R. Lizana, “Circuit Topologies, Modeling, Control Schemes, and Applications of Modular Multilevel Converters,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 1, pp. 4–17, 2015, doi: 10.1109/TPEL.2014.2310127.
- [33] Y. Lee, S. Cui, S. Kim, and S. K. Sul, “Control of Hybrid HVDC Transmission System with LCC and FB-MMC,” *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2014*, pp. 475–482, 2017, doi: 10.1109/ECCE.2014.6953432.
- [34] B. D. Gemmell, J. Dorn, D. Retzmann, and D. Soerangr, “Prospects of Multilevel VSC Technologies for Power Transmission,” *Transmission and Distribution Exposition Conference: 2008 IEEE PES Powering Toward the Future, PIMS 2008*, pp. 1–16, 2008, doi: 10.1109/TDC.2008.4517192.
- [35] S. V. J. Luis. Chumacero López Jesús Antonio, Salas Cabrera Eduardo Nacu, Cisneros Sinencio Luis Fortino, “Impacto de las Estrategias De Modulación en el Desempeño de los Inversores Multinivel.,” *Academia Tamaulipeca de Investigación Científica y Tecnológica, A. C.*, vol. 5, no. 1, 2021.
- [36] J. Chavero, H. López, and N. Vásquez, “Estrategia de Control para Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes,” *Instituto Tecnológico de Celaya.*, no. 108, pp. 554–573, 2014.
- [37] Y. Chen, Y. Cui, Y. Tao, Y. Kang, X. Wei, and X. Wang, “High-Fundamental-Frequency Modulation for the DC-DC Modular Multilevel Converter (MMC) with low Switching Frequency and Predicted-Based Voltage Balance Strategy,” *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conference Proceedings*, vol. 1, no. MMC, pp. 1–6, 2014, doi: 10.1109/ITEC-AP.2014.6941015.

- [38] E. Burguete Archel, “Análisis, Diseño Y Control De Convertidores Multinivel,” pp. 19–23, 2016.
- [39] Z. Xu, X. Zheng, T. Lin, J. Yao, and A. Ioinovici, “Switched Capacitor Multi-Level Inverter with equal Distribution of The Capacitors Discharging Phases,” *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 6, no. 4, pp. 42–52, 2020, doi: 10.23919/CJEE.2020.000029.
- [40] M. P. García, “Convertidores CC/CA Para La Conexión Directa A Red De Sistemas Fotovoltaicos: Comparación Entre Topologías De 2 Y 3 Niveles,” *Departament d’Enginyeria Electrònica*, 2004.
- [41] H. Wang, “A New Press Pack IGBT for High Reliable Applications With Short Circuit Failure Mode,” *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 107–114, 2021, doi: 10.24295/cpsstpea.2021.000009.
- [42] W. Ledesma de la cruz, “El IGBT,” *Universidad Nacional de Educacion Enrique Guzmán y Valle*, pp. 1–80, 2019.
- [43] S. Chen, S. Ji, L. Pan, C. Liu, and L. Zhu, “An ON-State Voltage Calculation Scheme of MMC Submodule IGBT,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, no. 8, pp. 7996–8007, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2879995.
- [44] B. Wang *et al.*, “Thermal Performances and Annual Damages Comparison of MMC Using Reverse Conducting IGBT and Conventional IGBT Module,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 9, pp. 9806–9825, 2021, doi: 10.1109/TPEL.2021.3062620.
- [45] A. A. Téllez, A. Robayo, I. Isaac, G. López, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [46] A. Herrera and A. Águila, “Mejoramiento de los Perfiles de Voltaje en Sistemas de Distribución mediante Óptima Ubicación de Reguladores de Tensión con Cambiadores de Derivación usando Búsqueda Exhaustiva,” pp. 4–10, 2021.
- [47] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. 9, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [48] A. A. Téllez, A. Robayo, I. Isaac, G. López, and J. González, “Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm,” *2019 FISE-IEEE/CIGRE Conference - Living the energy Transition (FISE/CIGRE)*, 2019, doi: 10.1109/FISECIGRE48012.2019.8984965.
- [49] A. Águila Téllez, “OPTIMIZACIÓN MULTICRITERIO DE FLUJOS DE POTENCIA REACTIVA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN,” *Tesis de Doctorado*, vol. 2021-06–15, p. 105 páginas, 2021, doi: <http://hdl.handle.net/20.500.11912/8699>.
- [50] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, “Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm,” *Heliyon*, vol. 7, no. 9, p. e08061, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [51] N. Shekhawat, A. K. Gupta, and A. Kumar Sharma, “Voltage Stability

Assessment Using Line Stability Indices,” *3rd International Conference and Workshops on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2018*, no. November, 2018, doi: 10.1109/ICRAIE.2018.8710435.

- [52] F. Bachelor and T. Nicole, “Back-to-Back HVDC-MMC for Passive Networks,” *MATLAB Central File Exchange. Recuperado July 13, 2022.*, 2019.



# UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

DATOS		TEMÁTICA			FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA											
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	APLICACION DE CONVERTIDORES DE POTENCIA	TOPOLOGÍAS DE CONVERSION	ESTACIONES CONVERTIDORAS LCC Y VSC	UBICACION DE CONVERTIDORES DE CORRIENTE CONTINUA	PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE UBICACION DE CONVERTIDORES MMC	CALIDAD EN SISTEMAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE RANGOS ADMISIBLES DE VOLTAJES	ÓPTIMA IMPLEMENTACION DE MMC	PROBLEMAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL MMC	DISPONIBILIDAD DE INFORMACION SOBRE TECNOLOGIA MMC	ACCESIBILIDAD A INFORMACION SOBRE SIMULACION DEL MMC	IRRUPCION DE LIMITES DE VOLTAJES ADMISIBLES	NUEVO PLANTAMIENTO DE SITEMA DE TRANSMISION	HEURISTICA SOBRE TECNOLOGIAS DE CONVERSION DE VOLTAJE	SIMULACION DE DISPOSITIVO MMMC	EVALUACION DE FUNCIONALIDAD DEL MMC EN SISTEMAS DE TRANSMISION	COMPARACION DEL SISTEMA INICIAL CON EL SISTEMA DE IMPLEMENTACION DEL MMC	ANÁLISIS DE LA ÓPTIMA UBICACION DEL MMC	APLICACION DE NUEVO DISPOSITIVO PARA CONVERSION DE VOLTAJE (MMC)	APLICACION DE LIMITES DE VOLTAJE ADMISIBLES EN LINEAS DE TRANSMISION	
7	2021	Requerimientos Materiales de la Transmisión Y Distribución de la Electricidad Para la Transición de Energía	22	203					☒								☒									☒
8	2021	A New Press Pack IGBT for High Reliable Applications With Short Circuit Failure Mode	39	165	☒									☒		☒										
9	2021	Mejoramiento de los Perfiles de Voltaje en Sistemas de Distribución mediante Óptima Ubicación de Reguladores de Tensión con Cambiadores de Derivación usando Búsqueda Exhaustiva	43	77																						☒
10	2021	Optimal location and dimensioning of capacitors in microgrids using a multicriteria decision algorithm	44	27			☒						☒				☒									
11	2021	A New Press Pack IGBT for High Reliable Applications With Short Circuit Failure Mode	39	165		☒																	☒			
12	2021	Thermal Performances and Annual Damages Comparison of MMC Using Reverse Conducting IGBT and Conventional IGBT Module	42	339						☒									☒					☒		
13	2021	Impacto de las Estrategias De Modulación en el Desempeño de los Inversores Multinivel.	33	7	☒	☒																				
14	2021	Requerimientos Materiales de la Transmisión Y Distribución de la Electricidad Para la Transición de Energía	22	203					☒								☒									☒
15	2021	A New Press Pack IGBT for High Reliable Applications With Short Circuit Failure Mode	39	165	☒									☒		☒										

# UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA											
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	REFERENCIA	CITAS	APLICACION DE CONVERTIDORES DE POTENCIA	TOPOLOGIAS DE CONVERSION	ESTACIONES CONVERTIDORAS LCC Y VSC	UBICACION DE CONVERTIDORES DE CORRIENTE CONTINUA	PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE UBICACION DE CONVERTIDORES MMC	CALIDAD EN SISTEMAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE RANGOS ADMISIBLES DE VOLTAJES	ÓPTIMA IMPLEMENTACION DE MMC	PROBLEMAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL MMC	DISPONIBILIDAD DE INFORMACION SOBRE TECNOLOGIA MMC	ACCESIBILIDAD A INFORMACION SOBRE SIMULACION DEL MMC	IRRUPCION DE LIMITES DE VOLTAJES ADMISIBLES	NUEVO PLANTAMIENTO DE SITEMA DE TRANSMISION	HEURISTICA SOBRE TECNOLOGIAS DE CONVERSION DE VOLTAJE	SIMULACION DE DISPOSITIVO MMMC	EVALUACION DE FUNCIONALIDAD DEL MMC EN SISTEMAS DE TRANSMISION	COMPARACION DEL SISTEMA INICIAL CON EL SISTEMA DE IMPLEMENTACION DEL MMC	ANALISIS DE LA ÓPTIMA UBICACION DEL MMC	APLICACION DE NUEVO DISPOSITIVO PARA CONVERSION DE VOLTAJE (MMC)	APLICACION DE LIMITES DE VOLTAJE ADMISIBLES EN LINEAS DE TRANSMISION	
16	2021	Mejoramiento de los Perfiles de Voltaje en Sistemas de Distribución mediante Óptima Ubicación de Reguladores de Tensión con Cambiadores de Derivación usando Búsqueda Exhaustiva	43	77		☒																				
17	2020	Switched Capacitor Multi-Level Inverter with equal Distribution of The Capacitors Discharging Phases	37	210		☒																				
18	2020	Equivalent hamiltonian equations modelling and energy function construction for MMC-HVDC in hybrid AC/DC power systems	8	159	☒						☒														☒	
19	2020	Power reversal strategies for hybrid LCC/MMC HVDC systems	4	163	☒																					
20	2020	Una Revisión Acerca de Tecnologías y Modelación de Enlaces HVDC para Estudios Eléctricos	5	7							☒											☒				
21	2019	An ON-State Voltage Calculation Scheme of MMC Submodule IGBT	41	81									☒									☒				
22	2019	Optimal sizing of distribution transformers using exhaustive search algorithm	45	12									☒													
23	2019	Investigation of Fault Ride-Through Capability of Hybrid VSC-LCC Multi-Terminal HVDC Transmission Systems	29	175			☒									☒						☒				
24	2019	Transmission Line Parameters	18	88					☒																	☒
25	2019	El IGBT	40	13			☒		☒																	

# UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
			REFERENCIA	CITAS	APLICACION DE CONVERTIDORES DE POTENCIA	TOPOLOGIAS DE CONVERSION	ESTACIONES CONVERTIDORAS LCC Y VSC	UBICACION DE CONVERTIDORES DE CORRIENTE CONTINUA	PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE UBICACION DE CONVERTIDORES MMC	CALIDAD EN SISTEMAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE RANGOS ADMISIBLES DE VOLTAJES	ÓPTIMA IMPLEMENTACION DE MMC	PROBLEMAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL MMC	DISPONIBILIDAD DE INFORMACION SOBRE TECNOLOGIA MMC	ACCESIBILIDAD A INFORMACION SOBRE SIMULACION DEL MMC	IRRUPCION DE LIMITES DE VOLTAJES ADMISIBLES	HEURISTICA SOBRE TECNOLOGIAS DE CONVERSION DE VOLTAJE	SIMULACION DE DISPOSITIVO MMMC	EVALUACION DE FUNCIONALIDAD DEL MMC EN SISTEMAS DE TRANSMISION	COMPARACION DEL SISTEMA INICIAL CON EL SISTEMA DE IMPLEMENTACION DEL MMC	ANALISIS DE LA ÓPTIMA UBICACION DEL MMC	APLICACION DE NUEVO DISPOSITIVO PARA CONVERSION DE VOLTAJE (MMC)	APLICACION DE LIMITES DE VOLTAJE ADMISIBLES EN LINEAS DE TRANSMISION
26	2019	Diseño Construcción de la Línea de Subtransmisión A 69 Kv Songa.	19	126				☒																
27	2019	Back-to-Back 31 Level Modular Multilevel Converter with Ethercat Communication	25	45	☒	☒			☒														☒	
28	2019	Comparative study on DC line fault transient characteristics of four typical MMC-HVDC configurations	12	282	☒			☒					☒							☒		☒		
29	2018	Analysis of Resonance between a VSC-HVDC Converter and the AC Grid	14	442	☒		☒							☒										
30	2018	Soporte de Frecuencia para Redes de Baja Inercia Conectadas a Estaciones HVDC-MMC	16	128		☒			☒												☒			
31	2018	Annual U.S. Transmission Data Review	15	120						☒														
32	2018	Voltage Stability Assessment Using Line Stability Indices	46	56							☒					☒								☒
33	2018	Interdependence of Transmission Branch Parameters on The Voltage Levels	21	2				☒		☒						☒								☒
34	2017	ESTUDIO TÉCNICO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE DIRECTA (HVDC) Y SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE CORRIENTE ALTERNA (HVAC)	2	11				☒												☒				
35	2017	Control of Hybrid HVDC Transmission System with LCC and FB-MMC	31	22			☒		☒							☒								
36	2017	Electricity Transmission Performance Report 2018	17	40	☒																			

# UBICACIÓN ÓPTIMA DEL CONVERTIDOR MODULAR MULTINIVEL (MMC) PARA LA MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONSIDERANDO EL ALGORITMO DE BÚSQUEDA EXHAUSTIVA

ITEM	AÑO	TITULO DEL ARTICULO	DATOS		TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA			SOLUCIÓN PROPUESTA					
			REFERENCIA	CITAS	APLICACION DE CONVERTIDORES DE POTENCIA	TOPOLOGIAS DE CONVERSION	ESTACIONES CONVERTIDORAS LCC Y VSC	UBICACION DE CONVERTIDORES DE CORRIENTE CONTINUA	PARAMETROS DE LINEAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE UBICACION DE CONVERTIDORES MMC	CALIDAD EN SISTEMAS DE TRANSMISION	ANÁLISIS DE RANGOS ADMISIBLES DE VOLTAJES	ÓPTIMA IMPLEMENTACION DE MMC	PROBLEMAS DE DIMENSIONAMIENTO DEL MMC	DISPONIBILIDAD DE INFORMACION SOBRE TECNOLOGIA MMC	ACCESIBILIDAD A INFORMACION SOBRE SIMULACION DEL MMC	IRRUPCION DE LIMITES DE VOLTAJES ADMISIBLES	NUEVO PLANTAMIENTO DE SISTEMA DE TRANSMISION	HEURISTICA SOBRE TECNOLOGIAS DE CONVERSION DE VOLTAJE	SIMULACION DE DISPOSITIVO MMC	EVALUACION DE FUNCIONALIDAD DEL MMC EN SISTEMAS DE TRANSMISION	COMPARACION DEL SISTEMA INICIAL CON EL SISTEMA DE IMPLEMENTACION DEL MMC	ANÁLISIS DE LA ÓPTIMA UBICACION DEL MMC	APLICACION DE NUEVO DISPOSITIVO PARA CONVERSION DE VOLTAJE (MMC)	APLICACION DE LIMITES DE VOLTAJE ADMISIBLES EN LINEAS DE TRANSMISION
37	2017	Análisis e Implementación De Estructuras De Comunicación De Datos Para El Control De Un Convertidor Modular Multinivel	24	15							☒						☒					☒			
38	2016	Dynamic Averaged and Simplified Models for MMC-Based HVDC Transmission Systems	27	409		☒																			
39	2016	Análisis, Diseño Y Control De Convertidores Multinivel	36	60				☒		☒														☒	
40	2015	High Voltage Direct Current Transmission Converters, Systems and DC Grids	13	424	☒		☒				☒		☒			☒				☒				☒	
41	2014	High-Fundamental-Frequency Modulation for the DC-DC Modular Multilevel Converter (MMC) with low Switching Frequency and Predicted-Based Voltage Balance Strategy	35	25		☒				☒				☒										☒	
42	2014	Impacts of three MMC-HVDC configurations on AC system stability under DC line faults	3	171	☒		☒		☒															☒	
43	2014	MULTI-TERMINAL DIRECT-CURRENT GRIDS Modeling, Analysis, and Control	10	146	☒	☒	☒			☒			☒					☒	☒	☒			☒		
44	2014	Estrategia de Control para Inversor Multinivel con Capacitores Flotantes	34	15		☒				☒															
45	2013	Tecnología modular multilevel converter (MMC) en sistemas HVdc	1	126	☒		☒			☒			☒			☒						☒			
46	2008	Prospects of Multilevel VSC Technologies for Power Transmission	32	164			☒			☒				☒		☒		☒			☒				
CANTIDAD:					14	12	11	4	8	11	5	3	5	3	4	7	3	4	2	4	4	5	11	6	

## 7.2 Resumen de Indicadores

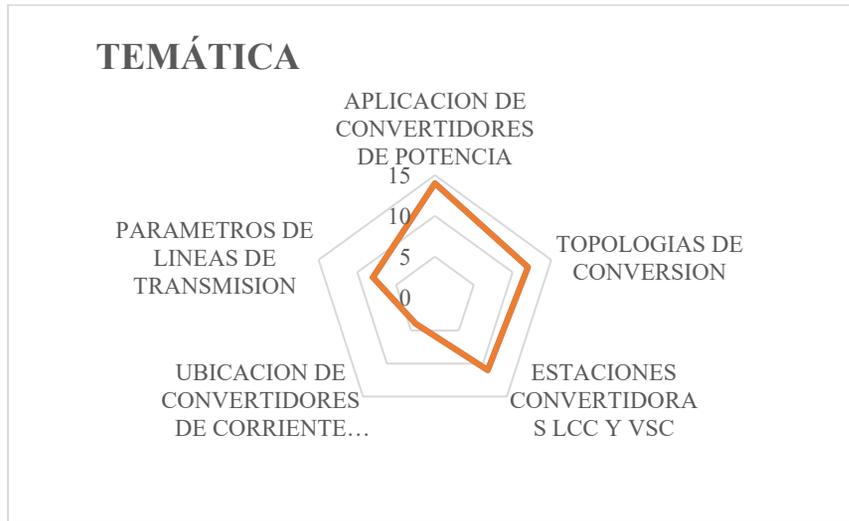


Figura 16. Resumen e indicador de la temática – Estado del arte.

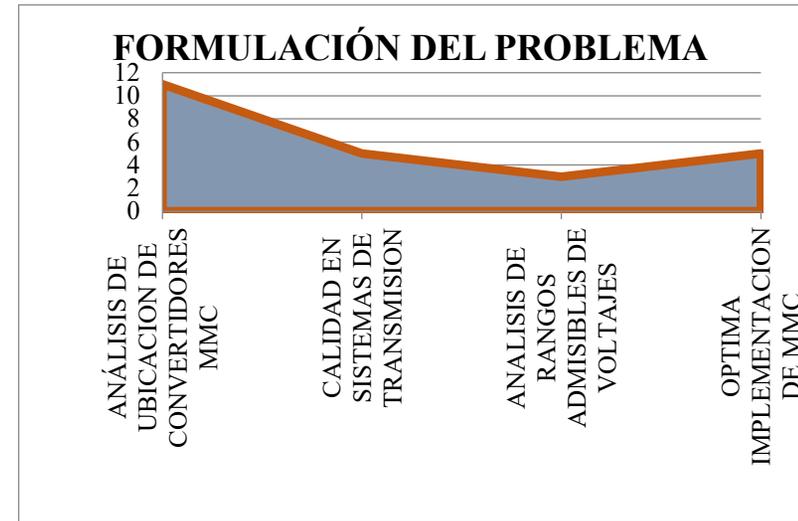


Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

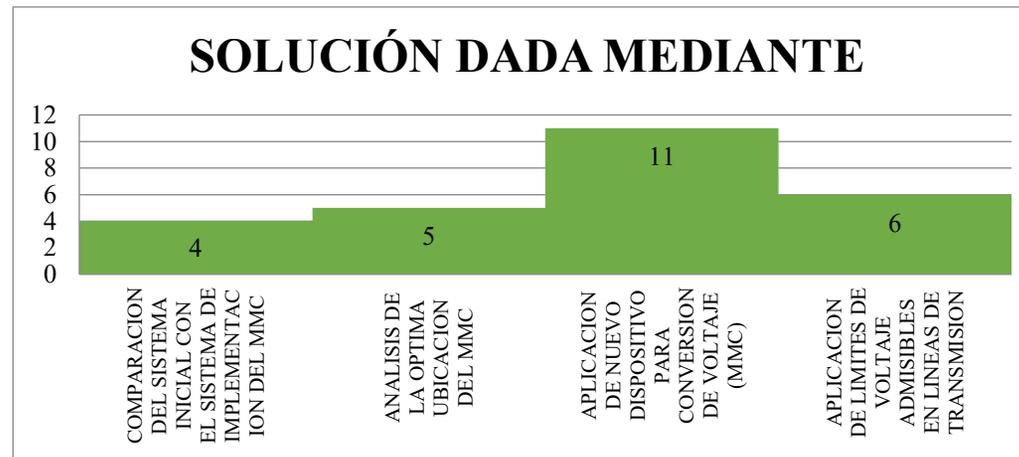


Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.

## 8 Anexos

Tabla 9. Datos de voltajes y corrientes del sistema IEEE de 9 barras.

Valores iniciales de voltaje			
Barra	Voltajes [V]	Voltajes PU	Corrientes [A]
1	16500	1	4909.023
2	18000	1	3808.597
3	13800	1	4579.229
4	215768.995	0.93812	351.4885
5	212737.921	0.92494	125.4841
6	210524.364	0.91532	152.3906
7	220599.544	0.95912	297.4
8	212983.037	0.92605	222.3161
9	221638.111	0.96364	165.4122

Tabla 10. Datos de voltajes y corrientes del sistema IEEE de 14 barras.

Valores iniciales de voltaje			
Barra	Voltajes [V]	Voltajes PU	Corrientes [A]
1	221380.3474	0.9625	403.6305
2	218436.2824	0.9497	79.7462
3	213487.9129	0.9282	237.9810
4	213428.6082	0.9280	205.8378
5	214179.2350	0.9312	221.9565
6	216785.5131	0.9425	24.3502
7	217087.9115	0.9439	119.6064
8	217603.9728	0.9461	76.1102
9	216886.3035	0.9430	34.7856
10	216774.9390	0.9425	9.3800
11	216737.3275	0.9423	16.9435
12	216617.7240	0.9418	24.3509
13	216577.1732	0.9416	4.1906
14	216526.5549	0.9414	13.5040