UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE ELECTRICIDAD

MITIGACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA UBICACIÓN DE RESTAURADORES DINÁMICOS DE VOLTAJE

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Eléctrico

AUTOR: **JOICE ARIEN LEGÑA GUASUMBA**

TUTOR: **DIEGO FRANCISCO CARRIÓN GALARZA**

Quito -Ecuador

2025

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Joice Arien Legña Guasumba con documento de identificación N° 1723969729 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, 27 de marzo del año 2025

Atentamente,

Joice Arien Legña Guasumba

1723969729

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

Yo, Joice Arien Legña Guasumba con documento de identificación No. 1723969729, 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: "Mitigación del desequilibrio de voltaje en redes eléctricas de distribución mediante la ubicación de restauradores dinámicos de voltaje", 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, 27 de marzo del 2025

Atentamente,

Joice Arien Legña Guasumba

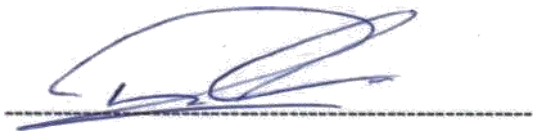
1723969729

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego Francisco Carrión Galarza con documento de identificación N° 1713703062, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MITIGACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA UBICACIÓN DE RESTAURADORES DINÁMICOS DE VOLTAJE, realizado por Joice Arien Legña Guasumba con documento de identificación N° 1723969729, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de articulo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 27 de marzo del año 2025

Atentamente,



Ing. Diego Francisco Carrión Galarza, Ph.D.

1713703062

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS V
ÍNDICE DE TABLAS V
Resumen 1
Abstract 1
1 Introducción 2
2 Trabajos Relacionados 3
2.1 Restauradores de Voltaje Residenciales. 3
2.2 Control y Optimización 4
2.3 Restauradores en Sistemas de Distribución 4
2.4 Componentes del Restaurador Dinámico de Voltaje 5
2.4.1 Convertidor Inversor 5
2.4.2 Esquema de Control 6
2.4.3 Generación de Señal PWM 6
2.4.4 Transformador de Acoplamiento y Filtro 6
3 Propuesta de Solución 7
3.1 Sistema de Distribución de 1 Carga 7
3.2 Sistema IEEE de 37 Barras 8
4 Análisis de resultados 9
4.1 Caso de Estudio: Sistema de Distribución con 1 Carga. 9
4.2 Caso de Estudio: Sistema de Distribución de 37 Barras 10
5 Conclusiones 13
5.1 Trabajos futuros 13
Referencias 13
6 Anexos 15
6.1 Anexo A – Diagrama de Sistema de 37 Barras 15
6.2 Anexo B – Parametrización de Cargas 16
6.3 Anexo C – Parametrización de Líneas 17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema DVR implementado 5
Figura 2. Circuito de Almacenamiento con Inversor y Fuente DC 5
Figura 3. Voltaje del Sistema Balanceado 6
Figura 4. Esquema de Control 6
Figura 5. Generación de Señal Portadora con Señal Original 6
Figura 6. Comparación de Señal Portadora con Señal Trifásica 6
Figura 7. Señal PWM para control de Inversor 6
Figura 8. Parámetros del Transformador de Acoplamiento 7
Figura 9. Filtro de Acoplamiento LC 7
Figura 10. Integración de DVR a sistema de 1 Carga 7
Figura 11. Filtro Pasivo para DVR - Caso 1 8
Figura 12. Filtro Pasivo para DVR - Caso 2 9
Figura 13. Parámetros de Falla en Línea de Transmisión 9
Figura 14. Voltaje de Falla - Caso 1 9
Figura 15. Voltaje de Compensación - Caso 1 9
Figura 16. Voltaje en la Carga - Caso 1 9
Figura 17. Voltaje en Carga 712 - Sistema Balanceado 10
Figura 18. Voltaje en Carga 724 - Sistema Balanceado 10
Figura 19. Voltaje en Carga 741 - Sistema Balanceado 10
Figura 20. Voltaje en Carga 742 - Sistema Balanceado 10
Figura 21. Desbalanceo de Carga 742 en Sistema de 37 Barras 10
Figura 22. Voltaje en Carga 712 - Sistema Desbalanceado 11
Figura 23. Voltaje en Carga 724 - Sistema Desbalanceado 11
Figura 24. Voltaje en Carga 741 - Sistema Desbalanceado 11
Figura 25. Voltaje en Carga 742 - Sistema Desbalanceado 11
Figura 26. Integración de DVR a Sistema de 37 Barras 11
Figura 27. Voltaje en Carga 712 con DVR 11
Figura 28. Voltaje en Carga 724 con DVR 12
Figura 29. Voltaje en Carga 724 con DVR 12
Figura 30. Voltaje en Carga 742 con DVR 12
Figura 31. Filtro para Disminución de Armónicos en Fase B 12
Figura 32. Voltaje en Carga 742 con DVR y Filtro RLC 12
Figura 33. Voltaje de Compensación de DVR en Sistema de 37 Barras 12

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros del Sistema de Distribución - Caso 1 7
Tabla 2. Parámetros de Control del Sistema de Distribución - Caso 1 7
Tabla 3. Parametrización del Sistema IEEE 37 Barras 8

Tabla 4. Parámetros de Control del Sistema de Distribución - Caso 2..... 8

MITIGACIÓN DEL DESEQUILIBRIO DE VOLTAJE EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA UBICACIÓN DE RESTAURADORES DINÁMICOS DE VOLTAJE.

Resumen

La mejora de los perfiles de voltaje en sistemas de distribución es indispensable para garantizar un suministro constante a los usuarios. El presente trabajo de investigación analiza la mitigación del desequilibrio de voltaje en sistemas de distribución utilizando restauradores dinámicos de voltaje. Para esto se realizó la implementación de un DVR en Matlab / Simulink en donde se integró este sistema en dos casos de estudio. El primero se lo muestra dentro de un sistema de una carga la cual está conectada directamente a la fuente de voltaje y del cual se simula una falla entre los 0.03 a 0.07s en donde el DVR entra en acción y genera una compensación que da una señal de voltaje igual a la original sin la generación de armónicos. Posteriormente se implementa el DVR en un sistema de 37 barras en donde se varía los parámetros de filtros y controlador PI para ajustar la compensación al sistema realizado. En este caso se generó un desbalance en una de las cargas la cual genero un desequilibrio de voltaje en todo el sistema, para lo cual mediante la implementación del DVR en el sistema se logró mitigar el desequilibrio tanto en la carga aplicada como en todo el sistema, adicional a esto se aplicó un filtro pasivo RLC el cual ayudo eliminar en su mayoría los armónicos que generaba la operación del DVR.

Palabras Clave: Restaurador de voltaje dinámico, desbalance de voltaje, perfiles de voltaje, redes de distribución, filtro RLC.

Abstract

Improving voltage profiles in distribution systems is essential to ensure a constant supply to users. This research analyzes the mitigation of voltage imbalance in distribution systems using dynamic voltage restorers. For this, a DVR was implemented in Matlab / Simulink where this system was integrated in two case studies. The first is shown within a system of a load which is directly connected to the voltage source and of which a fault is simulated between 0.03 to 0.07 s where the DVR comes into action and generates a compensation that gives a voltage signal equal to the original without the generation of harmonics. Later, the DVR is implemented in a 37-bus system where the filter and PI controller parameters are varied to adjust the compensation to the system performed. In this case, an imbalance was generated in one of the loads, which generated a voltage imbalance in the entire system. For this purpose, by implementing the DVR in the system, the imbalance was mitigated both in the applied load and in the entire system. In addition, a passive RLC filter was applied, which helped to eliminate most of the harmonics generated by DVR operation.

Keywords: Dynamic voltage restorer, voltage imbalance, voltage profiles, distribution networks, RLC filter.

1 Introducción

Hoy en día, el pilar fundamental que impulsa el desarrollo de varios aspectos de nuestra vida diaria es la electricidad, ya que esta está presente en innumerables actividades que realizamos a diario como, por ejemplo, la iluminación de nuestras casas hasta el control y manejo de maquinarias industriales. La base de todo este apartado se la denomina sistema de energía eléctrica, la cual es una red diseñada para generar, transmitir y distribuir la energía de manera eficiente y confiable a los usuarios finales[1].

El sector energético está experimentando cambios importantes con el fin de atender la necesidad de consumo de energía y las exigencias de calidad del servicio. En los últimos años los avances tecnológicos e incluso la aparición de nuevos equipos ha permitido tener la posibilidad de maximizar la estabilidad de voltaje en las redes de distribución [2]. Históricamente, la estabilidad del voltaje de la red se abordaba ajustando las unidades de generación y los dispositivos pasivos como los reguladores de voltaje. Sin embargo, el aumento en la tecnología de las redes de electricidad y el gran número de energía alternativa han hecho que cada vez existan nuevas soluciones más modernas e innovadoras [3].

Las redes de distribución, que tienen la función de trasladar la energía eléctrica desde los sistemas de transmisión hasta los usuarios finales, presentan dificultades particulares asociadas a la firmeza del voltaje. [4] Esta presencia de desequilibrios, originados por cargas que han sido desbalanceados, fallidos temporales o la inserción de generación distribuida, pueden influir significativamente en la calidad de la electricidad y ocasionar daños en los dispositivos conectados a la red [5]. Deslindar este inconveniente requiere de soluciones que no únicamente augmenten la capacidad del sistema, sino además disminuyen los costos de operación y el efecto ecológico.

Una de las maniobras más eficientes para hacer frente a este inconveniente es el uso de restauradores Dinámicos de Voltaje (DVR). Estos artefactos funcionan como amortiguadores pasivos, que inyectan o toman potencia de reacción en tiempo real con el fin de sostener el voltaje en las vías de distribución [6]. Su capacidad de respuesta veloz y versatilidad los vuelven en una solución ideal para lidiar con desórdenes de electricidad y aumentar la fiabilidad de los sistemas de energía eléctrica [6].

Varias investigaciones han buscado maneras de hallar la mejor posición y disposición de los DVR. Los cuales contienen el estudio de estabilidad que debe tener la corriente en niveles óptimos, la minimización en costos de instalación y la reducción en pérdidas de potencia, todo esto generando una mejor calidad del servicio para los usuarios[7]. En el momento de ubicar y delimitar la posición y disposición óptima de los dispositivos, ha sido de ayuda utilizar métodos heurísticos como son los algoritmos genéticos y también las técnicas de enredadera de partículas, además de los enfoques estáticos que se fundan en el cálculo de optimización.

Uno de los métodos que ayudarían con este fin es la compensación de potencia reactiva la cual es una técnica utilizada para corregir el factor de potencia de una red eléctrica [7]. Esto implica la instalación de dispositivos como bancos de condensadores, que pueden absorber o suministrar potencia reactiva según sea necesario, ayudando a mantener el voltaje en niveles adecuados [8].

Por lo que, el presente estudio tendrá como objetivo determinar las localizaciones y habilidades óptimas de DVR dentro de redes de distribución para hacer un uso eficaz de la energía eléctrica para evitar que los voltajes se descompongan de manera exitosa [8]. Este enfoque permitirá no solo buscará aumentar la estabilidad del sistema eléctrico, sino también sentar las bases para soluciones más avanzadas en el futuro, como la integración de sistemas inteligentes y reconfiguraciones dinámicas [9].

Para lograr este objetivo planteado, se usará un sistema de prueba de 33 barras, que es ampliamente reconocido en el ámbito de las redes de distribución [10]. El proceso de selección de este programa le da la oportunidad de examinar la capacidad de los DVR dentro de situaciones ficticios que representan las condiciones verdaderas de empleo, teniendo en cuenta no sólo el efecto en la estabilidad de la corriente sino también las pérdidas de potencia de la red [11].

El diseño que se implementará piensa en la reducción de desbalances de corriente a través de una franja de estabilidad de un porcentaje significativo, esto ayuda a evitar sobre cargamentos y mejorar la calidad del suministro de energía eléctrica. Así mismo, se propone un modelo de control más eficiente que utiliza un controlador (PI) proporcional integral, con el objetivo de mitigar el desequilibrio de voltaje en nuestro sistema de prueba.

En este estudio, se establecerá un sistema de prueba bajo condiciones iniciales, donde se introducirán desequilibrios de voltaje en diferentes

barras. Posteriormente, se evaluará el desempeño de nuestro DVR modificado frente a estos desequilibrios simulados, buscando validar su efectividad y eficacia en la corrección y estabilización del voltaje en el sistema eléctrico.

2 Trabajos Relacionados

Existen varios estudios acerca de la implementación de los Restauradores Dinámicos de Voltaje (DVR), diferentes estudios realizan la aplicación de este dispositivo en redes monofásicas las cuales son redes más sencillas y en donde se pudo ver que el comportamiento de este dispositivo fue eficaz, también existen estudios realizados en redes trifásicas las cuales son más complejas su implementación por lo que abarcan grandes espacios residenciales e industriales. Estos dos casos tienen el mismo problema en común que es la variación de voltaje, la compensación de potencia reactiva y la mitigación de armónicos [14].

El estado del arte relacionado con esta temática muestra diversos enfoques y metodologías que pretenden optimizar y mejorar el diseño y funcionamiento de estos dispositivos, asegurando una respuesta rápida y efectiva a las perturbaciones de voltaje [15].

La investigación de [16], aborda el diseño y simulación de restauradores de voltaje para mitigar problemas en la calidad de la energía eléctrica en redes de distribución. Se propone una solución integral que utiliza dispositivos electrónicos de potencia, como IGBT, diodos y transistores, para regular el voltaje, compensar potencia reactiva, y mitigar armónicos y variaciones de voltaje. El enfoque está en corregir rápidamente perturbaciones en el suministro de voltaje, mejorando la estabilidad y eficiencia de los transformadores conectados al sistema eléctrico.

De la misma manera, en [17] y [18] detallan el diseño específico de DVR para cargas sensibles. El DVR monofásico, basado en un inversor PWM puente H, está diseñado para regular el voltaje suministrado a cargas monofásicas sensibles, garantizando una alimentación constante y estable [17]. En el caso del DVR trifásico, se enfoca en solucionar problemas de SAG y SWELL en sistemas de distribución, utilizando una técnica de inyección mínima de energía, que consiste en inyectar solamente potencia reactiva [18]. Las investigaciones destacan la importancia de encontrar parámetros óptimos para el control y funcionamiento de los DVR, contribuyendo significativamente a la calidad de la energía eléctrica y a la protección de cargas sensibles en sistemas de distribución.

El deterioro de la calidad de energía en los sistemas eléctricos es un problema de los más comunes que existen, la cuales manifiestan diversas complicaciones como caídas de tensión (SAG), sobretensiones (SWELLS) entre otras perturbaciones. Estas complicaciones afectan principalmente a las cargas sensibles que necesitan niveles constantes de tensión y frecuencia. En [19] se describe la metodología para dimensionar cada componente de un DVR destinado a un sistema de distribución con cargas sensibles. Esta metodología se enfoca en asegurar que el DVR pueda compensar eficazmente las perturbaciones y mantener la estabilidad del suministro eléctrico.

2.1 Restauradores de Voltaje Residenciales.

Los restauradores dinámicos de voltaje (DVR) son instrumentos de electricidad diseñados para lidiar con alteraciones de voltaje en las redes de electricidad, esto es, sobrevoltajes, caídas temporales o falta de equilibrio [12]. Estos sucesos pueden deteriorar artefactos delicados y afectar la capacidad de suministro de energía eléctrica. Los DVR funcionan por la inyección de potencia activa o reactiva controladas en las vías de distribución, y esto hace que el voltaje se mantenga en equilibrio en todo momento.

En [20] se propone un diseño de DVR que mantiene de manera inalterable el voltaje en instalaciones eléctricas de bajo voltaje, tales como en redes alimentadas de 120 V-204V con un transformador monofásico de fase partida. El objetivo primordial de este diseño presentado es asegurar de manera correcta el funcionamiento de todos los dispositivos que estén conectados en el hogar, teniendo como finalidad prolongar la vida útil de los mismos. La investigación abarca la normativa de control eléctrico vigente, los elementos utilizados para la corrección del voltaje, y un modelo simulado en Matlab/Simulink que valida la efectividad del diseño. Se logró un sistema que entregó un voltaje con una fluctuación menor al 2% respecto al voltaje nominal.

El funcionamiento inicial de un DVR se basa en un transformador de potencia que posibilita generar corrientes de compensación. Este consumidor está conectado en paralelo con el sistema eléctrico a través de un adaptador [11]. En el momento en que se localiza una anomalía en la corriente de la red, el DVR actúa haciendo una señal de compensación para reestablecer la

magnitud de corriente que se desea. Esta habilidad de respuesta veloz es importante para preservar equipos valiosos en usos comerciales e industriales [13].

De la misma manera, en [21] se enfoca en la implementación de un DVR como parte de los Custom Power Devices (CPD), destinados a mitigar perturbaciones en el sistema eléctrico residencial, tales como armónicos, transitorios, sags y swells. El estudio establece los criterios para el diseño y la implementación de un prototipo de DVR específicamente orientado a cargas domésticas.

2.2 Control y Optimización

El control y la optimización son aspectos esenciales dentro de la performance de los DVR, ya que establecen la capacidad que tienen para atender rápidamente las alteraciones de corriente y maximizar la efectividad de la red. Los sistemas de administración de la red en los modernos controladores de DVR están basados en herramientas que monitorean la condición de esta y toman decisiones en función de ello [22].

En el artículo de [22] se propone un algoritmo de control para el DVR que utiliza un controlador proporcional integral derivativo (PID) controlado mediante un algoritmo denominado saltamontes (GOA). Esta propuesta ayuda a mejorar la calidad eléctrica y estabiliza de manera eficiente el voltaje, además reduce la distorsión armónica e incluso asegura un eficiente uso de la red de distribución.

Además, se comparan diferentes técnicas de optimización (CSA, GOA, FBA, GWO) y se evalúa el rendimiento del PID en comparación con un controlador de rechazo activo de perturbaciones (ADRC). Los resultados de simulaciones en MATLAB/Simulink demuestran que el PID optimizado supera en desempeño al ADRC convencional, ofreciendo una respuesta dinámica más rápida y un menor error global.

En [15] también se enfoca en el uso de controladores PID para DVR, comparándolos con controladores PI (Proporcional-Integral). Se destaca que el controlador PID es más efectivo en la compensación de caídas y subidas de voltaje, especialmente en aplicaciones de bajo y medio voltaje. Al momento de realizar la comparación entre ambos controladores acerca de la distorsión armónica total (THD) podemos concluir que el PID reduce en su mayoría el THD en comparación al PI, mejorando rotundamente la calidad de energía mientras existan fallas monofásicas.

Finalmente, en [23] proponen una solución basada en redes neuronales artificiales (ANN) para mejorar las capacidades de restauración y supresión de armónicos del DVR. Se compara el rendimiento del controlador ANN con el controlador PID y un controlador basado en lógica difusa, demostrando que el controlador ANN proporciona una superioridad en términos de reducción de distorsión armónica total (apenas un 13,5% de THD) y una mayor eficiencia en la restauración del voltaje.

Los avances en la evolución de la inteligencia artificial asimismo son fundamentales para el control y la mejora de los DVR. Algoritmos de aprendizaje automático posibilitan preverse daños en la red y cambiar las configuraciones del DVR de manera activa [23]. Esto no sólo aumenta la eficacia de la máquina, sino que además reduce la erosión de los componentes de ella.

Por lo que, el empleo de herramientas de simulación y representación matemática ha contribuido a la elaboración y análisis de métodos de control y optimización para los DVR. Estas herramientas posibilitan analizar la influencia de diferentes configuraciones y condiciones de trabajo previo a la puesta en marcha de soluciones en la realidad.

2.3 Restauradores en Sistemas de Distribución

La utilización de los DVR en los sistemas de distribución es una costumbre que ha adquirido importancia debido a que la demanda de mayor calidad del suministro de energía eléctrica ha crecido. Estos sistemas, que unen las subestaciones con los usuarios finales, son particularmente propensos a alteraciones en el voltaje debido a su amplitud y diversidad de tareas.

En las redes de distribución, las disfunciones de voltaje es posible que surjan debido a diversas causas, como la incorporación de objetos desbalanceados, la inserción de generación alternativa o las fallas en el momento [18]. Los DVR proveen una solución práctica para solucionar estos problemas, ya que actúan como un amortiguador que ajusta la corriente en las zonas críticas de la rejilla.

En el presente artículo [24] se detalla la implementación del DVR en sistemas de distribución integrados pero añadido con el uso de recursos energéticos renovables, esta opción mitiga diferentes perturbaciones de voltaje que puedan suceder durante el uso de diferentes aparatos electrónicos. Este estudio abarca una discusión exhaustiva acerca de los diferentes controladores y métodos que utiliza el restaurador dinámico de voltaje, y resalta la importancia que va

a tener a futuro la implementación de estos dispositivos en la energía renovable.

En [25] se enfoca en el modelado, análisis y simulación de un DVR de alta eficiencia en MATLAB, utilizando diversas técnicas de control como el esquema PWM discreto con controlador PI, el controlador de corriente de histéresis y el controlador de voltaje de histéresis. La comparación entre estas técnicas de control permite identificar un controlador óptimo para mejorar el rendimiento del DVR, destacando la importancia de la técnica de control en la eficiencia del dispositivo.

Por otro lado, en [14] se presenta una nueva configuración del DVR utilizando un diferenciador de modo deslizante clásico aproximado (ACSMD) con un controlador de modo deslizante terminal (TSMC). Esta configuración se implementa en MATLAB/Simulink y se evalúa su capacidad para mantener la magnitud del voltaje de carga, reducir la distorsión armónica total (THD) y mejorar la robustez del sistema. Este enfoque se centra en abordar los desafíos de calidad de la energía, como subidas y bajadas de tensión y desequilibrio de voltaje, mediante la inyección de una magnitud de voltaje adecuada en el sistema de distribución.

Finalmente, con la revisión bibliográfica se han obtenido diversos estudios sobre DVR que abarcan desde el diseño y optimización de controladores PID, PI y ANN, hasta la implementación en sistemas de distribución residenciales e industriales. Se destacó la importancia de estos dispositivos en mejorar la calidad de la energía eléctrica mediante la mitigación de perturbaciones de voltaje, reducción de la distorsión armónica y estabilización del voltaje en diversas aplicaciones. La implementación de técnicas de control avanzadas y la integración de recursos energéticos renovables se presentaron como aspectos importantes en el desarrollo de los DVR. Siendo esta información una base suficiente para la implementación del proyecto propuesto, donde se aplicarán estas metodologías y tecnologías para diseñar y optimizar un DVR dentro de un sistema de distribución de 37 Barras bajo la normativa IEEE.

2.4 Componentes del Restaurador Dinámico de Voltaje

La operación de un DVR consiste en inyectar voltajes de CA en serie con la línea trifásica para mejorar la calidad de tensión aplicando un ajuste en la magnitud de las señales. Esto generalmente se usa para proteger cargas sensibles cuando ocurre algún fallo inesperado dentro del sistema.

Entre los componentes principales del DVR se encuentra el inversor DC-DC, el cual permite la regulación de voltaje, es decir, aumenta o reduce la tensión dependiendo del modo de operación. Este se conecta hacia el inversor o convertidor el cual se conforma de un puente de IGBT's mismos que conmutan de acuerdo con la modulación PWM del sistema. Posteriormente se conecta a un filtro LC el cual permite la mitigación de los armónicos surgidos por la conmutación del convertidor para finalmente utilizar un transformador de acoplamiento con el sistema de distribución original. El esquema del DVR implementado se observa en la **Figura 1**.

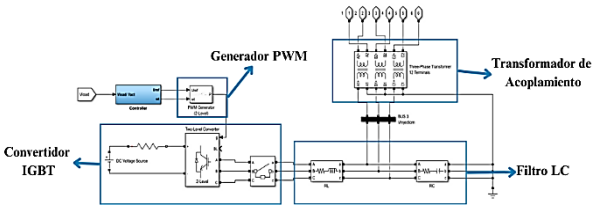


Figura 1. Esquema DVR implementado

2.4.1 Convertidor Inversor

En este caso se utiliza un convertidor de 2 niveles tal y como se observa en la **Figura 2**, el cual se encuentra conectado a una fuente DC de 200V y controlado mediante un generador PWM.

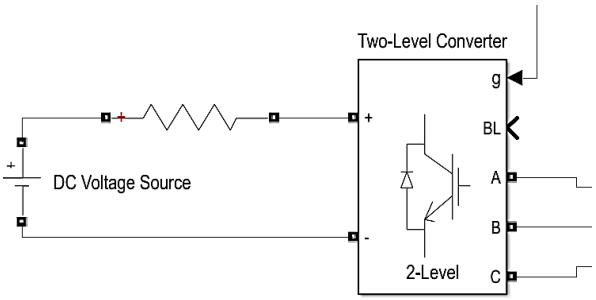


Figura 2. Circuito de Almacenamiento con Inversor y Fuente DC

Al ser un inversor trifásico se considera que el desfase generado entre las señales es de 120° tal y como se muestra en la **Figura 3**. Se debe tener una secuencia ABC y la sumatoria de las tensiones en función del tiempo es igual a cero como se representa en la Ecuación (1).

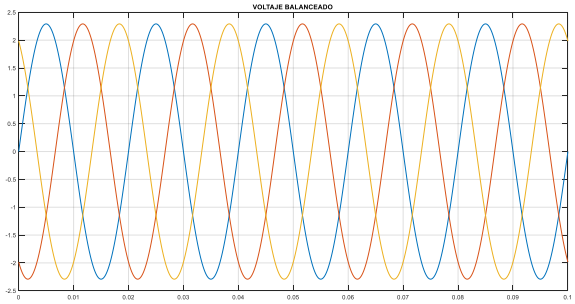


Figura 3. Voltaje del Sistema Balanceado

$$V_{ab}(t) + V_{bc}(t) + V_{ac}(t) = 0 \qquad (1)$$

2.4.2 Esquema de Control

El esquema de control es un componente esencial dentro del DVR ya que permite ajustar los valores de voltaje y fase según la referencia. En la **Figura 4** se observa el esquema de control planteado el cual consta de un Bloque PI el cual tiene una ganancia proporcional (Kp) y una integral (Ki), un bloque de ajuste de fase y un bloque de retroalimentación que permite la comprobación de esta.

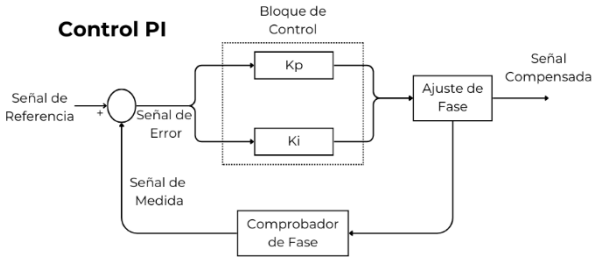


Figura 4. Esquema de Control

2.4.3 Generación de Señal PWM

El generador PWM compara la señal de referencia, que este caso es la señal de la carga con respecto a una señal portadora triangular en base al diagrama de bloques que se observa en la **Figura 5** el cual consta de un controlador PI para que mantenga la fase de manera constante.

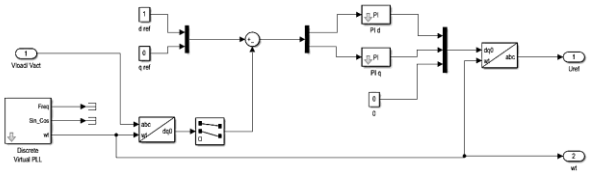


Figura 5. Generación de Señal Portadora con Señal Original

La señal generada por el controlador de la señal portadora se la puede observar en la **Figura 6** la cual forma una onda triangular que modula la señal trifásica de referencia.

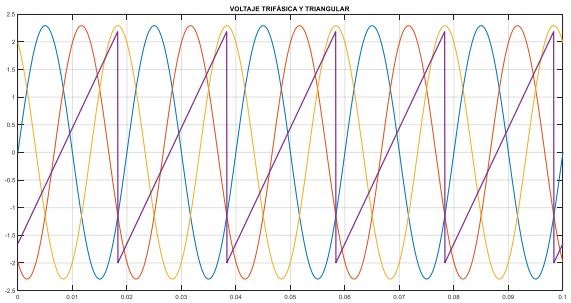


Figura 6. Comparación de Señal Portadora con Señal Trifásica

Con esta señal generada se procede a la generación de los pulsos PWM que permiten el control del inversor IGBT tal y como se observa en la **Figura 7**, dando un encendido y apagado cuando se requiera la compensación del voltaje respectiva.

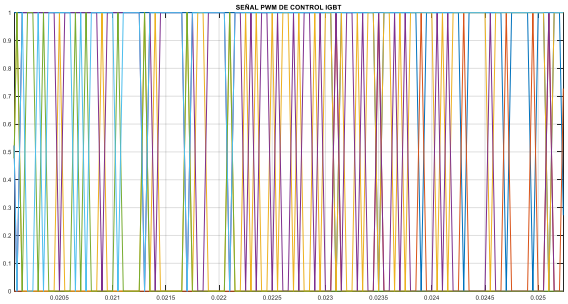
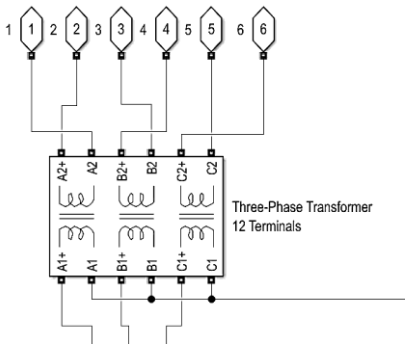


Figura 7. Señal PWM para control de Inversor

2.4.4 Transformador de Acoplamiento y Filtro

Finalmente se procede a colocar un transformador de acoplamiento con la línea de distribución donde se ubica la carga, el cual tiene 12 terminales, para las señales originales, como para la compensación del sistema de DVR y con las características que se observa en la **Figura 8**.



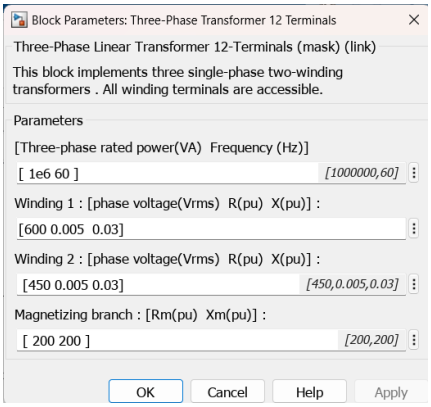


Figura 8. Parámetros del Transformador de Acoplamiento

Una vez acoplado el circuito, se adjunta un filtro LC que se observa en la **Figura 9**, el cual permite balancear el sistema y eliminar la mayor parte de los armónicos generados por la compensación de voltaje.

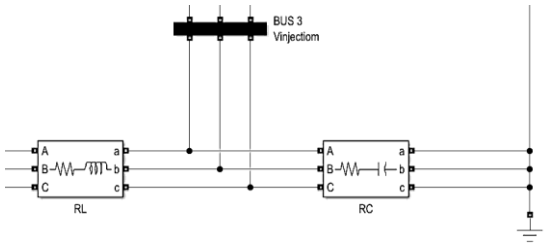


Figura 9. Filtro de Acoplamiento LC

Se considera que este filtro varía dependiendo del tipo de sistema utilizado, es decir se debe ajustar los valores de carga si se cambia la estructura del sistema de distribución.

3 Propuesta de Solución

El proceso metodológico realizado en el presente trabajo de investigación para el cumplimiento de los objetivos planteados se describen dos casos de estudio, en donde se analizarán los componentes para el control tanto para una carga, como para un sistema de 37 barras, así como los valores de los controladores que permiten la compensación de voltaje.

3.1 Sistema de Distribución de 1 Carga

Para analizar el comportamiento del DVR bajo diferentes escenarios de operación, se procedió a implementar un circuito de distribución con una Carga RL en paralelo en configuración delta. Los parámetros principales de la línea se los observa en la **Tabla 1**.

Tabla 1. Parámetros del Sistema de Distribución - Caso 1

Característica	Valor
Voltaje Nominal (Fuente)	4.8kV
Frecuencia de Trabajo (Fuente)	60 Hz
Configuración (Fuente)	Delta
Voltaje Nominal entre Fases (Carga)	480 V
Potencia Activa (Carga)	1.5 kW
Potencia Reactiva Inductancia (Carga)	100 VA

Una vez implementado el sistema bajo los parámetros observados, se procede a acoplar el DVR al sistema, en donde se ingresan los terminales de salida 1, 3 y 5 a la línea principal, y los terminales 2, 4 y 6 a los terminales de la carga tal y como se observa en la **Figura 10**. La ubicación del DVR en este caso de estudio se selecciona previo a la conexión de la carga debido a que es el único nodo de análisis posterior a la fuente de alimentación.

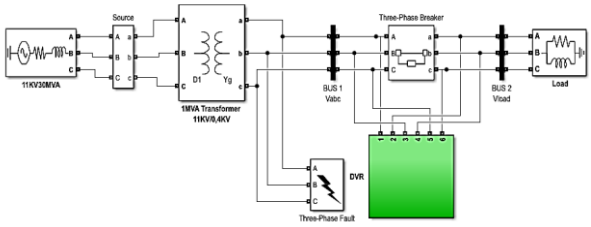


Figura 10. Integración de DVR a sistema de 1 Carga

En cuanto al controlador, se utiliza dos bloques PI, ya que este tipo de controladores es utilizado para las compensaciones de voltaje en aplicaciones de este tipo. En la **Tabla 2** se puede observar los detalles del controlador PI implementado para el caso de estudio 1. Estos valores se ajustaron de forma experimental, variando los parámetros desde un valor mínimo hasta un valor máximo, hasta lograr sintonizar la salida esperada con la forma de onda que más se ajuste a la señal original.

Tabla 2. Parámetros de Control del Sistema de Distribución - Caso 1

Característica	Valor
Ganancia Proporcional 1	40
Ganancia Integral 1	154
Ganancia Proporcional 2	25
Ganancia Integral 2	250

Adicionalmente se colocan los valores del filtro RLC que se observan en la **Figura 11** para generar una señal de respuesta que no posea armónicos. Con estos valores se realiza las pruebas necesarias para la verificar el comportamiento del DVR.

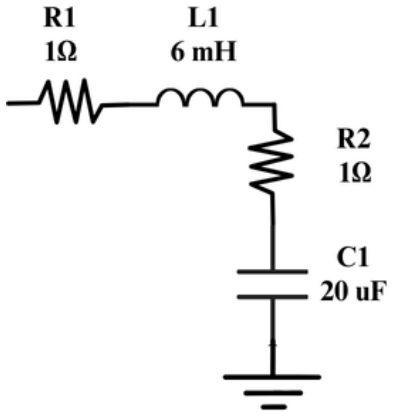


Figura 11. Filtro Pasivo para DVR - Caso 1

3.2 Sistema IEEE de 37 Barras

El segundo caso de estudio es la implementación del sistema de 37 Barras IEEE el cual se observa en el **Anexo A – Diagrama de Sistema de 37 Barras**. Este sistema tiene las características que se observan en la **Tabla 3**, en donde se destaca que existe pérdidas en la línea que genera carga inductiva, capacitiva y resistiva en cada trayecto. La fuente de alimentación tiene una capacidad de 4.8kV con una potencia de 6000VA para cubrir la demanda del circuito.

Tabla 3. Parametrización del Sistema IEEE 37 Barras

Característica	Valor
Voltaje Nominal (Fuente)	4.8kV
Frecuencia de Trabajo (Fuente)	60 Hz
Configuración (Fuente)	Delta
Potencia (Fuente)	6000 VA
Cantidad de Cargas	37
Resistencia / Km por Trayecto	[0.01273 0.3864]
Inductancia / Km por Trayecto	[0.9337e-3 4.1264e-3]
Capacitancia / Km por Trayecto	[12.74e-9 7.751e-9]

Cada una de las cargas está configurada como indica la norma, parámetros de los cuales se los puede observar en el **Anexo B – Parametrización de Cargas**. De igual manera cada tramo de conexión entre nodos tiene un valor asignado según la norma y de los cuales se puede observar en **Anexo C – Parametrización de Líneas.**

En cuanto a los parámetros del controlador, se mantiene el uso de 2 controladores PI como en el caso de estudio 1, con una variación en las ganancias que se indica en la **Tabla 4**. De igual manera que con el sistema básico, se ajustaron los valores de ganancia de forma experimental, variando los parámetros de un valor mínimo a un valor máximo, hasta sintonizar la salida esperada con la forma de onda original.

Tabla 4. Parámetros de Control del Sistema de Distribución - Caso 2

Característica	Valor
Ganancia Proporcional 1	40
Ganancia Integral 1	200
Ganancia Proporcional 2	20
Ganancia Integral 2	250

Finalmente se colocan los valores del filtro RLC que se observan en la **Figura 12** para generar una señal de respuesta que no posea armónicos. Con estos valores se realiza las pruebas necesarias para la verificar el comportamiento del DVR.

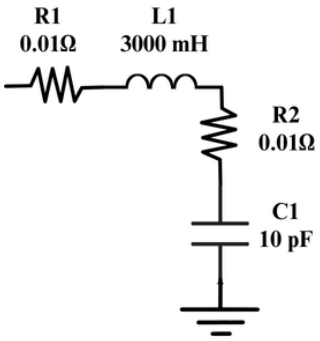


Figura 12. Filtro Pasivo para DVR - Caso 2

4 Análisis de resultados

4.1 Caso de Estudio: Sistema de Distribución con 1 Carga.

Para observar los resultados del DVR se hace la simulación de una falla dentro del sistema, mediante el bloque Three Phase Fault el cual se muestra en la **Figura 13** el cual genera una caída de tensión en las 3 fases, entre el segundo 0.03 a 0.07.

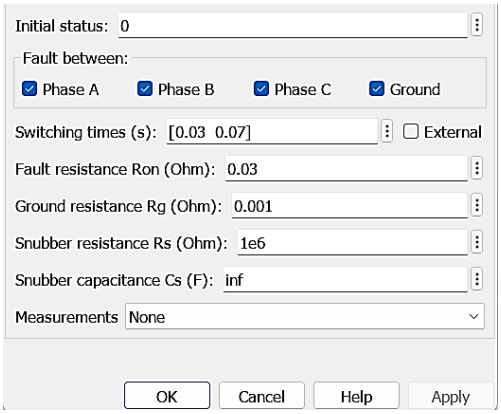


Figura 13. Parámetros de Falla en Línea de Transmisión

Una vez establecidos los tiempos de falla se procede a ejecutar la simulación, en donde se obtienen las respuestas de cada una de las señales. En la **Figura 14** se puede observar la respuesta del sistema en el punto donde se ejecuta la falla. Como se muestra existe una disminución de voltaje en los 0.03s hasta los 0.07s.

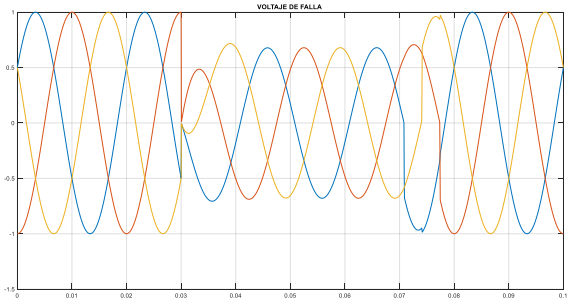


Figura 14. Voltaje de Falla - Caso 1

De igual manera, en la **Figura 15** se muestra la gráfica del voltaje compensado en cada una de las fases, en donde se evidencia el incremento de esta señal entre los segundos 0.03 a 0.07, tiempo durante el cual ocurre la falla.

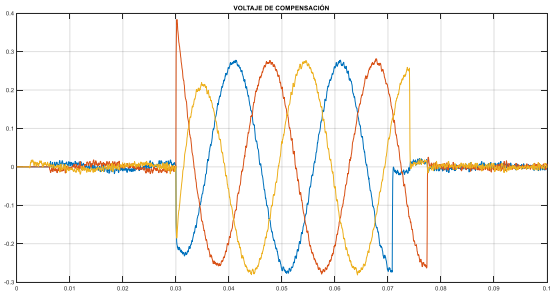


Figura 15. Voltaje de Compensación - Caso 1

Finalmente se comprueba que la inyección del voltaje compensado sea ejecutada en la carga de análisis, por lo que en la **Figura 16** se observa la respuesta de la señal en la Carga 1 evidenciando el correcto funcionamiento del DVR, generando una señal con pocos armónicos, sin desplazamiento de fase y con un voltaje que no se encuentra desbalanceado.

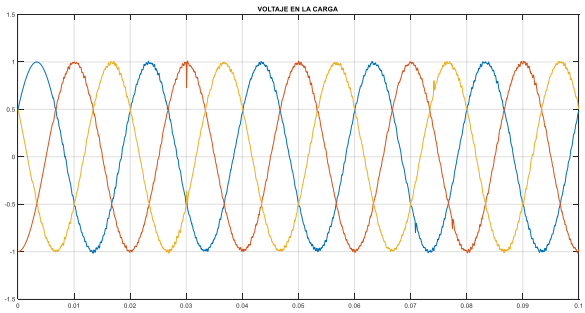


Figura 16. Voltaje en la Carga - Caso 1

4.2 Caso de Estudio: Sistema de Distribución de 37 Barras

Se procede a ejecutar la simulación para observar el comportamiento de las tensiones con el sistema totalmente balanceado. En la **Figura 17**, **Figura 18**, **Figura 19** y **Figura 20** se puede observar los voltajes obtenidos en las cargas 712, 724, 741 y 742 respectivamente, identificando que no existen desbalances en ninguna de las fases.

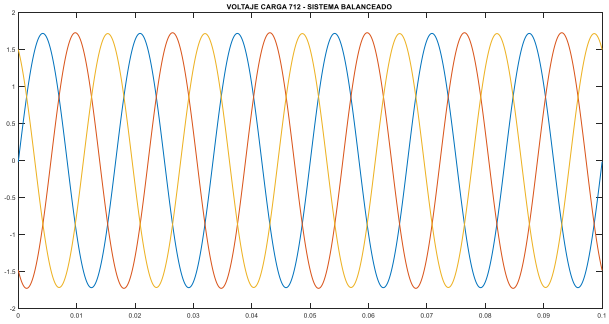


Figura 17. Voltaje en Carga 712 - Sistema Balanceado

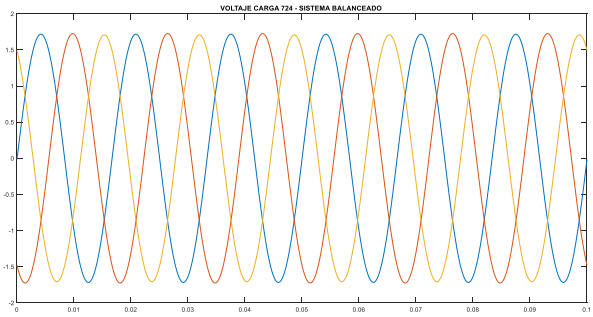


Figura 18. Voltaje en Carga 724 - Sistema Balanceado

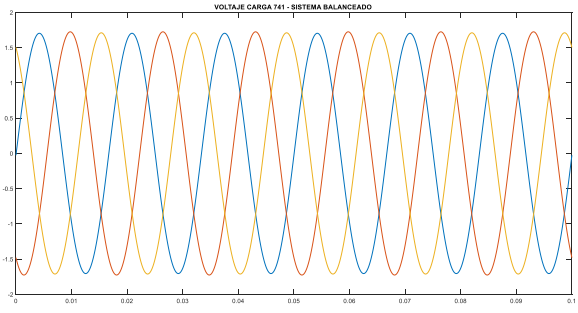


Figura 19. Voltaje en Carga 741 - Sistema Balanceado

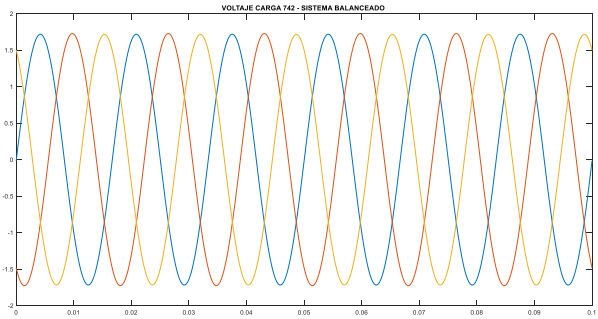


Figura 20. Voltaje en Carga 742 - Sistema Balanceado

Se procede a desbalancear el sistema con el objetivo de generar un desbalance en las señales de voltaje. Para esto, se selecciona una carga en paralelo a la carga 742 tal y como se observa en la **Figura 21** lo cual generará una perturbación en el balance del sistema que se activará en 0.01s y mantendrá el desbalance hasta los 0.02 s.

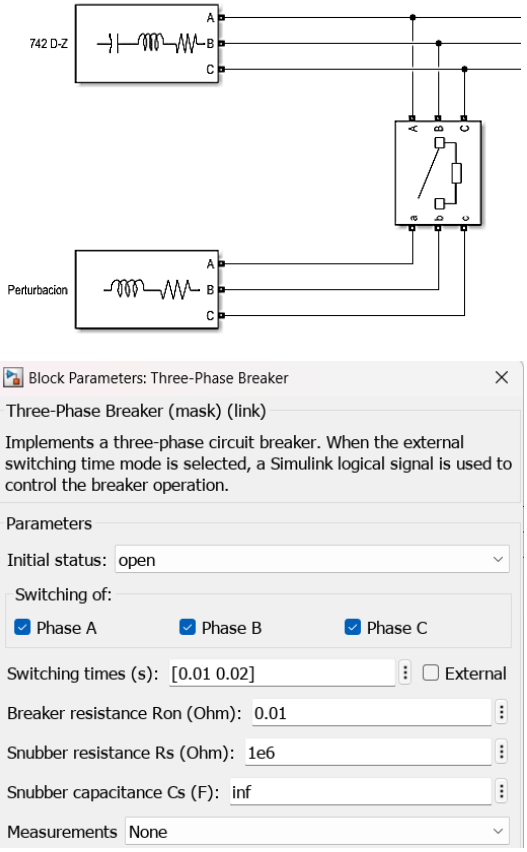


Figura 21. Desbalanceo de Carga 742 en Sistema de 37 Barras

Con esto se ejecuta la simulación para observar el comportamiento de cada una de las cargas con el desbalance del sistema. En la **Figura 22**, **Figura 23**, **Figura 24** y **Figura 25** se pueden observar las respuesta de voltaje obtenidas en las cargas 712,

724, 741 y 742 respectivamente, identificando que el desbalance produce fallas en todas las cargas del sistema.

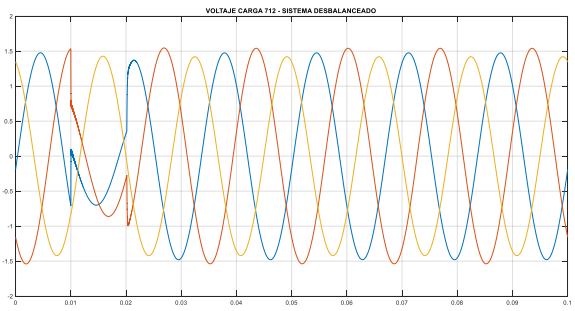


Figura 22. Voltaje en Carga 712 - Sistema Desbalanceado

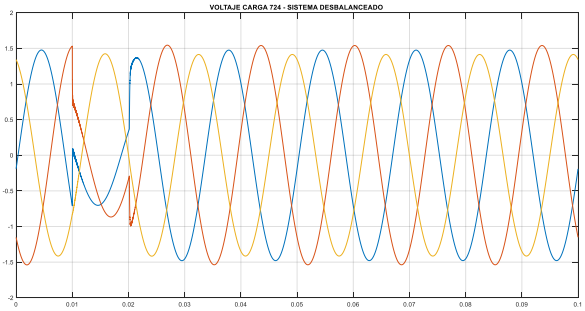


Figura 23. Voltaje en Carga 724 - Sistema Desbalanceado

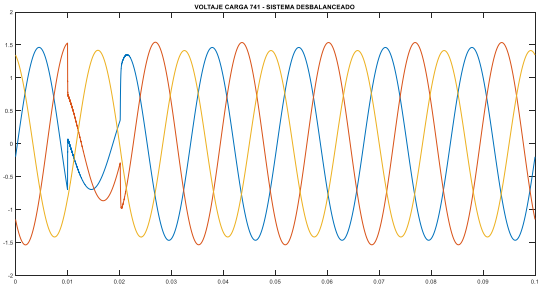


Figura 24. Voltaje en Carga 741 - Sistema Desbalanceado

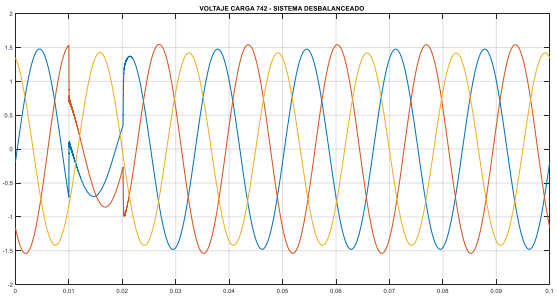


Figura 25. Voltaje en Carga 742 - Sistema Desbalanceado

Posteriormente se integra el DVR al sistema de 37 Barras, para lo cual se realiza la conexión entre la línea 705 – 742, que conecta la carga 742 con la perturbación tal y como se observa en la **Figura 26**. Se determinó este punto de análisis al ser un nodo intermedio que permite afectar de manera directa al desbalance de todo el sistema y de esta manera se puede comprobar las cargas más lejanas, así como las más cercanas desde la fuente de alimentación.

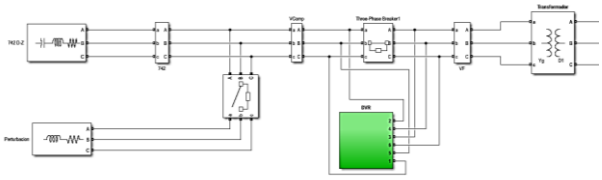


Figura 26. Integración de DVR a Sistema de 37 Barras

Con esto se realiza el ajuste del filtro LC del DVR para conseguir una calidad de señal óptima en las 3 fases. Para esto se selecciona valores de L= 3000mH y C= 10pF. Se ejecuta la simulación para observar el comportamiento del DVR. En la **Figura 27**, **Figura 28** y **Figura 29** se puede observar la respuesta de voltaje obtenida en las cargas 712, 724 y 741.

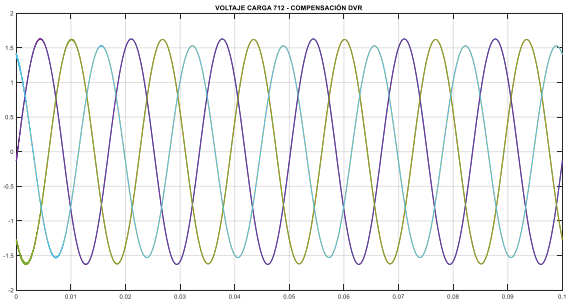


Figura 27. Voltaje en Carga 712 con DVR

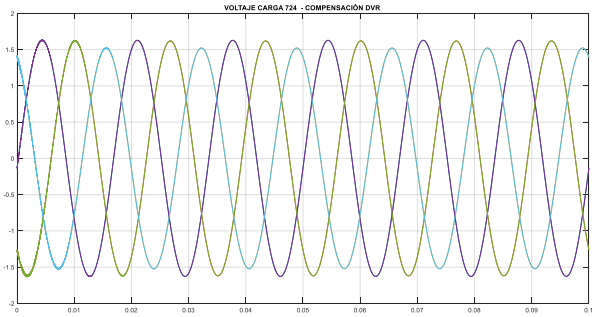


Figura 28. Voltaje en Carga 724 con DVR

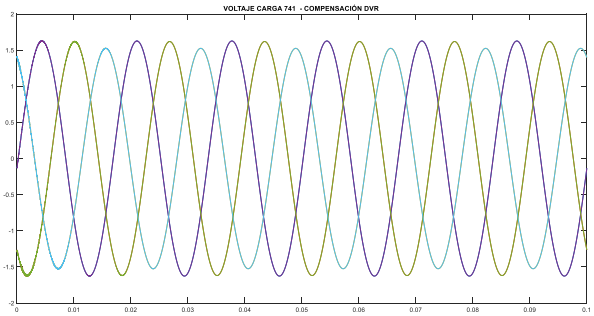


Figura 29. Voltaje en Carga 724 con DVR

Se identifica que existe una compensación en las cargas externas a la perturbación que tienen una excelente calidad de señal. Sin embargo, en la **Figura 30** se observa la respuesta de voltaje obtenida en la carga 742 o carga de desbalance en donde en la fase B (verde) se tiene una generación de armónicos que pueden perjudicar al sistema en general.

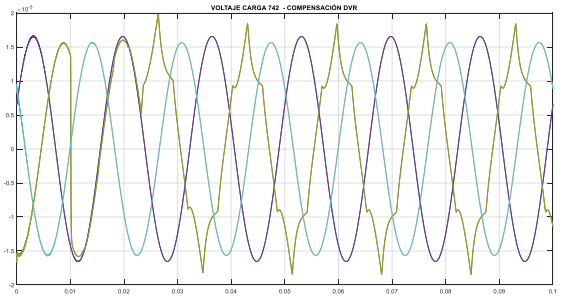


Figura 30. Voltaje en Carga 742 con DVR

Fuente: Elaboración Propia

Para solucionar el problema presentado, se realiza la colocación de un filtro RLC el cual será el encargado de disminuir los armónicos en la fase que tiene el problema, en este caso la fase B. Para esto se coloca en serie un componente de elementos pasivos tal y como se observa en la **Figura 31** , con los valores de R=5, I=400mH y C=8000uF.

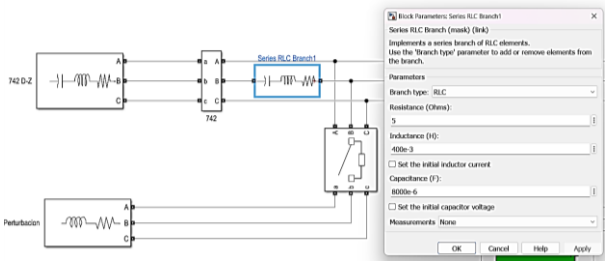


Figura 31. Filtro para Disminución de Armónicos en Fase B

Como se observa en la **Figura 32**, la colocación del filtro en la fase B produce una mejora significativa en la forma de onda de la carga 742, reduciendo en gran medida los armónicos y los sobre picos existentes con anterioridad.

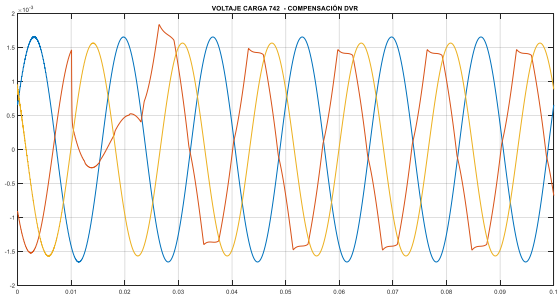


Figura 32. Voltaje en Carga 742 con DVR y Filtro RLC

Finalmente, en la **Figura 33** se puede observar el voltaje de inyección del DVR hacia el sistema, en donde se verifica que existe una mayor cantidad de voltaje que ingresa al sistema cuando se produce la falla en los segundos 0.01 a 0.02 s, para después volver a disminuir ya que el desbalanceo de la carga culmina y vuelve al estado normal de operación.

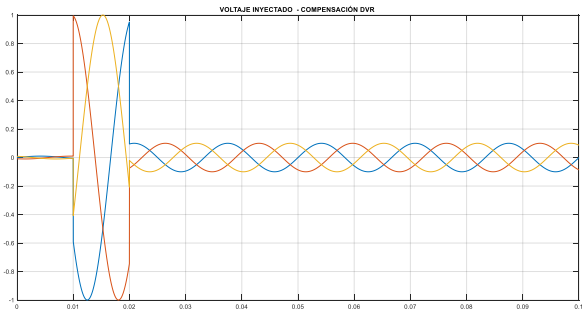


Figura 33. Voltaje de Compensación de DVR en Sistema de 37 Barras

5 Conclusiones

Mediante la revisión bibliográfica realizada se pudo identificar diversas metodologías y esquemas de control para lograr mitigar el desequilibrio de voltaje en sistemas de distribución. Adaptando el sistema de control PI en la implementación del DVR mediante el uso de Matlab / Simulink, se realizó 2 casos de estudio diferentes. En primer lugar, se aplicó el esquema de DVR obteniendo un perfil de voltaje sin ningún armónico dentro de sus fases.

Posteriormente se procedió a la implementación del DVR en un sistema de 37 barras, el cual consta de líneas de transmisión las cuales tienen características propias del sistema, así como cada una de las cargas las cuales fueron caracterizadas de igual manera que en la normativa. Dentro de este sistema se implementó un esquema de control PI realizando variaciones experimentales de los parámetros de control, así como del filtro de compensación. Con un valor de 3000mH y 10pF se procedió a realizar las pruebas del DVR en donde se aplicó un desbalance en la carga 742 a los 0.01 a 0.02 s. Se observó que el DVR en conjunto con el esquema de control planteado cumple la compensación de manera correcta en todas las cargas exceptuando en la que se aplicó el desbalance, lo cual asegura la mitigación del desequilibrio de voltaje.

Se realizaron diversas pruebas de rendimiento del DVR hasta integrar un filtro adicional el cual se coloca en la Fase B de la carga 742 y el cual permite disminuir la acción de los armónicos generados por la compensación del voltaje y la activación de los IGBT. Se generó un filtro RLC con valores de R=5, I=400mH y C=8000uF el cual mejoró la efectividad de manera significativa en la señal de respuesta de voltaje permitiendo cumplir con el objetivo de la compensación y mitigación de problemas de voltaje dentro del sistema.

5.1 Trabajos futuros

En cuanto a los trabajos futuros se plantea la aplicación del DVR diseñado en sistemas de distribución de IEE de 13, 34 y 123 para evaluar el comportamiento de la propuesta generada en esta investigación y de esta forma evaluar posibles mejoras para diferentes situaciones de carga.

También se plantea el análisis del DVR bajo diferentes condiciones de compensación, es decir generando fallas o desbalances en más cargas y de esta manera visualizar el comportamiento del sistema en diversos problemas que pueden ocurrir en un sistema de distribución.

Referencias

[1] P. Ogunboyo, R. Tiako y I. Davidson, «Effectiveness of Dynamic Voltage Restorer for Unbalance Voltage Mitigation and Voltage Profile Improvement in Secondary Distribution System,» *Can. J. Electr. Comput. Eng,* vol. 41, nº 2, pp. 105 - 115, 2022.

[2] S. DaneshvarDehnavi, C. Negri, S. Bayne y M. Giesselmann, «Dynamic Voltage Restorer (DVR) with a novel robust control strategy,» *ISA Trans,* vol. 121, pp. 316 - 326, 2022.

[3] M. Para, R. El, D. De, L. Demanda y M. Voltaje, «Metodología para reducir el desbalance de la demanda mediante sistemas de medio voltaje en corriente directa,» 2021.

[4] D. Campoverde, «Reducción del desequilibrio de voltaje mediante el uso del interruptor de transferencia estática, en una micro-red,» 2022.

[5] N. Sayed, G. El-Saady, E. Ibrahim y M. Mohamed, «Dynamic Voltage Restorer for Enhancing Distribution Systems Power Quality,» *Proc. Int. Japan-Africa Conf. Electron. Commun. Comput. JAC-ECC 2019,* pp. 210 - 215, 2019.

[6] J. Lopez y E. Ventura, «Estudio del desbalance de tensiones y sus efectos en la calidad del producto técnico para sistemas de distribución a nivel industrial,» 2019.

[7] P. A. Achig y D. Carrión, «Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica,» 2019.

[8] D. Eduardo, B. Vasconcellos y Y. Céspedes, «Compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución primaria de energía, aplicando algoritmos genético,» 2017.

[9] P. Rivera, A. Oleas y C. Barrera, «Control De Voltaje En Sistemas Eléctricos De Potencia Usando Transformadores Con Taps,» 2019.

[10] H. Axcell, «Mejoramiento de los perfiles de voltaje en los sitemas de distribución

mediante óptima ubicación de reguladores de tensión con cambiadores de derivación usando busqueda exhaustiva,» 2021.

[11] P. Wang, J. Lu y B. Xu, «Research on Control Optimization for Dynamic Voltage Restorer Using Fuzzy Adaptive PI Control,» *Int. Conf. Power Energy Syst. Appl,* pp. 28 - 33, 2023.

[12] T. Naidu, S. Member, S. Arya y S. Member, «Dynamic Voltage Restorer With Quasi-Newton Filter-Based Control Algorithm and Optimized Values of PI Regulator Gains,» *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron,* vol. 7, nº 4, pp. 2476 - 2485, 2019.

[13] C. T. e. al., «Dynamic Voltage Restorer With an Improved Strategy to Voltage Sag Compensation and Energy Self-Recovery,» *CPSS Trans. Power Electron. Appl.,* vol. 4, nº 3, 2019.

[14] A. M. M. Ariff, «The enhancement of power quality for the distribution system via dynamic voltage restorer,» *International Journal of Power Electronics and Drive System,* vol. 11, nº 3, pp. 1588 - 1595, 2020.

[15] K. Sureshkumar, S. Vasanthamani, M. Mariammal, S. Raj y R. Vinodkumar, «Power Quality Improvement Using Dynamic Voltage Restorer,» *Bonfring International Journal of Power Systems and Integrated Circuits,* vol. 9, nº 1, 2019.

[16] E. Hernández, A. Méndez y F. Jurado, «Diseño e implementación de un restaurador de tensión mediante Simulink perteneciente a la rama de los Custom Power,» *Revista Ingeniantes,* vol. 2, nº 1, 2023.

[17] G. Paredes y G. Díaz, «diseño y simulación del control de un restaurador dinámico de voltaje monofásico,» 2012.

[18] J. Asanza y M. Quimis, «Diseño del Control y Simulación de un Restaurador Dinámico de Voltaje Trifásico,» 2018.

[19] C. sepulveda y A. alzate, «metodologia para el diseño y dimensionamiento de un restaurador dinámico de tensión,» *Scientia et Technica Año XVI,* nº 48, 2011.

[20] F. León, «diseño de un restaurador dinámico de voltaje para instalaciones residenciales,» 2022.

[21] P. Carrillo y D. Tirara, «diseño e implementación de un prototipo de restaurador dinámico de voltaje (dvr) para mitigar variaciones de corta duración en cargas residenciales,» 2019.

[22] I. Ahmed, H. Shady, E. Essam y M. Algablawy, «An improved approach for robust control of dynamic voltage restorer,» *ISA Transactions,* 2019.

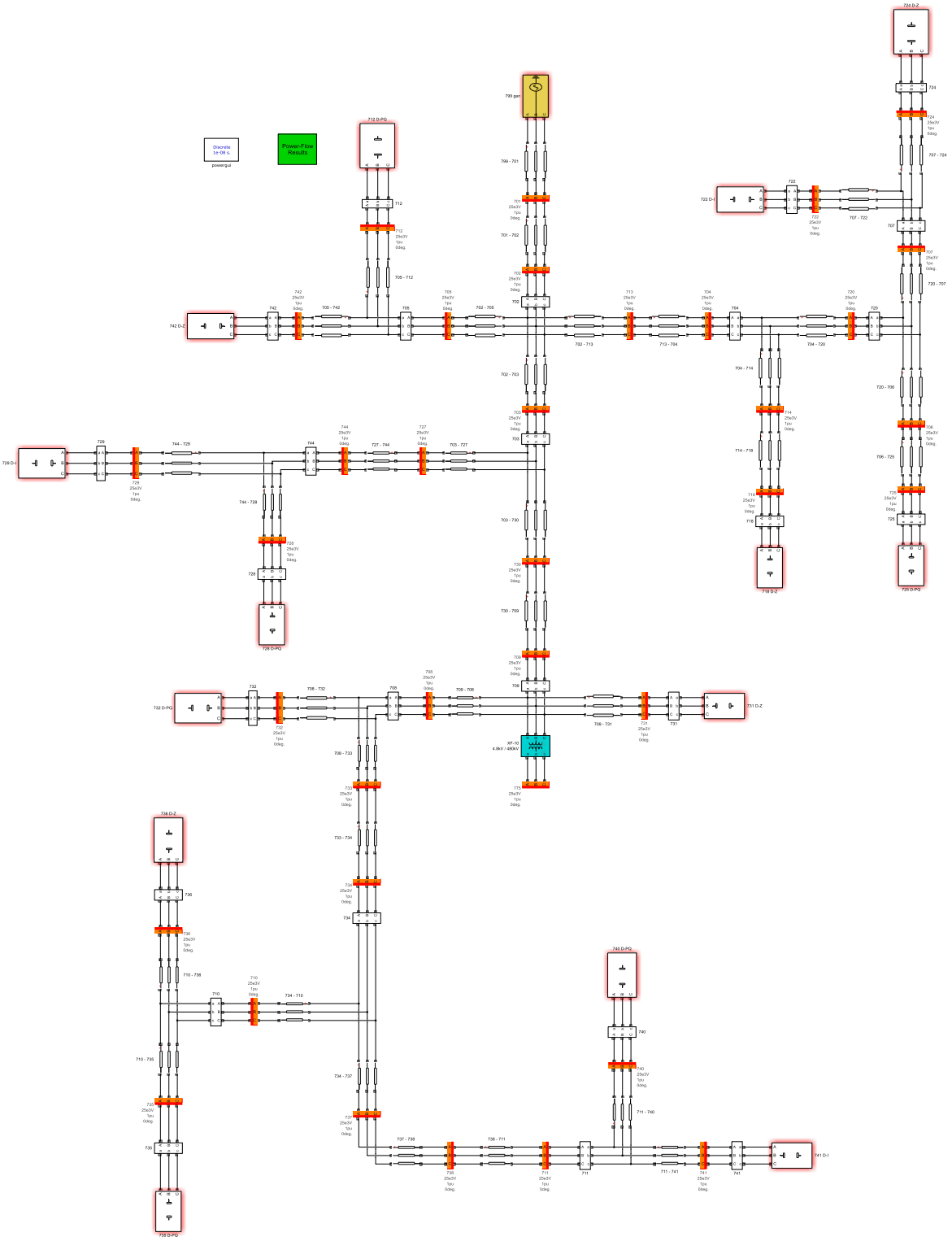
[23] S. Haque, E. Hossain y M. Ahmed, «Artificial Neural Network based Dynamic Voltage Restorer for Improvement of Power Quality,» *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE),* 2018.

[24] M. A, A. M y S. Najwa, «Power quality improvement using dynamic voltage restorer in electrical distribution system: an overview,» *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science,* vol. 17, nº 1, pp. 86 - 93, 2020.

[25] S. Saravanan, M. Solaimanigandan, T. Tharaneetharan, V. Varunraj y S. Parthasarathy, «Dynamic Voltage Restorer for Distribution System,» *International Journal of Engineering Research and Development,* vol. 7, nº 1, pp. 14 - 24, 2013.

6 Anexos

6.1 Anexo A – Diagrama de Sistema de 37 Barras



6.2 Anexo B – Parametrización de Cargas

Spot Loads

Node	Load	Ph-1	Ph-1	Ph-2	Ph-2	Ph-3	Ph-4
	Model	kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
701	D-PQ	140	70	140	70	350	175
712	D-PQ	0	0	0	0	85	40
713	D-PQ	0	0	0	0	85	40
714	D-I	17	8	21	10	0	0
718	D-Z	85	40	0	0	0	0
720	D-PQ	0	0	0	0	85	40
722	D-I	0	0	140	70	21	10
724	D-Z	0	0	42	21	0	0
725	D-PQ	0	0	42	21	0	0
727	D-PQ	0	0	0	0	42	21
728	D-PQ	42	21	42	21	42	21
729	D-I	42	21	0	0	0	0
730	D-Z	0	0	0	0	85	40
731	D-Z	0	0	85	40	0	0
732	D-PQ	0	0	0	0	42	21
733	D-I	85	40	0	0	0	0
734	D-PQ	0	0	0	0	42	21
735	D-PQ	0	0	0	0	85	40
736	D-Z	0	0	42	21	0	0
737	D-I	140	70	0	0	0	0
738	D-PQ	126	62	0	0	0	0

740	D-PQ	0	0	0	0	85	40
741	D-I	0	0	0	0	42	21
742	D-Z	8	4	85	40	0	0
744	D-PQ	42	21	0	0	0	0
Total		727	357	639	314	1091	530

6.3 Anexo C – Parametrización de Líneas

Line Segment Data

Node A	Node B	Length(ft.)	Config.
701	702	960	722
702	705	400	724
702	713	360	723
702	703	1320	722
703	727	240	724
703	730	600	723
704	714	80	724
704	720	800	723
705	742	320	724
705	712	240	724
706	725	280	724
707	724	760	724
707	722	120	724
708	733	320	723
708	732	320	724
709	731	600	723
709	708	320	723

710	735	200	724
710	736	1280	724
711	741	400	723
711	740	200	724
713	704	520	723
714	718	520	724
720	707	920	724
720	706	600	723
727	744	280	723
730	709	200	723
733	734	560	723
734	737	640	723
734	710	520	724
737	738	400	723
738	711	400	723
744	728	200	724
744	729	280	724
775	709	0	XFM-1
799	701	1850	721