

**METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA  
MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

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

**TEMA:  
METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA  
MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA**

**AUTOR:  
BRAYAN DAVID SIMBA REYES**

**TUTOR:  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

**Quito, Febrero 2021**

**BRAYAN DAVID SIMBA REYES**

**METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA  
MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**BRAYAN DAVID SIMBA REYES** (O'1994 – F'2021). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Nacional Juan de Salinas de la ciudad de Sangolquí. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en una metodología para reducir el desbalance de la demanda mediante sistemas de medio voltaje en corriente directa.

bsimbar@est.ups.edu.ec

*Dirigido por:*



**DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA** (Y'1981-SM'12). Se graduó en Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador en 2010 y en la actualidad está trabajando para lograr su título de Doctor en Ingeniería de la Universidad Pontificia Bolivariana - Medellín Colombia. Es profesor e investigador en la Universidad Politécnica Salesiana - Quito Ecuador. En la actualidad es miembro del Grupo de Investigación Girei (Grupo de Investigación en Redes Eléctricas Inteligentes - Smart Grid Research Group).

dcarrion@ups.edu.ec.

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2021 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

## DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR

Yo, DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA* realizado por BRAYAN DAVID SIMBA REYES, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito, Febrero de 2021




.....  
DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA  
C.C.: 1713703062

## **CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR**

Yo, BRAYAN DAVID SIMBA REYES, con documento de identificación N° 1726782004, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, Febrero de 2021



.....  
BRAYAN DAVID SIMBA REYES

C.C.: 1726782004

## ÍNDICE GENERAL

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introducción .....   | 2  |
| 2     | Marco Teórico.....   | 7  |
| 2.1   | MVDC.....  | 7  |
| 2.1.1 | Estándar.....  | 7  |
| 2.1.2 | Ventajas de redes DC en distribución.....  | 7  |
| 2.1.3 | Ubicación factible .....   | 8  |
| 2.1.4 | Topologías.....  | 8  |
| 2.1.5 | Posibles aplicaciones potenciales futuras.....                                   | 8  |
| 2.1.6 | Problemáticas asociadas a MVDC.....  | 9  |
| 2.2   | Armónicos .....  | 9  |
| 2.3   | Filtros de Potencia.....   | 10 |
| 2.3.1 | Para filtros RPF.....  | 10 |
| 2.3.2 | Filtros APF.....   | 11 |
| 2.4   | Balance de la Corriente Eléctrica Trifásica.....                                 | 11 |
| 2.4.1 | Índices de Balance de Cargas.....  | 12 |
| 2.5   | Demanda eléctrica residencial.....   | 13 |
| 2.6   | Flujo de Potencia en Sistemas Radiales .....                                     | 13 |
| 2.6.1 | Método de Flujo de Potencia por Newton- Raphson .....                            | 13 |
| 3     | Discusión de la Metodología y Formulación del Problema .....                     | 14 |
| 3.1   | Caso estudio modelo MVDC .....   | 15 |
| 4     | Análisis de Resultados .....   | 16 |
| 4.1   | Sistema Base MVDC simulado.....  | 16 |
| 4.1.1 | Afectación en calidad.....   | 17 |
| 4.1.2 | Comparativa de balance preliminar de corriente por modelo normal y con MVDC..... | 18 |
| 4.1.3 | Primera Prueba en el Equilibrio de la demanda .....                              | 19 |
| 4.1.4 | Segunda Prueba en el Equilibrio de la demanda.....                               | 22 |
| 4.2   | Modelos de Prueba Sistema IEEE 33 Buses .....                                    | 24 |
| 5     | Conclusiones .....   | 26 |
| 5.1   | Trabajos Futuros .....   | 26 |
| 6     | Referencias .....  | 26 |
| 6.1   | Matriz de Estado de Arte.....  | 30 |
| 6.2   | Resumen de Indicadores .....   | 31 |

## ÍNDICE DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Principios de calidad para el sistema de distribución eléctrica.....                                | 2  |
| Figura 2. Estado de balance sobre el sistema de distribución eléctrica .....                                  | 3  |
| Figura 3. Tipos de Metodologías .....   | 4  |
| Figura 4. Concepto básico del modelo de un sistema MVDC dentro de un sistema de distribución.....             | 6  |
| Figura 5. Ventajas más características de redes DC en distribución.....                                       | 7  |
| Figura 6. Circuito de salida después del VSI con filtro LC dispuesto .....                                    | 11 |
| Figura 7. APF paralelo, que inyecta corrientes de compensación .....  | 11 |
| Figura 8. APF serie, que inyecta tensiones de compensación a través de un transformador .....                 | 11 |
| Figura 9. Sistema combinado de filtros pasivos paralelos y filtro de potencia activa en serie .....           | 11 |
| Figura 10. Curva de demanda eléctrica media para el sector residencial .....                                  | 13 |
| Figura 11. Etapas para el balance de corriente por medio de MVDC.....   | 15 |
| Figura 12. Concepto de Modelo MVDC en la red .....  | 15 |
| Figura 13. Diagrama de bloques del sistema implementado en Matlab Simulink para pruebas del modelo MVDC. .... | 16 |
| Figura 14. Algoritmo matemático para filtro LC de un inversor .....   | 17 |
| Figura 15. Puntos de referencia como interés en salvaguardar la calidad .....                                 | 17 |
| Figura 16. Voltaje entrante al sistema MVDC.....  | 17 |
| Figura 17. Distorsión armónica del voltaje desde el punto de vista del SEP.....                               | 17 |
| Figura 18. Voltaje desde el punto de vista del consumidor.....  | 18 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 19. Distorsión armónica del voltaje desde el punto de vista del consumidor.....                                     | 18 |
| Figura 20. Comparativa de un sistema normal y con MVDC frente a desbalance de corriente .....                              | 19 |
| Figura 21. Distorsión armónica de la corriente entrante al sistema MVDC .....  | 19 |
| Figura 22. Corriente post MVDC, primera prueba .....   | 20 |
| Figura 23. Corriente previo MVDC, primera prueba.....  | 20 |
| Figura 24. Corriente post MVDC, segunda prueba.....  | 22 |
| Figura 25. Corriente previo MVDC, segunda prueba .....   | 22 |
| Figura 26. Sistema IEEE 33 Buses con sistema MVDC, DIgSILENT.....  | 24 |
| Figura 27. Perfil de tensión en sistema IEEE 33 Buses y con sistema MVDC, bajo condiciones iniciales de desequilibrio..... | 25 |

## ÍNDICE DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1: Tabla comparativa MVDC – HVDC .....                             | 7  |
| Tabla 2: Muestra de estado de balance de carga en primera prueba.....    | 30 |
| Tabla 3: Muestra de estado de balance de carga en segunda prueba .....   | 23 |
| Tabla 4: Índice de desequilibrio resumido en metodologías.....           | 30 |
| Tabla 5: Índice LBi para sistema IEEE33 buses con desbalance.....        | 25 |
| Tabla 6: Índice LBi para sistema IEEE33 buses con MVDC y desbalance..... | 30 |

# ***METODOLOGÍA PARA REDUCIR EL DESBALANCE DE LA DEMANDA MEDIANTE SISTEMAS DE MEDIO VOLTAJE EN CORRIENTE DIRECTA***

## **Resumen**

En la presente investigación se analizó la inclusión del sistema de media tensión en corriente directa (MVDC), en una subestación de distribución, con finalidad de solventar los problemas de desbalance de corrientes trifásicas. El estudio se hizo en consideración de abastecer de energía eléctrica a la zona residencial, por ser quien genera mayor problema de desequilibrio de corriente a la red. Con tal fin se realizaron simulaciones, por medio de diferentes escenarios de estudio que consideran demanda cambiante en función del tiempo, ejecutadas para el modelo preliminar MVDC y en el modelo de prueba del IEEE de 33 buses para distribución. Como resultado se obtuvo una media de desequilibrio de alrededor del 3.5%, en el equilibrio de la corriente, y estando dentro del rango de otras metodologías, como es el "Algoritmo de optimización dinámica" y "Cambio de fase, basado en algoritmo de murciélago modificado" que tienen una media de desequilibrio del 1.64% y 5% respectivamente. También se pudo constatar una ligera mayor capacidad de carga en el sistema con MVDC, pues se obtuvo un indicador positivo de balance en los buses del modelo IEEE de 33 buses con MVDC de 0,2218, siendo superior en comparación al 0.08 del sistema normal.

**Palabras Clave:** Comportamiento Estocástico, Demanda dinámica, Desbalance de corriente, HVDC, MVDC, Sistemas de distribución, VSC

## **Abstract**

This document analyzed the inclusion of the medium voltage system in direct current (MVDC), in a distribution substation, in order to solve the problems of unbalance of three-phase currents. The study was carried out in consideration of supplying electric power to the residential area, since it generates the greatest problem of current unbalance in the network. To this end, simulations were performed by means of different study scenarios that consider changing demand as a function of time, executed for the preliminary MVDC model and in the IEEE test model of 33 buses for distribution. As a result, an unbalance average of around 3.5% was obtained, in the balance of the current, and being within the range of other methodologies, such as the "Dynamic optimization algorithm" and "Phase shift, based on modified bat algorithm" which have an average imbalance of 1.64% and 5% respectively. Also it was possible to verify a slight higher load capacity in the system with MVDC, since a positive balance indicator was obtained in the buses of the IEEE model of 33 buses with MVDC of 0.2218, being higher compared to 0.08 of the normal system.

**Keywords:** Stochastic Behavior, Dynamic Demand, Current Unbalance, HVDC, MVDC, Distribution Systems, VSC

# 1 Introducción

Los sistemas de distribución normalmente tienen una topología radial, siendo una de las principales etapas del sistema eléctrico de potencia (SEP) [1], [2]. Existen muchos problemas asociados a esta etapa del SEP como son: pérdidas eléctricas, desconexiones, corrientes armónicas a causa de cargas no lineales, desbalances de cargas, entre tantas que deben de ser estudiadas para dar respuestas al problema determinado. También se plantea varios cambios con el fin de tener eficiencia energética, a partir de propuestas de energía limpia y amigable, sin embargo, los retos son amplios [3], [4].

La energía eléctrica es un servicio básico, por lo que el usuario final tiene el derecho de ser provisto de calidad energética [5], [6]. Para garantizar calidad en el sistema de distribución debe cumplir los principios que se mencionan en la figura 1, pues la red debe tener una capacidad instalada que sea adecuada, energía eléctrica disponible con muy pocos cortes ya sea por mantenimiento o eventos extraordinarios, tener acceso a expansión del sistema, trabajar de manera segura y estar en constante adaptación tanto a nuevos equipos tecnológicos como sistemas innovadores [5], [7].



Figura. 1. Principios que debe tener el sistema de distribución eléctrica.

Uno de los problemas asociados más comunes y complicados de resolver es el desbalance de corriente o desequilibrio en la red trifásica, que puede producir sobrecargas, calentamiento en conductores de alimentación, accionamiento de protecciones, circulación de corrientes por el neutro de la red y en casos severos “desplazamiento del núcleo” en transformadores [1], [8]–[10]

Un correcto equilibrio de carga en la red aporta a la mejora de la confiabilidad, escalabilidad, y mejora en el perfil de voltaje para cada nodo del sistema de distribución [1], [7], [11]. Por lo que es necesario plantear progresivamente nuevos modos de suplir la necesidad de contrarrestar el desbalance de corriente trifásica. Existen muchas causas que afectan al balanceo equilibrado de cargas en la red eléctrica de distribución, refiriéndose a la corriente por cada fase R-S-T, entre las que más peso tienen se considera [3], [7], [12]:

- Las cargas monofásicas conectadas no tienen una distribución equilibrada en las tres fases
- Las cargas monofásicas se conectan y desconectan continuamente de la red eléctrica
- Las redes de distribución pueden ser inherentemente asimétricas
- El comportamiento en continuo cambio de la demanda eléctrica

Normalmente los alimentadores de distribución consisten en una mezcla de cargas residenciales, comerciales, industriales e iluminación, de los cuales los picos de demandas no coinciden simultáneamente [1], [13], afectando al equilibrio de la corriente. Analizando la demanda eléctrica, las cargas industriales

y comerciales pueden ser consideradas “equilibradas” por la producción casi continua y el consumo equitativo en las tres fases. Sin embargo, la realidad para las cargas residenciales es muy diferente, al permanecer en constante cambio en el tiempo, al tener estas a su vez múltiples cargas que son poco predecibles, como licuadoras, televisores, hornos de resistencia y entre otras futuras cargas importantes como el auto eléctrico [14]. La expansión en la red de las residencias ya sean conjuntos habitacionales grandes como urbanizaciones, o hogares individuales, muchas veces de forma desordenada [7], serán una problemática creciente que se debe tomar en cuenta para el equilibrio de la corriente. En la figura 2, se ejemplifica el del consumo residencial, que generalmente es monofásico y bifásico, además que depende del comportamiento de los consumidores desplazados en distintas áreas, lo cual hace

que el óptimo equilibrio de repartición de la carga total o corrientes en las líneas trifásicas sea considerada muy difícil de corregir, dentro de un sistema eléctrico de distribución en un periodo de tiempo.

Es general, el sistema eléctrico debe lidiar con el comportamiento de las cargas conectadas, cuya fluctuación es el origen de desequilibrios o desbalances de corrientes en líneas de alimentación trifásicas, también los aspectos constructivos de las distribuidoras eléctricas agravan el problema [15]–[17]. En este mismo aspecto deben considerarse las futuras cargas monofásicas y bifásicas conectadas a los sistemas de distribución como son cocinas de inducción [18], el auto eléctrico [14], [17], entre otros; en combinación a la creciente inserción generación distribuida que generalmente es generación monofásica, seguirían aumentando la dificultad del balance óptimo de la corriente [3].

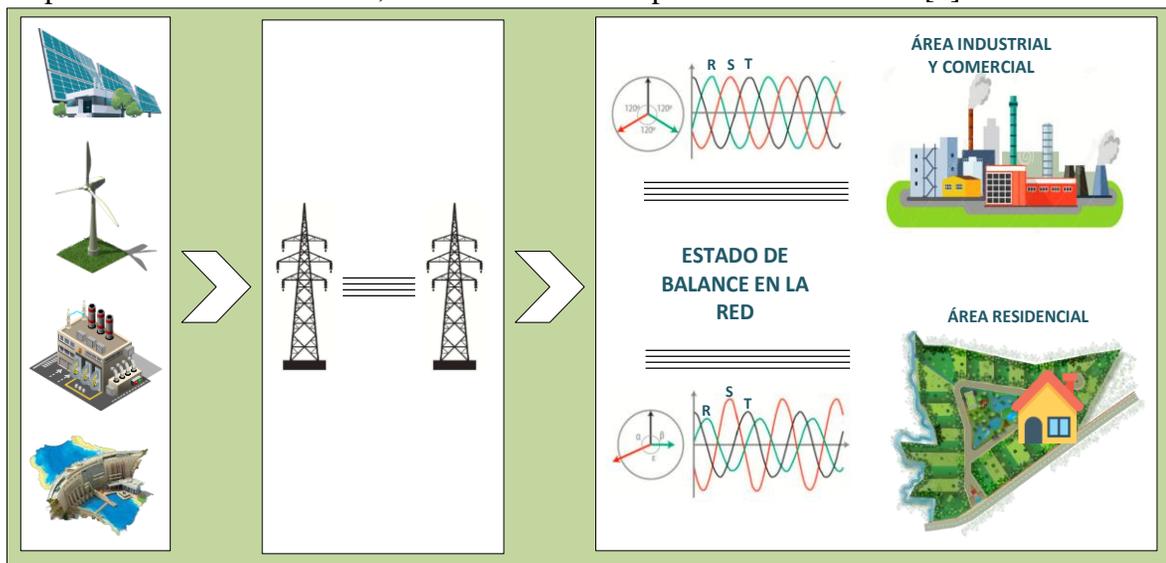


Fig.2 Estado de balance sobre el sistema de distribución eléctrica.

La figura 3 resume la organización de las vías de metodologías, con fin de dar solución al desequilibrio, mismas que tienen dos caminos; (i) estático o determinista y (ii) dinámico o estocástico,

de estas parten independientemente las herramientas mediante: algoritmos informáticos a partir de algoritmos matemáticos; hardware; conceptos como generación distribuida y micro redes;

ayudando como fin último contribuir a llegar al balance deseado o aceptable, a veces es necesario reconfigurar la red para

operación más eficiente del sistema [1], [19].

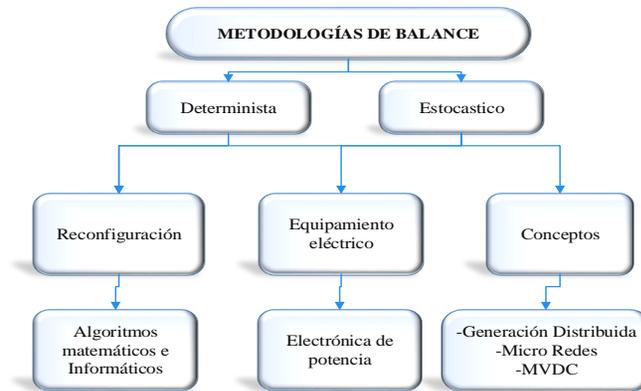


Fig.3 Tipos de Metodologías

En las propuestas [1], [19] se centran en emplear algoritmos para optimizar el intercambio de sucursal o alimentador al igual que la mayor parte de investigaciones para el equilibrio, a base de seccionadores e interruptores que se vienen utilizando con el objetivo de minimizar el desbalance, cambiando estado de la topología de los sistemas de distribución por modificación en el estado <abierto / cerrado> de los conmutadores [19]. También un sistema de distribución puede equilibrarse aproximadamente, migrando cargas de una fase de carga pesada que demanda mayor corriente a una fase de carga ligera [11]. Por ejemplo en [1] por la técnica de medición de índices (IMT) propuesta, la reconfiguración de la red para el balanceo de carga se realiza mediante la realización de una búsqueda sobre diferentes configuraciones radiales creadas al considerar conmutadores de tipo de intercambio de rama, donde las operaciones de conmutación se determinan implementando una búsqueda de árbol mínima de todas las configuraciones posibles, sin violar

restricciones y siendo un método determinista [1].

Cada propuesta propone mejorar tiempos de convergencia de una solución y optimización de recursos. La reconfiguración es muy común pero vale mencionar que no ofrece una solución definitiva [3]; tiene una fácil aplicabilidad en la red; la desventaja viene de la dependencia de una posibilidad de que se pueda ejecutar una conmutación en el intercambio entre alimentadores o ramales, siendo no siempre posible en algunas circunstancias [1] y un costo considerable aun mientras más veces sea el número de cambios [3].

La reconfiguración dinámica, es la vía técnicamente más fiable, pues el sistema se puede equilibrar de acuerdo con mediciones instantáneas de la red de distribución [11]. Los autores en [19] plantean una metodología que se centra en BFOA (Algoritmo de optimización del forrajeo bacteriano) siendo un algoritmo estocástico genérico de optimización metaheurística, basado en una población bacteriana, y hace referencia al

crecimiento material y búsqueda de alimento [19]. Además del balanceo de la carga también expone el método como estrategia de restauración rápida, con la facilidad de realizar maniobras de restauración de energía, que aún es un desafío en ciertas circunstancias, esta característica es interesante para reducir las molestias al usuario durante interrupciones[19].

En [3], los autores proponen un bus de DC, de forma de facilitar la inserción progresiva de la movilidad eléctrica y aprovechar eficientemente la energía fotovoltaica en horas pico para carga de los EVs (vehículos eléctricos), y en si generando un balance con la red. El bus de CD debe ir por el lado de corriente continua de los inversores de cada fuente fotovoltaica (FV) eléctrica [3]. Demuestra una convergencia muy aceptable con menos tiempo de cálculo, al igual que los anteriores metodologías mencionadas genera reducción de pérdidas de potencia y la variación de carga, mejorando el balance de carga y el perfil de voltaje en los nodos del sistema [3]. El limitante viene de ser una heurística aplicada en centros con generación fotovoltaica extendida. En general las metodologías deben cumplir con las restricciones de calidad y confiabilidad [1], [19].

En la actualidad los sistemas de distribución son parcialmente equilibrados en sus redes trifásicas, gracias a las técnicas mencionadas entre otras. Hay que entender que aún es un problema no resuelto completamente, los crecientes

cambios bruscos en el sistema de distribución ya mencionados en los anteriores párrafos, hacen necesario buscar más propuestas.

Tomando en cuenta que tradicionalmente se á utilizado la corriente alterna (AC) desde la generación, transmisión hasta la distribución producto de las propias ventajas técnicas, cuyo desarrollo para su uso fue implementado a mediados de 1880 por Westinghouse y Tesla [20] , que desde entonces ha prevalecido frente a las desventajas que tiene la corriente directa (altas pérdidas causadas por baja tensión en distribución), sin embargo en tiempos modernos producto de los avances tecnológicos focalizados en la electrónica de potencia como los convertidores de fuente de tensión (VSC) entre otros [21], [22], han ido solucionando aquellos problemas que la corriente directa tiene, creando factibilidad de su uso hoy en día.

La solución que se propone para este artículo se basa en utilizar una parte de la infraestructura de Media Tensión en Corriente Continua (MVDC), aún en evolución [20], [23], representada en la figura 4, en un criterio de aprovechar la ventaja de la posible rectificación de la corriente alterna a continua y viceversa, en función de grandes potencias, para impedir el desbalanceo de la corriente en la red. Haría referencia a una metodología estocástica, ósea en tiempo real, que se estima sería una solución estable y robusta.

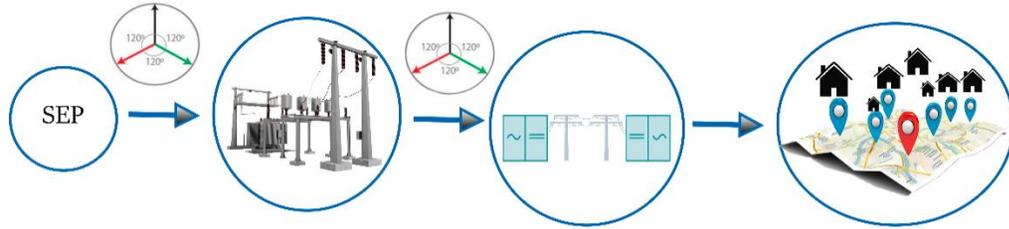


Figura. 4. Concepto básico del modelo de un sistema MVDC dentro de un sistema de distribución

Una tendencia de comenzar a usar MVDC se estima que puede llegar a ser la solución estándar del problema de desequilibrios de corriente, además de tener más ventajas destacables que aportarían al sistema eléctrico de distribución, por ejemplo, las oportunidades de reutilizar las líneas ya existentes en distribución como corredores, hace factible aumentar la capacidad de potencia [20], [21]; las pérdidas de potencia de la red de CC son menores en comparación de una red AC [3].

Se buscaría corregir el problema del desbalance de corriente, presente en la red de distribución, que tengan como fin alimentar o proveer de energía eléctrica a la zona residencial. Aun existiendo métodos de implementación basados en algoritmos vanguardistas de repartición de cargas para el diseño como se observa en las referencias [7] y [24], solo lo corrigen un porcentaje aceptable pero no el 100% del desbalance [25]. Las redes DC puede reducir no solo el desequilibrio trifásico de corriente, sino también las pérdidas de la red y voltaje, en comparación con el método convencional de reconfiguración [3].

Así se propone al sistema MVDC cuyo funcionamiento se asumirá como ideal al igual que componentes que lo comprenden, en alimentadores de suministro a cargas puramente residenciales. Inicialmente la modelación

base del sistema será objeto de estudio y progresivamente se ejecutará en el modelo de pruebas de 33 Buses del IEEE. Sujetas únicamente al análisis del balance de potencia en la red en función de demanda en estado dinámico con comportamiento randómico en el orden del tiempo. Cuya función objetivo busca minimizar el desbalance de potencia en el área residencial para mejorar la confiabilidad y calidad de energía. El software usado para realizar las simulaciones será Power Factory, y se empleará el método N-R para cálculo de flujos de potencia.

La introducción de estos sistemas se propone que sea gradual para sustentar inversiones económicas bajas pero continuas en el tiempo para una posible estructura completa MVDC en el sistema de distribución, por eso la razón de hablar de segmentos de MVDC o redes híbridas de AC y DC [21]. La escalabilidad se lograría siempre y cuando se logre controlar armónicos indeseables [3].

Como condiciones de simulación se establecen de la siguiente manera:

- i. La eficiencia de todos los convertidores se establece en 0.95 como mínimo.
- ii. La demanda de carga será randómica con comportamiento dinámico
- iii. El nivel de voltaje para distribución en media tensión será de 12.66kV

En adelante el artículo se organizará de la siguiente manera. En la sección 2 se realiza una revisión rápida del concepto MVDC, armónicos, filtros de potencia, índices de balance de carga, demanda eléctrica residencial, y flujo de potencia en sistemas radiales. En la sección 3 se describe la discusión de la metodología y

## 2 Marco Teórico

### 2.1 MVDC

El sistema de media tensión en DC en distribución, es un nuevo concepto y es un equivalente funcional de los conocidos sistemas HVDC, con conexión monopolar o bipolar, con la variante en potencia y voltaje se presenta en la Tabla 1 [26]. MVDC está basada en equipos de electrónica de potencia y opera a medio voltaje, complementado por filtros para prevenir armónicos que se producen por la múltiple rectificación y maniobras de control.

Tabla 1: Tabla comparativa MVDC – HVDC.

|                      | <i>MVDC</i> | <i>HVDC</i>     |
|----------------------|-------------|-----------------|
| <b>Voltaje (kV)</b>  | 1.5 - 30    | 30 - 600        |
| <b>Potencia (MW)</b> | 0.1 - 250   | Potencias > 250 |

#### 2.1.1 Estándar

La estandarización aplicada a DC en media tensión para distribución es uno de los limitantes actuales, hasta ahora se han estudiado aplicados a barcos y ferrocarriles como es IEEE Std 1204-1997 que da una revisión en los aspectos de conexiones AC/DC y el diseño preliminar de las interconexiones. También esta IEC 61660 que presenta la norma para Corrientes de corto circuito en DC [23].

formulación del problema, así como el principio de balance de la demanda por el sistema MVDC. En la sección 4 se analizan los resultados de la metodología. Finalmente, en la sección 5 se establecen las conclusiones y propuestas para trabajos futuros.

#### 2.1.2 Ventajas de redes DC en distribución

Hay avances y desarrollos existentes respecto a incluir la corriente directa (DC) en el sistema eléctrico, desde generación (fotovoltaica, eólica en DC), pasando por transmisión (High Voltaje DC), hasta llegar a la distribución (Médium Voltaje DC) [10].

Se debe tomar en cuenta las ventajas de redes DC como se observa en la figura 5, donde la corriente alterna AC no ha logrado llegar del todo [21].



Figura. 5. Ventajas más características de redes DC en distribución.

Es muy destacable mencionar la transición MVAC a MVDC en teoría permitiría aumentar el flujo de carga hasta en un 185% [20], basándose en los siguientes fundamentos:

- Primero, CC es capaz de utilizar la capacidad máxima de voltaje máximo de los circuitos de CA en

comparación con la clasificación RMS.

- Segundo, CC no sufre el efecto de piel, por lo que existe la posibilidad de una mayor capacidad de corriente sin afectar considerablemente la caída de tensión en comparación a AC.
- Tercero, CC necesitará retorno metálico, por lo que solo se pueden utilizar 2 de 3 conductores en un solo circuito.

### 2.1.3 *Ubicación factible*

Las condiciones básicas de sitio donde MVDC puede proporcionar beneficio para la implementación son [20]:

- Líneas aéreas largas
- Circuitos de cables urbanos
- Áreas sensibles o altamente restringidas
- Ángulos de fase a través de las entradas de transmisión
- Interconexión con alimentadores vecinos con diferentes factores de carga o calidad de energía que la vinculación aprovecharía la capacidad del sistema
- Sistemas de media tensión con desafíos de voltaje y flujo de energía

### 2.1.4 *Topologías*

La topología para MVDC se presentan como:

- Tipo radial, en la cual se conectan las cargas en estrella a una fuente. Es muy económica, pero tiene baja confiabilidad.
- Tipo anillo de fuente, en la que se conectan fuentes alimentadoras en serie con cargas en disposición radial con un solo juego de cables. Se pueden disponer de interruptores automáticos

compartidos y dos juegos de cables para aumentar la confiabilidad, lo que elevaría el costo.

- Tipo rejilla de malla, hay la conexión de múltiples cables a los nodos de la topología tipo anillo, obteniendo conexión mallada, con alta confiabilidad y flexibilidad en el sistema, pero incurre en costos elevados en comparación a las demás topologías.

### 2.1.5 *Posibles aplicaciones potenciales futuras*

En la actualidad al sistema MVDC se lo emplea en algunas embarcaciones marítimas, ferrocarriles de tracción eléctrica e interconexiones submarinas con generación eólica offshore, la aplicación puede verse expandido en futuro a [23]:

- Interconexión con todo tipo de generación eléctrica offshore, por ejemplo, la generación mareomotriz.
- Microrredes con integración de energía a gran escala (pequeñas ciudades, poblados o campus universitarios)
- Transporte
- Distribución eléctrica
- Circuito de electrificación a plataformas de petróleo y gas

Es interesante que tener segmentos de MVDC en las líneas de distribución pueden contribuir a la inserción de generación distribuida y energías renovables, haciendo más viable su entrada, al abaratar costos iniciales y facilitar la conexión [22], [27]. Facilitando la entrada de “micro grids conectadas” en una generación distribuida con ayuda de MVDC, aportarían a la robustez del sistema de distribución. A su vez contrasta sobre una mejora de eficiencia operativa y

de control que es a donde apuntan las empresas distribuidoras [3], [28], [20] .

### 2.1.6 Problemáticas asociadas a MVDC

Los problemas que deben ser tomados en cuenta es la relativa vida útil de los equipos MVDC que es de 15 a 25 años, frente a su homólogo AC que es de 30 a 40 años [20]. También es un problema los armónicos que se pueden generar por la múltiple rectificación eléctrica, además de las pérdidas relativas asociadas a la eficiencia de los equipos más importantes del sistema MVDC (rectificadores, inversores y convertidores DC/DC).

Un aspecto a considerar importante para el problema de este artículo, es que la mayor parte de las armónicas que se encuentran en el neutro eléctrico se deben a la tercera armónica, las corrientes armónicas provocadas se llegan a sumar consigo mismas. La corriente en neutro para estas condiciones, produce una corriente mayor a la de fase aunque las cargas conectados a los conductores estén correctamente balanceadas o equilibradas; la corriente neutro será igual a la suma de las tres corrientes fase de un sistema trifásico de cuatro hilos, que si es balanceado normalmente debe ser cero [29].

## 2.2 Armónicos

Los efectos de los armónicos en el sistema de potencia son muy variados, van desde la deformación de las señales de voltaje y corriente hasta la reducción de la vida útil de los transformadores. El incremento de generación de energía descentralizada o generación distribuida (GD), el auge de la inserción de energía renovable y las cargas no lineales provocan problemas de armónicos en el sistema [30]. El consumo

de energía eléctrica a partir de convertidores en la red eléctrica puede elevar el nivel de perturbación, afectar a la calidad de servicio eléctrico [29], dañar a cargas sensibles y muy posible afectaciones en la estabilidad del sistema [31]–[33].

Para realizar un análisis de armónicos se emplea las series de Fourier, que representan matemáticamente la suma infinita de cada señal periódica que componen a la señal con distorsión armónica, basándose en (1).

$$v(t) = \hat{v}(1) \cos(\omega t) + \sum (\hat{v}k * \cos(k\omega t - \phi k)) \quad (1)$$

Tal que,  $v(t)$  es la señal general a la que se le analiza mediante series de Fourier,  $\hat{v}(1)$  es el pico de la señal fundamental,  $k$  es el coeficiente que es múltiplo de la fundamental, además que  $k \in N \wedge k \neq 1$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $t$ =tiempo y  $\phi k$  es el desfase para cada coeficiente  $k$ .

La distorsión de corriente en la carga consecuentemente trae distorsión en el voltaje para el punto de conexión por una caída de voltaje distorsionada en las impedancias del sistema. Entre los efectos negativos principales es el sobrecalentamiento de equipos eléctricos como son transformadores producto de pérdidas por corrientes parásitas y sobrecalentamiento en los cables de neutro si fuere una conexión estrella, además también traen problemas sobre los condensadores y el accionamiento de sistemas de protección [29].

El nivel de distorsión armónica presente en el sistema eléctrico no debe superar el 5%, para no afectar la calidad de la red [30]. La fórmula para calcular los valores absolutos y relativos en corriente o tensión, se basa en la distorsión armónica

total (2) y (3) en ese orden [29]; normalmente se calculan los armónicos hasta el quincuagésimo orden apreciándose en el equivalente (4).

$$THD_v = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (v_n)^2} \quad (2)$$

$$THD_v = \frac{1}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_n)^2} \quad (3)$$

$$THD_v = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} \left( \frac{U_H}{U_1} \right)^2} \quad (4)$$

$U_h$  representa el valor RMS del armónico h, y  $U_1$  es el valor fundamental

### 2.3 Filtros de Potencia

Los sistemas de energía que tienen como base a la electrónica tienen las ventajas de su estructura simplificada, menor costo, mantenimiento reducido y mayor eficiencia. Sin embargo, el sistema de potencia sufre un estrés severo, puesto que las características de los diferentes equipos de potencia, como las cargas estáticas / dinámicas y los diferentes tipos de convertidores electrónicos de potencia lo ocasionan.

Para eliminar o reducir los efectos perjudiciales, un método es lograr el aislamiento entre la fuente de alimentación y las cargas mediante el uso de un elemento de almacenamiento de energía, y la otra forma es utilizar un filtro de potencia [31].

Para altas potencias en el sistema eléctrico el filtro se puede dividir principalmente en filtro de potencia reactiva (RPF) y filtro de potencia activa (APF) [31], [34].

- a. Filtros RPF estructurado de inductor y / o condensador para filtrar los armónicos. La principal característica positiva es la fiabilidad. Sin embargo, es

complicado diseñar este tipo de filtros, también debido a su considerable peso y volumen, el RPF muy pocas veces se usa solo.

- b. Filtros APF hace uso de interruptores de potencia para trasladar armónicos a otro inductor y / o condensador. Se hace uso frecuentemente en sistemas electrónicos de potencia porque puede reducir en gran medida el peso y el volumen del filtro. Sin embargo, está restringido a la velocidad del convertidor, por lo que APF no puede reemplazar completamente al RPF.

#### 2.3.1 Para filtros RPF

Como se observa en la Figura 6 de ejemplo, habitualmente son empleados para suprimir los armónicos producidos debido a las operaciones de conmutación en convertidor electrónicos; el diseño de filtros es importante para la conexión a la red eléctrica local, IEEE-519 e IEC 61000-3-2 especifican el estándar de restricción de armónicos para los problemas de calidad de energía de los sistemas de distribución de energía [32], [33].

Como fin de diseño de filtros LC debe ser el garantizar que la distorsión armónica total mínima se obtenga eliminando la tensión de salida predominante y los armónicos de corriente, por lo tanto, una distorsión armónica THD lo más mínima posible. La mala selección de los parámetros LC del filtro puede provocar el efecto de resonancia [32]; a lo cual la frecuencia de resonancia no debe estar dentro del ancho de banda de control que provocaría inestabilidades en el sistema eléctrico. También cabe mencionar que los filtros LC convencionales no pueden

compensar eficientemente los armónicos debidos a cargas no lineales en un sistema [33].

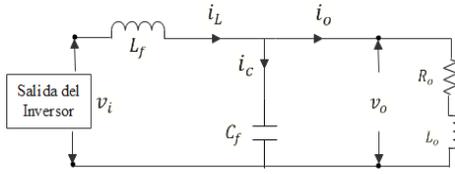


Figura. 6. Circuito de salida después del VSI con filtro LC dispuesto.

De la figura 6, se denota  $v_i$  es la tensión de salida del inversor,  $L_f$  es la inductancia del filtro,  $C_f$  es la capacitancia del filtro,  $v_o$  es la tensión en la carga,  $R_o$  es la resistencia de carga,  $i_L$  es la corriente sobre la bobina,  $i_c$  es la corriente sobre el capacitor, y  $i_o$  es la corriente sobre la carga.

El elegir la frecuencia de corte ( $\omega_c$ ) la decide el estándar IEEE sobre la base de la frecuencia de conmutación expresada en (5), donde  $\omega_s$  es la conmutación angular.

$$\omega_c < \omega_s / 15 \quad (5)$$

$\omega_c$  en términos de parámetros del filtro se entiende en (6).

$$\omega_c = \frac{1}{L_f C_f} \quad (6)$$

Para una condición de potencia mínima,  $L_f$  se puede evaluar como (7) y posteriormente  $C_f$  con (6).

$$L_f = \left( \frac{R_o}{\omega_c} \right) \sqrt{\omega_c^2 - \omega_o^2} \quad (7)$$

### 2.3.2 Filtros APF

El filtro APF en comparación al RPF es más costoso, pero tiene la ventaja de que puede eliminar simultáneamente el armónico de banda ancha en la etapa de fuente [30]. Los filtros activos no solo

generan corriente de baja frecuencia que compensa la corriente armónica, sino también ondulaciones de conmutación de alta frecuencia. Comúnmente la frecuencia de resonancia del filtro de salida está diseñada para ser  $f_{of}$ , tal que,  $10f_1 < f_{of} < f_2/10$ , siendo  $f_1$  frecuencia máxima de corriente de salida del filtro activo y  $f_2$  frecuencia portadora de *PMW* [30][34]. Los APF se clasifican de la siguiente manera:

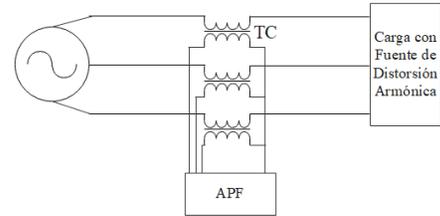


Figura 7. APF paralelo, que inyecta corrientes de compensación.

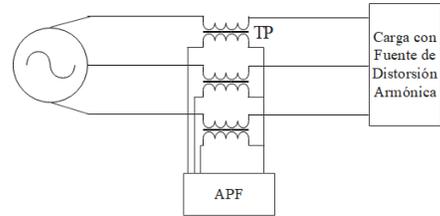


Figura 8. APF serie, que inyecta tensiones de compensación a través de un transformador.

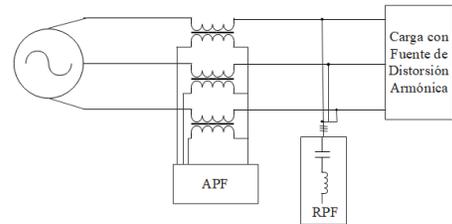


Figura 9. Sistema combinado de filtros pasivos paralelos y filtro de potencia activa en serie.

## 2.4 Balance de la Corriente Eléctrica Trifásica

En un sistema de distribución con corriente trifásica, las corrientes de carga idealmente deben ser iguales en magnitud en las tres fases de la red, y por consiguiente tendrán un desfase de  $120^\circ$  una

de otra. El objetivo para el sistema eléctrico debe ser mantener un nivel de balance aceptable a través de un equilibrio de cargas, de manera de poder ser considerado un sistema balanceado, caso contrario será desbalanceado o desequilibrado [1].

Para el caso de un desequilibrio, se pueden producir sobrecargas y calentamiento en conductores de alimentación, accionamiento de protecciones y circulación de corrientes por el neutro de la red. En distribución eléctrica, los transformadores de potencia que proveen de energía eléctrica a los alimentadores son los equipos más susceptibles a trabajar bajo desbalance [1], [35].

#### 2.4.1 Índices de Balance de Cargas

Las diferentes metodologías como base de medida al grado de equilibrio hacen referencia a los índices de desequilibrio "G" y el índice de balance o equilibrio de carga "LB". La minimización G descrito en (9), también LB descrito en las ecuaciones (12) y (13) es el objetivo de todo método de balanceo de cargas; disminuir el valor de estos índices implica disminuir pérdidas. Para el caso de cálculo del índice de desequilibrio de corriente G, se entiende que el desequilibrio actual es diferente entre las fases trifásicas [12], a lo cual:

$$\bar{I} = \left( \frac{I_1 + I_2 + I_3}{3} \right) \quad (8)$$

$$G = \sqrt{\frac{(\bar{I} - I_1)^2 + (\bar{I} - I_2)^2 + (\bar{I} - I_3)^2}{3}} \quad (9)$$

$$G^2 = \frac{1}{6} [(I_1 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_3)^2] \quad (10)$$

$$F = (I_1 - I_2)^2 + (I_1 - I_3)^2 + (I_2 - I_3)^2 \quad (11)$$

Donde,  $I_{1,2,3}$ =corriente trifásica

Para el caso del índice de balance de carga LB se tiene como la medición de cuánto se puede cargar una rama sin exceder la capacidad nominal establecida para esa rama o ramas [1].  $LB_i$  (12) está referida al balance de carga sobre una barra o bus,  $LB_{sistema}$  de la ecuación (13) viene a ser el balance de carga para todo el sistema tomando en cuenta todas las barras.

$$LB_i = \frac{S_i}{S_i^{max}} = \frac{\sqrt{Pi^2 + Qi^2}}{S_i^{max}} \quad (12)$$

$$LB_i = \frac{1}{nb} \sum_{i=1}^{nb} \frac{S_i}{S_i^{max}} \quad (13)$$

Donde,  $S_i$  es la potencia compleja que fluye por la rama  $i$  y  $S_i^{max}$  expresa la capacidad máxima de la rama  $i$ .

Para el caso de que las cargas no están equilibradas, los índices de equilibrio de carga de las ramas individuales diferirán notablemente, un sistema equilibrado generará que los índices de todas las ramas sean casi iguales. En la práctica es muy complicado hacer que todos los índices de las ramas " $LB_i$ ", sean exactamente iguales; tomando en consideración lo último mencionado, es posible que al reprogramar las cargas o reconfigurar los alimentadores se ajusten los índices de equilibrio de carga de las sucursales y, por lo tanto, se mejore el equilibrio en el sistema general [1].

Hay que tomar en cuenta en el cálculo, que el balance en comparación al inicial se mejorará solo si el valor de " $LB_{sistema}$ " es mayor que cero y se deteriora si es menor que cero [1]. Cuando sea positivo, se mejorará el equilibrio de carga (entonces hay una sucursal que puede ser candidata

para intercambio de sucursales y la sucursal que se abrirá debe ser la que optimice el  $LB_{sistema}$ , para el caso de aplicarse en intercambio de sucursales ) y, si es negativo, se deteriorará [19].

## 2.5 Demanda eléctrica residencial

La energía eléctrica demandada por el área residencial equivale al 30% de la demanda mundial total, los picos en esta zona de consumo son significativos desde el punto de vista de la demanda general de consumo. Pueden afectar en la eficiencia y al ser cargas monofásicas podrían generar problemas en el correcto balance de corriente y/o repartición de cargas en la red [35].

Es mencionable que la demanda de este sector trae un nivel de incertidumbre en su comportamiento como se observa en la figura 10, siendo ejemplo del comportamiento del consumo eléctrico en el sector residencial en Brasil [35] y muy parecida al de otros países.

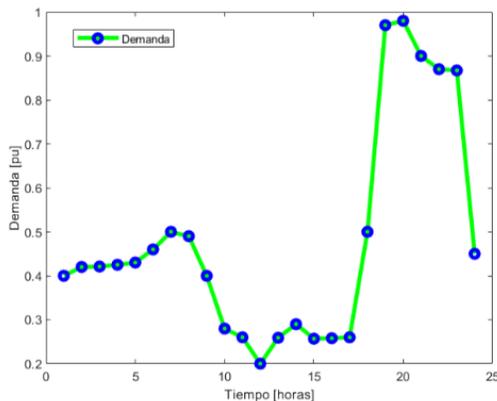


Figura 10. Curva de demanda eléctrica media para el sector residencial [35].

## 2.6 Flujo de Potencia en Sistemas Radiales

Los flujos de potencia en sistemas eléctricos pueden ser monofásicos o trifásicos independientemente del método utilizado, aproximan voltajes (módulo y

ángulo) en cada nodo, transferencia de potencias activa y reactiva en líneas y transformadores, así como las pérdidas de potencia.

Los flujos de potencia monofásicos se utilizan en sistemas balanceados, mientras que los de tipo trifásico en sistemas desbalanceados, ósea se ejecuta el cálculo por cada fase para encontrar los parámetros mencionados.

Sobre los sistemas radiales el flujo de potencia es en una dirección, al haber una sola fuente de alimentación, además la transferencia de potencia es relativamente pequeña por estar a nivel de distribución. A diferencia de la resolución de flujos de potencia en transmisión que considera balance perfecto de carga, en distribución es notable un grado de desbalance que debe ser considerado [36].

### 2.6.1 Método de Flujo de Potencia por Newton-Raphson

Es un método muy reconocido y utilizado en sistemas radiales y mallados por su alto grado de convergencia en tiempos menores en comparación a otros métodos tradicionales. Se basa en la expansión de una función no lineal en Series de Taylor, truncándola en la primera derivada, razón por la cual es un proceso iterativo. Cabe reiterar que para el análisis del flujo de potencia en sistemas radiales, los desequilibrios ya no son despreciables, la transposición es diferente a comparación de transmisión, la relación X/R, el valor de R en las impedancias no tienen valores despreciables para el cálculo de la Y de barra [36]–[41].

La resolución de esta metodología se logra siguiendo los siguientes pasos:

-Obtener información de impedancias, voltajes, cargas, potencias generadas, del sistema.

-Cálculo de Y de barra por fase.

Asignar una barra slack, voltajes máximos y mínimos aceptables en las barras.

-Cálculo de potencia activa (14) y reactiva (15).

$$P_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) \quad (14)$$

$$Q_i = v_i \sum_{j=1}^n v_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (15)$$

Tal que,  $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

-Calculo la matriz Jacobiana (16).

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

$$[J] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Para el cálculo de los parámetros de la matriz Jacobiana fuera de la diagonal se emplea (18), (19), (20) y (21).

$$H_{ij} = v_i v_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (18)$$

$$N_{ij} = -v_i v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) \quad (19)$$

$$M_{ij} = v_i v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) \quad (20)$$

$$L_{ij} = -v_i v_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (21)$$

En cambio, para la determinación de los parámetros de la matriz Jacobiana en la diagonal se usa (22), (23), (24) y (25).

$$H_{ii} = v_i^2 B_{ij} + Q_i \quad (22)$$

$$N_{ii} = -v_i^2 G_{ij} - P_i \quad (23)$$

$$M_{ii} = v_i^2 G_{ij} - P_i \quad (24)$$

$$L_{ii} = v_i^2 B_{ij} - Q_i \quad (25)$$

Tal que,

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (26)$$

-Cálculo de variaciones de potencia P y Q

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,cal} \quad (27)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,cal} \quad (28)$$

En términos combinados

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - v_i \sum_{j=1}^n v_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \text{sen} \theta_{ij}) \quad (29)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - v_i \sum_{j=1}^n v_j (G_{ij} \text{sen} \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \quad (30)$$

-Cálculo de ángulos y voltajes a partir del despeje de (26)

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = -[J]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (31)$$

Cálculo de corrección de voltaje y ángulo

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \Delta \theta^k \quad (32)$$

$$v^{k+1} = v^k (1 + \Delta v / v)^k \quad (33)$$

### 3 Discusión de la Metodología y Formulación del Problema

El desbalance de corrientes trifásicas se origina por el comportamiento de las cargas, por lo tanto, el objeto de interés para la investigación es la etapa de distribución; el resto de etapas del sistema eléctrico (generación y transmisión) se los toma como ideales y con operación normal. El principio para el balance y/o equilibrio de carga por MVDC se detalla en la figura 11, que se tomó en cuenta para el desarrollo de este trabajo. Teorizando que un sistema o subsistema MVDC tiene la capacidad de amortiguar desbalances; el principio básico va de la mano de tomar la potencia necesaria de un bus de DC a

media tensión para alimentación de cargas monofásicas o bifásicas por medio de inversores.

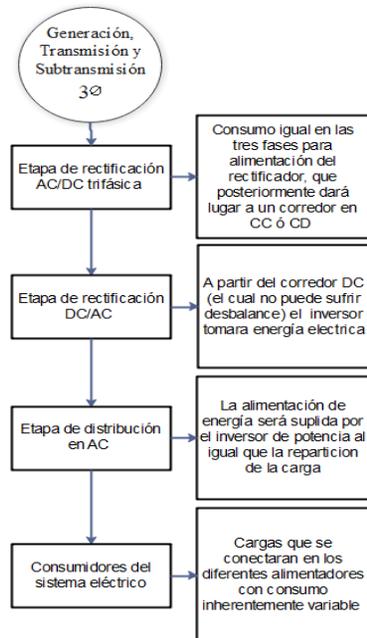


Figura 11. Etapas para el balance de cargas por medio de MVDC.

### 3.1 Caso estudio modelo MVDC

El modelo observado en la figura 12, es aplicable dentro de una subestación de distribución, basándose en incluir un

rectificador e inversor trifásicos, posterior transformador de potencia con el objetivo de balance de la carga. La ventaja principal es conservar los actuales equipos que trabajan en baja tensión como es el caso de los transformadores convencionales de poste y demás equipos.

El modelo base a partir de MVDC que se propone debe ser capaz de cumplir el objetivo propuesto de mejorar el balance de corriente y criterios de optimización de recursos, que pueden ser minimización de costos de implementación, minimizar el desbalance de la red de distribución; entre otras.

Como consideración a tener en cuenta en el modelo son las cargas industriales y comerciales de zonas productivas de relativa alta potencia; al ser normalmente cargas del tipo trifásico, no tienen notables problemas de desbalance en corriente a lo que no afectan al sistema. Se tomaría una derivación normal previo a la rectificación AC/DC sin ninguna modificación para alimentadores de áreas industriales y comerciales.

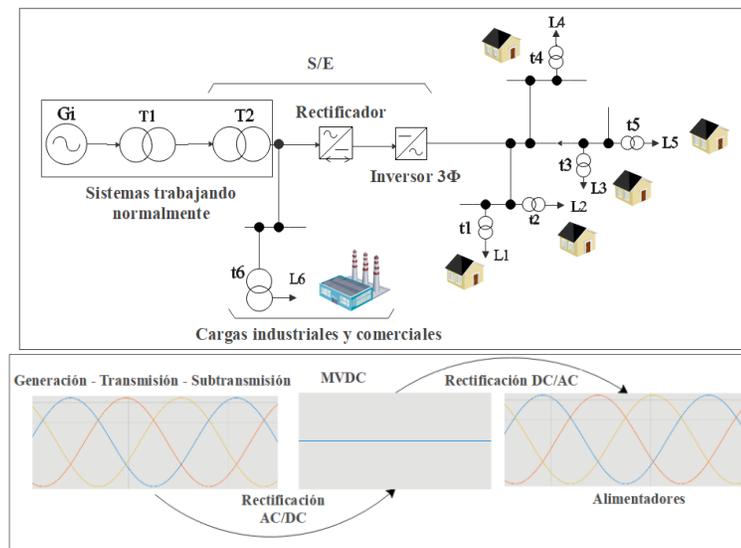


Figura 12. a) Diagrama para modelo caso estudio MVDC.  
b) Formas de onda de voltaje o corriente en las distintas etapas del sistema.

## 4 Análisis de Resultados

Los resultados se han ordenado de manera que se especifique un detalle del sistema base MVDC simulado; la afectación en calidad de voltaje y frecuencia por la entrada del sistema MVDC pues cuenta con equipos de operación no lineales; una comparativa del trabajo de MVDC para equilibrio de la corriente R-S-T en frente a un sistema normal; pruebas para diferentes casos de estudio del modelo MVDC, y la aplicación en el sistema de prueba IEEE de 33 buses para distribución. El análisis se refleja en las condiciones operativo previo y después de la implementación de MVDC, con criterio en el cumplimiento de objetivos de equilibrio y la no afectación a la calidad del sistema eléctrico (voltaje y frecuencia).

### 4.1 Sistema Base MVDC simulado

Se ha tomado en consideración un SEP previo al sistema de balance MVDC voltajes en media y frecuencia (60 Hz), figura 13. En el modelo propuesto se ha implementado por medio de un rectificador e inversor trifásico de tecnología IGBT que da menor aportación de armónicas en comparación a las tecnologías tradicionales (mediante diodos). Para el rectificador e inversor se implementó control por voltaje para cada equipo, al ser necesario garantizar un nivel de tensión por concepto de calidad. En el control de la distorsión armónica de los convertidores, se ha implementado pasivos LC como se puede ver en la figura 14. Manteniendo una distorsión dentro del límite del 5% antes y después del sistema propuesto en voltaje o corriente.

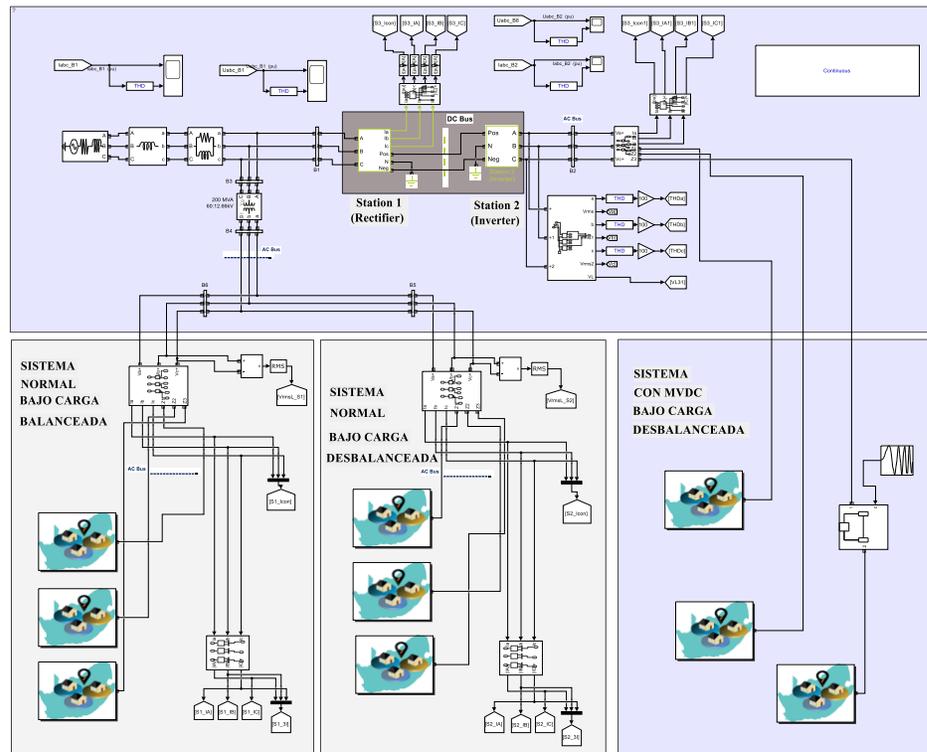


Figura 13. Diagrama de bloques del sistema implementado en Matlab Simulink para pruebas del modelo MVDC.

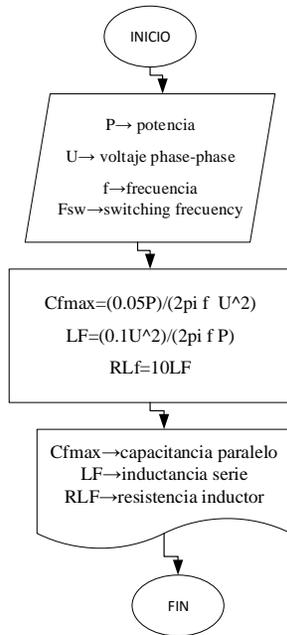


Figura 14. Algoritmo matemático para filtro LC de un inversor.

#### 4.1.1 Afectación en calidad

Este apartado aborda la importante que la entrada de cualquier sistema propuesto, en este caso MVDC al sistema eléctrico no genere problemas ya sea en frecuencia y tensión, tanto a las cargas que alimente y en aguas atrás que es el SEP. La figura 15 presenta los puntos de referencia de medida, para abordar la no afectación en calidad por parte del sistema MVDC.

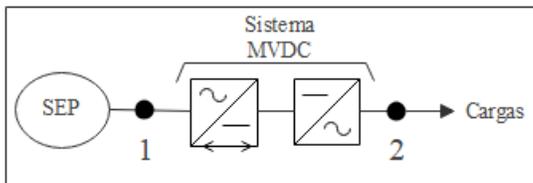


Figura 15. Puntos de referencia como interés en salvaguardar la calidad.

Lo más crítico en afectación a calidad en un sistema eléctrico que incluya a MVDC es la rectificación, que produce altos grados de distorsión armónica, por lo que es necesario filtros. La distorsión puede llegar a diferir dependiendo del diseño de filtros aplicados, que para esta

investigación se han usado filtros pasivos, conservando la forma sinusoidal pura de la onda de tensión, su magnitud y frecuencia.

Del punto de referencia 1 visto en la figura 16, la calidad global del SEP no debe tener perjuicio por MVDC. Para tal fin, la incorporación de filtros tiene el efecto de atenuación de armónicos por la múltiple rectificación, por lo tanto, no muestra efectos negativos en el SEP en el cual se conecte el sistema. El voltaje como muestra la figura 17 no presenta diferencias de amplitudes, ni distorsión armónica, al solo haber un THD ≈ 0.04%, por lo tanto, la frecuencia tampoco se ve afectada.

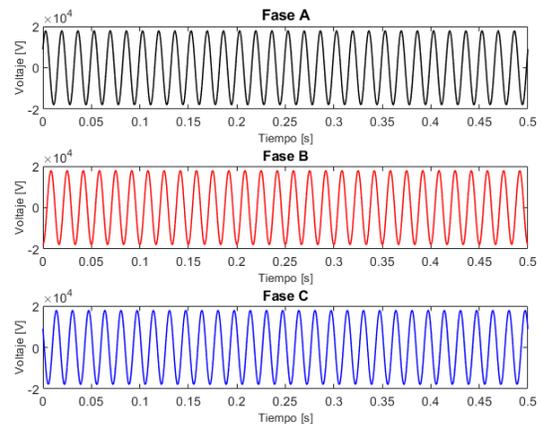


Figura 16. Voltaje entrante al sistema MVDC.

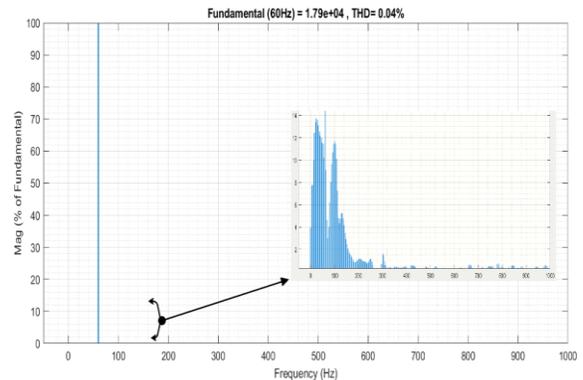


Figura 17. Distorsión armónica del voltaje desde el punto de vista del SEP.

Desde el punto de vista de calidad para el consumidor visto en el punto de

referencia 2 de la figura 15, el voltaje y frecuencia no se ven afectados considerablemente, como se puede apreciar en la figura 18, sin embargo, hay grado de distorsión,  $THD \approx 2.48\%$ , pero siendo aceptable, pues no supera un THD del 5% que se rige dentro del límite de calidad como se observa en la figura 19.

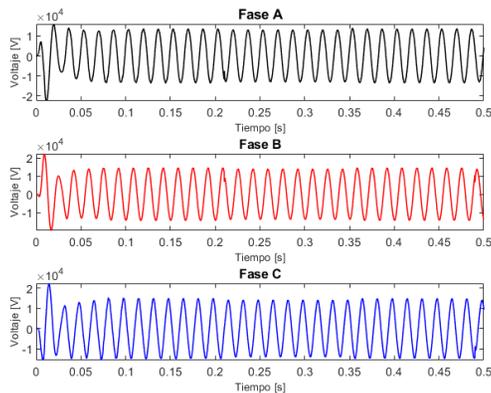


Figura 18. Voltaje desde el punto de vista del consumidor.

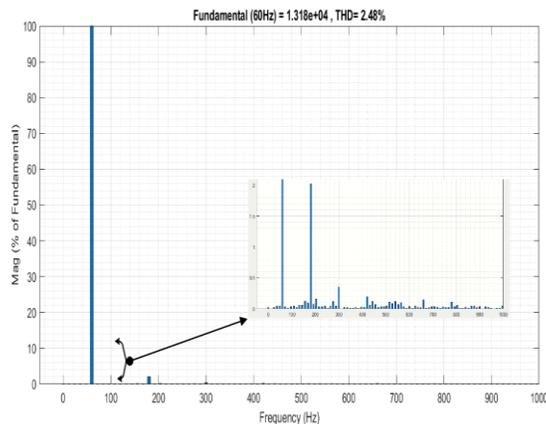


Figura 19. Distorsión armónica del voltaje desde el punto de vista del consumidor.

En síntesis las figuras 16, 17, siendo de gran importancia desde el punto de vista del SEP (no afectación en voltaje y frecuencia en aguas atrás del sistema MVDC), y figuras 18, 19, siendo de importancia para el consumidor final (no afectación en la calidad de energía eléctrica que recibe), muestran que es posible la entrada de MVDC en el sistema eléctrico de distribución sin afectación de

calidad, siempre y cuando se utilicen filtros adecuados, que en este caso fueron del tipo pasivo calculados con el algoritmo de la figura 13 y análisis de Fourier.

#### 4.1.2 Comparativa de balance preliminar de corriente por modelo normal y con MVDC

La corriente consumida por la carga residencial y que pasa por el modelo estudiado tiene un grado de relevancia alto en el objetivo de estudio, tanto en distorsión armónica (afectación a la frecuencia) y balance, ya que el SEP puede verse afectado por estas problemáticas.

Tomando en cuenta un sistema normal, representado en la figura 20 parte (a), y obviando que tuviere algún compensador de alguna naturaleza para el equilibrio de la carga, la corriente trifásica se muestra en la figura 20 parte (b), representando un claro desequilibrio y es lo que afectaría aguas atrás del sistema eléctrico.

Los resultados preliminares de un sistema aplicado MVDC mostrado en la figura 20 parte (c), dan una buena convergencia de equilibrio de las corrientes R-S-T, evidenciado en la figura 20 parte (d).

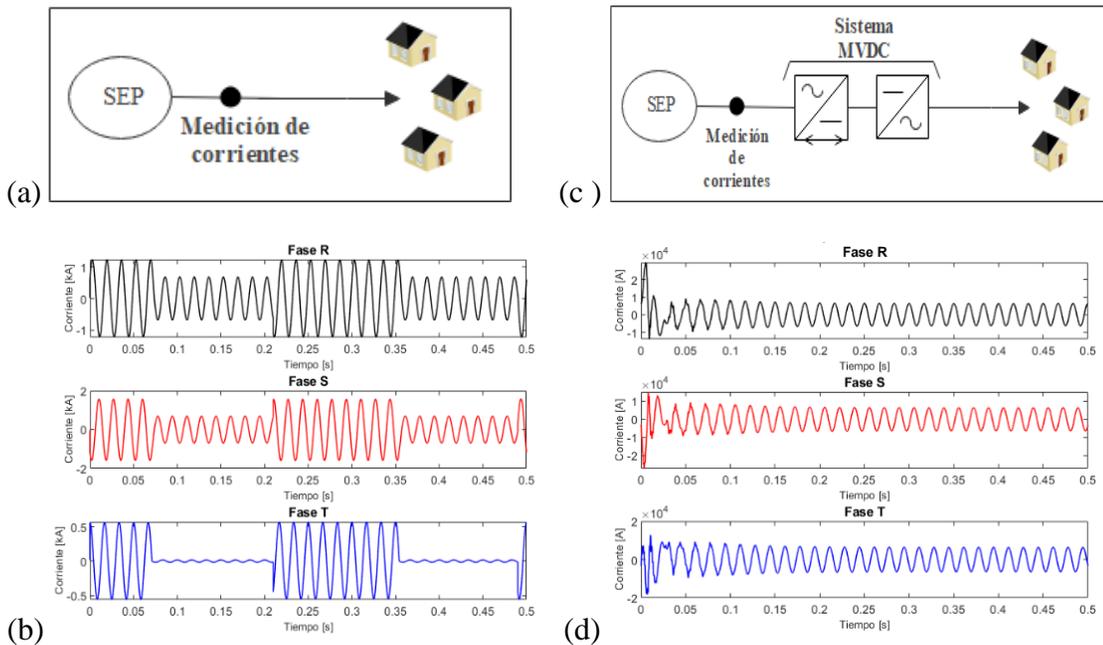


Figura 20. Comparativa de un sistema normal y con MVDC frente a desbalance de corriente: (a) Medición de corrientes en sistema normal, (b) Corriente trifásica con desequilibrio por cargas dinámicas en un sistema normal, (c) Medición de corrientes en sistema con MVDC, (d) Corriente balanceada por efecto del sistema MVDC .

La figura 21, es la representación de una relativa baja tasa de distorsión armónica, con un  $THD \approx 2.48\%$ . en corriente que atraviesa al sistema MVDC, y que se ha logrado que sea puramente sinusoidal pese a tener equipos con comportamiento no lineal.

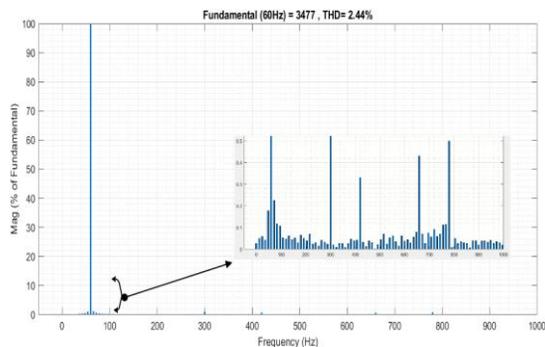


Figura 21. Distorsión armónica de la corriente entrante al sistema MVDC.

La mejora de balance de corriente mostrada en la figura 20 parte (b), en comparativa de la corriente mostrada en la figura 20 parte (d), es la respuesta

preliminar de efectividad de introducir un sistema MVDC para corregir el equilibrio de corriente en las tres fases.

#### 4.1.3 Primera Prueba en el Equilibrio de la demanda

En términos reales no se espera que la demanda permanezca estacionaria, el desequilibrio es algo inherente en las redes radiales; se ha simulado en Matlab-Simulink para escrutar la validez de la metodología propuesta a partir de cargas randómicas mediante el pseudocódigo “randi([Pmin Pmax],1)”, y la desconexión como conexión de la carga por breakers programados.

La figura 22 muestra el lugar de medición, y las corrientes en cada una de sus fases trifásicas R-S-T. Se aprecia un desbalance ocasionado intencionalmente y es notable observar una buena adaptabilidad del modelo a la dinámica de la carga por acción de los filtros, pues se

observan ondas sinusoidales puras de la corriente.

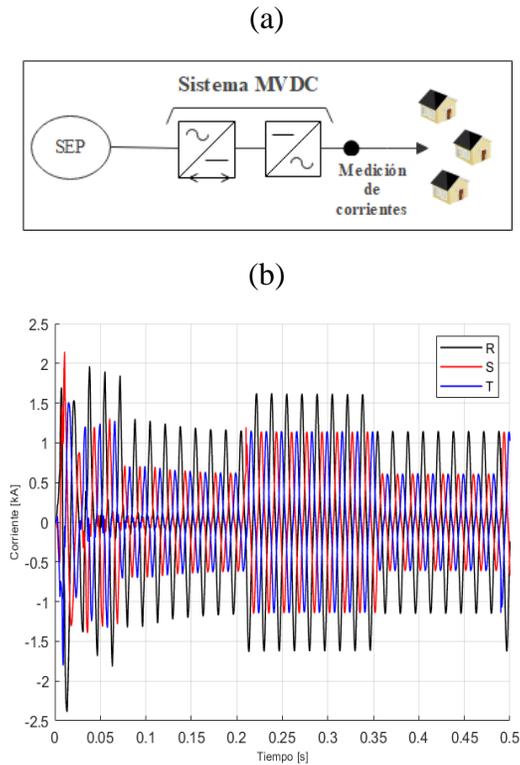


Figura 22. Corriente post MVDC, primera prueba: (a) Medición de corriente, (b) Corriente con evidente desbalance.

En la figura 23 parte a y b, se observa que el sistema MVDC implementado ejecuta efectivamente el mejoramiento del balance de la corriente, que fue el objetivo general de la investigación, al igual que la tabla 2 que da una muestra los resultados del equilibrio de la corriente trifásica. Ya no se observa el desbalance crítico presentado en la figura 22, por acción de la lógica planteada previamente en la figura 11. También, aparecen ciertos desbalances momentáneos producto de la convergencia inicial del sistema hasta llegar a estabilizarse, y pueden llegarse a ver en la tabla 2.

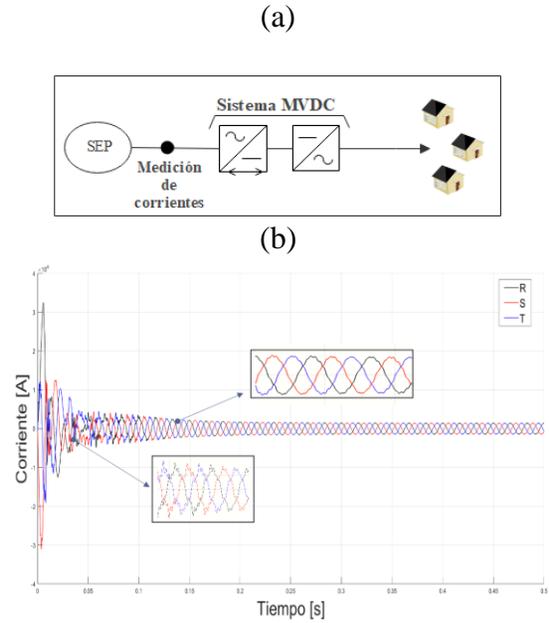


Figura 23. Corriente previo MVDC, primera prueba: (a) Medición de corriente, (b) Corriente balanceada por efecto de MVDC.

Los datos de la tabla 2 y también de la siguiente tabla 3 de estado de balance, se analizan de manera que un equilibrio de corriente efectivo dicta que:

- En un equilibrio perfecto la magnitud de las corrientes en las tres fases debe ser igual.
- El ángulo de desfase entre corrientes (R-S, R-T, S-T) debe ser  $120^\circ$ , por lo tanto la suma de los tres desfases será  $360^\circ$ .

Los datos mostrados en la tabla 2, son una pequeña muestra de cerca de 250000 datos obtenidos de las corrientes por cada fase, de los cuales se han tomado por azar para presentarlos y analizar el sistema.

Tabla 2: Muestra de estado de balance de carga en primera prueba.

| Fase R   |                 | Fase S   |                 | Fase T   |                 | $\Sigma \alpha-\Theta + \alpha-\delta $ |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|---|
| IR       | Ángulo $\alpha$ | IS       | Ángulo $\Theta$ | IT       | Ángulo $\delta$ |   |
| 1,45E+03 | 89,40           | 1,45E+03 | -30,51          | 1,45E+03 | -150,64         | <b>359,95</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,25           | 1,46E+03 | -30,73          | 1,46E+03 | -150,80         | <b>360,03</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,35           | 1,43E+03 | -30,83          | 1,43E+03 | -150,53         | <b>360,06</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,38           | 1,44E+03 | -30,67          | 1,44E+03 | -150,71         | <b>360,13</b>                           |
| 1,55E+03 | 89,49           | 1,56E+03 | -30,36          | 1,56E+03 | -150,62         | <b>359,96</b>                           |
| 2,87E+03 | 88,48           | 2,91E+03 | -29,50          | 2,98E+03 | -151,15         | <b>357,61</b>                           |
| 2,30E+03 | 80,84           | 2,77E+03 | -36,00          | 2,68E+03 | -166,05         | <b>363,74</b>                           |
| 2,61E+03 | 88,71           | 2,64E+03 | -30,62          | 2,65E+03 | -151,45         | <b>359,49</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,36           | 1,43E+03 | -30,73          | 1,43E+03 | -150,52         | <b>359,96</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,44           | 1,45E+03 | -30,56          | 1,45E+03 | -150,71         | <b>360,17</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,24           | 1,44E+03 | -30,74          | 1,44E+03 | -150,79         | <b>360,02</b>                           |
| 2,96E+03 | 90,77           | 2,80E+03 | -25,97          | 3,02E+03 | -144,97         | <b>352,48</b>                           |
| 2,54E+03 | 78,85           | 2,85E+03 | -42,40          | 2,66E+03 | -167,58         | <b>367,67</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,34           | 1,44E+03 | -30,60          | 1,44E+03 | -150,70         | <b>359,97</b>                           |
| 1,89E+03 | 89,35           | 1,87E+03 | -30,29          | 1,89E+03 | -150,05         | <b>359,04</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,33           | 1,44E+03 | -30,82          | 1,43E+03 | -150,72         | <b>360,20</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,29           | 1,43E+03 | -30,88          | 1,43E+03 | -150,65         | <b>360,10</b>                           |
| 1,67E+03 | 89,38           | 1,67E+03 | -30,34          | 1,68E+03 | -150,59         | <b>359,68</b>                           |
| 1,75E+03 | 89,45           | 1,76E+03 | -30,30          | 1,76E+03 | -150,77         | <b>359,97</b>                           |
| 1,57E+03 | 89,56           | 1,58E+03 | -30,47          | 1,58E+03 | -150,70         | <b>360,29</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,19           | 1,45E+03 | -30,78          | 1,45E+03 | -150,90         | <b>360,06</b>                           |
| 1,73E+03 | 89,44           | 1,72E+03 | -30,55          | 1,72E+03 | -150,23         | <b>359,66</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,33           | 1,45E+03 | -30,80          | 1,44E+03 | -150,94         | <b>360,40</b>                           |
| 2,00E+03 | 89,57           | 2,02E+03 | -30,28          | 2,02E+03 | -150,97         | <b>360,40</b>                           |
| 1,53E+03 | 89,06           | 1,53E+03 | -30,63          | 1,54E+03 | -150,60         | <b>359,35</b>                           |
| 1,50E+03 | 89,30           | 1,50E+03 | -30,71          | 1,50E+03 | -150,62         | <b>359,94</b>                           |
| 1,70E+03 | 89,80           | 1,71E+03 | -30,42          | 1,70E+03 | -150,60         | <b>360,62</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,32           | 1,45E+03 | -30,66          | 1,45E+03 | -150,83         | <b>360,13</b>                           |
| 1,45E+03 | 89,39           | 1,45E+03 | -30,72          | 1,45E+03 | -150,73         | <b>360,24</b>                           |
| 2,04E+03 | 88,99           | 2,03E+03 | -30,35          | 2,06E+03 | -150,40         | <b>358,74</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,35           | 1,44E+03 | -30,71          | 1,44E+03 | -150,71         | <b>360,12</b>                           |
| 1,47E+03 | 89,18           | 1,48E+03 | -30,56          | 1,48E+03 | -150,86         | <b>359,79</b>                           |
| 1,54E+03 | 89,46           | 1,54E+03 | -30,46          | 1,54E+03 | -150,72         | <b>360,10</b>                           |
| 1,45E+03 | 89,43           | 1,45E+03 | -30,63          | 1,45E+03 | -150,74         | <b>360,24</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,50           | 1,45E+03 | -30,50          | 1,46E+03 | -150,34         | <b>359,83</b>                           |
| 2,83E+03 | 89,42           | 2,84E+03 | -30,28          | 2,85E+03 | -150,56         | <b>359,69</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,30           | 1,44E+03 | -30,85          | 1,43E+03 | -150,72         | <b>360,17</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,17           | 1,46E+03 | -30,60          | 1,46E+03 | -150,73         | <b>359,68</b>                           |
| 1,49E+03 | 89,29           | 1,49E+03 | -30,78          | 1,49E+03 | -150,67         | <b>360,03</b>                           |
| 1,45E+03 | 89,39           | 1,45E+03 | -30,54          | 1,45E+03 | -150,64         | <b>359,97</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,27           | 1,44E+03 | -30,72          | 1,44E+03 | -150,72         | <b>359,98</b>                           |
| 1,71E+03 | 89,43           | 1,71E+03 | -30,19          | 1,72E+03 | -150,35         | <b>359,39</b>                           |
| 2,18E+03 | 89,43           | 2,15E+03 | -30,63          | 2,16E+03 | -149,87         | <b>359,35</b>                           |
| 2,44E+03 | 10,59           | 2,08E+03 | -30,29          | 1,72E+03 | -131,03         | <b>182,50</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,49           | 1,45E+03 | -30,49          | 1,46E+03 | -150,34         | <b>359,82</b>                           |
| 2,87E+03 | 89,41           | 2,90E+03 | -27,22          | 3,03E+03 | -149,38         | <b>355,41</b>                           |
| 2,19E+03 | 89,77           | 2,17E+03 | -30,68          | 2,17E+03 | -150,11         | <b>360,33</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,40           | 1,45E+03 | -30,49          | 1,46E+03 | -150,48         | <b>359,76</b>                           |
| 2,84E+03 | 89,54           | 2,84E+03 | -30,27          | 2,85E+03 | -150,51         | <b>359,86</b>                           |
| 1,48E+03 | 89,36           | 1,48E+03 | -30,64          | 1,48E+03 | -150,64         | <b>360,01</b>                           |
| 2,94E+03 | 86,06           | 2,89E+03 | -33,88          | 2,92E+03 | -152,97         | <b>358,98</b>                           |
| 1,46E+03 | 89,28           | 1,46E+03 | -30,57          | 1,46E+03 | -150,75         | <b>359,88</b>                           |
| 1,92E+03 | 89,99           | 1,93E+03 | -30,55          | 1,91E+03 | -150,41         | <b>360,94</b>                           |
| 2,37E+03 | 89,53           | 2,35E+03 | -29,85          | 2,38E+03 | -149,75         | <b>358,67</b>                           |
| 1,70E+03 | 89,56           | 1,69E+03 | -30,65          | 1,69E+03 | -150,23         | <b>360,00</b>                           |
| 1,44E+03 | 89,30           | 1,44E+03 | -30,58          | 1,44E+03 | -150,56         | <b>359,73</b>                           |
| 2,86E+03 | 89,16           | 2,93E+03 | -29,15          | 2,97E+03 | -151,11         | <b>358,57</b>                           |
| 1,45E+03 | 89,33           | 1,45E+03 | -30,49          | 1,46E+03 | -150,56         | <b>359,71</b>                           |
| 1,88E+03 | 89,39           | 1,87E+03 | -30,12          | 1,89E+03 | -150,16         | <b>359,07</b>                           |
| 1,47E+03 | 89,27           | 1,47E+03 | -30,59          | 1,47E+03 | -150,73         | <b>359,86</b>                           |

#### 4.1.4 Segunda Prueba en el Equilibrio de la demanda

De la misma forma que la primera prueba se expuso al modelo a un desbalance provocado por una carga dinámica que simula el comportamiento de los consumidores residenciales, como se observa en la figura 24 parte (a) y (b).

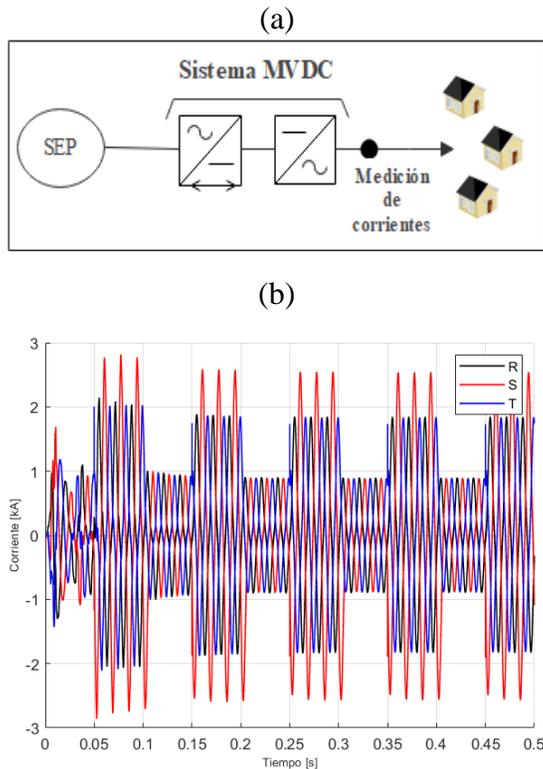


Figura 24. Corriente post MVDC, segunda prueba: (a) Medición de corriente, (b) Corriente con evidente desbalance.

La respuesta del modelo implementado MVDC como se ve en la figura 25 parte (a), responde correctamente equilibrando las corrientes al igual que en la primera prueba de desbalance, esto se lo evidencia en la figura 25 parte (b) y en la tabla 4.

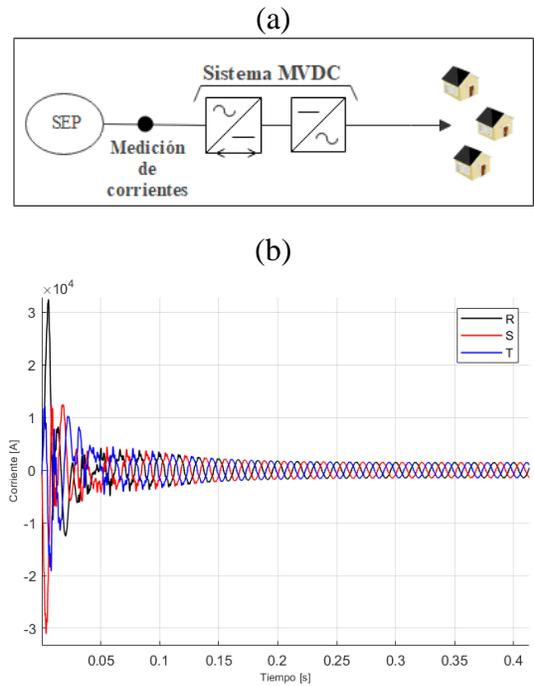


Figura 25. Corriente previo MVDC, segunda prueba: (a) Medición de corriente, (b) Corriente balanceada por efecto de MVDC.

La tabla 3. También es una muestra de los datos obtenidos, que refleja el estado de balance para el caso de estudio de la segunda prueba de equilibrio. Existen ciertos desbalances atribuidos al estado inicial de trabajo de MVDC hasta converger, y esta es una razón de que la media de desequilibrio no sea perfecta en el sistema, notado en la tabla 4.

Tabla 3: Muestra de estado de balance de carga en segunda prueba.

| Fase R   |                 | Fase S   |                 | Fase T   |                 | $\sum \alpha-\Theta + \alpha-\delta $ |
|----------|-----------------|----------|-----------------|----------|-----------------|---------------------------------------|
| IR       | Ángulo $\alpha$ | IS       | Ángulo $\Theta$ | IT       | Ángulo $\delta$ |                                       |
| 2,92E+03 | 91,20           | 2,97E+03 | -28,91          | 2,94E+03 | -149,69         | <b>361,01</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,42           | 1,44E+03 | -30,82          | 1,43E+03 | -150,55         | <b>360,21</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,34           | 1,44E+03 | -30,78          | 1,43E+03 | -150,70         | <b>360,16</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,17           | 1,45E+03 | -30,80          | 1,45E+03 | -150,91         | <b>360,06</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,20           | 1,44E+03 | -30,72          | 1,44E+03 | -150,86         | <b>359,99</b>                         |
| 2,77E+03 | 88,41           | 2,80E+03 | -30,78          | 2,82E+03 | -151,80         | <b>359,40</b>                         |
| 1,92E+03 | 89,79           | 1,90E+03 | -30,73          | 1,90E+03 | -150,08         | <b>360,40</b>                         |
| 1,46E+03 | 89,25           | 1,46E+03 | -30,73          | 1,46E+03 | -150,78         | <b>360,03</b>                         |
| 1,85E+03 | 89,43           | 1,83E+03 | -30,74          | 1,84E+03 | -150,14         | <b>359,74</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,13           | 1,44E+03 | -30,73          | 1,44E+03 | -150,71         | <b>359,69</b>                         |
| 2,86E+03 | 89,28           | 2,93E+03 | -28,57          | 2,99E+03 | -150,87         | <b>358,00</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,26           | 1,44E+03 | -30,61          | 1,44E+03 | -150,80         | <b>359,93</b>                         |
| 1,92E+03 | 89,78           | 1,94E+03 | -30,15          | 1,93E+03 | -150,59         | <b>360,30</b>                         |
| 1,66E+03 | 89,60           | 1,67E+03 | -30,61          | 1,66E+03 | -150,72         | <b>360,54</b>                         |
| 2,87E+03 | 90,50           | 2,95E+03 | -28,77          | 2,95E+03 | -150,42         | <b>360,18</b>                         |
| 1,51E+03 | 89,40           | 1,50E+03 | -30,68          | 1,50E+03 | -150,39         | <b>359,87</b>                         |
| 2,02E+03 | 89,11           | 2,03E+03 | -30,10          | 2,05E+03 | -150,67         | <b>358,99</b>                         |
| 2,29E+03 | 80,85           | 2,69E+03 | -32,82          | 2,74E+03 | -163,11         | <b>357,64</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,16           | 1,44E+03 | -30,74          | 1,44E+03 | -150,79         | <b>359,85</b>                         |
| 2,87E+03 | 89,98           | 2,97E+03 | -28,82          | 2,97E+03 | -151,11         | <b>359,89</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,39           | 1,44E+03 | -30,83          | 1,43E+03 | -150,68         | <b>360,27</b>                         |
| 2,06E+03 | 89,10           | 2,04E+03 | -30,54          | 2,06E+03 | -150,07         | <b>358,81</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,18           | 1,45E+03 | -30,71          | 1,45E+03 | -150,89         | <b>359,96</b>                         |
| 1,46E+03 | 89,07           | 1,45E+03 | -31,04          | 1,45E+03 | -150,87         | <b>360,04</b>                         |
| 1,52E+03 | 12,95           | 1,08E+03 | -76,36          | 1,88E+03 | 157,93          | <b>234,29</b>                         |
| 2,93E+03 | 86,53           | 2,86E+03 | -31,53          | 2,98E+03 | -151,26         | <b>355,86</b>                         |
| 1,86E+03 | 89,75           | 1,87E+03 | -30,31          | 1,86E+03 | -150,51         | <b>360,32</b>                         |
| 2,05E+03 | 88,99           | 2,03E+03 | -30,40          | 2,06E+03 | -150,29         | <b>358,68</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,29           | 1,44E+03 | -30,94          | 1,43E+03 | -150,74         | <b>360,27</b>                         |
| 2,53E+03 | 89,16           | 2,50E+03 | -30,46          | 2,53E+03 | -150,13         | <b>358,91</b>                         |
| 2,82E+03 | 88,79           | 2,80E+03 | -30,45          | 2,84E+03 | -150,37         | <b>358,40</b>                         |
| 2,19E+03 | 80,20           | 2,57E+03 | -29,19          | 2,77E+03 | -160,87         | <b>350,45</b>                         |
| 1,57E+03 | 89,57           | 1,58E+03 | -30,48          | 1,58E+03 | -150,70         | <b>360,31</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,36           | 1,44E+03 | -30,83          | 1,43E+03 | -150,72         | <b>360,27</b>                         |
| 2,88E+03 | 90,50           | 2,98E+03 | -28,75          | 2,96E+03 | -150,91         | <b>360,67</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,30           | 1,45E+03 | -30,79          | 1,45E+03 | -150,93         | <b>360,31</b>                         |
| 2,89E+03 | 89,19           | 2,95E+03 | -29,64          | 2,97E+03 | -151,32         | <b>359,35</b>                         |
| 2,92E+03 | 91,23           | 2,97E+03 | -28,94          | 2,94E+03 | -149,68         | <b>361,08</b>                         |
| 1,65E+03 | 89,19           | 1,64E+03 | -30,63          | 1,65E+03 | -150,47         | <b>359,48</b>                         |
| 1,45E+03 | 89,41           | 1,45E+03 | -30,70          | 1,45E+03 | -150,75         | <b>360,27</b>                         |
| 1,47E+03 | 89,30           | 1,47E+03 | -30,61          | 1,47E+03 | -150,82         | <b>360,04</b>                         |
| 2,98E+03 | 86,54           | 2,90E+03 | -33,80          | 2,92E+03 | -152,25         | <b>359,13</b>                         |
| 1,46E+03 | 89,23           | 1,46E+03 | -30,72          | 1,46E+03 | -150,81         | <b>359,98</b>                         |
| 2,94E+03 | 88,00           | 2,94E+03 | -33,33          | 2,88E+03 | -152,54         | <b>361,87</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,33           | 1,44E+03 | -30,93          | 1,43E+03 | -150,75         | <b>360,35</b>                         |
| 1,48E+03 | 89,37           | 1,48E+03 | -30,63          | 1,48E+03 | -150,65         | <b>360,01</b>                         |
| 1,57E+03 | 89,56           | 1,57E+03 | -30,67          | 1,57E+03 | -150,54         | <b>360,32</b>                         |
| 1,69E+03 | 89,35           | 1,68E+03 | -30,47          | 1,69E+03 | -150,31         | <b>359,47</b>                         |
| 1,57E+03 | 89,53           | 1,57E+03 | -30,67          | 1,57E+03 | -150,55         | <b>360,27</b>                         |
| 2,19E+03 | 90,11           | 2,21E+03 | -30,30          | 2,19E+03 | -150,48         | <b>361,00</b>                         |
| 1,45E+03 | 89,36           | 1,45E+03 | -30,42          | 1,46E+03 | -150,55         | <b>359,68</b>                         |
| 1,49E+03 | 89,23           | 1,49E+03 | -30,79          | 1,49E+03 | -150,68         | <b>359,92</b>                         |
| 2,71E+03 | 88,26           | 2,66E+03 | -31,95          | 2,68E+03 | -151,09         | <b>359,55</b>                         |
| 1,44E+03 | 89,28           | 1,44E+03 | -30,74          | 1,44E+03 | -150,74         | <b>360,04</b>                         |
| 2,19E+03 | 89,91           | 2,22E+03 | -30,01          | 2,21E+03 | -150,57         | <b>360,41</b>                         |
| 1,45E+03 | 89,32           | 1,45E+03 | -30,70          | 1,45E+03 | -150,84         | <b>360,18</b>                         |
| 1,91E+03 | 89,59           | 1,89E+03 | -30,64          | 1,89E+03 | -149,89         | <b>359,71</b>                         |
| 2,73E+03 | 88,41           | 2,70E+03 | -32,41          | 2,68E+03 | -151,56         | <b>360,78</b>                         |
| 2,19E+03 | 80,22           | 2,51E+03 | -27,81          | 2,78E+03 | -159,11         | <b>347,36</b>                         |
| 1,49E+03 | 89,21           | 1,48E+03 | -30,64          | 1,49E+03 | -150,59         | <b>359,66</b>                         |

De los resultados totales revisados en las pruebas de desequilibrio, y presentados como muestras a las tablas 2 y 3, se pudo determinar un indicador de desequilibrio de la corriente en un promedio del 3.5%, reflejado en la tabla 4, siendo muy aceptable.

Tabla 4: Índice de desequilibrio resumido en metodologías.

| Método de equilibrio de carga  | Estado   |          | % Índice G | Año  |
|--|----------|----------|------------|------|
|  | Dinámico | Estático |            |      |
| Método de búsqueda mediante intercambio de sucursal  |          | X        | 0.8        | 1989 |
| Algoritmo de optimización dinámica   | X        |          | 1.64       | 1995 |
| Método dinámico de salto de rana   | X        |          | 0.6        | 2005 |
| Enfoque de lógica difusa   |          | X        | 0.03       | 2007 |
| Equilibrio de carga mediante control de micro redes no síncronas                             | X        |          | 2          | 2017 |
| Estrategia de dimensionamiento y cambio de fase basado en algoritmo de murciélago modificado | X        |          | 5          | 2018 |
| Metodología MVDC   | X        |          | ≈3.5       |      |

## 4.2 Modelos de Prueba Sistema IEEE 33 Buses

En el sistema de distribución radial IEEE de 33 Buses, el nivel de tensión nominal en todos los buses es de 12,66kV, con límites de voltaje máximo y mínimo en un 10%. De ser necesario aumentar los niveles de tensión se podría colocar estratégicamente capacitores y/o aumentar los taps de los transformadores de poste en distribución según sea conveniente, para este trabajo se ha regido en los límites predeterminados del modelo IEEE. La figura 26 representa

el sistema IEEE de 33 buses implementado MVDC para objeto de estudio.

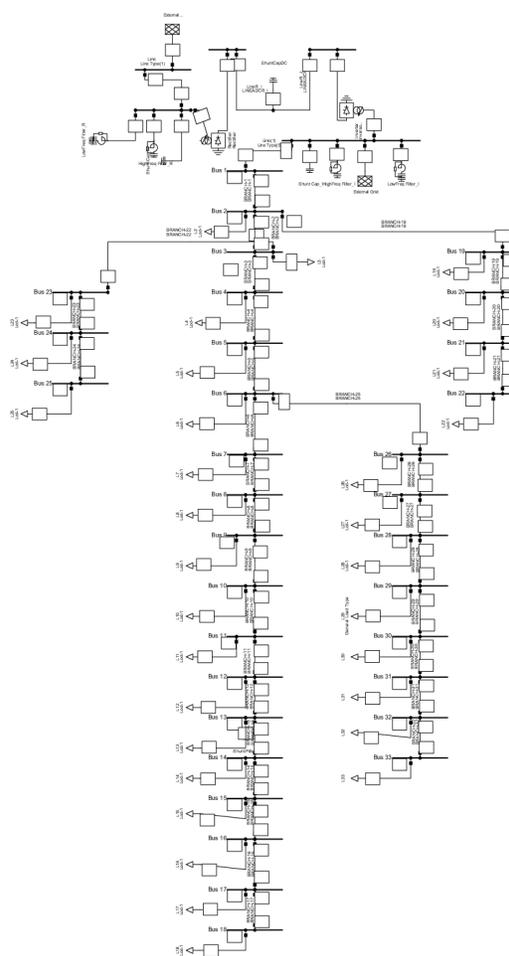


Figura 26. Sistema IEEE 33 Buses con sistema MVDC, DGSILENT.

En primeras instancias el sistema MVDC no afecta en el perfil de voltaje en los buses del modelo IEEE de 33 buses, al entregar la tensión requerida por la red, esto se refleja en la figura 27, con excepción de los buses 28, 29, 30, 31, 32 y 33 que reflejan caída de tensión. Sin embargo, no es una caída significativamente alta, pues hay una varianza alrededor del 0.34% respecto al modelo IEEE normal, de ser necesario se

podría colocar un capacitor para elevar el perfil de tensión.

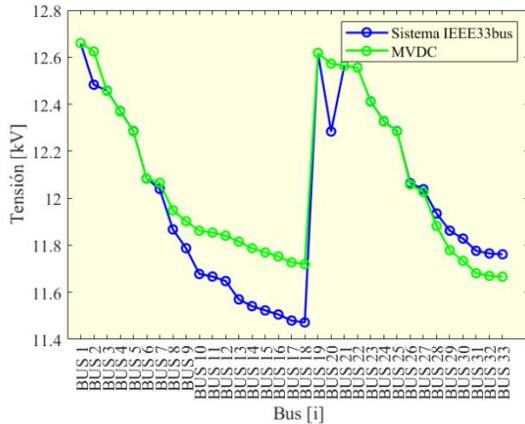


Figura 27. Perfil de tensión en sistema IEEE 33 Buses y con sistema MVDC, bajo condiciones iniciales de desequilibrio.

La tabla 5 y 6, son los resultados obtenidos de la potencia global asumida por cada bus en cada sistema, de modo de poder revisar el índice del balance de la carga LBi. Dando una referencia de como el balance de la corriente previo el sistema MVDC, y el ligero mejoramiento del perfil de tensión en la mayoría de buses, mejora la capacidad de que un bus pudiere asumir más carga, para ingreso de consumidores o por intercambio de ser necesario entre buses.

Tabla 5: Índice LBi para sistema IEEE33 buses con desbalance.

| BUS    | BAJO DESBALANCE |         |        | LBi   |
|--------|-----------------|---------|--------|-------|
|        | P[MW]           | Q[Mvar] | S[MVA] |       |
| Bus 1  | 3,889           | 1,917   | 4,336  | 0,342 |
| Bus 8  | 3,878           | 1,911   | 4,324  | 0,342 |
| Bus 29 | 3,372           | 1,667   | 3,762  | 0,297 |
| Bus 20 | 2,327           | 1,162   | 2,601  | 0,205 |
| Bus 21 | 2,192           | 1,074   | 2,441  | 0,193 |
| Bus 22 | 2,101           | 1,018   | 2,335  | 0,184 |
| Bus 24 | 1,102           | 0,528   | 1,222  | 0,097 |
| Bus 23 | 0,891           | 0,420   | 0,985  | 0,078 |
| Bus 25 | 0,686           | 0,317   | 0,756  | 0,060 |
| Bus 2  | 0,621           | 0,294   | 0,687  | 0,054 |
| Bus 3  | 0,560           | 0,274   | 0,623  | 0,049 |
| Bus 4  | 0,514           | 0,244   | 0,569  | 0,045 |
| Bus 5  | 0,451           | 0,207   | 0,497  | 0,039 |
| Bus 6  | 0,391           | 0,171   | 0,426  | 0,034 |
| Bus 19 | 0,270           | 0,091   | 0,285  | 0,023 |
| Bus 18 | 0,210           | 0,080   | 0,225  | 0,018 |
| Bus 14 | 0,150           | 0,060   | 0,162  | 0,013 |
| Bus 9  | 0,090           | 0,040   | 0,098  | 0,008 |

|                  |       |       |       |              |
|------------------|-------|-------|-------|--------------|
| Bus 7            | 0,361 | 0,161 | 0,395 | 0,031        |
| Bus 10           | 0,270 | 0,120 | 0,296 | 0,023        |
| Bus 11           | 0,180 | 0,080 | 0,197 | 0,016        |
| Bus 12           | 0,090 | 0,040 | 0,098 | 0,008        |
| Bus 13           | 0,936 | 0,455 | 1,041 | 0,082        |
| Bus 15           | 0,841 | 0,401 | 0,932 | 0,074        |
| Bus 16           | 0,420 | 0,200 | 0,465 | 0,037        |
| Bus 17           | 0,935 | 0,462 | 1,043 | 0,082        |
| Bus 26           | 0,873 | 0,436 | 0,976 | 0,077        |
| Bus 27           | 0,807 | 0,406 | 0,904 | 0,071        |
| Bus 28           | 0,743 | 0,383 | 0,836 | 0,066        |
| Bus 30           | 0,622 | 0,312 | 0,695 | 0,055        |
| Bus 31           | 0,420 | 0,210 | 0,470 | 0,037        |
| Bus 32           | 0,270 | 0,140 | 0,304 | 0,024        |
| Bus 33           | 0,060 | 0,040 | 0,072 | 0,006        |
| <b>LBsistema</b> |       |       |       | <b>0,080</b> |

Desde el punto de vista de cada bus, la carga circulante no puede exceder la capacidad total a la que se diseñó para trabajar. Si se compara el índice LBi de la tabla 6, con el LBi de la tabla 5 es ligeramente superior por 0.012. Que da muestra de una ligera mayor potencia disponible en algunos buses para trabajar sin riesgo a sobrecargas.

Tabla 6: Índice LBi para sistema IEEE33 buses con MVDC y desbalance.

| BUS    | BAJO DESBALANCE |         |        | LBi    |
|--------|-----------------|---------|--------|--------|
|        | P[MW]           | Q[Mvar] | S[MVA] |        |
| Bus 1  | 3,9570          | 2,4435  | 4,6506 | 0,3673 |
| Bus 8  | 0,8888          | 0,4202  | 0,9831 | 0,0777 |
| Bus 29 | 0,7457          | 0,8838  | 1,1564 | 0,0913 |
| Bus 20 | 0,2701          | 0,1202  | 0,2957 | 0,0234 |
| Bus 21 | 0,1800          | 0,0801  | 0,1970 | 0,0156 |
| Bus 22 | 0,0900          | 0,0400  | 0,0985 | 0,0078 |
| Bus 24 | 0,8413          | 0,4010  | 0,9320 | 0,0736 |
| Bus 23 | 0,9364          | 0,4551  | 1,0412 | 0,0822 |
| Bus 25 | 0,4200          | 0,2000  | 0,4652 | 0,0367 |
| Bus 2  | 3,9445          | 2,4372  | 4,6367 | 0,3663 |
| Bus 3  | 3,4306          | 2,1893  | 4,0697 | 0,3215 |
| Bus 4  | 2,3609          | 1,6817  | 2,8986 | 0,2290 |
| Bus 5  | 2,2120          | 1,5921  | 2,7254 | 0,2153 |
| Bus 6  | 2,1134          | 1,5288  | 2,6084 | 0,2060 |
| Bus 19 | 0,3610          | 0,1609  | 0,3952 | 0,0312 |
| Bus 18 | 0,0900          | 0,0400  | 0,0985 | 0,0078 |
| Bus 14 | 0,3910          | 0,1709  | 0,4267 | 0,0337 |
| Bus 9  | 0,6845          | 0,3171  | 0,7544 | 0,0596 |
| Bus 7  | 1,1007          | 0,5287  | 1,2211 | 0,0965 |
| Bus 10 | 0,6209          | 0,2945  | 0,6872 | 0,0543 |
| Bus 11 | 0,5603          | 0,2743  | 0,6239 | 0,0493 |
| Bus 12 | 0,5144          | 0,2440  | 0,5694 | 0,0450 |
| Bus 13 | 0,4517          | 0,2069  | 0,4968 | 0,0392 |
| Bus 15 | 0,2706          | 0,0906  | 0,2854 | 0,0225 |
| Bus 16 | 0,2103          | 0,0804  | 0,2252 | 0,0178 |
| Bus 17 | 0,1501          | 0,0600  | 0,1616 | 0,0128 |
| Bus 26 | 0,9482          | 0,9723  | 1,3581 | 0,1073 |
| Bus 27 | 0,8849          | 0,9456  | 1,2951 | 0,1023 |
| Bus 28 | 0,8136          | 0,9107  | 1,2211 | 0,0965 |
| Bus 30 | 0,6218          | 0,8118  | 1,0226 | 0,0808 |

|        |        |                  |        |        |
|--------|--------|------------------|--------|--------|
| Bus 31 | 0,4202 | 0,2103           | 0,4699 | 0,0371 |
| Bus 32 | 0,2700 | 0,1400           | 0,3042 | 0,0240 |
| Bus 33 | 0,0600 | 0,0400           | 0,0721 | 0,0057 |
|        |        | <b>LBsistema</b> |        | 0,0920 |

## 5 Conclusiones

Por medio del escrutamiento de información aplicado en simulaciones, se ha logrado proponer un sistema eléctrico de distribución basado en incluir MVDC, para el balanceo de la corriente de la demanda residencial. De lo que el principal problema presente, ha sido la propia naturaleza de los equipos convertidores, que actúan como cargas no lineales. Hay una necesidad del diseño de filtros para controlar el problema de distorsión armónica, de modo que el modelo sea viable y aplicable.

Se ha dispuesto como comprobación de eficacia de balance, la comparativa entre un sistema normal y uno con MVDC, aplicado a demandas dinámicas y estocásticas que generen intencionalmente desequilibrios de corriente. El resultando da valides de balancear la corriente trifásica por cada línea a favor del sistema estudiado con MVDC. También hay que mencionar, que se ha observado desbalances transitorios en este modelo, y es por razón del sistema necesita converger en los tiempos iniciales de entrar en operación, para mantenerse estable el resto del tiempo.

El índice de balance de la carga muestra un ligero aumento del aprovechamiento de la potencia por cada bus, generando una mayor capacidad que se puede aprovechar, sin embargo, no es muy significativo alto pues ronda en una mejora del 0.012% a nivel de todo el sistema. Lo más apreciable es el índice de desequilibrio que muestra una drástica mejora en el equilibrio de la corriente de la demanda, que ronda el 3.5% siendo muy buen índice, pues un desequilibrio del 0% es lo perfecto.

La metodología tratada como la inserción de MVDC a modo de subsistema dentro de la red MVAC para el balance de demanda, esta queda abierta como una propuesta progresiva de implementación de sistemas completos de MVDC. El escalonar el sistema incurriría en amortiguar costos hasta lograr una red de distribución más robusta y la facilidad en la integración de nuevas tecnologías como la generación distribuida y el auto eléctrico.

### 5.1 Trabajos Futuros

Se recomendaría incurrir en la validez de aprovechamiento del bus DC en media tensión, para trabajar con inyección de energía por parte de generación en DC independiente de la naturaleza de este, también en el aprovechamiento del bus como fuente provisión de energía a electrolinerías para la movilidad eléctrica.

La distorsión armónica es la principal problemática dentro de sistemas MVDC, por lo que el proponer un algoritmo de diseño genérico de filtros sería muy factible.

## 6 Referencias

- [1] M. A. Kashem and V. Ganapathy, "Three-phase load balancing in distribution systems using index measurement technique," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 24, no. 1, pp. 31–40, 2002.
- [2] D. Carrión, E. García, J. W. González, I. A. Isaac, G. J. López, and R. Hincapié, "Método Heurístico de Ubicación Óptima de Centros de Transformación y Enrutamiento de Redes Eléctricas de Distribución," *Rev. T*, vol. 13, no. 1, 2017.
- [3] J. Zhang, M. Cui, H. Fang, and Y. He, "Two Novel Load-Balancing Platforms Using Common DC Buses," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 3, pp. 1099–1107, 2018.

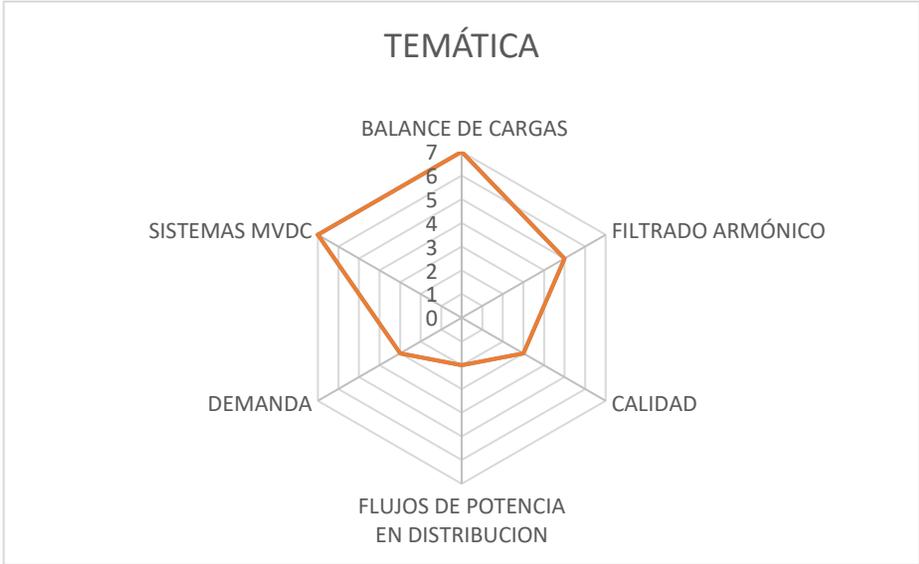
- [4] G. Salazar and D. Carrión, "Characterization and Modeling of the Efficiency of Photovoltaic Systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 8, pp. 2580–2586, 2015.
- [5] Whei-Min Lin and Hong-Chan Chin, "A current index based load balance technique for distribution systems," in *POWERCON '98. 1998 International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.98EX151)*, 1998, vol. 1, pp. 223–227.
- [6] D. Carrión, "Energy saving model through lighting management systems for residences," in *2013 Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2013, pp. 0–5.
- [7] M. R. Vuluvala and L. M. Saini, "Load balancing of electrical power distribution system: An overview," in *Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing, PICC 2018*, 2018, pp. 1–5.
- [8] F. Mosquera, "Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, 2020.
- [9] J. Palacios and D. F. Carrión Galarza, "Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 1–8, 2020.
- [10] S. Pinzón, D. Carrión, and E. Inga, "Optimal Transmission Switching Considering N-1 Contingencies on Power Transmission Lines," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. (in press), 2020.
- [11] D. Carrión, J. W. Gonzalez, I. A. Isaac, G. J. Lopez, and H. A. Cardona, "Load Characterization Based on Voltage and Current Phasorial Measurements in Micro-Grids," *2017 Int. Conf. Inf. Syst. Comput. Sci.*, pp. 1–6, 2017.
- [12] A. Eyni, "Load balancing in overhead power distribution network replaced with self-supporting cable," *20th Electr. Power Distrib. Conf. EPDC 2015*, no. April, pp. 203–206, 2015.
- [13] A. Sánchez and D. Carrión, "Modeling of the Behavior Power Flow on Transmission Lines Based on Voltage and Current Synchronopasors," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 16, no. 4, pp. 1142–1149, 2017.
- [14] T. Klayklueng, S. Dechanupaprittha, and P. Kongthong, "Analysis of unbalance Plug-in Electric Vehicle home charging in PEA distribution network by stochastic load model," in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*, 2015, pp. 394–398.
- [15] A. Águila Tellez, D. C. Carrión, and L. Ortiz Matos, "Analysis of power losses in the asymmetric construction of electric distribution systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 13, no. 7, pp. 2190–2194, 2015.
- [16] D. Carrión, E. Correa, and E. M. Garcia, "Predicción de la Demanda Eléctrica a Corto Plazo Mediante Cadenas de Markov y Monte Carlo," *RISTI - Rev. Iber. Sist. e Tecnol. Inf.*, no. E30, p. 241 527, 2019.
- [17] D. Salazar, Jair; García, Edwin; Carrión, "Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda," *I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. 0–6, 2020.
- [18] D. X. Morales, Y. Besanger, M. Toledo, and R. D. Medina, "Impact study of new loads and time of use schedule in the low voltage network," in *2016 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2016, pp. 1–6.
- [19] K. S. Kumar and T. Jayabarathi, "A novel power system reconfiguration for a distribution system with minimum load balancing index using bacterial foraging optimization algorithm," *Front. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 260–265, 2012.
- [20] G. Bathurst, G. Hwang, and L. Tejwani, "MVDC-the new technology for distribution networks," in *IET*

- Seminar Digest*, 2015, vol. 2015, no. CP654, pp. 1–5.
- [21] R. Zuelli *et al.*, “The impact of MVDC links on distribution networks,” in *2018 110th AEIT International Annual Conference, AEIT 2018*, 2018, pp. 1–5.
- [22] N. R. Butler *et al.*, “Undersea MVDC Power Distribution,” *2010 IEEE Int. Power Modul. High Volt. Conf.*, pp. 294–297, 2010.
- [23] A. Giannakis and D. Pefitsis, “MVDC Distribution Grids and Potential Applications: Future Trends and Protection Challenges,” *2018 20th Eur. Conf. Power Electron. Appl. EPE 2018 ECCE Eur.*, pp. 1–11, 2018.
- [24] F. K. Handhal and A. T. Rashid, “Load balancing in distribution system using heuristic search algorithm,” in *International Conference on Advances in Sustainable Engineering and Applications, ICASEA 2018 - Proceedings*, 2018, pp. 48–53.
- [25] W. Kong, K. Ma, and Q. Wu, “Three Phase Power Imbalance Decomposition into Systematic Imbalance and Random Imbalance,” *2018 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, p. 1.
- [26] J. J. Mesas, L. L. Monjo, L. Sainz, and J. Pedra, “Study of MVDC system benchmark networks,” *Proc. - 2015 Int. Symp. Smart Electr. Distrib. Syst. Technol. EDST 2015*, pp. 235–240, 2015.
- [27] M. Monadi, C. Koch-Ciobotaru, A. Luna, J. I. Candela, and P. Rodriguez, “A protection strategy for fault detection and location for multi-terminal MVDC distribution systems with renewable energy systems,” in *3rd International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2014*, 2014, pp. 496–501.
- [28] A. Musa, S. Rehan, L. Sabug, F. Ponci, and A. Monti, “Modeling and Design of Hybrid Distribution Network: Operational and Technical Features,” in *2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2017, pp. 1–6.
- [29] M. Schael, C. Sourkounis, A. Rogat, and C. Neumann, “Industrial electric grid evaluation regarding harmonics based on measurement data,” *2016 Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion, SPEEDAM 2016*, pp. 282–287, 2016.
- [30] N. Bianchi and M. Dai Pre, “Active power filter control using neural network technologies,” *IEE Proceedings-Electric Power Appl.*, vol. 150, no. 2, pp. 139–145, 2003.
- [31] L. Ren, N. Luo, C. Gong, and S. Yang, “Harmonics Suppression for Pulsed Power Loads for DC Power System,” *2018 IEEE Int. Conf. Electr. Syst. Aircraft, Railw. Sh. Propuls. Road Veh. Int. Transp. Electr. Conf. ESARS-ITEC 2018*, pp. 1–6, 2019.
- [32] X. Sun, R. Han, H. Shen, B. Wang, Z. Lu, and Z. Chen, “A Double-Resistive Active Power Filter System to Attenuate Harmonic Voltages of a Radial Power Distribution Feeder,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 9, pp. 6203–6216, 2016.
- [33] M. K. Mohamed J. M. A. Rasul, H.V. Khang, “Harmonic mitigation of a grid-connected photovoltaic system using shunt active filter,” in *20th International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS*, 2017.
- [34] Z. Wang, J. Wang, J. Liu, J. Wang, and G. Li, “Harmonic suppression in electric traction system based on a single-phase hybrid active filter,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2012, no. 611 CP, pp. 16–20, 2012.
- [35] T. Abreu, U. N. L. T. Alves, C. R. Minussi, A. D. P. Lotufo, and M. L. M. Lopes, “Residential electric load curve profile based on fuzzy systems,” in *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America, ISGT LATAM 2015*, 2016, pp. 591–596.
- [36] D. Khaniya, A. K. Srivastava, and N. N. Schulz, “Distribution power flow for multiphase meshed or radial systems,” in *40th North American Power Symposium, NAPS2008*, 2008.

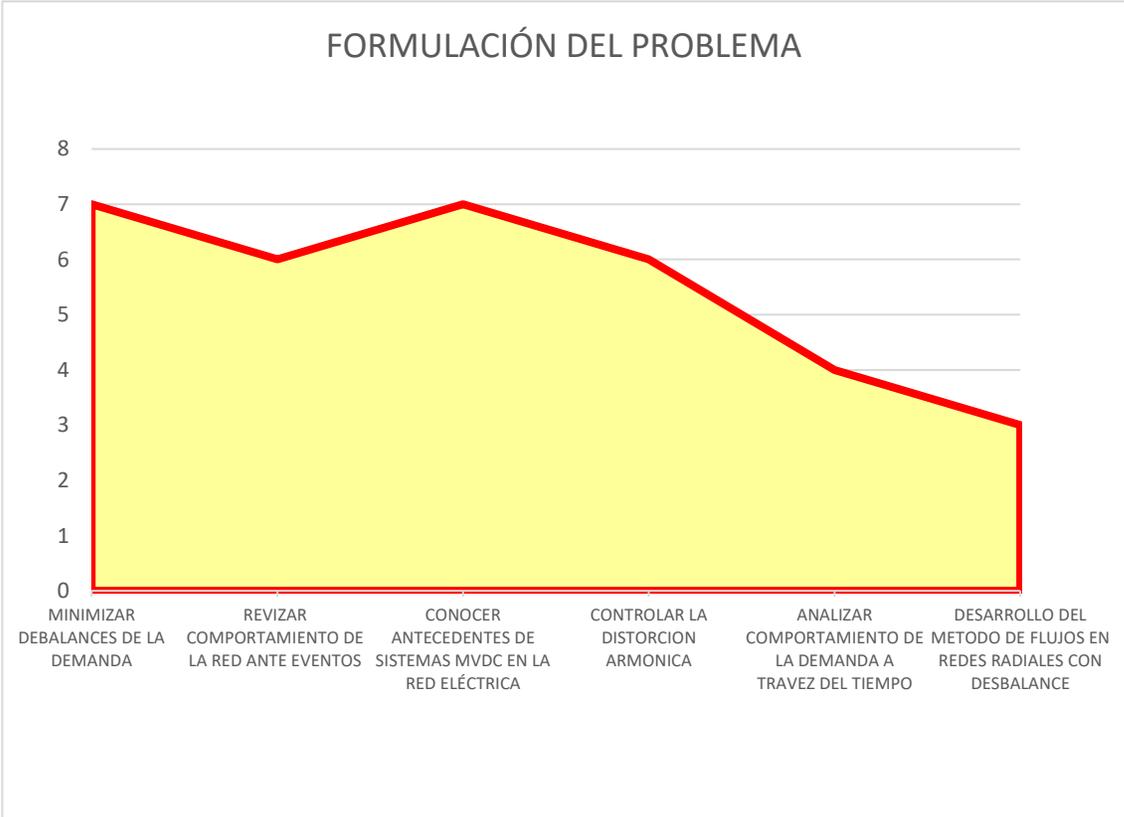
- [37] J. Jativa, G. Constante, and G. Cabrera, “Flujo de Potencia por Newton-Raphson con el Jacobiano Calculado en las Ecuaciones de Errores de Potencia,” *Rev. Politécnica*, vol. 33, no. 3, p. 7, 2014.
- [38] P. Masache and D. Carrión, “Estado del Arte de conmutación de líneas de transmisión con análisis de contingencias,” *Rev. I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 98–106, 2019.
- [39] P. V. Escudero and D. F. Carrión, “Modelo de Expansión de un sistema de transmisión basado en linealización de flujos de potencia óptimos AC,” p. 34, 2018.
- [40] P. Escudero and D. Carrión, “Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC Expansion of a transmission system using LOPF-AC,” *INGE CUC*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018.
- [41] D. Carrión and J. W. González, “Ubicación óptima de PMU considerando restricciones de contingencias N-1 en sistemas eléctricos de potencia,” *Enfoque UTE*, vol. 10, no. 1, pp. 1–12, 2019.



**6.2 Resumen de Indicadores**



**Figura 1.** Resumen e indicador de la temática - Estado del arte



**Figura 2.** Indicador de formulación del problema - Estado del arte

