

**MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN ALIMENTADORES CRÍTICOS
INCORPORANDO RESTAURADORES DE VOLTAJE DINÁMICOS MEDIANTE EL
MODELO DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN**



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN ALIMENTADORES CRÍTICOS
INCORPORANDO RESTAURADORES DE VOLTAJE DINÁMICOS MEDIANTE EL
MODELO DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN.**

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

AUTOR: MADIÁN HAMID TITO SALMERÓN
TUTOR: MANUEL DARIO JARAMILLO MONGE

Quito -Ecuador
2023

Madián Hamid Tito Salmerón

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN ALIMENTADORES CRÍTICOS INCORPORANDO RESTAURADORES DE VOLTAJE DINÁMICOS MEDIANTE EL MODELO DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN.

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2023

Carrera de Electricidad

Breve reseña histórica e información de contacto.



Madián Hamid Tito Salmerón (Y' 1997). Realizó sus estudios de nivel secundario en la Unidad Educativa Fiscal “Capitán Giovanni Calles” de la ciudad de Francisco de Orellana. Actualmente se encuentra cursando el décimo semestre de la carrera de Electricidad en la Universidad Politécnica Salesiana. mtitos@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Manuel Dario Jaramillo Monge (Y' 1990). Realizó sus estudios superiores en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE de Quito, donde se graduó de Ingeniero Electrónico en Automatización y Control en el 2014. Además, donde obtuvo el título en Máster en Electrical Power. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo de la Universidad Politécnica Salesiana. mjaramillo@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

©2023 Universidad Politécnica Salesiana

QUITO - ECUADOR

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Madián Hamid Tito Salmerón con documento de identificación N° 2200368781 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, 13 de noviembre del año 2023

Atentamente,



Madián Hamid Tito Salmerón
2200368781

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

Yo, Madián Hamid Tito Salmerón con documento de identificación No. 2200368781, 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 el autor del Artículo Académico; “Mejoramiento del perfil de voltaje en alimentadores críticos incorporando restauradores de voltaje dinámicos mediante el modelo de control de retroalimentación.”, 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, 13 de noviembre del año 2023

Atentamente,



Madián Hamid Tito Salmerón
2200368781

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Dario Jaramillo Monge con documento de identificación N° 1714298005, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN ALIMENTADORES CRÍTICOS INCORPORANDO RESTAURADORES DE VOLTAJE DINÁMICOS MEDIANTE EL MODELO DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN, realizado por Madián Hamid Tito Salmerón con documento de identificación N° 2200368781, 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, 13 de noviembre del año 2023

Atentamente,



Ing. Manuel Dario Jaramillo Monge, MSc
1714298005

ÍNDICE GENERAL

1	Introducción	2
2	Marco teórico.....	3
2.1	Sistemas de red de distribución	3
2.1.1	Topología de la red de distribución	3
2.1.2	Componentes principales del sistema de distribución	4
2.2	Problemas existentes en el sistema de distribución	5
2.2.1	Pérdidas de potencia en transformadores	5
2.2.2	Pérdidas de potencia en líneas.....	6
2.3	Estabilidad en sistemas eléctricos de distribución	6
2.3.1	Estabilidad de voltaje	7
2.3.2	Estabilidad de frecuencia	7
2.4	Restauradores dinámicos de voltaje (DVR)	8
2.4.1	Modelado del DVR	8
2.4.2	Principales componentes del DVR	9
2.5	Control de retroalimentación	10
2.5.1	PLL (Phase Locked Loop).....	10
2.5.2	Componentes del PLL	11
2.5.3	Operación del PLL.....	12
3	Metodología.....	12
3.1	Formulación del problema	12
3.2	Generación distribuida del tipo fotovoltaica.....	14
3.3	Implementación de DVR a través del control PLL en inversor de potencia..	15
3.3.1	Modus operandi del control PLL	15
3.3.2	Lógica del regulador VDC	15
3.3.3	Funcionamiento del regulador de corriente.....	15
3.4	Casos de estudio	16
3.4.1	Sistema base IEEE 34 barras	16
3.4.2	Incorporación de DVR en el sistema de 34 barras	16
3.4.3	Inclusión de cargas dinámicas y verificación del funcionamiento del DVR	17
4	Análisis de resultados	18
4.1	Sistema base IEEE 34 barras.....	18
4.2	Incorporación de DVR en el sistema de 34 barras.....	18
4.3	Inclusión de cargas dinámicas y verificación del funcionamiento del DVR... 20	

4.3.1	Inclusión de carga dinámica 1	20
4.3.2	Inclusión de carga dinámica 1, 2.....	21
4.3.3	Inclusión de carga dinámica 1, 2, 3.....	21
4.3.4	Inclusión de carga dinámica 1, 2, 3 , 4	22
5	Conclusiones.....	23
5.1	Trabajos futuros	24
6	Referencias.....	24
6.1	Matriz de Estado del Arte	27
6.2	Resumen de Indicadores.....	29

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de distribución radial.....	4
Figura 2. Sistema de distribución mallado.....	4
Figura 3. Sistema de distribución anillo.....	4
Figura 4. Diagrama unifilar de un circuito DVR.....	8
Figura 5. Diagrama esquemático de un PLL (lazo de fijación de fase).....	10
Figura 6. Sistema de prueba (IEEE de 34 Barras).....	13
Figura 7. Esquemático de la generación distribuida fotovoltaica.....	14
Figura 8. Modo de operación del control PLL.....	15
Figura 9. Esquemático del control PLL y regulador de corriente.....	16
Figura 10. Sistema IEEE de 34 barras con detención de carga crítica en la barra 27.....	16
Figura 11. Sistema IEEE de 34 barras con detención de carga crítica vs implementación del módulo DVR en la barra 27.....	17
Figura 12. Inclusión de cargas dinámicas y DVR.....	18
Figura 13. Perfil de voltaje del sistema IEEE de 34 barras en condiciones normales.....	18
Figura 14. Perfil de voltaje del sistema IEEE de 34 barras e implementación del módulo DVR en la barra 27.....	19
Figura 15. Inclusión de la primera carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.....	20
Figura 16. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 1 vs. el DVR mediante una desviación media.....	20
Figura 17. Resultados de compensación de la carga dinámica 1 en los tiempos establecidos.....	20
Figura 18. Inclusión de la segunda carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.....	21
Figura 19. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 2 vs. el DVR mediante una desviación media.....	21
Figura 20. Resultados de compensación de la carga dinámica 2 en los tiempos establecidos.....	21
Figura 21. Inclusión de la tercera carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.....	21
Figura 22. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 3 vs. el DVR mediante una desviación media.....	22
Figura 23. Resultados de compensación de la carga dinámica 3 en los tiempos establecidos.....	22
Figura 24. Inclusión de todas las cargas dinámicas con el voltaje original vs. la compensación del DVR.....	22
Figura 25. Comparación de los perfiles de voltaje de todas las cargas vs. el DVR mediante una desviación media.....	22
Figura 26. Resultados de compensación de todas las cargas dinámicas en los tiempos establecidos.....	23
Figura 27. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte....	29
Figura 28. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.....	29
Figura 29. Indicador de solución - Estado del arte.....	29

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de líneas de distribución.	13
Tabla 2. Datos de nodos del sistema.	14
Tabla 3. Datos de cargas y tiempos de inclusión.	17
Tabla 4. Datos de compensación de voltaje.	19

MEJORAMIENTO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN ALIMENTADORES CRÍTICOS INCORPORANDO RESTAURADORES DE VOLTAJE DINÁMICOS MEDIANTE EL MODELO DE CONTROL DE RETROALIMENTACIÓN.

Resumen

En el siguiente artículo se abarcarán las principales problemáticas existentes en la calidad de energía, donde se considerará la implementación de un compensador DVR acompañado de una lógica de control PLL retroalimentada. Se presenta una solución a las caídas y subidas de tensión existentes en el sistema de distribución buscando mejorar la estabilidad del voltaje en cada barra y mitigar las perturbaciones que se puedan suscitar. El control PLL (Phase Locked Loop) es posible implementarlo mediante el software Matlab/Simulink, para lo cual se parametriza cada bloque de elementos, especificando voltajes de compensación requeridos en el sistema IEEE de 34 barras. Para un análisis con mayor enfoque en el comportamiento del DVR se requiere la inclusión de un flujo de carga exponencial, que simule una caída de tensión la cual provocará una gran inestabilidad de voltaje en los alimentadores y en las barras más vulnerables del sistema. Las señales de entrada de la red y salida de la carga ingresarán al módulo DVR, donde comienza a actuar el sistema de control de retroalimentación lineal, que determina mediante la retroalimentación de datos si el compensador requiere inyectar potencia activa o absorber potencia reactiva hasta lograr obtener los niveles de voltaje deseados. El compensador estará implementado en la barra 27 entre la red y la carga, inyectando potencia de forma constante a fin de mantener los voltajes dentro de los niveles de operación.

Palabras Clave: Sistema de control de retroalimentación lineal, calidad de energía, flujo de carga.

Abstract

In the following article, the main existing problems in power quality will be covered, where the implementation of a DVR compensator accompanied by a feedback PLL control logic will be considered. A solution to the voltage rises and drops existing in the distribution system is presented, seeking to improve the stability of the voltage in each bar and mitigate the disturbances that may arise. The PLL (Phase Locked Loop) control can be implemented using the Matlab/Simulink software, for which each block of elements is parameterized, specifying compensation voltages required in the IEEE 34-bar system. For an analysis with greater focus on the behavior of the DVR, the inclusion of an exponential load flow is required, which simulates a voltage drop which will cause a great voltage instability in the feeders and in the most vulnerable bars of the system. The input signals of the network and output of the load will enter the DVR module, where the linear feedback control system begins to act, which determines through data feedback if the compensator requires to inject active power or absorb reactive power until obtaining desired voltage levels. The compensator will be implemented in bar 27 between the network and the load, constantly injecting power to maintain the voltages within the operating levels.

Keywords: Linear feedback control system, power quality, load flow.

1 Introducción

El sistema de distribución tiene como objetivo ser el despacho de energía hacia los suministros o usuarios finales, donde se ve presente que el crecimiento de la demanda de energía es producido por el incremento poblacional lo que ocasiona varios problemas de inestabilidad de voltaje a causa de la sobrecarga en los alimentadores [1], [2].

Por ello surge la idea de dar solución a estos problemas buscando tener un sistema robusto que inyecte un voltaje constante dentro de los rangos establecidos por las distribuidoras y que presente una continuidad del servicio sin perturbaciones, evitando producir en el sistema el deterioro en los elementos y déficit en el despacho de la energía [1], [2].

Los niveles de voltaje en el sistema de distribución en Ecuador están en el rango de 0.6 a 40 kV, siendo estos los valores para que el sistema opere en los límites permisibles, pero a razón de las perturbaciones en el sistema se hace imposible mantener estos niveles, por ello se busca tener bajo control el voltaje en el circuito, buscando estabilizar las variaciones de voltaje [2], [5].

Las líneas de distribución son las encargadas de transportar la energía de una subestación a otra y posteriormente hacia los usuarios finales manteniendo el voltaje constante en cada uno de los puntos de transformación, la confiabilidad de los alimentadores depende de los niveles de voltajes, por eso se debe evitar disparos ocasionados por el crecimiento de la demanda o una incorrecta dimensión de los conductores [2], [5].

Es importante destacar del sistema de distribución a las subestaciones, debido a que cuentan con diversos arreglos y varios de ellos afectan la continuidad del servicio, a razón de su estructura y construcción. Las tres topologías básicas de las subestaciones son: radial, en anillo y mallado, siendo la

topología anillo que brinda mayor continuidad del servicio [2], [5].

La topología radial tiene una baja confiabilidad debido a que su estructura presenta un solo camino sin retorno siendo propenso a dejar sin servicio a varios usuarios, lo que podría ocasionar caídas de tensión y sobre carga en los alimentadores, por ello se busca un compensador que permita disipar sobrecargas o mantener el perfil de voltaje de las barras a fin conservar los niveles de tensión en un rango de 0.95 a 1 pu [2], [5].

El desarrollo tecnológico de los reguladores de voltaje es cada vez más rápido y preciso con una lógica de control sencilla al momento mantener la diferencia de las fases en cero, por ello son una gran alternativa para la mejora del perfil de voltaje permitiendo mitigar las caídas y subidas de tensión por motivo de las desconexiones y adiciones de cargas instantáneas que en sí generan grandes pérdidas de energía. [17], [20].

Por lo general los reguladores de voltaje se conectan en serie entre la red de distribución y las cargas críticas, operando de forma continua, inyectando la potencia necesaria de compensación con el fin de mantener el voltaje de carga en los niveles establecidos por las distribuidoras [17], [20].

El restaurador dinámico de voltaje (DVR) es una tecnología que se ha utilizado recientemente ante problemas de caídas y subidas de tensión, usa la lógica de control de retroalimentación PLL con la finalidad de relacionar las diferencias de las frecuencias de cada fase y mantenerlas en valores cercanos al cero. [15], [17].

Al pensar en una forma de mejorar la calidad de la energía y estabilizar el sistema de distribución se tiene en consideración los reguladores de voltaje, lo cuales ayudan a proteger la carga del usuario final y no sobrecargar los alimentadores críticos ante cualquier perturbación que se pueda presentar en su funcionamiento [15].

El DVR en cuanto a su funcionamiento es considerado un instrumento personalizado de potencia con la capacidad de mejorar el perfil de voltaje en las líneas de distribución, barras y usuarios finales, se pueden conectar en serie exactamente antes de las cargas críticas a diferencia de otros tipos de compensadores que tienen su conexión en paralelo [17].

El DVR cuenta principalmente con un dispositivo de almacenamiento de energía CC, un inversor de fuente de voltaje y un transformador de inyección, para el monitoreo de compensación de potencia se utiliza la lógica control PLL retroalimentada la cual opera de forma continua [20], [23].

El principal elemento en la operación del DVR es la lógica de control, que permite al compensador trabajar de manera continua, rápida y con precisión, analizando la frecuencia y fase del VCO (oscilador controlado por voltaje), detectando las diferencias de frecuencias existentes en las señales de entrada y salida, permitiendo eliminarlas con el fin de mejorar el perfil de voltaje [20], [23].

El filtro pasivo se encarga de mitigar el ruido existente en las señales sincronizadas presentando una mejora en la señal original, produciendo así una mayor estabilidad de voltaje en el sistema ante perturbaciones que se puedan originar, [23].

El presente artículo tiene como objetivo brindar una mejora al sistema de distribución mediante un análisis del sistema IEEE de 34 barras, en el cual se implementará un módulo DVR con la ayuda del software Matlab/Simulink, que permite estudiar el comportamiento del sistema al punto de poder determinar si la compensación que está suministrando el módulo es la correcta, siendo así para las empresas distribuidoras un gran factor económico en el control de pérdidas energéticas y una mejora en el despacho de la energía [5], [7].

2 Marco teórico

El Sistema de Distribución cuenta con diversos conceptos fundamentales que se abarcan a continuación: Clasificación de la estructura de la red, elementos que componen la red, parámetros para el estudio de las caídas de voltaje. Para mitigar las caídas y subidas de tensión se analizará un control de retroalimentación PLL monofásico que se incorporará en los restauradores dinámicos de voltaje [1].

2.1 Sistemas de red de distribución

El sistema de distribución conforma una parte del sistema eléctrico de potencia, abarcando grandes territorios a diferentes magnitudes de voltaje que van desde 2.4kV a 69kV, alimentados por un sistema de transmisión o subtransmisión, abasteciendo a millones de sistemas independientes de bajo voltaje que operan entre 120 V y 600 V [1] - [3].

También conocido como el gigante invisible, debido a que supera el 80% de la inversión del sistema eléctrico de potencia, a razón de todos los elementos que lo componen, por ello requiere una evolución constante en equipos, herramientas, estructuras y materiales ocupados en la construcción de las redes de distribución [1], [2].

El sistema de distribución puede ser proyectado de forma que a medida que se incrementa la demanda el sistema se amplía progresivamente, con la finalidad de asegurar un servicio adecuado y continuo para la carga futura y presente. La aplicación de una ingeniería cuidadosa debe considerarse para la planificación, construcción y operación del sistema [3], [4].

2.1.1 Topología de la red de distribución

Existen 3 tipos de topologías que se pueden encontrar en sistema de distribución, la selección de cada una de ellas dependerá de

la continuidad del servicio y regulación de tensión deseada [2].

Sistema radial

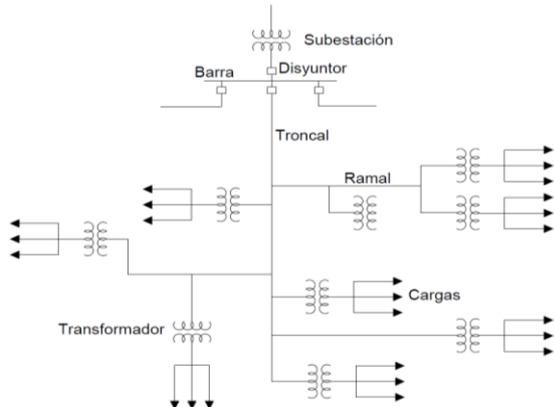


Figura 1. Sistema de distribución radial.

Es un sistema que consta de una sencilla instalación y bajo presupuesto en su construcción, su estructura presenta un solo camino sin retorno, donde la potencia viaja desde centro de alimentación hacia la carga.

Los equipos de corte y protección que se puede encontrar en esta estructura son menores a diferencia de las otras topologías, por ello cuentan con una baja confiabilidad del servicio ante averías y mantenimiento debido a que deja fuera de servicio a diversos usuarios conectados a la red. Por lo general se utiliza la topología radial para la electrificación de zonas rurales [5].

Sistema mallado

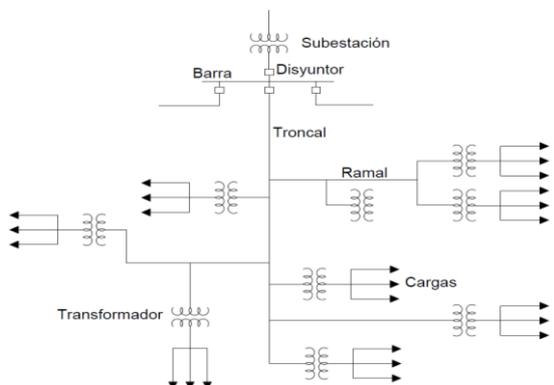


Figura 2. Sistema de distribución mallado.

Este sistema es empleado en zonas industriales donde se requiere una alta

continuidad del servicio y una adecuada estabilidad de voltaje. Por lo tanto, el sistema mallado se considera el más confiable, debido a que los centros de carga son energizados desde diversos centros de alimentación. Requiere un sistema de protección más complejo, debido a que presenta una mayor potencia de cortocircuito [5].

Sistema anillo

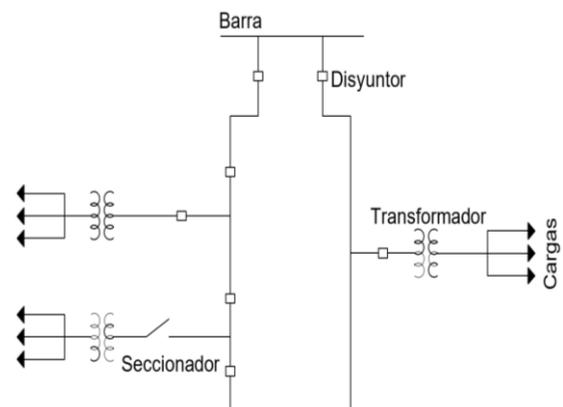


Figura 3. Sistema de distribución anillo.

Este sistema ayuda a suplir de energía a zonas que requieren una alta continuidad de suministro eléctrico, esto es posible debido a que la estructura en anillo está formada por más de una trayectoria, permitiéndole alimentar a la carga desde diversas zonas, evitando de esta forma cortes del servicio [5].

2.1.2 Componentes principales del sistema de distribución

Los principales elementos que componen el sistema de distribución son:

Subestación principal de potencia

Se encarga de transformar la potencia proveniente de las centrales de generación a un nivel de voltaje de transmisión. Se consideran voltajes de transmisión de 138 kV – 500 kV, los cuales ingresan a las subestaciones de subtransmisión

manejando potencias elevadas de cientos MW [2], [5].

Sistema de subtransmisión

Este sistema está conformado por líneas que transportan tensiones de 46 kV – 69 kV, que parten desde la S/E de subtransmisión, alimentado a las S/E de distribución [2], [5].

Subestaciones de distribución

La S/E de distribución se encarga de transformar la energía proveniente de las líneas de subtransmisión a niveles de media tensión, la cual será conducida por los alimentadores primarios hacia los usuarios finales [2], [5].

Alimentadores primarios

Las redes de media tensión provenientes de las S/E de distribución son las encargadas de transportar niveles tensión de 2.4 kV – 34.5 kV, que ingresan al transformador de distribución, con la finalidad de reducir los niveles de voltaje [2], [5].

Transformadores de distribución

Estos transformadores permiten reducir el nivel tensión que circulan en los alimentadores primarios a un nivel de consumo para el usuario final. En el mercado se puede encontrar transformadores monofásicos (120/240 V) y trifásicos (127/220 V), los cuales cuentan con tres diferentes tipos de montaje que pueden ser en: poste, cámaras subterráneas o tipo Padmounted [2], [5].

Alimentadores secundarios

Las redes de baja tensión se encuentran conectadas al secundario del transformador de distribución, se encarga de suministrar energía a los usuarios por medio de una acometida, con la finalidad de suplir la demanda de consumo que pueda existir en cada industria, comercio o residencia [2].

2.2 Problemas existentes en el sistema de distribución

El sistema de distribución cuenta con algunos problemas a lo largo de su estructura debido a la distancia que existe desde las centrales de generación hasta los puntos de carga, lo cual provoca que existan pérdidas de energía, siendo esto muy perjudicial para las empresas distribuidoras, ya que provocan pérdidas económicas muy elevadas [6], [7].

2.2.1 Pérdidas de potencia en transformadores

Existe una gran pérdida de potencia activa internamente en el transformador, la cual es producidas por el acero (no depende del transformador), y pérdidas ocasionadas por los devanados (dependen de la carga de transformador), por tal razón se definen a las pérdidas totales de potencia activa en el transformador con la siguiente ecuación [3], [8], [10].

$$\Delta P_t = \Delta P_{vac} + \Delta P_{c.c} \cdot \beta^2 \quad (1)$$

Donde:

ΔP_{vac}	pérdidas en acero interno del transformador sometido a un voltaje nominal.
$\Delta P_{c.c}$	pérdidas en los devanados internos del transformador con carga nominal.
$\beta = \frac{S}{S_n}$	concordancia entre la carga que alimenta al transformador y su potencia nominal.

En el transformador también se encuentran pérdidas de potencia reactiva, que se encuentran asociadas con las pérdidas de excitación o magnetización (no dependen de la carga), y pérdidas ocasionadas por el flujo de dispersión (dependen de la carga de transformador) [3], [8], [10]. Estas dos pérdidas pueden ser expresadas por la siguiente ecuación:

$$\Delta Q_t = \Delta Q_{vac} + \Delta Q_{c.c} \cdot \beta^2 \quad (2)$$

Los valores de pérdidas en acero (ΔP_{vac}) y cobre ($\Delta P_{c.c}$) se pueden encontrar en los catálogos de los transformadores, de igual manera se pueden encontrar las pérdidas de potencia reactiva (ΔQ_{vac} y $\Delta Q_{c.c}$) en los datos de catálogo que son definidas por las siguientes expresiones [3], [8].

$$\Delta Q_{vac} = \sqrt{\left[\frac{I_{vac}\% S_{nT}}{100}\right]^2} \Delta P_{vac} \cdot 10^3 \cong \frac{I_{vac}\% S_{nT}}{100} \quad (3)$$

$$\Delta Q_{c.c} = 3 I_{nT}^2 \cdot X_T \cdot 10^3 \cong \frac{V_{c.c}\% S_{nT}}{100} \quad (4)$$

Donde:

I_{vac}	corriente de vacío del transformador en %.
$V_{c.c}$	voltaje de cortocircuito en %.
I_{nT}	corriente nominal del transformador en A.

2.2.2 Pérdidas de potencia en líneas

Existen pérdidas de potencia en las líneas de distribución por tal razón es necesario realizar cálculos para determinar los valores de potencia activa o reactiva que se están perdiendo en las redes trifásicas. Por lo tanto, se formula la siguiente ecuación para el cálculo de pérdidas de potencia activa [3], [9].

$$\Delta P_L = 3 I_{cál.c.}^2 \cdot R_L \cdot 10^{-3} \quad (5)$$

Para el cálculo de pérdidas de la potencia reactiva se formula la siguiente ecuación:

$$\Delta Q_L = 3 I_{cál.c.}^2 \cdot X_L \cdot 10^{-3} \quad (6)$$

Donde:

$I_{cál.c.}$	indica la corriente de cálculo para una distancia específica dada en A.
--------------	---

En ciertos casos las pérdidas de potencia en las líneas de distribución se reflejan en porcentajes de potencia de cálculo; que viene determinada por la siguiente formula [3], [9].

$$\Delta P_L \% = \frac{\Delta P_L}{P_{cál.c.}} 100 \quad (7)$$

Si en las líneas de distribución de corriente alterna (CA), los valores de caída de tensión son pequeños en la potencia reactiva, se determina una unión entre las pérdidas de potencia (%) y las caídas de tensión, dando como resultado la siguiente ecuación [3], [9].

$$\Delta V \% = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot R_L \cdot \cos \varphi}{V_n} 100 \quad (8)$$

$$\Delta P \% = \frac{3 \cdot I_n^2 \cdot R_L}{P_{cál.c.}} 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot I_n \cdot R_L}{V_n \cdot \cos \varphi} 100 \quad (9)$$

Reemplazando la ecuación (8) en la ecuación (9), se obtienen las pérdidas de potencia (%) en las líneas de distribución [3], [9].

$$\Delta P \% = \frac{\Delta V \%}{\cos^2 \varphi} \quad (10)$$

Se obtiene la ecuación (10) para encontrar las pérdidas de potencia, para este caso se determinaron mediante las caídas de tensión existentes en las líneas de distribución [3], [9].

2.3 Estabilidad en sistemas eléctricos de distribución

La estabilidad en el sistema eléctrico de potencia es un factor limitante que afecta a las redes de distribución, esto debido a una creciente proporción de carga controlada por potencia y exceso de carga en las líneas de transmisión y distribución, por ello se busca realizar estudios de estabilidad de voltaje y frecuencia en el sistema con el fin

de lograr una mayor robustez en el mismo [11] - [13].

Mediante simulaciones se obtienen parámetros de operación que se utilizan como límites de seguridad para las líneas y barras del sistema, que requieren operar de forma estable, siendo el caso de que presente alguna perturbación física, este pueda volver a un estado de equilibrio operativo, logrando de esta forma que el sistema no ingrese a un riesgo mayor como el colapso total [11] - [13].

En el sistema de distribución la estabilidad se define como una propiedad de movimiento el cual debe permanecer en un conjunto de equilibrio, donde las diversas fuerzas que existen en el sistema logren igualarse de forma instantánea y pueda conservar las condiciones iniciales de operación [13].

Un sistema de distribución que cuenta con estabilidad logra controlar perturbaciones grandes y pequeñas, y a lo largo de su operación debe ser capaz de adaptarse a condiciones cambiantes, con la finalidad de soportar daños graves como cortocircuitos en las líneas, los cuales podrían provocar daños en las estructuras debido a la pérdida de aislamiento de los elementos en falla [13].

Para el estudio de la estabilidad en los sistemas de distribución, se toman en cuenta el voltaje y la frecuencia en la que opera el sistema, de esta manera se busca un balance de las dos variables en operación constante. Para poder entender de mejor forma como actúan estos eventos en las redes de distribución y como afectan a las líneas y barras, se definen los siguientes temas como base de fundamento para el estudio de la estabilidad en los sistemas de distribución.

2.3.1 Estabilidad de voltaje

La estabilidad de voltaje en una red de distribución depende de la capacidad que tiene el sistema para mantener los voltajes estables ante alguna perturbación suscitada ya sea en las líneas o barras, desde una

condición inicial determinada. Por tal razón el sistema requiere tener la destreza de mantener o restaurar el equilibrio entre la carga y la generación, evitando ocasionar subidas y bajas de tensión en la mayor cantidad de barras [13], [14].

La inestabilidad del voltaje puede ocasionar pérdidas en la carga lo que conlleva a una desconexión de las líneas de distribución y otros elementos que conforman su sistema de protección. Algunos elementos como el transformador con tap bajo carga, limitadores de corriente y operaciones de desconexiones forzadas en las líneas provocan que el sistema ante una respuesta de falla se ralentice dando como resultado la inestabilidad de la red [11], [13].

2.3.2 Estabilidad de frecuencia

La estabilidad de la frecuencia requiere de una habilidad en el sistema de distribución, el cual tiene como objetivo mantener una frecuencia constante ante una severa perturbación, que resulta en un desequilibrio representativo entre la carga y la generación. Por tal razón la estabilidad de la frecuencia depende de la capacidad de mantener o restablecer el equilibrio entre la carga y la generación, manteniendo una mínima pérdida involuntaria [13], [14].

La inestabilidad de frecuencia que se puede suscitar en la red de distribución es producida por oscilaciones de frecuencia sostenidas, las cuales provocan pérdidas de carga y unidades de generación. Por lo general los problemas de la estabilidad de frecuencia se encuentran asociados a falta de respuestas de los equipos, mala coordinación de equipos de protección y control y la insuficiente reserva de generación [13] - [15].

La inestabilidad de la frecuencia requiere ser analizada como un fenómeno a corto plazo, donde la formación de una isla subgenerada con deslastre de carga no cuenta con una carga ideal de frecuencia de modo que la misma decae de forma inmediata lo

que provoca apagones en cuestión de segundos. El fenómeno a largo plazo actúa como protección y control de la red, que actúa con un intervalo de tiempo que puede ir desde los 0 segundos hasta varios minutos [13] - [15].

2.4 Restauradores dinámicos de voltaje (DVR)

El restaurador dinámico de voltaje (DVR) es conocido como un dispositivo de potencia personalizado, utilizado para mejorar la calidad de la energía en las instalaciones del consumidor, y muy útiles para manejar cargas críticas, las cuales son muy sensibles a los cambios de voltaje que se suministra.

El DVR se conecta en serie al terminal de red, el cual se encuentra ubicado antes de las cargas críticas, se inyecta el voltaje de compensación requerido con la finalidad de mantener el voltaje de carga en los valores deseados [15] - [17].

El DVR es principalmente útil para mitigar las caídas y subidas de tensión, que se producen por la adición y desconexión instantánea de la carga. También conocido como un dispositivo FACTS (Sistema de Transmisión de Corriente Alterna Flexible), con la capacidad de resolver estos problemas en una línea de distribución de energía.

Un DVR generalmente consta de un dispositivo de almacenamiento de energía de CC, un inversor de fuente de voltaje, componentes de filtro pasivo y un transformador de inyección [15] - [17].

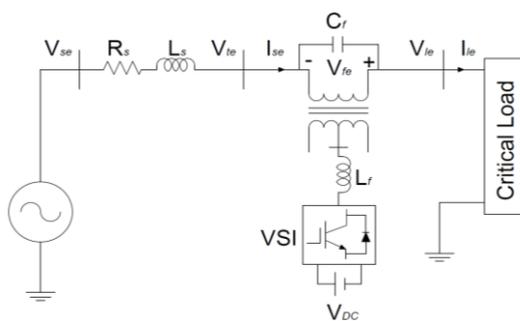


Figura 4. Diagrama unifilar de un circuito DVR.

El circuito de control del DVR detecta la presencia de caídas o subidas de voltaje e inyecta el voltaje de CA requerido en la línea lo más rápido posible. Cuenta con una técnica de control simple, basado en el control de retroalimentación, que toman como valores de referencia al voltaje de fuente y voltaje de carga.

Proporciona al sistema una alta eficiencia y una respuesta dinámica rápida, su dimensión es pequeña y presenta un bajo costo en el mercado, lo que hace de este dispositivo una opción ideal para lidiar con problemas de calidad de energía [17], [18].

2.4.1 Modelado del DVR

El restaurador dinámico de voltaje (DVR), tiene 2 modos de trabajo, el primero denominado operación en cortocircuito (Standby), en donde el voltaje entregado es grande. El segundo es por impulso (Boost), opera cuando el DVR entrega un voltaje de magnitud y etapa adecuadas para poder restablecer el voltaje de carga anterior a la falla [16].

$$V_{DVR} = V_{LOAD} + Z_S * I_{LOAD} - V_S \quad (11)$$

Donde:

V_{LOAD}	Voltaje de carga.
Z_S	Impedancia de la fuente.
I_{LOAD}	Corriente de carga.
V_S	Voltaje de la fuente.

Entonces la Corriente de carga (I_{LOAD}) actual es:

$$I_L = \frac{[P_L + jQ_L]}{V} \quad (12)$$

La ecuación (2) se puede escribir tomando V_L como referencia.

$$V_{DVR} \angle \alpha = V_L \angle 0 + Z_{TH} \angle (\beta - \theta) - V_{TH} \angle \delta \quad (13)$$

Donde α , β y δ son los ángulos de V_{DVR} , Z_{TH} y V_{TH} respectivamente, θ es el ángulo de potencia [16].

$$\theta = \tan^{-1} \frac{Q_L}{P_L} \quad (14)$$

La inyección de energía compleja del DVR se define de la siguiente forma:

$$S_{DVR} = V_{DVR} I_L \quad (15)$$

2.4.2 Principales componentes del DVR

El restaurador dinámico de voltaje (DVR), representado en un diagrama de bloques cuenta con los siguientes componentes principales:

Inversor de fuente de voltaje

El DVR cuenta con un inversor tipo puente monofásico, este dispositivo produce un voltaje CA requerido por la línea principal para la compensación. Esta unidad de control esta encargada de suministrar pulsos de activación para los interruptores, en función de la presencia de sag (disminución de voltaje) o swell (elevación de voltaje) [17] - [19].

Almacenamiento de energía

El inversor de fuente de voltaje requiere un suministro de CC en forma de un condensador de almacenamiento de CC o una batería [17] - [19].

Transformador de inyección

El DVR cuenta con un transformador reductor, el cual se encuentra conectado en el lado de Media tensión con la red de distribución y en su lado de Baja tensión conectado al circuito de alimentación del DVR. Su función principal es inyectar el voltaje DVR adecuado y también proporcionar aislamiento del circuito DVR de la línea de alimentación [17] - [19].

Filtro pasivo

Se utiliza un filtro LC para el DVR, con la finalidad de eliminar voltajes de alta frecuencia, encontrados en la salida del

inversor de fuente de voltaje. Esta unidad asegura que el voltaje inyectado a la red es netamente sinusoidal [17] - [19].

Unidad de control

Se utiliza una unidad de control en el DVR, la encargada de monitorear continuamente el voltaje de barra, siendo el caso que note alguna ausencia de voltaje, tomara la acción de generar pulsos de compuerta para los MOSFET del inversor, supliendo así el voltaje necesario para la compensación [17] - [19].

La unidad de control permite que el DVR actúe de forma rápida ante alguna perturbación de voltaje, inyectando un voltaje AC adecuado para el sistema. Por medio de la transformada de Park la forma de onda trifásica del voltaje de carga se convierte en una señal de corriente continua, con el fin de simplificar los procesos, cálculos y análisis [18].

Para estimar el valor de error entre la señal de referencia y el voltaje de carga se utiliza un controlador integral proporcional (PI), convirtiendo nuevamente la señal trifásica en su valor real. A continuación, se muestra el controlador de transformación del dq0 Park empleado en la unidad de control del DVR mediante la siguiente ecuación [18].

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Para convertir el voltaje trifásico a las señales trifásicas originales de salida se emplea el controlador de transformación Park dq0, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin(\omega t) & 1 \\ \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

El controlador PI al escribirse de forma matemática quedaría expresado con la siguiente ecuación:

$$U = K_p e + K_i \int e d\tau \quad (18)$$

$$U = K_p e + \frac{1}{\tau_N} \int e d\tau \quad (19)$$

$$U = K_p \left(e + \frac{1}{\tau_N} \int e d\tau \right) \quad (20)$$

Donde:

U	Controlador PI
K_p	Factor de ganancia proporcional.
K_i	Factor de ganancia de integración.
T_1	Tiempo de integración.
T_N	Tiempo de reinicio.

Para calcular el error entre la señal de referencia y el voltaje de carga se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = G \frac{(1+\tau_s)}{\tau_s} \quad (21)$$

Donde $G = K_p$, es el factor de ganancia proporcional y $G/T = K_i$, es el factor de ganancia integral.

Para obtener los voltajes trifásicos modulados se debe considerar la siguiente ecuación:

$$V_a = \sin(\omega t + \delta) \quad (22)$$

$$V_b = \sin\left(\omega t + \delta + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (23)$$

$$V_c = \sin\left(\omega t + \delta + \frac{4\pi}{3}\right) \quad (24)$$

La relación entre frecuencia y fase se puede expresar mediante la siguiente ecuación:

$$\omega(t) = \frac{d\phi}{dt} \quad (25)$$

La unidad de control del DVR se puede reducir al algoritmo de control donde se incorpora el controlador PI.

2.5 Control de retroalimentación

El control de retroalimentación permite comparar una señal de entrada y de salida de una variable (voltaje y frecuencia), la cual en presencia de cualquier perturbación ayuda a reducir la señal de error utilizando a la diferencia como una variable de control para el mejoramiento de los perfiles de tensión del sistema de distribución [20].

2.5.1 PLL (phase locked loop)

Un PLL es un sistema de retroalimentación que incluye un VCO, un detector de fase y un filtro de paso bajo dentro de su bucle. Su propósito es obligar al VCO a replicar y rastrear la frecuencia y la fase en la entrada cuando está bloqueado [20], [21].

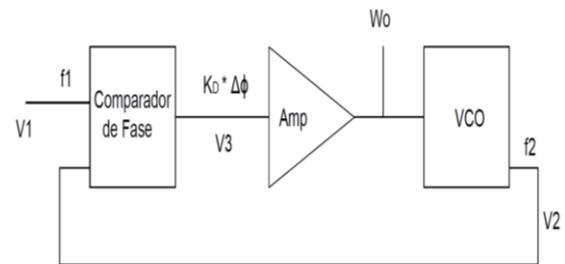


Figura 5. Diagrama esquemático de un PLL (lazo de fijación de fase).

El PLL es un sistema de control que permite que un oscilador siga a otro. Es posible tener una compensación de fase entre la entrada y la salida, pero cuando está bloqueado, las frecuencias y las fases deben seguir exactamente iguales [20], [21].

Pseudocódigo dinámico del PLL

Paso 1: Inicio y llamada de: V_{cofreq} , $ervec$.

Paso 2: Inicialización de variables:
Señales de referencia, señales de entrada y salida, señal de error, frecuencia y fase, constante proporcional y derivativa.

Paso 3: Determinar asignación del oscilador
Establecer modelo dinámico

For it = numiterations

Simular el oscilador:
 phs = mod(phs + floor(freq / 2 ^ 16), 2 ^ 16);
 ref = phs < 32768;

Rastrear la fase:
 sig = tracksig(it);

Restablecer "flip-flop" fase-frecuencia:
 rst = ~ (qsig & qref);

Detectar señales altas:
 qsig = (qsig | (sig & ~ lsig)) & rst;

Activar flip-flop de referencia:
 qref = (qref | (ref & ~ lref)) & rst;

Valores de iteración:
 lref = ref; lsig = sig;

Señal de error:
 ersig = qref - qsig;

Filtro proporcional e integral de frecuencia:
 filtered_ersig = ersig + (ersig - lersig) * deriv;

Señal error de salida proporcional:
 lersig = ersig;

Integra frecuencia VCO de señal error:
 freq = freq - 2 ^ 16 * filtered_ersig * prop;

Almacena frecuencia VCO actual:
 vcofreq(1, it) = freq / 2 ^ 16;

Señal error resultante:
 ervec(1, it) = ersig;

End

Paso 4: Fin

La estructura real de un PLL está definida por un detector de fase multiplicativo que consta de un filtro pasabajos, donde las señales que ingresar son:

$$v_1(t) = V_1 \text{sen } \omega_1 t \quad (26)$$

$$v_2(t) = V_2 \text{sen } \omega_2 t \quad (27)$$

Al multiplicarse estas dos señales con las debidas funciones trigonométricas se obtiene la siguiente ecuación:

$$v_3(t) = K v_1(t) v_2(t) = \frac{K}{2} V_1 V_2 [\cos(\omega_1 - \omega_2) t - \text{sen}(\omega_1 + \omega_2) t]. \quad (28)$$

Si asumimos que $\omega_1 - \omega_2 \ll \omega_1 + \omega_2$, se considera que el filtro pasabajos tiene su frecuencia de corte entre las dos frecuencias, se logra eliminar la frecuencia $\omega_1 + \omega_2$, pudiendo concluir así que,

$$v_3(t) \cong \frac{K}{2} V_1 V_2 \cos(\omega_1 - \omega_2) t. \quad (29)$$

Donde $(\omega_1 - \omega_2)t$ es la diferencia de fase $\Delta\varphi$ entre las dos señales, siendo el resultado,

$$v_3(t) \cong \frac{K}{2} V_1 V_2 \cos\Delta\varphi. \quad (30)$$

Si aproximamos la ecuación con $\pi/2$, para obtener una relación más lineal, queda la siguiente ecuación:

$$v_3 \cong \frac{K}{2} V_1 V_2 \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right) = K_D \left(\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right). \quad (31)$$

Para eliminar la linealidad se utiliza un circuito de tipo OR-exclusivo, cuyo resultado es,

$$v_3(t) = K \text{sg}(v_1(t)) \text{sg}(v_2(t)), \quad (32)$$

donde $\text{sg}(x)$ es la función signo. Asumiendo que las señales tienen semiperiodos simétricos y un desfase $\Delta\varphi$, se puede obtener como resultado un valor medio en un periodo de,

$$V_{3med} = \frac{1}{T} \int_0^T v_3(t) dt = \frac{K(\pi - \Delta\varphi) - K\Delta\varphi}{\pi} \quad (33)$$

es decir

$$V_{3med} = \frac{2K}{\pi} \left[\frac{\pi}{2} - \Delta\varphi \right]. \quad (34)$$

2.5.2 Componentes del PLL

Los tres principales bloques funcionales del PLL son:

Comparador de fase

El detector de fase ayuda a establecer el desfase que existe entre la señal V1 y la señal V2, produciendo una señal $K_D * \Delta\phi$, igual a la diferencia entre las señales V1 y V2, las cuales son producidas por el oscilador de voltaje [20], [22].

Filtro pasa bajo (PD)

El funcionamiento de los filtros pasa bajo depende de un condensador y una resistencia, donde su operación será fija dentro de un límite de frecuencia. La función principal de estos filtros es mitigar el ruido existente en las ondas de sincronización, suscitando un cambio de fase a la señal original por medio de una fase negativa, produciendo así un cambio en la caída de tensión [20], [22].

Oscilador controlado por voltaje (VCO)

El VCO permite la comunicación analógica en todo sistema, su funcionamiento se basa en la conversión de señales de entrada DC a señales de salidas sinusoidales. Sus principales componentes son un amplificador, el cual aumenta la magnitud a la señal de entrada y también cuenta con una red de retroalimentación [20], [22].

2.5.3 Operación del PLL

El principio de funcionamiento del PLL depende del VCO (oscilador controlado por voltaje), el cual se debe encontrar operando de forma natural o con una continuidad establecida. Al ingresar una señal al sistema, el comparador se encarga de analizar la frecuencia y fase del VCO, en caso de presentarse una diferencia se genera una tensión de error V1(t), que permite relacionar la diferencia de frecuencia entre las señales y el periodo de operación [20], [23].

El error de tensión V1(t), es ingresado a un filtro y un amplificador los cuales se encuentra aplicados en el control VCO, con

el fin de obtener una tensión de control V2(t), la cual estará encargada de reducir la diferencia de frecuencia entre las señales naturales y, de entrada, mediante la frecuencia del VCO [20], [23].

3 Metodología

Los problemas existentes en el sistema de distribución (SD) son provocados por fenómenos naturales o muchas veces por el crecimiento de la demanda energética, por ello es de gran importancia encontrar métodos que permitan eliminar los efectos que estos puedan provocar en el sistema de distribución. Los alimentadores son en mayor parte los elementos con más afectaciones, por lo tanto, se busca reducir estos problemas con la implementación de un DVR, logrando mejorar la operación del sistema de distribución.

Mediante el estudio de la problemática se logrará plantear los métodos para la obtención de resultados, donde se analizará lo siguiente: formulación del problema, la generación distribuida, el sistema de prueba, implementación del DVR y varios casos de estudios que tiene como propósito explicar el comportamiento del sistema antes y después de implementar la compensación.

3.1 Formulación del problema

Para el estudio del problema se considerará un sistema de distribución de 34 barras de la IEEE, el mismo que opera a niveles de tensión de 24.9kV fase a fase, este sistema de prueba es replicado en el software Matlab/Simulink, con la finalidad de implementar el modelo del DVR en unas de las barras que presente mayor afectación y desbalance de voltaje.

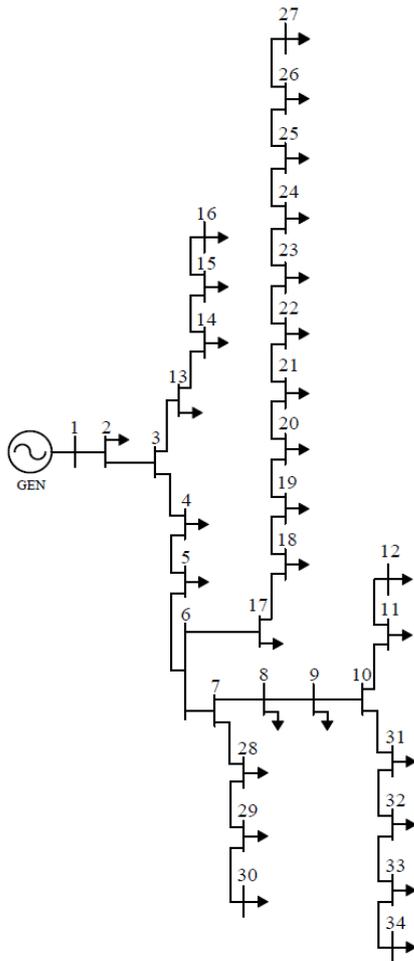


Figura 6. Sistema de prueba (IEEE de 34 Barras).

El sistema de 34 barras de la IEEE está compuesto por diversos elementos que serán expuestos a continuación: 1 generador, 29 cargas y 33 líneas trifásicas de distribución. A lo largo del sistema de prueba se logra evidenciar que los estimados de las barras conservan un valor cercano al 1 en pu, permitiendo determinar que la magnitud y ángulo de la tensión no sufre un mayor cambio en su operación.

En la Figura 6, se muestra el sistema de prueba de 34 barras de la IEEE en el cual se va a desarrollar los diferentes casos de estudios para el análisis de la temática propuesta. Además, en la tabla 1 se da a conocer la información de líneas del sistema con el fin de comprender mejor su funcionamiento y determinar las barras con mayor caída de tensión cuando opera en condiciones normales.

Tabla 1 Datos de líneas de distribución

Line	Node		R	X
	In	Out		
L 1	1	2	0,0813	0,3020
L 2	2	3	0,0743	0,0302
L 3	3	4	0,1142	0,3148
L 4	4	5	0,1038	0,2842
L 5	5	6	0,1038	0,2842
L 6	6	7	0,2181	0,3701
L 7	7	8	0,1458	0,2467
L 8	8	9	0,2181	0,3701
L 9	9	10	0,1458	0,2467
L 10	10	11	0,091	0,1540
L 11	11	12	0,0729	0,1234
L 12	3	13	0,1092	0,1855
L 13	13	14	0,1458	0,2467
L 14	14	15	0,0729	0,1234
L 15	15	16	0,0361	0,3563
L 16	6	17	0,1243	0,3425
L 17	17	18	0,1139	0,3148
L 18	18	19	0,1444	0,3237
L 19	19	20	0,1313	0,2951
L 20	20	21	0,1313	0,2951
L 21	21	22	0,1819	0,3089
L 22	22	23	0,1819	0,3089
L 23	23	24	0,2181	0,3701
L 24	24	25	0,1458	0,2467
L 25	25	26	0,091	0,1510
L 26	26	27	0,0729	0,1234
L 27	7	28	0,1092	0,1855
L 28	28	29	0,1092	0,1855
L 29	29	30	0,1092	0,1855
L 30	30	31	0,1092	0,1855
L 31	31	32	0,1458	0,2467
L 32	32	33	0,1092	0,1855
L 33	33	34	0,0729	0,1234

En la tabla 2 se muestran los datos de voltaje en pu de cada nodo, donde se aprecia una caída de tensión a partir del bus 17 con un voltaje de 0.9941 pu hasta llegar al bus 27 con un voltaje de 0.9910 pu, para lo cual se considera que estas barras son las que presentan una perturbación y por

consiguiente mayor inestabilidad de voltaje en el sistema de distribución.

Tabla 2 Datos de nodos del sistema

Node	Bus	Voltage [kV]	Pu
1	1	14,38	1,0000
2	2	14,36	0,9990
3	3	14,35	0,9982
4	13	14,35	0,9981
5	14	14,35	0,9980
6	15	14,35	0,9980
7	16	14,35	0,9980
8	4	14,33	0,9969
9	5	14,32	0,9958
10	6	14,30	0,9947
11	17	14,29	0,9941
12	18	14,29	0,9936
13	19	14,28	0,9931
14	20	14,27	0,9927
15	21	14,27	0,9923
16	22	14,26	0,9919
17	23	14,26	0,9916
18	24	14,25	0,9912
19	25	14,25	0,9911
20	26	14,25	0,9910
21	27	14,25	0,9910
22	7	14,28	0,9935
23	28	14,28	0,9931
24	29	14,27	0,9928
25	30	14,27	0,9927
26	8	14,28	0,9932
27	9	14,27	0,9929
28	10	14,27	0,9927
29	31	14,27	0,9927
30	32	14,27	0,9926
31	33	14,27	0,9926
32	34	14,27	0,9926
33	11	14,27	0,9927
34	12	14,27	0,9927

3.2 Generación distribuida de tipo Fotovoltaica

Para poder obtener una compensación adecuada a la red de distribución se requiere de una gran energía en abastecimiento, por ello la generación distribuida del tipo fotovoltaica es una gran opción para la alimentación del DVR, debido a que en el Ecuador se cuenta con niveles altos de irradiación con una media aproximada de 4200 kWh/año, muy superiores al de los países europeos, siendo muy rentable al momento de equiparar costos.

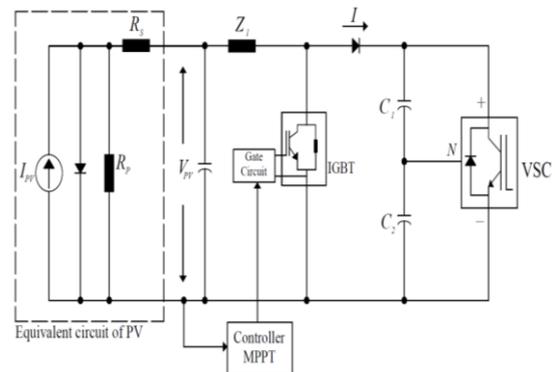


Figura 7. Esquemático de la generación distribuida fotovoltaica.

La estructura de los PV (paneles fotovoltaicos), está definido por una matriz de 66 cadenas conectadas en paralelo donde cada cadena consta de 5 módulos conectados en serie, utilizando así 330 módulos SunPower (SPR-305E-WHT-D), que suministran una potencia de 100 kW a 1000 W/m² de radiación solar. Esta potencia se conecta a la red de 14.4 kV por medio de un convertidor elevador CC-CC y un convertidor de fuente de voltaje (VSC).

En la figura 7, se aprecian los componentes que conforman la estructura de la generación distribuida fotovoltaica, entre ellos se encuentra el controlador MPPT (seguimiento del punto de máxima potencia), el cual varía de forma automática el tiempo de trabajo con el fin de generar el voltaje requerido para la extracción de la máxima potencia.

3.3 Implementación de DVR a través de control PLL en inversor de potencia

El concepto del diseño y control del DVR, fue implementado con la ayuda del software Matlab/Simulink, que consiste principalmente de transformador de inyección, filtros, VSC y el sistema de control de potencia PLL (phase locked loop), donde se realiza un feedback (retroalimentación) mediante el DVR, el cual se encuentra instalado entre la red y la carga, detectando problemas de estabilidad de voltaje en el punto de acoplamiento, haciendo que el voltaje de carga (V_c) obtenga los valores de magnitud y fase deseados para el suministro, y manteniendo el voltaje de carga en 1 pu.

3.3.1 Modus operandi del control PLL

Para lograr una compensación adecuada el DVR debe tener un sistema de control de precisión y rapidez, por ello el PLL es una opción muy viable para su correcta operación. La función del PLL es analizar las señales de la red rastreando la frecuencia y fase trifásica con la ayuda de un oscilador interno de frecuencia con el fin de mantener la diferencia de las fases en cero.

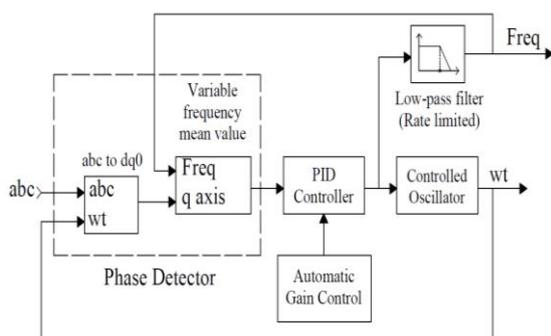


Figura 8. Modo de operación del control PLL.

Utilizando la transformada de Park con la posición angular del oscilador interno se logra convertir la señal de entrada en un marco giratorio $dq0$. Para poder mantener la diferencia de las fases en cero sobre el oscilador controlado, se implementa un

control automático de ganancia y un controlador Proporcional -Integral -Derivativo (PID), dando como resultado una frecuencia de salida en hercios.

Las señales de salida entregadas en un marco giratorio $dq0$, ingresan a un selector que proporciona un redondeo a la señal multidimensional resultante que se conecta a un bloque de regulador de corriente.

3.3.2 Lógica del regulador VDC

El regulador VDC tiene como entrada las señales de compensación, una especifica el voltaje de referencia y la otra el voltaje de retroalimentación, las mismas pasan por un bloque operacional de suma que permite mantener el voltaje en un valor constante, el cual ingresa a una alta ganancia permitiendo que la salida logre llegar al valor esperado.

Por consiguiente, la señal ingresa al bloque controlador PI discreto que aplica una lógica de control proporcional - integral, donde la salida del bloque es una suma ponderada entre la señal de entrada y la derivada de la señal de entrada, dando el mayor peso a la señal de ganancia proporcional - integral.

El bloque PI permite implementar límites superiores e inferiores de saturación que están en el rango de los 1.5 y -1.5, también utiliza la función de transferencia, que le permite ajustar de forma rápida los coeficientes PI, mientras analiza las respuestas relevantes del sistema con el fin de corroborar su rendimiento.

3.3.3 Funcionamiento del regulador de corriente

Los reguladores de corriente se encuentran conectados después de los reguladores VDC y el control PLL recepiendo sus señales de salida de corriente y voltaje, las corrientes de potencia activa y reactiva del marco de referencia y de retroalimentación ingresan a un operacional de suma que le permite obtener una sola señal resultante, la cual por consiguiente ingresa al bloque PI

realizando la lógica de control para generar una señal controlada, de forma distinta las señales de corriente de referencia y voltaje de retroalimentación obtienen diversas ganancias que al final se suman para obtener una sola señal resultante.

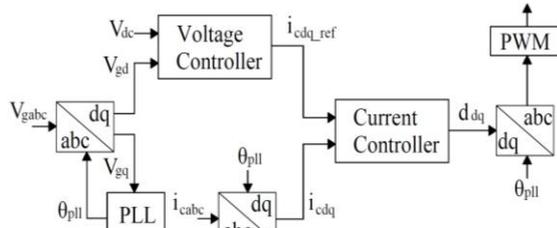


Figura 9. Esquemático del control PLL y regulador de corriente

El regulador de corriente puede generar potencia activa o absorber potencia reactiva mediante el convertidor y la lógica de control dando como resultado dos señales de igual magnitud que permiten sumarse y obtener una señal final, a la cual se le implementa una saturación con límites superiores e inferiores de 2 y -2.

3.4 Casos de estudio

El caso de estudio se llevará a cabo en un sistema de prueba de 34 barras de la IEEE, para ello el software Matlab/Simulink permitirá implementar el diseño del sistema y modelo del DVR. Las pruebas que se realizarán darán como resultados valores estimados muy cercanos a los reales.

3.4.1 Sistema base IEEE 34 barras

En el primer caso de estudio se implementará y simulará el modelo del DVR en la barra de distribución más débil, con los resultados obtenidos de la simulación se llevaran a cabo los diversos estudios de caídas y subidas de tensión, donde se recopilaran los datos con el fin de hacer uso de ellos, realizando un mínimo a todos los voltajes obtenidos de las barras con el fin de extraer el voltaje con mayor caída de tensión, se hace referencia a este

voltaje como la barra con mayor afectación al momento simularse el modelo, gracias al siguiente proceso se logró determinar que la barra 27 presenta una mayor caída de voltaje a comparación de las demás.

Una vez determinada la barra de distribución más débil se procede a realizar los casos de estudios enfocados particularmente en esta barra.

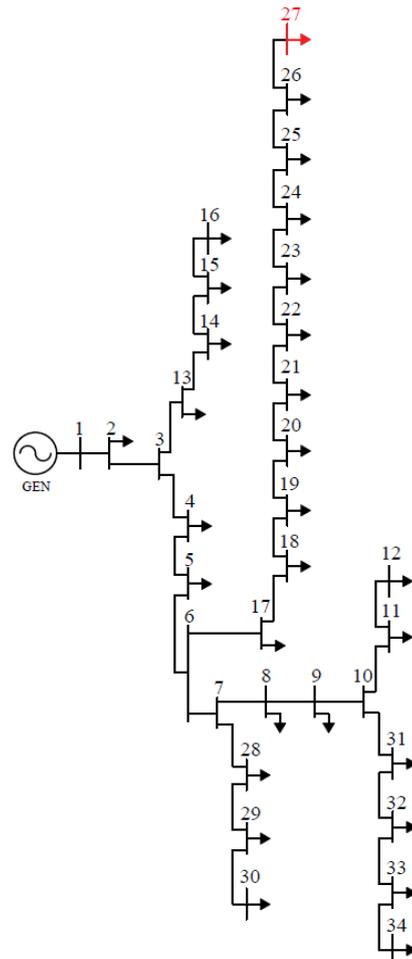


Figura 10. Sistema IEEE de 34 barras con detección de carga crítica en la barra 27.

3.4.2 Incorporación del DVR en el sistema de 34 barras

En el segundo caso de estudio se analiza el nodo más débil en el sistema IEEE de 34 barras en el cual se procede a implementar el DVR, conectándose entre la red y el suministro de carga, de esta forma se logra la correcta operación del control de detección y se logra ofrecer un gran

rendimiento del controlador PI, teniendo una mayor precisión al momento de sintonizarse con las ganancias.

El DVR utiliza la lógica del control de rastreo de frecuencia y fase en el sistema, con el fin de determinar si es necesario generar potencia activa o absorber potencia reactiva, el control PLL actúa de forma continua, rápida y precisa.

El modelo del DVR entrega al sistema un voltaje en Vac de 29 kV, la necesaria para poder realizar la compensación de cualquier desequilibrio de voltaje, mitigando las caídas y subidas de tensión, logrando mantener los voltajes de carga en 1 pu.

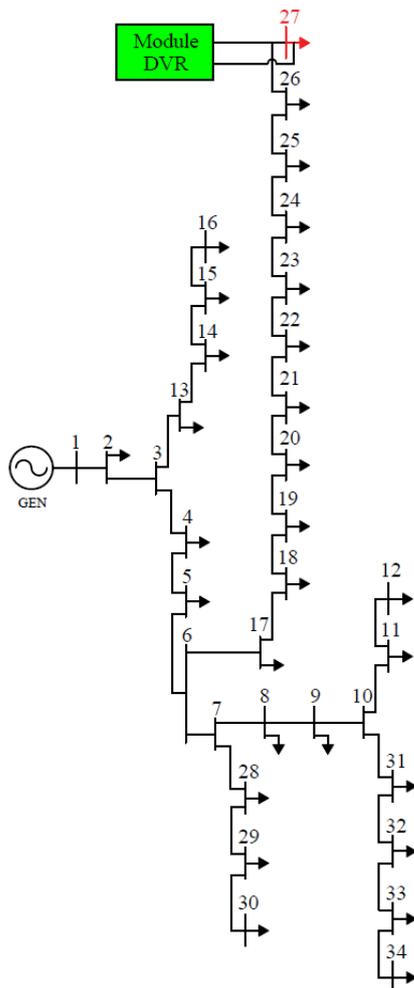


Figura 11. Sistema IEEE de 34 barras con detención de carga crítica e implementación del DVR en la barra 27.

3.4.3 Inclusión de cargas dinámicas y verificación del funcionamiento del DVR

En el tercer caso de estudio es necesario realizar diversas pruebas en la barra 27 del sistema IEEE de 34 barras la cual será expuesta a una caída de tensión de un 400% mayor al valor original, con el propósito de ver el funcionamiento del DVR al ser expuesto a una gran carga la cual ira creciendo de forma exponencial en determinados instantes de tiempos de la simulación, con esto se logrará evidenciar el correcto funcionamiento del DVR y la lógica de control PLL.

Al tener un gran crecimiento de la carga en la barra 27 del sistema de prueba se esperarí una desconexión inmediata, pero se ha logrado eliminar esa probabilidad con la ayuda del módulo DVR, esto se verá reflejado en los análisis de resultado, donde el módulo en un instante de tiempo cumple con su función, compensando el voltaje requerido en magnitud y fase, estabilizando el sistema a medida que siga aumentando la carga.

Tabla 3 Datos de cargas y tiempos de inclusión.

Simulation time [s]	Load P[kW]	Load Q_L [kVAr]
0,05	92,8	57,5
0,10	185,6	115,4
0,15	278,4	173,1
0,20	371,2	230,8

La tabla3 explica a detalle el ingreso de potencias activas y reactivas de las 4 cargas dinámicas que se utilizaran en el tercer caso de estudio, donde se simulara una caída de voltaje con el fin de corroborar si el DVR se encuentra en un óptimo funcionamiento, para la activación de cada carga se utilizan los interruptores trifásicos los cuales se encuentran definidos con un tiempo de switcheo, que se irán accionando a medida que la simulación se efectúa, esperando un resultado favorable en la compensación y estabilización del voltaje.

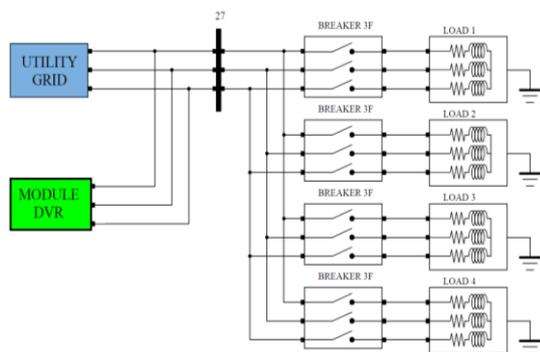


Figura 12. Inclusión de cargas dinámicas y DVR

Para verificar los resultados se realiza una simulación, en el sistema de 34 barras sin la conexión del DVR, incorporando las cargas dinámicas en el nodo 27, siendo visible la caída de voltaje y provocando el mismo efecto en los nodos que le anteceden, después de analizar el comportamiento del sistema se conecta el módulo DVR en el mismo nodo, para poder determinar que efecto causa. De esta forma se obtiene el resultado previsto, dando como consecuencia un sistema netamente estabilizado y operando a niveles adecuados de tensión.

4 Análisis de resultados

El problema más común en el sistema eléctrico de distribución deriva de la estabilidad de voltaje, que se encuentra relacionada con la capacidad de mantener al sistema bajo condiciones normales de operación ante cualquier afectación o perturbación suscitada, para esto se requiere que la magnitud del voltaje se mantenga estable en cada una de las barras. La solución a este inconveniente es implementar un módulo DVR, que brinde la compensación necesaria al alimentador crítico que está sujeto a fenómenos naturales y variaciones de carga.

4.1 Sistema base IEEE 34 barras

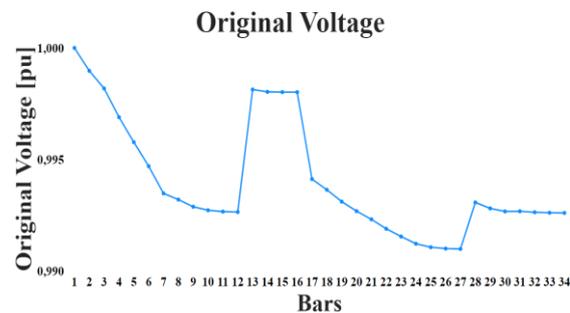


Figura 13. Perfil de voltaje del sistema IEEE de 34 barras en condiciones normales.

En el primer análisis del caso de estudio se pretende comprender el funcionamiento del sistema IEEE de 34 barra con el propósito de encontrar el nodo más débil, donde se implementará el módulo DVR con el objetivo de eliminar cualquier perturbación y mitigar las caídas y subidas de tensión que puedan presentarse en dicho nodo. En la figura 13 se representa el sistema original en condiciones de operación normal, donde se aprecia una caída de tensión en la barra 27.

Para ello se realiza una simulación donde se suscita un descenso del perfil de voltaje en los nodos más lejanos, esto se debe a los diversos ramales y cargas conectadas en el sistema de distribución, los cuales provocan caídas de voltaje en las últimas barras, siendo necesario la implementación del compensador.

4.2 Incorporación del DVR en el sistema de 34 barras

En el segundo análisis del caso de estudio se determina que la barra 27 presenta una mayor pérdida de potencia al tener un gran número de barras que le anteceden. Por ello se ha decidido implementar el módulo DVR en la barra 27 del sistema de prueba, donde se presenciaron cambios relevantes en los alimentadores críticos, esto gracias al módulo el cual genera potencia activa o absorber potencia reactiva dependiendo de que compensación sea necesaria, de esta

forma se logró estabilizar el voltaje y mitigar las caídas de tensión.

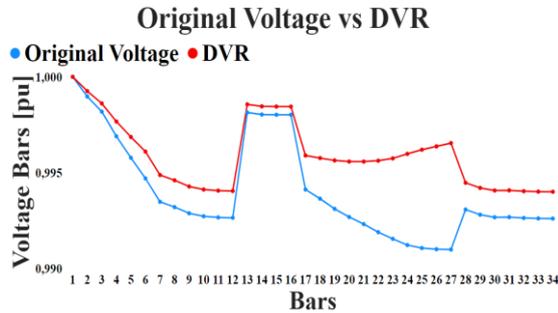


Figura 14. Perfil de voltaje del sistema IEEE de 34 barras e implementación del módulo DVR en la barra 27.

El sistema DVR se instala entre la red de distribución y la carga del suministro, consiste principalmente de un transformador, filtros, encaje CC, VSC estructurado con IGBT y la lógica de control PLL, todos los elementos funcionan de forma continua al momento de producirse alguna perturbación, estabilizando el voltaje durante la condición PQ de caída y subida de tensión, por lo tanto, el DVR opera en las condiciones más adversas permitiendo al voltaje de carga y de red obtener los niveles adecuados de voltaje.

En la figura 14 se muestra la señal del voltaje original operando en condiciones normales con la señal del compensador, inyectando al sistema trifásico el voltaje necesario para igualar o incrementar la magnitud, eliminando las caídas de tensión a fin de estabilizar el voltaje de carga en el lado del suministro.

En el lapso 0,1 (s) del tiempo simulado el compensador comienza a actuar de manera inmediata, aumentando el voltaje en la barra 27, apreciando la mejora de dicha barra y las que le anteceden, con esta información se puede determinar que el DVR opera de forma correcta logrando mitigar las perturbaciones existentes en el sistema.

En la tabla 4 se visualizan los valores del voltaje original con los del DVR, compensando a las 4 cargas dinámicas ya

incluidas en el sistema, dando como resultado la mejora máxima porcentual del perfil de voltaje en la barra 27 con un valor de 0.56%.

Tabla 4 Datos de compensación de voltaje.

Bus	Original Voltage [kV]	Voltage with DVR [kV]	Voltage profile percentage improvement [%]
1	14,38	14,38	0.00
2	14,36	14,37	0.03
3	14,35	14,36	0.04
4	14,33	14,34	0.08
5	14,32	14,33	0.11
6	14,30	14,31	0.14
7	14,28	14,30	0.14
8	14,28	14,29	0.14
9	14,27	14,29	0.14
10	14,27	14,29	0.14
11	14,27	14,29	0.14
12	14,27	14,29	0.14
13	14,35	14,36	0.04
14	14,35	14,35	0.04
15	14,35	14,35	0.04
16	14,35	14,35	0.04
17	14,29	14,31	0.18
18	14,29	14,31	0.21
19	14,28	14,31	0.25
20	14,27	14,31	0.29
21	14,27	14,31	0.33
22	14,26	14,31	0.37
23	14,26	14,31	0.42
24	14,25	14,31	0.48
25	14,25	14,32	0.51
26	14,25	14,32	0.54
27	14,25	14,32	0.56
28	14,28	14,29	0.14
29	14,27	14,29	0.14
30	14,27	14,29	0.14
31	14,27	14,29	0.14
32	14,27	14,29	0.14
33	14,27	14,28	0.14
34	14,27	14,28	0.14

4.3 Inclusión de cargas dinámicas y verificación del funcionamiento del DVR

En el tercer caso de estudio se realiza un análisis más profundo en el comportamiento del módulo DVR, para lo cual se requiere la inclusión de cargas en la barra previamente compensada, donde se estima el ingreso de 4 cargas las cuales se irán activando en el transcurso de la simulación, con la ayuda de 4 interruptores trifásicos automáticos.

Se logrará controlar los tiempos de switcheo de cada carga dinámica, aplicando así una sobrecarga de forma exponencial al sistema, con el fin de ver si el DVR compensa y estabiliza los voltajes sin generar ninguna perturbación de caída o subida de tensión.

Para el análisis del ingreso de las cargas dinámicas y del compensador se considera realizar 4 subcasos de estudios con el fin de entender el comportamiento en cada uno de ellos.

4.3.1 Inclusión de carga dinámica 1

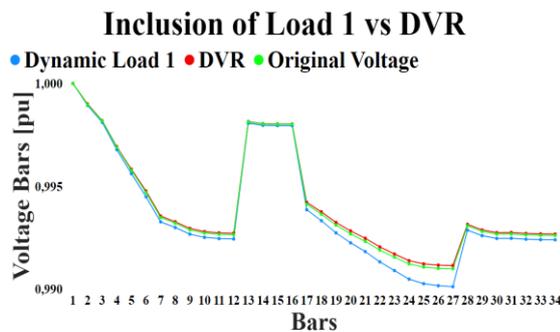


Figura 15. Inclusión de la primera carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.

Para el primer subcaso de estudio se considera la inclusión de la primera carga dinámica, la cual se activa en un tiempo de switcheo establecido en los 0.05 (s), donde se presenta un aumento del voltaje de carga del 0.03% en comparación al voltaje original, siendo notable el crecimiento de la demanda, la cual provoca una pequeña inestabilidad en el sistema, después 0.1 (s)

se activa el módulo DVR, el cual comienza a operar de forma rápida y precisa, mitigando la subida de tensión hasta el punto de estabilizar el sistema, compensando el voltaje de la red al valor establecido por la distribuidora y manteniendo el voltaje de carga en 1 pu.

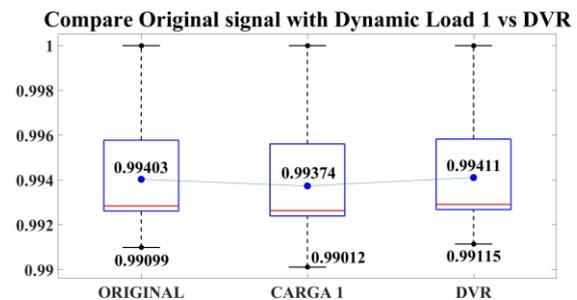


Figura 16. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 1 vs. el DVR mediante una desviación media.

Como se puede observar en la figura 16, el valor original de la media de todos los perfiles de voltaje cae a 0.99374 [pu], representando esto una caída del 0.03% respecto a los valores originales. Posteriormente con la implementación del DVR este valor incrementa a 0.99411 [pu], representando esto una mejora de un 0.03% respecto del caso de ingreso de carga. Adicionalmente se observa que el DVR inclusive incrementa el valor mínimo de perfil de voltaje, pasando de 0.99012 [pu] a 0.99115 [pu].

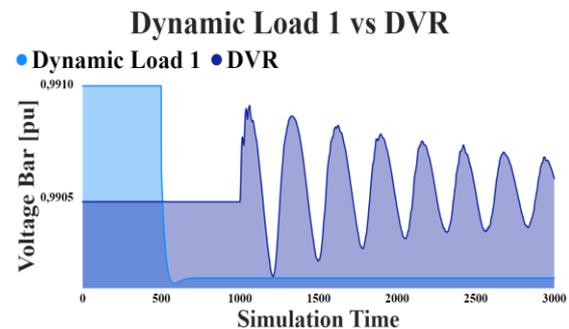


Figura 17. Resultados de compensación de la carga dinámica 1 en los tiempos establecidos.

La caída de tensión en la barra 27 produce voltajes mínimos de operación por motivo del ingreso de la carga dinámica 1, por ello el compensador comienza a actuar

utilizando la lógica de control retroalimentada, analizando las señales de entrada y salida con el fin de realizar el proceso de compensación, donde se incrementará el voltaje de la barra 27 y por consiguiente la estabilización del voltaje de carga.

4.3.2 Inclusión de carga dinámica 1, 2

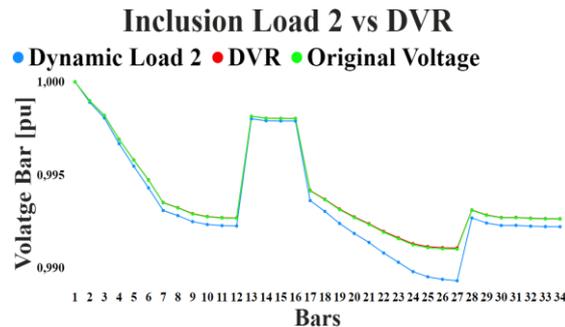


Figura 18. Inclusión de la segunda carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.

El ingreso de la segunda carga dinámica incrementa el voltaje de la señal original, provocando así perturbaciones en el sistema de forma controlada e inestabilidad del voltaje, suscitando una caída de tensión la cual se aprecia en la figura 18.

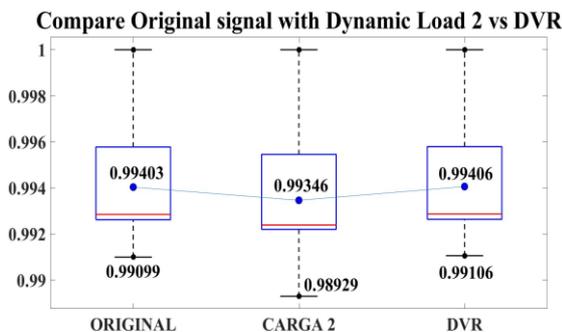


Figura 19. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 2 vs. el DVR mediante una desviación media.

Se aprecia en la figura 19, que el valor original de la media de todos los perfiles de voltaje cae a 0.99346 [pu], representando esto una caída del 0.06% respecto a los valores originales. Posteriormente con la implementación del DVR este valor incrementa a 0.99406 [pu], representando

esto una mejora de un 0.06% respecto del caso de ingreso de carga.

Adicionalmente se observa que el DVR inclusive incrementa el valor mínimo de perfil de voltaje, pasando de 0.98929 [pu] a 0.99106 [pu]. El compensador aumenta el voltaje un 0.002% a la señal original, logrando así estabilizar el voltaje en la barra mitigando la caída de tensión ocasionada por la inclusión de las cargas 1 y 2.

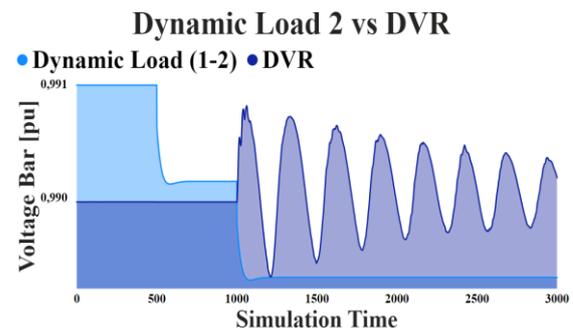


Figura 20. Resultados de compensación de la carga dinámica 2 en los tiempos establecidos.

En la figura 20 se analizan los resultados de compensación del DVR con respecto al ingreso de la carga dinámica 1 y 2, donde el tiempo de switcheo de la carga 2 es en 0.1 (s), para lo cual se aprecia al compensador actuando en ese mismo instante de tiempo, inyectando la potencia necesaria para mantener los voltajes de la barra 27 en 1 pu.

4.3.3 Inclusión de carga dinámica 1, 2, 3

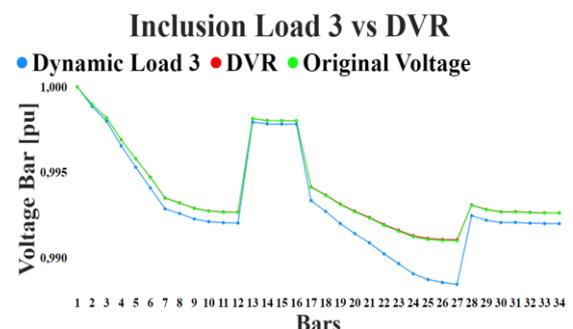


Figura 21. Inclusión de la tercera carga dinámica con el voltaje original vs. la compensación del DVR.

En el tercer caso de estudio se analiza el ingreso de la carga dinámica 3 la cual se suma a la carga 1 y 2, ocasionando una

sobrecarga en la barra 27, provocando una caída de tensión en la señal original, produciendo una inestabilidad de voltaje y alterando de igual forma a las barras anteriores, este comportamiento es visible en la figura 21.

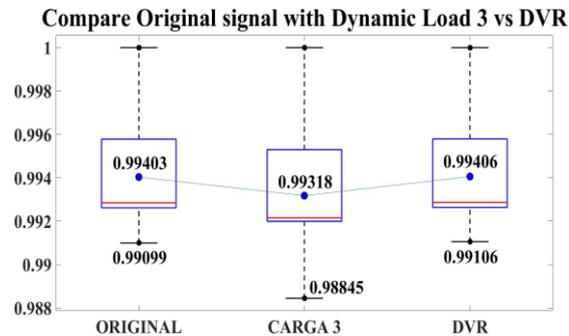


Figura 22. Comparación de los perfiles de voltaje de la carga 3 vs. el DVR mediante una desviación media.

Como se puede observar en la figura 22, el valor original de la media de todos los perfiles de voltaje cae a 0.99318 [pu], representando esto una caída del 0.09% respecto a los valores originales. Posteriormente con la implementación del DVR este valor incrementa a 0.99406 [pu], representando esto una mejora de un 0.09% respecto del caso de ingreso de carga.

Adicionalmente se observa que el DVR inclusive incrementa el valor mínimo de perfil de voltaje, pasando de 0.98845 [pu] a 0.99106 [pu]. El compensador aumenta el voltaje un 0.002% a la señal original, logrando así estabilizar el voltaje en la barra mitigando la caída de tensión ocasionada por la inclusión de las cargas 1, 2 y 3.

De igual forma el comportamiento del DVR ante la inclusión de la carga 3 en el instante de tiempo de 0.15 (s), la cual aumenta 3 veces la caída de tensión no causa ninguna afectación a la operación del módulo, por ello la compensación sigue constante ante el incremento de la carga, igualando los voltajes y manteniendo la diferencia de las fases en cero.

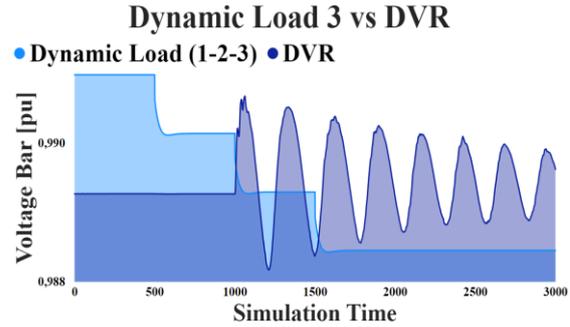


Figura 23. Resultados de compensación de la carga dinámica 3 en los tiempos establecidos.

4.3.4 Inclusión de carga dinámica 1, 2, 3, 4

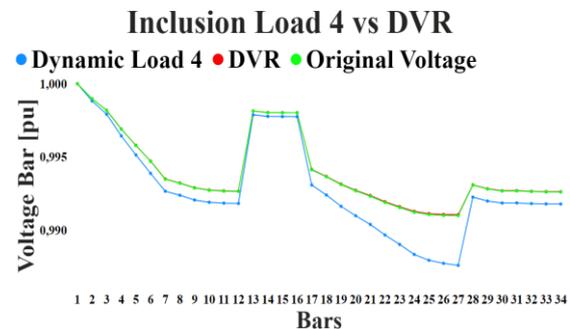


Figura 24. Inclusión de todas las cargas dinámicas con el voltaje original vs. la compensación del DVR.

El cuarto caso de estudio dará un análisis total del comportamiento del DVR, permitiendo analizar su modo de operación ante la suma de las 4 cargas dinámicas conectadas en la barra 27.

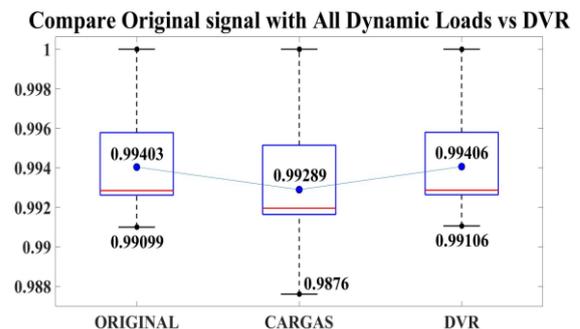


Figura 25. Comparación de los perfiles de voltaje de todas las cargas vs. el DVR mediante una desviación media.

En la figura 25 se visualiza, que el valor original de la media de todos los perfiles de voltaje cae a 0.99289 [pu], representando esto una caída del 0.12% respecto a los

valores originales. Posteriormente con la implementación del DVR este valor incrementa a 0.99406 [pu], representando esto una mejora de un 0.12% respecto del caso de ingreso de carga.

Adicionalmente se observa que el DVR inclusive incrementa el valor mínimo de perfil de voltaje, pasando de 0.9876 [pu] a 0.99106 [pu]. El compensador aumenta el voltaje un 0.002% a la señal original, logrando así estabilizar el voltaje en la barra mitigando la caída de tensión ocasionada por la inclusión de las cargas 1, 2, 3 y 4.

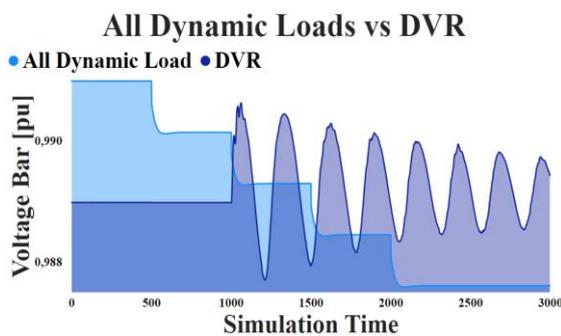


Figura 26. Resultados de compensación de todas las cargas dinámicas en los tiempos establecidos.

En la figura 26, se verificó que el compensador DVR funciona correctamente al no presentar ningún inconveniente al momento de inyectar potencia de forma continua a la red, con el fin de compensar la caída de tensión producida por las 4 cargas dinámicas conectadas en paralelo al sistema, determinando que el modo de operación y actuar del DVR ante sobretensión y caídas de tensión es el más eficiente y óptimo a implementarse, permitiendo mitigar las afectaciones y perturbaciones suscitadas en el sistema de distribución.

5 Conclusiones

El estudio y análisis realizado en este artículo permite concluir lo siguiente:

Para obtener un mayor análisis en el comportamiento del sistema IEEE de 34

barras se realizó un flujo de carga, donde se localizaron caídas de tensión en la barra 27, determinando que estos son los puntos críticos donde se implementó el compensador a fin de mejorar los perfiles de voltaje.

El modelado y parametrización del módulo DVR se lo realizó acorde a las características y necesidades de la red previamente analizada, permitiendo obtener un desempeño óptimo de compensador ante perturbaciones de voltaje y fluctuaciones de carga.

EL control PLL utilizado para el rastreo de la frecuencia y fase realiza la comparación de señales de entrada y salida mediante la retroalimentación, modificando la frecuencia hasta llegar a un punto de equilibrio de voltajes, logrando mitigar caídas o subidas de tensión que se pudieran generar en la operación.

En el primer subcaso de estudio se evidenció que el ingreso de la primera carga produce una caída de voltaje en la señal original del 0.03%, provocando inestabilidad en el sistema, después de 0.1 (s) el compensador comienza a operar aumentando el voltaje al 0.03%, igualándose a la señal original y elevando el voltaje en 0.002%, determinando que la compensación fue la correcta para eliminar la sobrecarga ocasionada por el aumento de la demanda.

Para el segundo caso de estudio se analiza el ingreso de la segunda carga sumándose a la primera ocasionando una caída de voltaje del 0.06%, presentando una mayor perturbación en el sistema, de igual forma que el subcaso 1 el compensador se activa a los 0.1 (s), donde comienza a equilibrar el desbalance de voltaje existente llegando a un valor del 0.06% de compensación, viéndose reflejado un incremento 0.002% al voltaje original.

En el tercer subcaso de estudio se incrementa la demanda en un 0.09% al voltaje original, presentando una caída 3 veces mayor a la normal, por tal razón la

inestabilidad en el sistema de distribución aumenta ocasionando caídas de voltaje de mayor duración, pero a medida que la carga crece el DVR inyecta una mayor potencia con el fin de mantener la señal original en los niveles adecuados de operación, para este tercer subcaso el valor compensado es de 0.09%.

Para el último subcaso de estudio se suman todas las cargas anteriores reflejando un caída de tensión del 0.12% en el voltaje original, esto se suscita a los 0.20 (s) de haber iniciado la simulación, ocasionando una gran inestabilidad de voltaje en la red, para lo cual se activa la lógica de control retroalimentada que realiza un análisis de las señales de entrada y salida con el fin de inyectar la potencia necesaria al sistema sin generar ninguna sobretensión a causa de errores de recopilación de datos o pérdida de los mismos, en este último subcaso el voltaje de compensado es de 0.12%, presentando un aumento del 0.002% en la señal original.

5.1 Trabajos futuros

Los resultados obtenidos de este artículo son base para la investigación de nuevos controles como la lógica predictiva de corriente que permite mitigar las pequeñas variaciones de tensión que al sumarse forman armónicos, este control utiliza un filtro de potencia para eliminar los THD.

6 Referencias

[1] M. D. Jaramillo, D. F. Carrión, and J. P. Muñoz, "A Novel Methodology for Strengthening Stability in Electrical Power Systems by Considering Fast Voltage Stability Index under N & minus; 1 Scenarios," *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.3390/en16083396.

[2] K. Benítez, M. Jaramillo, J. Muñoz, C. Barrera-Singaña, and W. Pavón, "Multi-Objective Analysis for

Optimal location and location of Distributed Generation Focused on Improving Power Quality," *2023 IEEE IAS Glob. Conf. Renew. Energy Hydrog. Technol. GlobConHT 2023*, pp. 7–12, 2023, doi:10.1109/GlobConHT56829.2023.10087886.

- [3] P. Tupiza, W. Pavon, D. Jaramillo, and P. Acosta-Vargas, "Strategy for Controlling Total Current Harmonics Distortion by means Photovoltaic Generation with an Unified Active Power Filter (UAPF)," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1141, no. 1, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1141/1/012010
- [4] U. A. Nestor, "Universidad andina 'nestor CÁCERES VELASQUEZ,'" 2021.
- [5] M. Jaramillo and S. Llamuca, "A Proposed Model for Electricity Demand Forecasting in Ecuador Considering Akaike Criterion," in *Communication, Smart Technologies and Innovation for Society*, 2022, pp. 345–355.
- [6] M. Callacando, W. Pavón, and L. Ortíz, "Multilevel inverter D-STATCOM for reducing total harmonic distortion in a non-linear loads electrical distribution system," *Rev. Técnica "energía"*, vol. 19, no. 1, pp. 85–91, 2022, doi: 10.37116/revistaenergia.v19.n1.2022.520.
- [7] A. Águila, L. Ortiz, R. Orizondo, and G. López, "Optimal location and dimensioning of capacitors microgrids using a multicriteria decision algorithm," *Heliyon*, vol. 7, no. 9, 2021, doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08061.
- [8] J. Muñoz, M. Jaramillo, and I. Montalvo, "Residential Customer Segmentation for On-Grid PV Systems Considering Profitability Indexes: Case Study Ecuador," in *2022 International Conference on*

- Electrical, Computer, Communications and Mechatronics Engineering (ICECCME)*, 2022, pp. 1–5. doi: 10.1109/ICECCME55909.2022.9988650.
- [9] M. Jaramillo and L. Tipán, “Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement,” in *2020 IEEE International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, 2020, pp. 261–267. doi: 10.1109/GUCON48875.2020.9231191.
- [10] C. Gavilanez, M. Jaramillo, W. Pavón, C. Barrera-Singaña, and M. Ruíz, “Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters,” in *2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GlobConPT)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/GlobConPT57482.2022.9938312.
- [11] W. Pavón, H. Medina, D. Andrade, D. Jaramillo, J. Muñoz, and C. Barrera-Singaña, “Optimal Heuristic Algorithms for Connecting Electrical Networks using an unique Path,” *2023 IEEE IAS Glob. Conf. Renew. Energy Hydrog. Technol. GlobConHT 2023*, pp. 1–6, 2023, doi:10.1109/GlobConHT56829.2023.10087852.
- [12] P. Tupiza, W. Pavón, D. Jaramillo, J. Muñoz, C. Barrera-Singaña, and M. Tipan, “Strategy for Reducing Total Current Harmonics Distortion using an Unified Active Power Filter (UAPF) with Photovoltaic generation,” *2023 IEEE IAS Glob. Conf. Renew. Energy Hydrog. Technol. GlobConHT 2023*, pp. 1–5, 2023, doi: 10.1109/GlobConHT56829.2023.10087852.
- [13] M. Jaramillo, L. Tipán, and J. Muñoz, “A novel methodology for optimal location of reactive compensation through deep neural networks,” *Heliyon*, vol. 8, no. 10, p. e11097, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11097>.
- [14] M. Jaramillo, D. Carrión, and J. Muñoz, “A Deep Neural Network as a Strategy for Optimal Sizing and Location of Reactive Compensation Considering Power Consumption Uncertainties,” *Energies*, vol. 15, no. 24, 2022, doi: 10.3390/en15249367.
- [15] M. Pradhan and M. K. Mishra, “Dual P-Q Theory Based Energy-Optimized Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement in a Distribution System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 4, pp. 2946–2955, 2019, doi: 10.1109/TIE.2018.2850009.
- [16] B. L. S. Shraddha, R. Sonicka, S. J. Pillai, and S. Modi, “Simulation and analysis of dynamic voltage restorer,” *2018 3rd IEEE Int. Conf. Recent Trends Electron. Inf. Commun. Technol. RTEICT 2018 - Proc.*, pp. 1388–1393, 2018, doi: 10.1109/RTEICT42901.2018.9012532.
- [17] M. Jaramillo and D. Carrión, “An Adaptive Strategy for Medium-Term Electricity Consumption Forecasting for Highly Unpredictable Scenarios: Case Study Quito, Ecuador during the Two First Years of COVID-19,” *Energies*, vol. 15, no. 22, 2022, doi: 10.3390/en15228380.
- [18] P. T. Ogunboyo, R. Tiako, and I. E. 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, doi: 10.1109/cjece.2018.2858841.
- [19] M. R. Rajendra Rizky Pradana, Y. Rahmawati, and H. Putranto, “Simulation of Using Dynamic Voltage Restorer Circuit for Analysis of Swell Voltage Repair in Three Phase Induction Motor,” *7th Int. Conf. Electr. Electron. Inf. Eng. Technol. Breakthr. Gt. New Life, ICEEIE 2021*, pp. 0–3, 2021, doi: 10.1109/ICEEIE52663.2021.9616776.
- [20] A. Cumanicho, “Alternativas de mejora para un filtro no lineal adaptativo, tipo seguidor de fase (pll) como herramienta para monitoreo de magnitud y ángulo en tensiones de nodo.,” *Tesis Univ. Politec. Sales.*, pp. 1–37, 2021.
- [21] F. Vaca, M. Jaramillo, J. Munoz, C. Barrera-Singana, and W. Pavon, “THD Minimization in Electrical Distribution Networks Through Vector Space Control Implementation in Power Inverters,” *2023 IEEE IAS Glob. Conf. Renew. Energy Hydrog. Technol. GlobConHT 2023*, pp. 1–6, 2023, doi:10.1109/GlobConHT56829.2023.10087359.<http://www.fceia.unr.edu.ar/enica3>
- [22] M. Zúñiga, M. Jaramillo, W. Pavón, and J. Muñoz, “Artificial Neural Networks as a Methodology for Optimal Location of Static Synchronous Series Compensator in Transmission Systems,” in *2022 IEEE Global Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GlobConPT)*, 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/GlobConPT57482.2022.9938203.
- [23] E. O. Hernandez Martinez and O. Beltrán Valle, “Análisis de la operación de un restaurador de voltaje dinámico para mejorar la calidad de la energía de sistemas industriales,” no. July, 2020, [Online].

6.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 1. Matriz de estado del arte.

MEJORA DEL PERFIL DE VOLTAJE EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN MEDIANTE ÓPTIMA UBICACIÓN DE COMPENSADOR EN SERIE SINCRÓNICO ESTÁTICO (SSSC) A TRAVÉS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES																				
ITEM	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACIÓN DEL PROBLEMA FUNCIONES OBJETIVO			RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA				SOLUCIÓN PROPUESTA		
	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Sistemas de distribución eléctrica	Estabilización del sistema eléctrico de distribución	Compensación	Lógica de Control	Mejoramiento del perfil de voltaje	Estabilidad de frecuencia	Estabilidad de voltaje	Subestaciones de distribución	Topología de la red	Líneas de distribución	Generación distribuida Fotovoltaica	Lógica de control PLL	Restaurador dinámico de voltaje	Control de retroalimentación	Mejoramiento del perfil de voltaje en las líneas de distribución	Implementación del restaurador dinámico de voltaje	Óptima ubicación del DVR
1	2023	A Novel Methodology for Strengthening Stability in Electrical Power Systems by Considering Fast Voltage Stability Index under N & minus; 1 Scenarios	160	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2	2023	Multi-Objective Analysis for Optimal location and location of Distributed Generation Focused on Improving Power Quality	0	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	2023	Strategy for Controlling Total Current Harmonics Distortion by means Photovoltaic Generation with a Unified Active Power Filter (UAPF)	112	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	2021	Introducción a Sistemas Eléctricos de Potencia	281	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	2022	A Proposed Model for Electricity Demand Forecasting in Ecuador Considering Akaike Criterion	195	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	2022	Multilevel inverter D-STATCOM for reducing total harmonic distortion in a non-linear loads electrical distribution system	103	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	2021	Optimal location and dimensioning of capacitors microgrids using a multicriteria decision algorithm	205	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	2022	Residential Customer Segmentation for On-Grid PV Systems Considering Profitability Indexes: Case Study Ecuador	58	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	2020	Comparative analysis of DG units against Capacitive banks in a micro-grid as an alternative for voltage profile enhancement	101	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	X	X	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	X	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

10	2022	Power Factor Improvement in a Distribution System by Implementing Adaptive Control for Reactive Power Filters	138	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	2023	Optimal Heuristic Algorithms for Connecting Electrical Networks using a unique Path	37	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	2023	Strategy for Reducing Total Current Harmonics Distortion using a Unified Active Power Filter (UAPF) with Photovoltaic generation	200	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	2022	A novel methodology for optimal location of reactive compensation through deep neural networks	102	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	2022	A Deep Neural Network as a Strategy for Optimal Sizing and Location of Reactive Compensation Considering Power Consumption Uncertainties	393	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15	2019	Dual P-Q Theory Based Energy-Optimized Dynamic Voltage Restorer for Power Quality Improvement in a Distribution System	90	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
16	2018	Simulation and analysis of dynamic voltage restorer	215	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
17	2022	An Adaptive Strategy for Medium-Term Electricity Consumption Forecasting for Highly Unpredictable Scenarios: Case Study Quito, Ecuador during the Two First Years of COVID-19	325	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
18	2022	Effectiveness of Dynamic Voltage Restorer for Unbalance Voltage Mitigation and Voltage Profile Improvement in Secondary Distribution System	459	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
19	2021	Simulation of Using Dynamic Voltage Restorer Circuit for Analysis of Swell Voltage Repair in Three Phase Induction Motor	111	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
20	2021	Alternativas de mejora para un filtro no lineal adaptativo, tipo seguidor de fase (pll) como herramienta para monitoreo de magnitud y ángulo en tensiones de nodo	87	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
21	2023	THD Minimization in Electrical Distribution Networks Through Vector Space Control Implementation in Power Inverters	157	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
22	2022	Artificial Neural Networks as a Methodology for Optimal Location of Static Synchronous Series Compensator in Transmission Systems	103	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
23	2020	Análisis de la operación de un restaurador de voltaje dinámico para mejorar la calidad de la energía de sistemas industriales	95	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
CANTIDAD:				7	8	6	7	6	7	10	6	5	7	7	9	8	10	7	9	7

6.2 Resumen de Indicadores

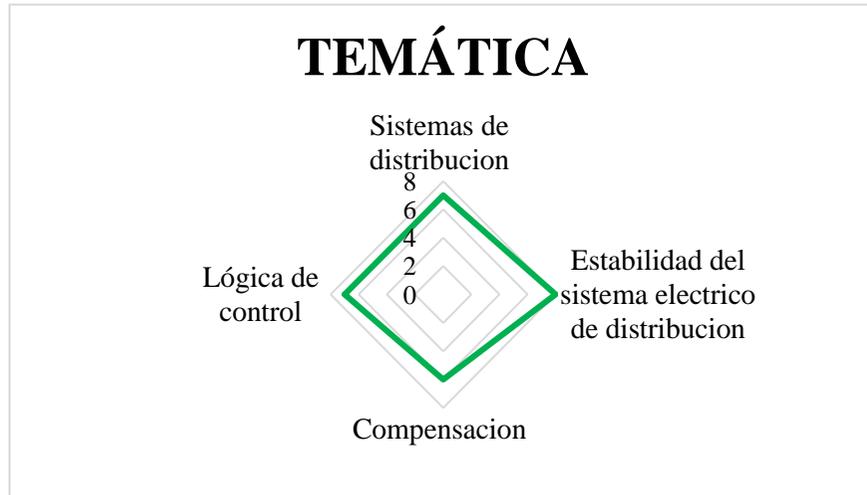


Figura 27. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

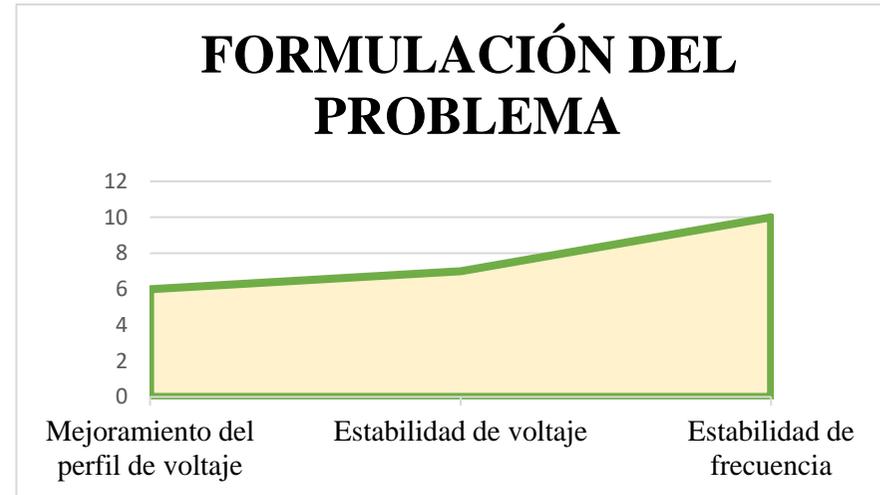


Figura 28. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

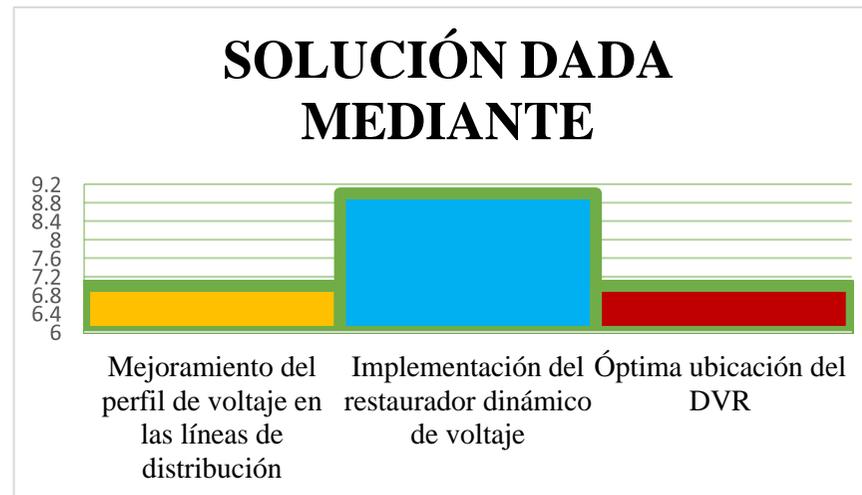


Figura 29. Indicador de solución - Estado del arte.