

**REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL
INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL
INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.**

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

AUTOR: DAYANA MARIYITH CAMPOVERDE FLORES
TUTOR: ROGELIO ALFREDO ORIZONDO MARTÍNEZ

Quito -Ecuador
2022

Dayana Mariyith Campoverde Flores

REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2022

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Dayana Mariyith Campoverde Flores (Y'1999 – M'06). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Adventista del Ecuador “CADE” de la ciudad de Santo Domingo. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se basa en la reducción del desequilibrio de voltaje mediante el uso del interruptor de transferencia estática, en una micro-red.

dcampoverdef@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Rogelio Alfredo Orizondo Martínez (Y'1972 – M'1). Nació en Caracas, Venezuela. Recibió su título en Ingeniería Eléctrica por la Universidad Simón Bolívar en 1999 y el MSc. en la Universidad Simón Bolívar en 2006. Actualmente es docente en la Universidad Politécnica Salesiana. Sus áreas de investigación incluyen electrónica de potencia, especialmente FACTS, sistemas de puesta a tierra y protección catódica.

rORIZONDO@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

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

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

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

Yo, Dayana Mariyith Campoverde Flores con documento de identificación N° 2200126080 manifiesto que:

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

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Dayana Mariyith Campoverde Flores

2200126080

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

Yo, Dayana Mariyith Campoverde Flores con documento de identificación No. 2200126080, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “ Reducción Del Desequilibrio De Voltaje Mediante El Uso Del Interruptor De Transferencia Estática, En Una Micro-Red ”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

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

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Dayana Mariyith Campoverde Flores

2200126080

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Rogelio Alfredo Orizondo Martínez con documento de identificación N° 1757424195, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED, realizado por Dayana Mariyith Campoverde Flores con documento de identificación N° 2200126080, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 08 de septiembre del año 2022

Atentamente,



Ing. Rogelio Alfredo Orizondo Martínez, MSc
1757424195

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	2
2.1	Micro-redes.....	2
2.2	Estabilidad de Voltaje.....	3
2.2.1	Desequilibrio de Voltaje.....	4
2.2.2	Desequilibrio de Cargas	4
2.3	Parámetros y Variables afectadas en el desbalance de una micro-red.	4
2.3.1	Pérdidas de Potencia.....	5
2.3.2	Caída de Tensión	5
2.4	Métodos para reducción del desbalance de voltaje	5
2.4.1	Equilibrador Buck-Boost.....	5
2.4.2	Compensador tipo Boost -SEPIC	6
2.4.3	Convertidor CC-CC multidireccional de tres puntos (TMC).....	6
2.4.4	Balanceador de voltaje medio puente dual-Buck.....	6
2.5	Interruptor de Transferencia estática (STS).....	6
2.6	Desequilibrio de voltaje y corriente en la línea del neutro bajo condición de carga.....	7
3	Simulación en ATP Draw	7
4	Resultados.....	10
5	Conclusiones.....	16
5.1	Trabajos Futuros.....	16
6	Referencias.....	17
6.1	Matriz de Estado del Arte	20
6.2	Resumen de Indicadores.....	23

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplo de una micro-red en CC	3
Figura 2. Circuito del Interruptor de Transferencia Estática.....	6
Figura 3. Modelo de una micro-red en CC.....	7
Figura 4. Simulación de micro-red desbalanceada en ATP Draw	8
Figura 5. Simulación de micro-red desbalanceada con STS en ATP Draw.....	9
Figura 6. Operación de dos STS de positivo a negativo y viceversa.	9
Figura 7. Operación de dos STS de positivo a negativo.	9
Figura 8. Simulación de Micro-red CC con Generación Distribuida.....	10
Figura 9. Simulación de micro-red CC con Generación Distribuida y los STS.....	10
Figura 10. Simulación de micro-red sin GD y sin STS Original	11
Figura 11. Simulación de micro-red Original sin GD aplicando STS	11
Figura 12. Simulación de Caso de Estudio con GD sin el uso de STS.....	12
Figura 13. Simulación del Caso de Estudio con GD y uso del STS.	12
Figura 14. Pérdidas en la micro-red sin generación distribuida.....	15
Figura 15. Pérdidas en la micro-red con generación distribuida.....	15
Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.	23
Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	23
Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.....	23

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros de la micro-red CC	8
Tabla 2. Tabla de Operación de los interruptores STS.	9
Tabla 3. Voltaje Inicial de desbalance en la micro-red Original.....	12
Tabla 4. Voltajes del último nodo en función de los STS en la micro-red Original	13
Tabla 5. Voltaje Final en la micro-red Original después de actuar los STS.	13
Tabla 6. Caída de Tensión en el último nodo de la micro-red sin GD.....	13
Tabla 7. Voltajes Desbalanceados de la micro-red con Generación Distribuida.....	13
Tabla 8. Voltajes del último nodo en función de los STS en la micro-red con GD.....	13
Tabla 9. Voltajes Finales después de actuar los STS.	13
Tabla 10. Caída de Tensión en el último nodo de la micro-red con GD.....	13
Tabla 11. Corriente de los polos sin GD y sin STS.....	14
Tabla 12. Corriente de los polos sin GD y con STS.	14
Tabla 13. Corriente de los polos con GD y sin STS	14
Tabla 14. Corriente de los polos con GD y con STS.	14
Tabla 15. Corrientes del neutro de la micro-red sin GD	14
Tabla 16. Corrientes del neutro de la micro-red con GD	14
Tabla 17. Potencias de pérdidas de la micro-red sin GD	15
Tabla 18. Potencias de pérdidas de la micro-red con GD	15
Tabla 19. Matriz de Estado del Arte	20

REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.

Resumen

En el presente artículo se plantea el modelo de una micro-red bipolar desequilibrada en corriente continua. Se presentan los resultados de un conjunto de maniobras la cual tiene como objetivo reducir el desbalance de voltaje y por ende minimizar las pérdidas de potencia usando los interruptores de transferencia estática STS. Para el desarrollo de este artículo se tomó en cuenta la simulación de la micro-red original sin generación distribuida GD y la micro-red con GD. Todos los casos de estudio fueron simulados en el software ATP Draw.

En ambos casos se analiza el desbalance de voltaje con y sin el uso de los interruptores, en el nodo más alejado de la micro-red para observar la diferencia de voltajes entre ellos. Los resultados obtenidos en el presente artículo se lograron con la correcta ubicación de los interruptores STS la reducción de pérdidas de potencia, desbalance de voltaje cumpliendo con el rango límite del porcentaje de desbalance %VU entre líneas y por ende reduciendo la caída de voltaje en cada una de las líneas.

Palabras Clave: Recursos Energéticos Distribuidos (DER), Generación Distribuida, Micro-red Bipolar, Interruptor de Transferencia Estática (STS), Pérdidas de Potencia.

Abstract

In this article, the model of an unbalanced bipolar micro-network in direct current is proposed. The results of a set of maneuvers are presented which aims to reduce voltage unbalance and therefore minimize power losses using static transfer switches STS. For the development of this article, the simulation of the original micro-grid without distributed generation DG and the micro-grid with DG was taken into account. All study cases were simulated in the ATP Draw software.

In both cases, the voltage unbalance is analyzed with and without the use of the switches, in the furthest node of the micro-network to observe the voltage difference between them. The results obtained in this article were achieved with the correct location of the switches STS, the reduction of power losses, voltage imbalance, complying with the limit range of the percentage of imbalance %VU between lines and therefore reducing the drop. voltage on each line.

Keywords: Distributed Energy Resources (DER), Distributed Generation (DG), Bipolar Microgrid, Static Transfer Switch (STS), Power losses.

1 Introducción

Debido al calentamiento global, el uso de fuentes de energías renovables es una buena alternativa que garantiza el bienestar de las personas y una mejora en el medio ambiente. Las energías renovables se las suele dividir en convencionales y no convencionales de acuerdo con su uso en el país. Algunos ejemplos de energías renovables son la solar, la eólica o la geotérmica.

Las micro-redes hoy en día desempeñan un papel cada vez más importante, ya que están conformadas por estas energías limpias, con el objetivo de beneficiar a los usuarios en la reducción de costos[1]-[2].

También se pueden diseñar micro-redes con generación convencional y fuentes renovables con la finalidad de ofrecer una mejor continuidad en el servicio [3].

La generación distribuida no es más que una fuente de producción de energía que se encuentra conectada con la red de distribución o incluso puede ser conectada cerca a la carga, con el objetivo de reducir las pérdidas y garantizando mayor estabilidad, que redundando en la calidad y la confiabilidad de la energía [4].

Existen dos tipos de configuración en la micro-red CC que son: la unipolar y la bipolar. La configuración bipolar utiliza dos niveles de voltaje, lo cual permite transferir carga de un nodo a otro. Esta configuración puede funcionar de forma asimétrica cuando alimenta a cargas desiguales, deteriorando la calidad del servicio eléctrico y reduciendo el voltaje en los nodos terminales del alimentador [5],[6][7].

En este artículo se presentan varios escenarios de una micro-red que opera en Corriente Continua (CC) con cargas desequilibradas, donde se evidencia el desbalance de voltajes provocado por cargas desequilibradas.

Como solución al desbalance de voltajes, se ha propuesto un interruptor de transferencia (STS) en serie a las cargas. El objetivo es conmutar la carga del nodo

positivo al nodo negativo o viceversa con el objetivo de reducir la corriente en el neutro del sistema. La reducción en la corriente del neutro mejora el perfil del voltaje. La configuración hace que la corriente del neutro que circula en los puntos comunes de conexión de las cargas disminuya para reducir las pérdidas de potencia en el conductor del neutro [8].

Este artículo se encuentra estructurado de la siguiente manera: en la sección II se explica de forma detallada el concepto de una micro-red y los parámetros afectados cuando se presenta un desequilibrio de cargas, se plantea el problema de la caída de voltaje y las técnicas que pueden ser utilizadas para dar solución al problema. La sección III presenta las simulaciones de una micro-red desarrolladas en el programa ATP Draw para varios escenarios y en la sección IV se analizan los resultados obtenidos. En la sección V se ofrecen las conclusiones y se esbozan algunos futuros trabajos [9].

2 Marco teórico

Las micro-redes eléctricas son básicamente redes que pueden operar como redes de distribución eléctricas activas, y que tienen una participación de generación distribuida.

2.1 Micro-redes.

Las fuentes de generación distribuidas pueden ser convencionales o no convencionales, renovables o no renovables. Suelen ser de pequeña potencia y son acopladas a la red de distribución en baja tensión [10].

La micro-red está compuesta por elementos propios de un sistema de distribución típico, que necesita entregar energía a sus clientes, e integra a su matriz energética generadores eléctricos de distintos tipos. Puede tener unidades de generación distribuida (GD) como microturbinas eólicas, paneles fotovoltaicos (FV), dispositivos de almacenamiento distribuidos (DS) como condensadores o

baterías así como cargas tanto fijas como flexibles [4],[10],[11].

Desde el punto de vista topológico, la micro-red está formada por nodos de carga, nodos de generación y de almacenamiento. Se integra con un controlador maestro, e interruptores inteligentes [10].

Una micro-red puede funcionar en forma de isla o conectada a la red principal. En esta última condición operativa, puede receptor de la red de potencia la energía faltante, o entregar a la red su energía sobrante [10].

En síntesis, una micro-red opera:

- **Conectada:** La red entregará las referencias de tensión y frecuencia que se requieran para que la generación funcione correctamente.
- **Aislada:** Los generadores deben responder a los cambios en el consumo para que, de esta manera, tanto la tensión como la frecuencia sean estables y se encuentren en los valores nominales [12].

La eventual implementación de micro-redes tiene ventajas como la reducción de pérdidas en la red y disminución del impacto ambiental en el sistema eléctrico.

Las micro-redes pueden operar en corriente continua (CC). Existen dos tipos de micro-redes en CC, las unipolares que operan con una sola fase o polo, con su conductor neutro y las bipolares que operan con dos fases o polos, junto con su conductor neutro:[13]

- Unipolar (Vdc,0)
- Bipolar (+Vdc, -Vdc)

Por el conductor del neutro circula toda corriente desequilibrada que es generada por una distribución asimétrica de la carga. En ese caso, las pérdidas en el neutro se elevan y la tensión de la barra se desvía del valor nominal [13].

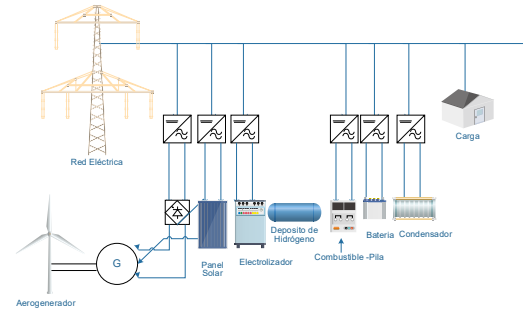


Figura 1. Ejemplo de una micro-red en CC

2.2 Estabilidad de Voltaje

Históricamente, las micro-redes se iniciaron como una red de servicio público, haciendo uso de grandes centrales de producción eléctrica las cuales se beneficiaban de la economía de escala, aumentando las conexiones de transmisión con el objetivo de elevar de confiabilidad. Eventualmente, la red eléctrica se convirtió en un servicio monopólico al interconectar muchas de esas micro-redes aisladas [14].

Hoy en día, con la necesidad de una mayor calidad y confiabilidad de la energía, y con el creciente uso de las energías renovables, convencionales y no convencionales, es vital impulsar las micro-redes ya que estas son más beneficiosas y flexibles.[14]

Mejorar la confiabilidad es un criterio para operar una micro-red, puesto que incide en la reducción de costos de interrupciones y de energía no suministrada (ENS). Las empresas distribuidoras realizan las actualizaciones necesarias para prestar una mejor calidad de servicio a los usuarios y evitar interrupciones al cliente[3].

La operación de la micro-red debe garantizar la estabilidad en su red ante cambios en la carga o por alteración del voltaje [4].

Las micro-redes CC bipolares hoy en día son cada vez más frecuentes a nivel internacional debido en parte a su modo de funcionamiento, dado que ofrecen una mayor versatilidad que una micro-red en CC unipolar.

En algunos casos para equilibrar el voltaje, se necesita utilizar técnicas de

control, incluir convertidores, equilibradores o agregar carga.[15]

La principal causa de la caída de voltaje en una micro-red bipolar de CC (BCC-MG) es por la desigualdad en la demanda neta.[15]

2.2.1 Desequilibrio de Voltaje

La calidad de la energía en una micro-red es afectada por el desequilibrio de voltaje causado por cargas desequilibradas. Debido a este voltaje desequilibrado, los equipos pueden tener un funcionamiento anormal.

Una micro-red Bipolar CC (BCC-MG) es un tipo de micro-red de alta confiabilidad y eficiencia en comparación con la micro-red unipolar. La micro-red está conformada por un sistema de tres hilos (positivo, neutro y negativo) que operan a dos niveles de voltajes[7].

Una forma de mostrar el porcentaje de desequilibrio en la red es utilizando la siguiente formula:

$$VU\% = \frac{|V1 - V2|}{\frac{V1 + V2}{2}} * 100\% \quad (1)$$

Donde:

VU%: Desequilibrio de voltaje

V1: Voltaje del nodo positivo

V2: Voltaje del nodo negativo[8].

En las micro-redes de CC, el desequilibrio es causado por dos formas diferentes de conexión. Existe la conexión fase a fase (FF) y la conexión fase a neutro (FN); La conexión fase a fase (FF) son denominadas así cuando la fase positiva se conecta a la fase negativa y la conexión fase a neutro se la usa cuando la fase positiva o negativa se conecta al neutro o a tierra. [16], [17].

La regulación del voltaje está presente en el control primario y secundario dentro de la alimentación de una forma flexible por la conexión de sus cargas y fuentes, la mala conexión de la fuente de voltaje independiente (IVS) y la unidad de control de potencia (PCU) entre polos de forma

invertida produce un desfase entre ellos y por ende hará que un polo se sobrecargue mientras que en el otro polo no se generará carga.[18]

2.2.2 Desequilibrio de Cargas

Una micro-red en CC que alimenta cargas en corriente alterna (CA), lo hacen a través de convertidores de CC/CA.

Las estrategias de control del convertidor con carga desequilibrada buscan alcanzar un voltaje simétrico en el terminal de la carga, anulando el rizado de tensión [19].

Cuando la carga del nodo se desequilibra, el voltaje los límites establecidos por la empresa distribuidora y se activará la protección de voltaje. Para ajustar el voltaje dentro del rango admisible, es necesario un control distribuido y coordinado para garantizar el funcionamiento normal de la carga[13].

2.3 Parámetros y Variables afectadas en el desbalance de una micro-red.

Cuando el sistema tiene voltajes desequilibrados, la corriente también se desequilibra. Los circuitos de control con PLL buscan disminuir ese desequilibrio haciendo un seguimiento de la fase en el lado de CA [20].

Hay varias soluciones implementadas para el problema de la compensación de las corrientes desequilibradas debidas al desequilibrio de cargas, en una micro-red bipolar de CC. Una solución consiste en implementar un redistribuidor de corriente conectado a un convertidor CC/CC de manera que se ajustan los flujos de potencia en los polos y la corriente que circula por el conductor neutro sea igual a 0 (A) [21].

La conexión de una carga resistiva en una red de voltaje desequilibrado hará que se produzca un flujo de corriente por el conductor del neutro y tierra debido a que, si la carga está conectada en el polo de menor voltaje, la carga disminuye o si se

encuentra conectada en el polo de mayor voltaje, la carga aumenta. Llamándose también desequilibrio de corriente. La forma de conexión de una carga influye en el aumento de potencia que obtendrá la red, más no causará desequilibrio de corriente. La carga conectada entre polo y polo no aporta nada a la red debido a que no hay cierre de circuito, si la carga no contiene conexión a tierra es probable que al producirse un cortocircuito se dañe de forma instantánea, sin embargo no influye en el desequilibrio de corriente u tensión [22].

2.3.1 Pérdidas de Potencia

Las pérdidas de potencia en micro-redes en CA, puesto que las micro-redes en CC están diseñadas para reducir las pérdidas de conversión de las fuentes a las cargas con la finalidad aumentar la eficiencia del sistema [23].

El aumento de pérdidas de potencia en las micro-redes CC se produce debido al desequilibrio de voltaje, como consecuencia de a la presencia de corriente en el neutro. [24].

2.3.2 Caída de Tensión

El incremento de voltaje nominal en la barra de una micro-red de CC es importante, puesto que permite una mayor capacidad de transmisión de energía para garantizar el abastecimiento a las cargas que se encuentren a mayor distancia [25].

Por otra parte, la caída tensión máxima permitida en operación, cambia según la legislación y respecto de las empresas distribuidoras. Un valor que suele utilizarse es del 5% de su voltaje nominal [25]. Para casos en que el valor calculado sobrepase el porcentaje máximo de caída, se modifica el tramo por otro calibre superior. De igual manera, en caso de que la corriente sobrepase la capacidad nominal del conductor, se cambia por otro de calibre superior.

La caída de voltaje en % viene expresada de la siguiente forma: [25]

$$\Delta V = \frac{(V_i - V_f)}{V_i} * 100\% \quad (2)$$

Donde:

V_i : es el voltaje al inicio de la línea

V_f : es el voltaje en la barra que conecta a la carga.

2.4 Métodos para reducción del desbalance de voltaje

Una micro-red unipolar es más propensa a desbalances de voltajes que una micro-red bipolar. La micro-red bipolar presenta una mayor confiabilidad por su conexión a tierra y disponibilidad para ambos polos. En [5], se presentan dos tipos de equilibradores de voltaje que a su vez hacen la función de convertidores bidireccionales CC-CC.

Estos convertidores en CC son:

- Convertidor Tres niveles (TL) CC-CC, sirve como cargador rápido con el objetivo de equilibrar los voltajes de la barra en CC.
- Condensador en serie modificado (SC), este compensa voltaje sin embargo tiene una tasa de conversión más alta que la del convertidor TL.[5]

Para compensar el voltaje en una micro-red en CC, se utilizan los equilibradores. Estos provienen de la gama de convertidores CC-CC del tipo:[6]

- Super Sepic
- Zeta tipo Buck
- Buck Boost.

2.4.1 Equilibrador Buck-Boost

El equilibrador Buck Boost ha sido empleado de una manera eficaz en el análisis de micro-redes para conservar el flujo de potencia y como ayuda de carga rápida en una estación para vehículos eléctricos. La ventaja más importante es que aumenta la capacidad de potencia y ofrece más seguridad al momento de compensar el voltaje [6].

2.4.2 Compensador tipo Boost -SEPIC

Este es un compensador CC-CC diseñado especialmente para atenuar el desbalance de voltaje. Su forma de operación en la micro-red no depende de una fuente activa debido a que no consume potencia activa. En [9], es utilizado para reducir la potencia total y la corriente que circula por el conductor del neutro ya que no se la puede eliminar.

2.4.3 Convertidor CC-CC multidireccional de tres puntos (TMC).

El convertidor TMC es utilizado en la micro-red Bipolar en CC con el objetivo de integrar un sistema de batería. Está diseñado para equilibrar voltajes y suministrar carga a las baterías. También puede operar en paralelo con otros convertidores. Es capaz de compartir corriente de carga de la batería entre la fuente y el polo (positivo y negativo) [7].

2.4.4 Balanceador de voltaje medio puente dual-Buck.

En relación con el balanceador medio puente Dual Buck, se ha demostrado que este dispositivo se puede acoplar a la micro-red de CC sin importar su lugar de adaptación en la que se requiera balancear el voltaje. Posee la ventaja de convertir una red de 2 polos en una red 3 polos en CC en base al conductor neutro[26].

2.5 Interruptor de Transferencia estática (STS).

En [8], el interruptor de transferencia estática es utilizado para proporcionar transferencia de carga en el sistema de distribución, el mismo que va conectado junto a la carga teniendo en cuenta que es simulado mediante un algoritmo considerando la disminución de corriente del neutro.

Este dispositivo es útil para mitigar voltajes desequilibrados ocasionados cuando los equipos están sobrecargados. En

[27], se propone que para evitar desequilibrios los dispositivos deberán ser conectados del polo positivo a neutro, o de polo negativo a neutro. También una manera eficaz es automatizando el interruptor de transferencia al sistema.

El interruptor de transferencia estática (STS) es diseñado para operar con el objetivo de transferir carga sensible de una fuente a otra resguardando así las cargas industriales a fin de evitar las interrupciones en el sistema, en [28], muestra el rendimiento y el modo de operación del interruptor de transferencia estática basado en tiristores.

El tiempo de transferencia del STS es un tiempo mínimo [28], así mismo este puede operar hasta los 38kV y en valores de corriente de hasta 1200 A. El interruptor electromecánico (EMTS), ha sido reemplazado por interruptores de transferencia [29]. El STS se lo emplea en sistemas de bajo voltaje[30].

El interruptor de transferencia estática tiene una estructura básica:

- Comprende tiristores que son conectados a la fuente de alimentación
- Comprende dos fuentes de independientes llamadas, fuente preferida y otra fuente alternativa [28][30].
- También está compuesta por una carga sensible a las variaciones de voltaje
- Conlleva una lógica de control [30].

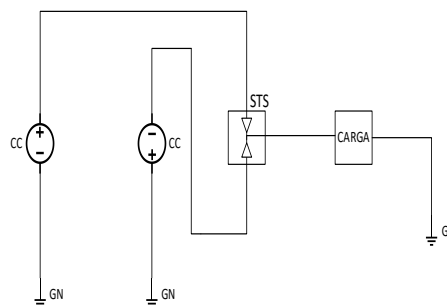


Figura 2. Circuito del Interruptor de Transferencia Estática.

2.6 Desequilibrio de voltaje y corriente en la línea del neutro bajo condición de carga.

En una micro-red bipolar, el conductor del neutro es representado como el punto de conexión para las cargas en polo positivo o en el polo negativo. Por este conductor circula una determinada corriente, debida a la diferencia de potencia que existe cuando las cargas conectadas del lado positivo y las cargas de lado negativo son diferentes. En cada fase de alimentación se produce una caída de tensión a causa de las resistencias del conductor.

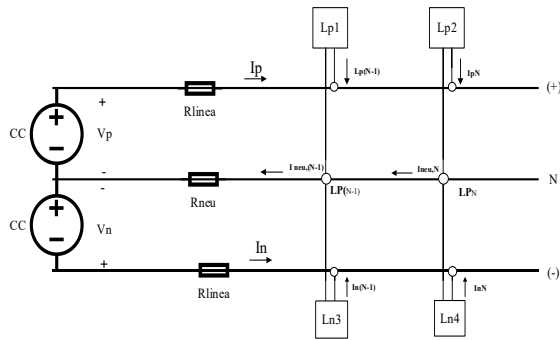


Figura 3. Modelo de una micro-red en CC

La corriente en el conductor del neutro es la suma de las corrientes que circulan por la línea LP y la línea LN:

$$I_{neu(N)} = I_{pN} + I_{nN} \quad (3)$$

$$I_{neu(N-1)} = I_{p(N-1)} + I_{n(N-1)} + I_{neu,N} \quad (4)$$

$$I_{neu,(N-1),STS} = -(I_{p(N-1)} + I_{n(N-1)} + I_{neu,N}) \quad (5)$$

$$P_{per} = (I_{neu})^2 * R_{línea,n} \quad (6)$$

Donde:

Ineu(N): Corriente en el conductor neutro en el último nodo de la micro-red.

Ineu(N-1): Corriente en el conductor neutro del nodo anterior de la micro-red.

Ip(N): Corriente en el polo positivo del último nodo de la micro-red.

Ip(N-1): Corriente en el polo positivo del nodo anterior de la micro-red.

In(N): Corriente en el polo negativo del último nodo de la micro-red.

In(N-1): Corriente en el polo negativo del nodo anterior de la micro-red.

Ineu(N-1), STS: Corriente en el conductor neutro con el uso de los interruptores.

Ppér: Pérdidas de potencia.

Rneu: Resistencia del neutro.

Las corrientes de los polos tendrán que ser de signos opuestos para que la corriente que circule por el neutro sea mínima, por lo tanto, si son de signos iguales la corriente que circule por el neutro aumentará. [8]

3 Simulación en ATP Draw

Se ha planteado una micro-red bipolar desequilibrada en CC usando el software ATP Draw. El sistema es propuesto en base a los datos utilizados en [8]. La micro-red consta de 2 fuentes de CC que entregan ± 750 (V), 5 cargas conectadas en el polo positivo, con un consumo de 40 (kW) cada una y 5 cargas en el nodo negativo con un consumo de 20 (kW) cada una, como se muestra en la

Figura 4.

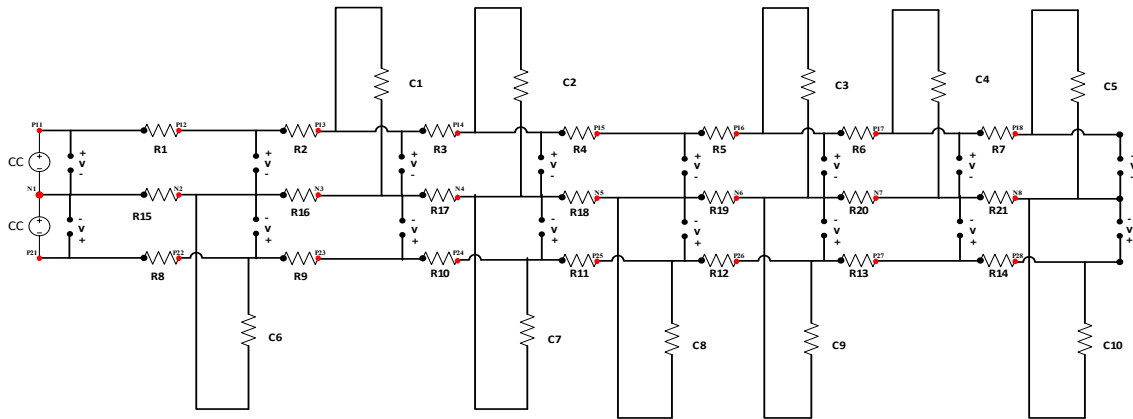


Figura 4. Simulación de micro-red desbalanceada en ATP Draw

Los valores de las resistencias mostrados en la Tabla 1 serán calculados con una distancia diferente tomando como base los valores utilizados en [8].

Se ha utilizado conductores tipo ACSR asumiendo que la distancia entre cargas es de 200 (m). Los cálculos se realizan de la siguiente manera:

- a) Cálculo de resistencia para los conductor positivos y negativos.

$$R_{dc_{pos,neg}} = 0.182 \frac{\Omega}{km} \left[\frac{1km}{1000m} \right] \quad (7)$$

$$= 0.000182 \frac{\Omega}{m} * 200m$$

$$= 0.0364 (\Omega).$$

- b) Cálculo de resistencia para conductor del neutro.

$$R_{dc_{neu}} = 0.301 \frac{\Omega}{km} \left(\frac{1 km}{1000m} \right) \quad (8)$$

$$= 0.000301 \frac{\Omega}{m} * 200m$$

$$= 0.0602 (\Omega).$$

Los parámetros de los elementos que conforman la micro-red se enumeran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de la micro-red CC

Parámetros	Valores
R1-R7, R8-R14	0.0364 (Ω)
R15 - R21	0.0602 (Ω)
C1, C2, C3, C4, C5	40 (kW)
C6, C7, C8, C9, C10	20 (kW)
Fuente CC	± 750 (V)

La implementación de los interruptores STS para la carga en la micro-red se muestra en la Figura 5.

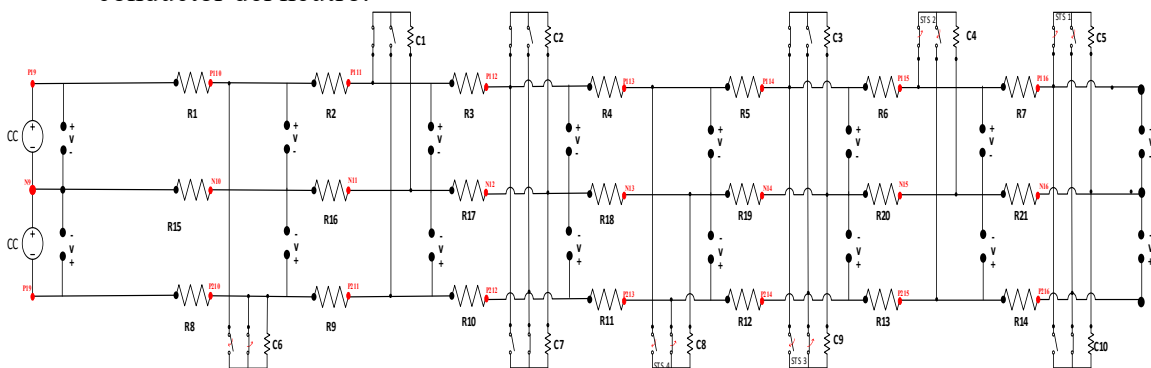


Figura 5. Simulación de micro-red desbalanceada con STS en ATP Draw

En la Figura 6, el interruptor STS está diseñado para transferir carga de un polo a otro. La micro-red contiene 9 interruptores STS, de los cuales solo están operando 4: 2 (STS 1, STS 2) conectados al polo positivo y 2 (STS 3, STS 4) conectados al polo negativo, cada uno opera en una secuencia de tiempo.

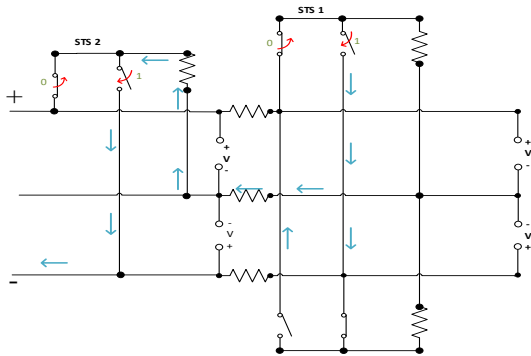


Figura 6. Operación de dos STS de positivo a negativo y viceversa.

Como se muestra en la Figura 6, el interruptor STS 1 conectado al polo positivo empieza a actuar primero, debido a que la micro-red compensa desde el punto más lejano al más cercano respecto de la generación. El STS más lejano, en el nodo N, actúa primero compensando carga del polo positivo al negativo si es necesario. En el nodo anterior (N-1) compensa el interruptor STS 2 conectado al nodo positivo transfiriendo carga al nodo negativo hasta que se equilibren los voltajes.

En la micro-red sin GD, 2 de los interruptores (STS 1, STS 2) están transfiriendo carga desde el nodo positivo hacia el nodo negativo, 2 (STS 3, STS 4) transfieren del negativo al positivo hasta llegar a compensar y obtener el voltaje requerido. En la micro-red con GD, 3 de los interruptores (STS 1, STS 2, STS 4)

transfieren carga del nodo positivo y 1 (STS 3) transfiere carga del nodo negativo. La secuencia y forma de operación de los interruptores STS está mostrada en la Figura 7 y en la Tabla 2.

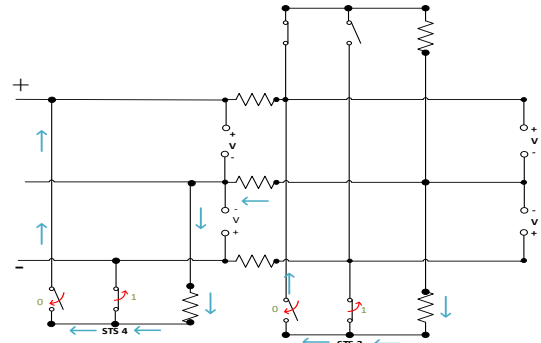


Figura 7. Operación de dos STS de positivo a negativo

Tabla 2. Tabla de Operación de los interruptores STS.

Tiempo	STS	Pos	Neg
0.02 (s)	1	ON	
	0		OFF
0.03(s)	1	ON	
	0		OFF
0.04(s)	1	OFF	
	0		ON
0.05(s)	1	OFF	
	0		ON

A. Caso de Estudio

Se ha establecido como caso de estudio la micro-red CC con generación distribuida GD simulada con los mismos valores que se ha asignado en la micro-red original; tiene 4 fuentes de generación distribuida, de tal manera que están conectadas 2 en el polo positivo seguido del nodo P12 y nodo P15, 2 en el polo negativo seguido del nodo P23 y nodo P27. Estas fuentes GD aportan al sistema de modo que la diferencia de voltaje entre nodos se reduce con respecto a la micro-red original.

La Figura 8 muestra la micro-red con GD.

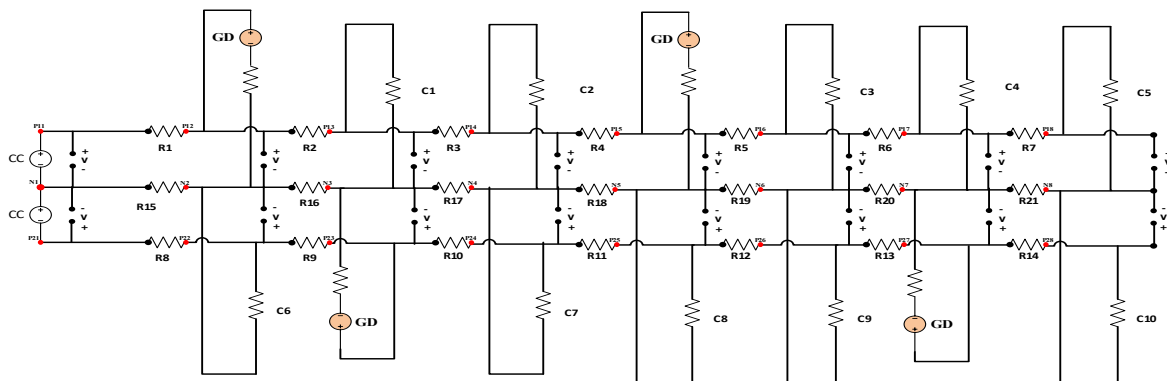


Figura 8. Simulación de Micro-red CC con Generación Distribuida

La micro-red con los interruptores de transferencia STS en el sistema, se muestra en la Figura 9.

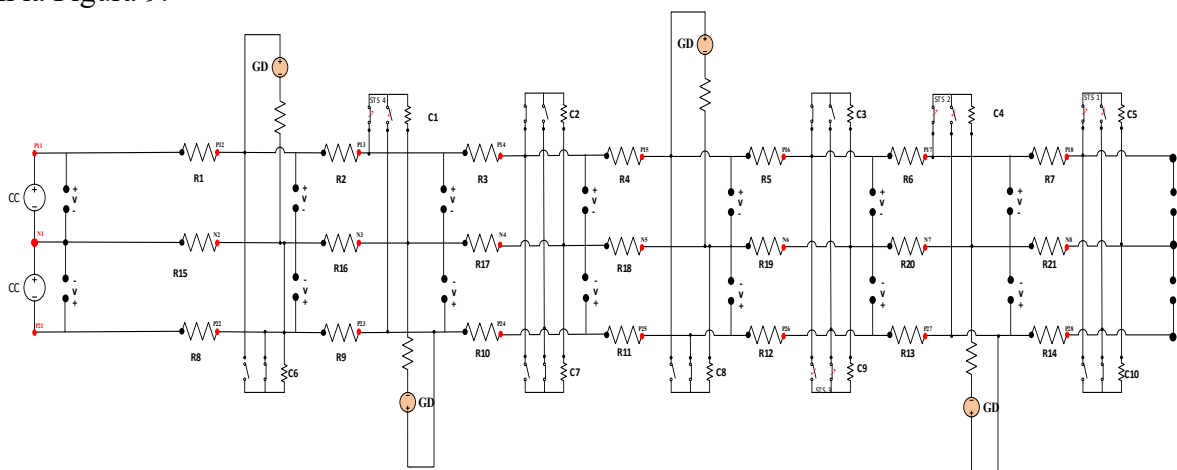


Figura 9. Simulación de micro-red CC con Generación Distribuida y los STS

4 Resultados y Análisis

Se describen los resultados de todos los casos de la micro-red para mostrar su comportamiento ante la operación de los STS y en ausencia de los interruptores, así como el efecto de la GD. Los valores de

voltajes de cada micro-red se visualizan en su respectiva tabla.

Caso 1: Sin Generación Distribuida

a) Sin Interruptores STS

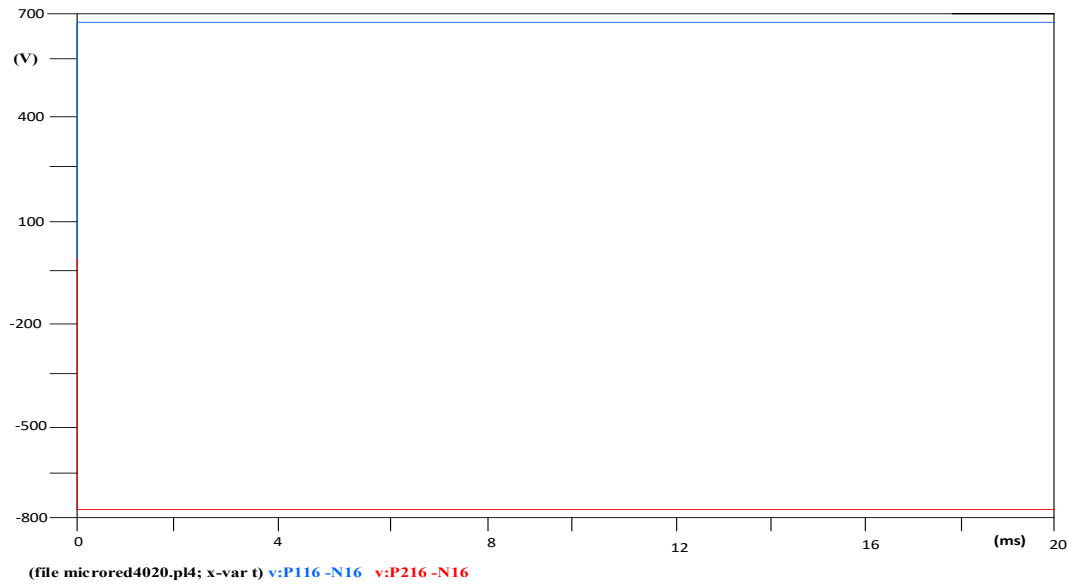


Figura 10. Simulación de micro-red sin GD y sin STS Original

b) Con Interruptores STS

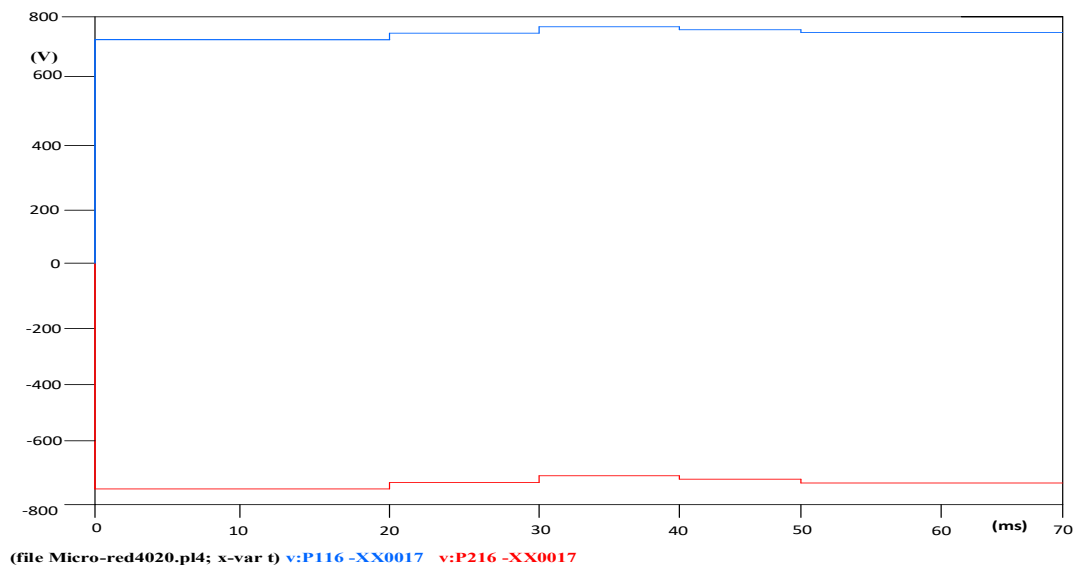


Figura 11. Simulación de micro-red Original sin GD aplicando STS

Caso 2: Con Generación Distribuida

a) Sin Interruptores STS

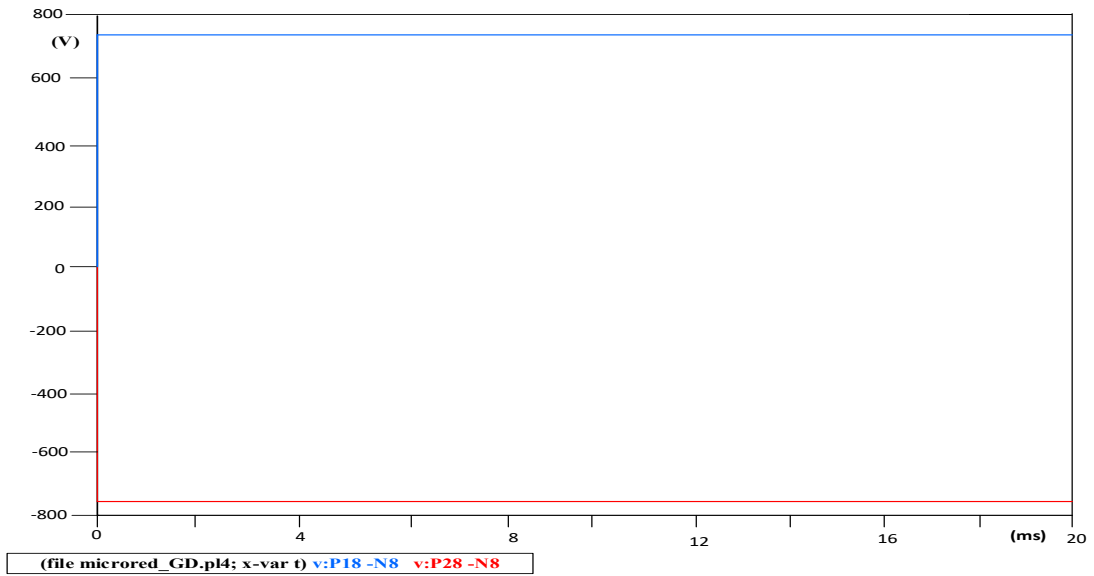


Figura 12. Simulación de Caso de Estudio con GD sin el uso de STS

b) Con Interruptores STS

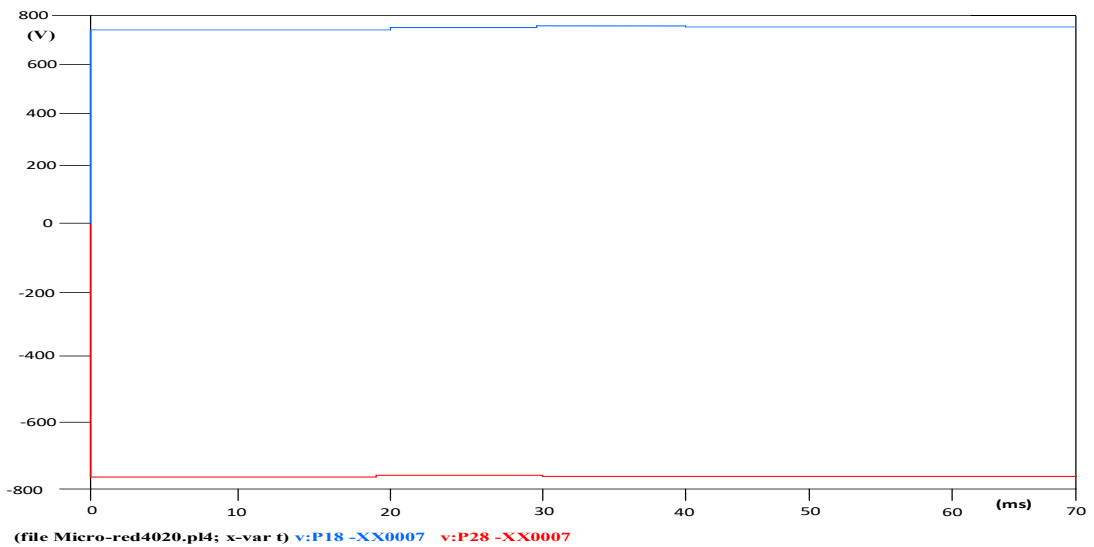


Figura 13. Simulación del Caso de Estudio con GD y uso del STS

Caso 1: Simulación de la micro-red sin Generación Distribuida.

Voltaje Positivo (V)	Voltaje Negativo (V)
674.34	-765.17

La Figura 10 muestra el resultado de la micro-red desbalanceada sin el uso de los interruptores STS. En la Tabla 3 se observa el voltaje de desbalance de la Figura 10 del nodo negativo y del nodo positivo.

Tabla 3. Voltaje Inicial de desbalance en la micro-red Original.

La Figura 11 muestra el comportamiento de la micro-red sin GD desde 0.02 (s) hasta 0.05 (s), con los STS. Los voltajes se muestran en la Tabla 4. Se muestra también el porcentaje de desbalance (VU %) entre fases.

Tabla 4. Voltajes del último nodo en función de los STS en la micro-red Original

STS (ms)	Voltaje Positivo (V)	Voltaje Negativo (V)	VU (%)
-	675.86	-767.27	12.67
20	717.58	-724.28	0.929
30	760.51	-682.61	10.79
40	742.68	-699.75	5.95
50	728.63	-713.61	2.08

Después de haber actuado los 4 interruptores STS, su voltaje final se ve en la Tabla 5, con una diferencia de voltaje de 15.02 (V) entre los dos polos. La diferencia de voltaje del polo positivo con el voltaje de la fuente es de 21.37 (V) y del polo negativo es de -36.39 (V).

Tabla 5. Voltaje Final en la micro-red Original después de actuar los STS.

Voltaje positivo (V)	Voltaje negativo (V)
728.63	-713.61

Las caídas de voltaje (% ΔV) de la micro-red sin generación distribuida (Caso 1) en el último nodo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Caída de Tensión en el último nodo de la micro-red sin GD

% ΔV	
Voltaje Positivo	Voltaje Negativo
2.85	4.85

Caso 2: Simulación de la micro-red con Generación Distribuida

La Figura 12 muestra el comportamiento de la micro-red con GD sin el uso de los interruptores STS, el voltaje se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Voltajes Desbalanceados de la micro-red con Generación Distribuida

Voltaje Positivo (V)	Voltaje Negativo (V)
718.72	-749.79

La Figura 13 muestra el comportamiento de la micro-red con GD y la evolución del voltaje en el último nodo, considerando los interruptores STS. Se observa que el voltaje se encuentra inicialmente desbalanceado. A partir de 0.02 (s) se activan los interruptores y se reduce el desbalance.

En la Tabla 8 se muestran los voltajes de cada polo después de la activación de los interruptores STS, así como el desbalance de voltaje entre nodos.

Tabla 8. Voltajes del último nodo en función de los STS en la micro-red con GD.

STS (ms)	Voltaje Positivo (V)	Voltaje Negativo (V)	VU (%)
-	718.78	-749.82	4.23
20	736.51	-739.35	0.38
30	746.43	-736.99	1.27
40	744.14	-737.79	0.85
50	744.78	-737.80	0.94

En la Tabla 9, se muestra el voltaje final a los 0.05 (s). La diferencia del polo positivo con el voltaje de la fuente es de 5.22 (V) y del polo negativo con la fuente es de -12.2 (V).

Tabla 9. Voltajes Finales después de actuar los STS.

Voltaje Positivo(V)	Voltaje Negativo(V)
744.78	-737.80

La micro-red con generación distribuida (Caso 2) tiene una caída de tensión (% ΔV) en el último nodo, mostrado en la Tabla 10.

Tabla 10. Caída de Tensión en el último nodo de la micro-red con GD

% ΔV	
Voltaje Positivo	Voltaje Negativo
0.69	1.63

Para calcular las pérdidas totales, se verifican las corrientes del neutro en cada uno de los neutros de la micro-red aplicando la ecuación (4) antes del interruptor y la ecuación (5) después de actuar el interruptor. Una vez obtenido los valores se procede a calcular la potencia perdida en base a la ecuación (6) por cada corriente y realizar la sumatoria de potencias.

La Tabla 11 y la Tabla 12 muestra los valores de corrientes de cada nodo de la micro-red sin generación distribuida del polo positivo y polo negativo.

Tabla 11. Corriente de los polos sin GD y sin STS.

Corrientes de los polos (A)		
Nodos	Ip	In
N10	245.93	-134.91
N11	245.93	-108.18
N12	194.94	-108.18
N13	144.82	-81.25
N14	144.82	-54.29
N15	96.12	-27.21
N16	47.95	20.75

Tabla 12. Corriente de los polos sin GD y con STS.

Corrientes de los polos (A)		
Nodos	Ip	In
N10	205.76	-153.16
N11	205.76	-153.16
N12	153.94	-153.16
N13	102.53	-126.87
N14	76.90	-126.87
N15	0	-126.87
N16	0	-126.12

La Tabla 13 y la Tabla 14 muestra los valores de corrientes de cada nodo de la micro-red con generación distribuida del polo positivo y polo negativo.

Tabla 13. Corriente de los polos con GD y sin STS

Corrientes de los polos (A)		
Nodos	Ip	In
N2	62.32	-73.30
N3	106.46	-46.76
N4	53.77	-86.25
N5	1.09	-59.81
N6	154.47	-33.58
N7	102.45	-7.13
N8	51.11	-26.66

Tabla 14. Corriente de los polos con GD y con STS.

Corrientes de los polos (A)		
Nodos	Ip	In
N2	39.78	-41.29
N3	50.43	-41.29
N4	50.43	-58.12
N5	-2.54	-31.64
N6	78.90	-5.27
N7	0	-5.27
N8	0	-78.69

Una vez verificada las corrientes de los polos, se calcula la corriente del neutro de cada conductor basándonos en la ecuación (5) y (6).

Tabla 15. Corrientes del neutro de la micro-red sin GD

Corrientes sin GD sin STS (A)		Corrientes sin GD con STS (A)	
N10	131.77	N10	-128.72
N11	158.49	N11	-128.72
N12	107.51	N12	-76.90
N13	84.31	N13	-51.78
N14	111.27	N14	-26.15
N15	89.66	N15	50.75
N16	20.75	N16	-76.12
$\sum x $	703.75		539.13
$\Delta\%$		23%	

Tabla 16. Corrientes del neutro de la micro-red con GD

Corrientes con GD sin STS (A)		Corrientes con GD con STS (A)	
N2	13.46	N2	-77.18
N3	84.15	N3	-87.83
N4	-8.025	N4	-71.00
N5	-34.28	N5	-44.52
N6	145.34	N6	5.06
N7	119.76	N7	73.43
N8	24.45	N8	-78.69
$\sum x $	429.46		437.72
$\Delta\%$		-2%	

En la Tabla 15, las corrientes disminuyen con respecto a la micro-red en que los STS no están en funcionamiento. En cambio, en la Tabla 16, las corrientes, al actuar los STS se redistribuyen y en los neutros N6 y N7 la corriente disminuye.

Utilizando la ecuación (4) se calcula el valor de las pérdidas por conductor.

La Tabla 17 y la Tabla 18 se muestran el cálculo de las pérdidas de potencia en los neutros de los casos estudiados, así como las pérdidas totales.

La Tabla 17 detalla los valores de pérdidas de la micro-red sin generación distribuida sin la actuación de los interruptores STS y con su presencia. Se puede observar que los valores de pérdidas al actuar los interruptores disminuyen desde el nodo más cercano a la fuente hasta el último nodo con respecto a la micro-red en su condición normal, con la excepción del último nodo.

Tabla 17. Potencias de pérdidas de la micro-red sin GD

Potencias sin GD sin STS (W)	Potencias sin GD con STS (W)
N10 1045.19	N10 997.40
N11 1512.26	N11 997.40
N12 695.75	N12 355.97
N13 427.94	N13 161.39
N14 745.39	N14 41.17
N15 483.89	N15 155.07
N16 25.91	N16 348.79
Σ 4936.34	3057.17

En la Tabla 18 se detallan los valores de pérdidas de la micro-red con generación distribuida con la actuación de los interruptores STS y sin ellos. Al actuar los interruptores, la mayoría de los nodos muestran valores más altos que en ausencia de los STS, a excepción de los nodos N6 y N7 cuyas potencias disminuyen. Sin embargo, se cumple que la potencia de pérdidas totales al ser aplicado los interruptores es menor a la condición normal. El cambio de valores de los nodos N6 y N7 es por la conexión de los interruptores en esos nodos.

Tabla 18. Potencias de pérdidas de la micro-red con GD

Potencias con GD sin STS (W)	Potencias con GD con STS (W)
N2 10.91	N2 358.61
N3 426.31	N3 464.41
N4 3.88	N4 303.49
N5 70.73	N5 119.31
N6 1271.60	N6 1.54
N7 863.47	N7 424.38
N8 35.98	N8 372.82
Σ 2682.86	1945

En las siguientes figuras se muestra el valor de la sumatorias de las potencias, esto es la potencia de pérdidas en las micro-redes bajo análisis.

Las pérdidas en la micro-red del caso

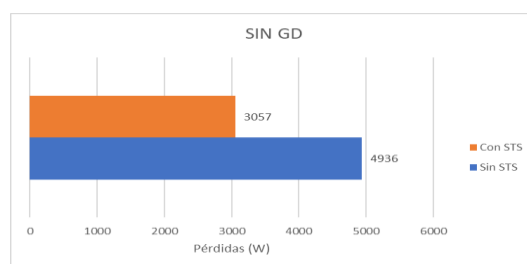


Figura 14. Pérdidas en la micro-red con generación distribuida

de estudio son bajas con respecto al de la micro-red original por la generación distribuida que contiene. Al realizar la compensación de voltaje en el punto más lejano de cada micro-red, utilizando los interruptores, la corriente se redistribuye y las pérdidas se reducen en los neutros.

En la Figura 15, la micro-red original

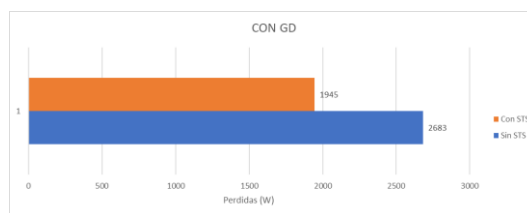


Figura 15. Pérdidas en la micro-red sin generación distribuida.

experimenta una potencia de pérdidas total de casi 5 (kW) en la operación original. En la operación con los

interruptores STS, las pérdidas bajan a 3 (kW), lo que significa una reducción aproximada del 38%.

En la Figura 14, se observa que la micro-red del caso de estudio que tiene GD sin el uso de los interruptores experimenta pérdidas menores al de la micro-red original con 2683 (W). Al actuar los STS, las pérdidas se reducen a un valor de 1945 (W). En este caso, las pérdidas han disminuido casi en un 28%.

Solo la presencia de GD en la micro-red implica una reducción de casi 46% en las pérdidas del neutro, sin considerar los STS.

En cuanto a la operación de los STS, el caso de la micro-red con presencia de GD es más favorable que en su ausencia, con una disminución del 37% si se considera la presencia de GD.

5 Conclusiones

El modelo de micro-red presentado es simulado de dos formas, con generación distribuida y sin generación distribuida. Ambos casos demuestran que, al activarse los interruptores, el desbalance de voltaje VU entre líneas varía hasta que el porcentaje disminuye, la micro-red sin GD tiene un desbalance de voltaje final de 2.08% mostrado en la Tabla 4 y la micro-red con GD tiene un porcentaje del 0.94% mostrado en la Tabla 8. El porcentaje de desbalance de voltaje en ambos casos de la micro-red cumple con el valor estándar. El valor límite es del 3% según ANSI C84.

En todos los casos se logra obtener en el último nodo de la micro-red un voltaje cercano a la fuente de alimentación y la reducción de las pérdidas de potencia mediante el uso de los interruptores STS y de la generación distribuida. La generación distribuida al estar conectada más cerca de las cargas disminuye las pérdidas de potencia en los neutros.

La caída de voltaje después de actuar los interruptores STS en la micro-red sin GD mostrado en la Tabla 6 es del 2.85% en el polo positivo y 4.85% en el polo negativo, comparando con la micro-red que contiene GD Tabla 10 se observa que el porcentaje disminuye con un valor significativo del 0.69% en el polo positivo y 1.63% en el polo negativo. La caída de voltaje final cumple con el rango máximo admisible del $\pm 5\%$ en ambos casos.

La implementación en las simulaciones de los STS reduce en un 23% el total de corrientes que circulan por los neutros de la micro-red sin GD. En cambio, en la micro-red con GD el efecto es marginal y aumenta un 2%. Sin embargo, a pesar de que la redistribución de corrientes no implica una disminución en la sumatoria de los valores absolutos de las corrientes, las potencias sí se ven reducidas de forma relevante.

5.1 Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos en este artículo pueden ser utilizados para realizar futuras investigaciones:

Simular dispositivos similares para la reducción de la caída del voltaje incluyendo la generación distribuida, en micro-redes de CA.

Verificar la calidad del servicio en una micro-red en CC utilizando convertidores o compensadores Buck, Boost o de CC/CA.

Implementar un algoritmo automatizado para que efectúe la conmutación de los STS según la corriente del neutro y detenga la operación de estos al obtener un valor superior al último VU, si es mayor. Esto significa programar un algoritmo que obtenga el valor óptimo del conjunto de secuencias de operaciones de los STS para una condición operativa determinada.

6 Referencias

- [1] M. I. Awaad and Z. E. Afifi, “Design, Simulation and Implementation of a DC Microgrid based on Quadrupler DC Converter,” *Comput. Electr. Eng.*, vol. 89, no. December 2020, 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2020.106948.
- [2] J. Kumar, A. Agarwal, and N. Singh, “Design, operation and control of a vast DC microgrid for integration of renewable energy sources,” *Renew. Energy Focus*, vol. 34, no. September 2020, pp. 17–36, 2020, doi: 10.1016/j.ref.2020.05.001.
- [3] N. Y. Gonzalez Castro, C. A. Cusguen Gomez, E. A. Mojica Nava, and F. A. Pavas Martínez, “Estrategias de control de calidad de energía en microrredes rurales,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 16, no. 2, pp. 93–104, 2017, doi: 10.18273/revuin.v16n2-2017009.
- [4] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, “Microgrids management,” *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 54–65, 2008, doi: 10.1109/MPE.2008.918702.
- [5] S. Kim, H. G. Kim, and H. Cha, “A New Voltage Balancer with DC-DC Converter Function,” *2018 Asian Conf. Energy, Power Transp. Electrification ACEPT 2018*, pp. 0–6, 2019, doi: 10.1109/ACEPT.2018.8610826.
- [6] F. Wang, Z. Lei, X. Xu, and X. Shu, “Topology deduction and analysis of voltage balancers for DC microgrid,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 2, pp. 672–680, 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2016.2638959.
- [7] T. Ahmadi, E. Rokrok, and M. Hamzeh, “Supervisory control of bipolar DC microgrids equipped with three-port multidirectional DC–DC converter for efficiency and system damping optimization,” *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 327–340, 2018, doi: 10.1016/j.segan.2018.10.001.
- [8] G. H. Gwon, C. H. Kim, Y. S. Oh, C. H. Noh, T. H. Jung, and J. Han, “Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 90, pp. 158–167, 2017, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.02.009.
- [9] P. Prabhakaran and V. Agarwal, “Mitigation of voltage unbalance in a low voltage bipolar DC microgrid using a boost-SEPIC type interleaved DC-DC compensator,” *2016 IEEE 2nd Annu. South. Power Electron. Conf. SPEC 2016*, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1109/SPEC.2016.7846222.
- [10] S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, *Microgrids and active distribution networks*. 2009. doi: 10.1049/pbrn006e.
- [11] C. F. Bordón, L. Schenberger, F. Berterame, C. M. Chezzi, and J. J. Penco, “Estrategia para la Gestión de una Micro Red,” *2018 IEEE 9th Power, Instrum. Meas. Meet. EPIM 2018*, 2018, doi: 10.1109/EPIM.2018.8756437.
- [12] P. A. Villada Sandoval, “Diseño y simulación de una micro-red eléctrica aislada basada en el uso de fuentes de energía renovable,” 2020.
- [13] M. Yang, N. Zhou, Q. Wang, J. Liao, and X. Meng, “Unbalanced Voltage Control Strategy of Bipolar DC Microgrid Based on Distributed Cooperation,” *Diandong Jishu Xuebao/Transactions China*

- Electrotech. Soc.*, vol. 36, no. 3, pp. 634–645, 2021, doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.200026.
- [14] M. Alluhaidan and I. Almutairy, “Modeling and Protection for Low-Voltage DC Microgrids Riding Through Short Circuiting,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 114, pp. 457–464, 2017, doi: 10.1016/j.procs.2017.09.024.
- [15] G. M. Javad Khodabakhsh, “Decentralized Unbalanced Voltage Suppression in Bipolar DC Microgrids with Smart Loads,” pp. 2692–2697, 2021.
- [16] G. H. Kim, C. Hwang, J. H. Jeon, J. B. Ahn, and E. S. Kim, “A novel three-phase four-leg inverter based load unbalance compensator for stand-alone microgrid,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 65, pp. 70–75, 2015, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.09.035.
- [17] N. Bayati, A. Hajizadeh, and M. Soltani, “Protection in DC microgrids: A comparative review,” *IET Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 66–75, 2018, doi: 10.1049/iet-stg.2018.0035.
- [18] J. Ma, Y. Li, M. Zhu, and X. Cai, “Parallel operation of distributed voltage balancers for bipolar DC system with improved reliability and efficiency,” *Proc. IECON 2017 - 43rd Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, vol. 2017-Janua, pp. 1387–1392, 2017, doi: 10.1109/IECON.2017.8216236.
- [19] X. Zhu, Y. Zhang, and S. Jing, “A Voltage Ripple Suppression Method of DC Microgrid under Unbalanced Load,” *Diangong Jishu Xuebao/Transactions China Electrotech. Soc.*, vol. 33, no. 15, pp. 3437–3449, 2018, doi: 10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.170841.
- [20] V. Sapara, R. Saha, and S. Phulare, “Current unbalance and DC bus unbalance control for three level grid tied NPC inverter fed by der with DC-DC boost converter,” *PIICON 2020 - 9th IEEE Power India Int. Conf.*, 2020, doi: 10.1109/PIICON49524.2020.9113015.
- [21] T. D. Mai, T. Verschelde, and J. Driesen, “Comparative study of current redistributor’s topologies for mitigating unbalanced currents in bipolar DC microgrids,” *2017 IEEE 2nd Int. Conf. Direct Curr. Microgrids, ICDCM 2017*, pp. 242–247, 2017, doi: 10.1109/ICDCM.2017.8001051.
- [22] M. . Davis, R. Broadwater, and J. Hambrick, “Modeling and testing of unbalance loading and voltage regulation,” *Contract*, 2007.
- [23] H. Kakigano, Y. Miura, and T. Ise, “Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high quality distribution,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, 2010, doi: 10.1109/TPEL.2010.2077682.
- [24] P. Prabhakaran and V. Agarwal, “Novel Boost-SEPIC Type Interleaved DC-DC Converter for Mitigation of Voltage Imbalance in a Low-Voltage Bipolar DC Microgrid,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 67, no. 8, pp. 6494–6504, 2020, doi: 10.1109/TIE.2019.2939991.
- [25] C. Galvanica, “Control, Optimización y gestion de Microrredes de Corriente Continua,” pp. 3–9, 2013, [Online]. Available: <http://www.electrosector.com/wp-content/ftp/descargas/basico.pdf?0ad197>
- [26] X. Zhang and C. Gong, “Dual-buck half-bridge voltage balancer,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8,

- pp. 3157–3164, 2013, doi:
10.1109/TIE.2012.2202363.
- [27] G. Van Den Broeck, S. De Breucker, J. Beerten, J. Zwysen, M. Dalla Vecchia, and J. Driesen, “Analysis of three-level converters with voltage balancing capability in bipolar DC distribution networks,” *2017 IEEE 2nd Int. Conf. Direct Curr. Microgrids, ICDCM 2017*, pp. 248–255, 2017, doi:
10.1109/ICDCM.2017.8001052.
- [28] M. R. Javed, T. Mahmood, and M. A. Choudhry, “Performance analysis of static transfer switch using MATLAB/Simulink,” *2015 Power Gener. Syst. Renew. Energy Technol. PGSRET 2015*, 2015, doi:
10.1109/PGSRET.2015.7312181.
- [29] T. Mahmood and M. A. Choudhry, “Application of static transfer switch for feeder reconfiguration to improve voltage at critical locations,” *2006 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. TDC’06*, vol. 00, pp. 1–6, 2006, doi:
10.1109/TDCLA.2006.311430.
- [30] M. R. Iravani, “Modeling and Simulation of a Static Transfer Switch,” *IEEE Trans. Power Syst.*, no. January, p. 43, 2001.

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 19. Matriz de Estado del Arte

REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.																											
DATOS			TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Citas	Generación Distribuida	Micro-redes	Interruptor de transferencia estática (STS)	Desbalance de voltaje	Pérdidas de energía	Calidad	Minimizar pérdidas	Reducir el desbalance voltaje	Aplicación del Interruptor	Caída de Voltaje	Nivel de Tensión	Métodos para mitigar el	Capacidad en las cargas	Modelo matemático	Programa ATP Draw	Calcular Desbalance de voltaje	Identificar localización de STS.	Implementar los interruptores de transferencia (STS).	Ajustar el voltaje	Minimizar pérdidas	Mitigar el desequilibrio de voltaje.	Reducir la caída de voltaje		
1	2020	Design, Simulation and Implementation of a DC Microgrid based on Quadrupler DC Converter	18	✗	✗				✗							✗											
2	2020	Design, operation and control of a vast DC microgrid for integration of renewable energy sources.	35	✗	✗				✗							✗											
3	2017	Estrategias de control de calidad de energía en micro-redes rurales	31	✗	✗				✗							✗											
4	2008	Microgrids management	4	✗	✗				✗																		
5	2018	A New Voltage Balancer with DC-DC Converter Function	9		✗				✗					✗	✗									✗	✗		
6	2017	Topology deduction and analysis of voltage balancers for DC microgrid	18	✗	✗		✗		✗		✗				✗									✗	✗		
7	2018	Supervisory control of bipolar DC microgrids equipped with three-port multidirectional DC-DC converter for efficiency and system damping optimization	31	✗	✗		✗		✗		✗				✗									✗	✗		
8	2017	Mitigation of voltage unbalance by using static load transfer switch in bipolar low voltage DC distribution system	36				✗	✗		✗	✗	✗		✗		✗	✗	✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA							
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTICULO	Citas	Generación Distribuida	Micro-redes	Interruptor de transferencia estática (STS)	Desbalance de voltaje	Pérdidas de energía	Calidad	Minimizar pérdidas	Reducir el desbalance voltaje	Aplicación del Interruptor	Caída de Voltaje	Nivel de Tensión	Métodos para mitigar el desbalance	Capacidad en las cargas	Modelo matemático	Programa ATP Draw	Calcular Desbalance de voltaje	Identificar localización de STS.	Implementar los interruptores de transferencia (STS).	Ajustar el voltaje	Minimizar pérdidas	Mitigar el desequilibrio de voltaje.	Reducir la caída de voltaje
9	2016	Mitigation of voltage unbalance in a low voltage bipolar DC microgrid using a boost-SEPIC type interleaved DC-DC compensator	15	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒		☒		☒				☒	☒	
10	2009	Microgrids and active distribution networks.	60	☒	☒				☒																
11	2018	Estrategia para la Gestión de una Micro Red.	13	☒	☒				☒																
12	2020	Diseño y simulación de una micro-red eléctrica aislada basada en el uso de fuentes de energía removable.	51	☒	☒				☒																
13	2021	Unbalanced Voltage Control Strategy of Bipolar DC Microgrid Based on Distributed Cooperation.	16	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒	☒	☒		☒						
14	2017	Modeling and Protection for Low-Voltage DC Microgrids Riding Through Short Circuiting.	23	☒	☒				☒					☒											
15	2021	Decentralized Unbalanced Voltage Suppression in Bipolar DC Microgrids with Smart Loads.	23	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒	☒	☒		☒						
16	2015	A novel three-phase four-leg inverter based load unbalance compensator for stand-alone microgrid.	22	☒	☒	☒	☒		☒							☒									
17	2018	Protection in DC microgrids: A comparative review.	119	☒	☒		☒		☒																
18	2017	Parallel operation of distributed voltage balancers for bipolar DC system with improved reliability and efficiency	8	☒	☒		☒	☒	☒	☒	☒			☒	☒		☒		☒				☒	☒	
19	2018	A Voltage Ripple Suppression Method of DC Microgrid under Unbalanced Load	11	☒	☒				☒					☒			☒								

REDUCCIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE MEDIANTE EL USO DEL INTERRUPTOR DE TRANSFERENCIA ESTÁTICA, EN UNA MICRO-RED.

DATOS		TEMÁTICA						FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETOS				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA								
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	Citas	Generación Distribuida	Micro-redes	Interruptor de transferencia estática (STS)	Desbalance de voltaje	Pérdidas de energía	Calidad	Minimizar pérdidas	Reducir el desbalance voltaje	Aplicación del Interruptor	Caída de Voltaje	Nivel de Tensión	Métodos para mitigar el	Capacidad en las cargas	Modelo matemático	Programa ATP Draw	Calcular Desbalance de voltaje	Identificar localización de STS.	Implementar los interruptores de transferencia (STS).	Ajustar el voltaje	Minimizar pérdidas	Mitigar el desequilibrio de voltaje.	Reducir la caída de voltaje	
20	2020	Current unbalance and DC bus unbalance control for three level grid tied NPC inverter fed by der with DC-DC boost converter	12	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒		☒									
21	2017	Comparative study of current redistributor's topologies for mitigating unbalanced currents in bipolar DC microgrids	7	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒		☒									
22	2007	Modeling and testing of unbalance loading and voltage regulation	14	☒	☒		☒		☒	☒				☒	☒		☒									
23	2010	Low-voltage bipolar-type dc microgrid for super high-quality distribution	19	☒	☒		☒	☒	☒	☒				☒	☒		☒							☒		
24	2020	Novel Boost-SEPIC Type Interleaved DC-DC Converter for Mitigation of Voltage Imbalance in a Low-Voltage Bipolar DC Microgrid	24	☒	☒		☒	☒	☒	☒				☒	☒		☒							☒		
25	2013	Control, Optimización y gestión de Microrredes de Corriente Continua	67	☒	☒				☒			☒														☒
26	2013	Dual-buck half-bridge voltage balancer	21	☒	☒		☒		☒					☒	☒		☒		☒				☒	☒		
27	2017	Analysis of three-level converters with voltage balancing capability in bipolar DC distribution networks.	28	☒	☒		☒		☒					☒	☒		☒		☒				☒			
28	2015	Performance analysis of static transfer switch using MATLAB/Simulink.	12								☒			☒			☒						☒	☒		
29	2006	Application of static transfer switch for feeder reconfiguration to improve voltage at critical locations	18								☒												☒			
30	2001	Modeling and Simulation of a Static Transfer Switch.	4								☒												☒	☒		

6.2 Resumen de Indicadores

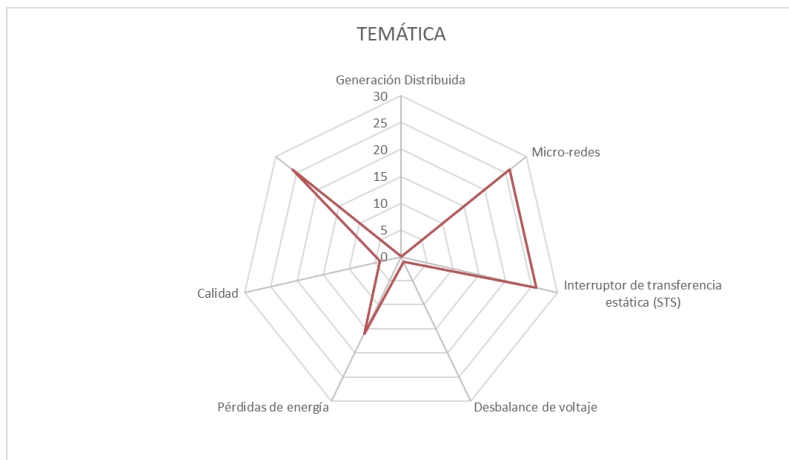


Figura 16. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

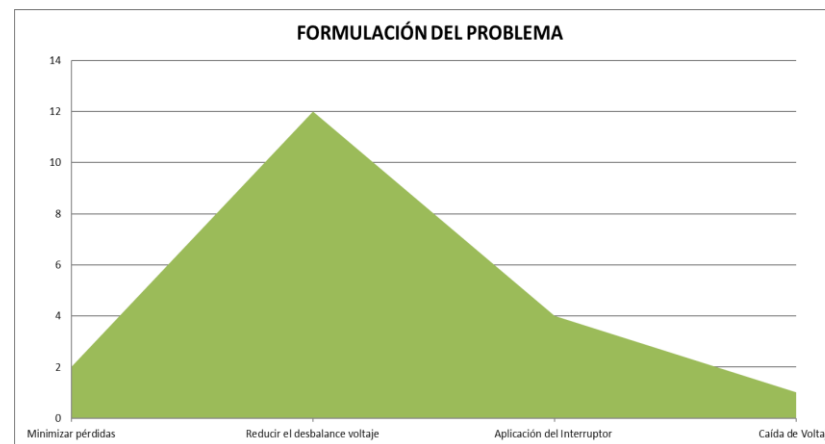


Figura 17. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

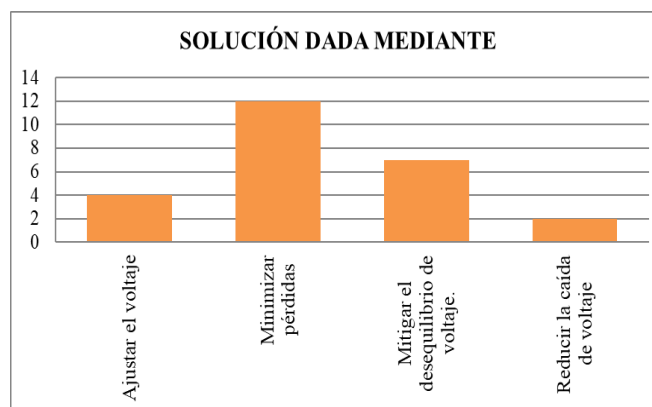


Figura 18. Indicador de solución - Estado del arte.

