

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA, SISTEMAS Y
TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TÍTULO.

REVISION DE TECNICAS DE MITIGACION EN PROBLEMAS DE CALIDAD
DE LA ENERGIA EN MICRORREDES
REVIEW OF MITIGATION TECHNIQUES IN ENERGY QUALITY
PROBLEMS IN MICROGRIDS

AUTOR:

Jorge Enrique Ramos Camargo

DIRECTOR:

Ing. Msc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
24 DE JUNIO DE 2022

TÍTULO
REVISION DE TECNICAS DE MITIGACION EN PROBLEMAS DE CALIDAD
DE LA ENERGIA EN MICRORREDES

REVIEW OF MITIGATION TECHNIQUES IN ENERGY QUALITY
PROBLEMS IN MICROGRIDS

AUTOR:
Jorge Enrique Ramos Camargo

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR:
Ing. Msc. Edison Andrés Caicedo Peñaranda

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,
SISTEMAS Y TELECOMUNICACIONES
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PAMPLONA N. DE S. – COLOMBIA
24 DE JUNIO DE 2022

Resumen

El presente documentó es el resultado del desarrollo de la metodología implementada para la revisión y determinación de los problemas de la calidad de la energía y las técnicas de mitigación en sistemas de microrredes de distribución por medio del marco del diplomado en calidad de la energía eléctrica ofertado por el programa de ingeniería eléctrica de la universidad de pamplona.

La calidad de la energía ha aumentado significativamente su grado de importancia ya que es un tema que hoy en día es relevante tanto para la empresa que presta el servicio como para el usuario final. El considerable crecimiento de las tecnologías para la generación de energía eléctrica diferentes a la forma típica (por medio de hidroeléctricas, termoeléctricas, etc.), es el caso de la presente revisión donde se determinan los factores que me producen eventos perturbadores en microrredes de distribución. Dichos eventos perturbadores se encuentran normalizados por estándares internacionales (IEEE, IEC por ejemplo) y algunas traducciones nacionales (UPME por ejemplo), con el fin de caracterizar cada evento según escalas de tiempo de duración y magnitudes, en donde las microrredes teniendo en cuenta el uso de la electrónica de potencia, generación distribuida, sistemas de almacenamiento, sistemas de control, modo de operación, algunos tipos de cargas de usuarios finales generan la mayor parte de los problemas como elevaciones de tensión, caídas de tensión, interrupciones, armónicos de tensión y corriente entre otros.

Después de describir el comportamiento del evento perturbador, la determinación de las causas y efectos del mismo ya sea en la red, equipos de la red o equipos de usuario final me dirigen a las posibles técnicas de mitigación de estos problemas de calidad de la energía en donde según la revisión bibliográfica se lleva a cabo por medio de equipos diseñados específicamente para contrarrestar la afectación del evento perturbador también apoyados en las bases del control inteligente para tener una relación y manipular las variables implicadas en el buen funcionamiento de la microrred de distribución como lo son el voltaje, la corriente y la frecuencia entre otras. La robustez del control implementado me define en gran parte la efectividad del funcionamiento de la microrred, por otro lado se determina la posibilidad de implementación de las técnicas de mitigación seleccionadas en un contexto nacional analizando normativas, certificados de verificación de funcionamiento de productos, costos y beneficios, teniendo en cuenta que las técnicas de mitigación están basadas en equipos con un propósito específico.

Palabras clave: calidad de la energía, calidad de la potencia, microrredes, técnicas de mitigación, control inteligente, eventos perturbadores, electrónica de potencia, tipos de cargas, generación distribuida, fuentes renovables, factor de potencia, equipos para mitigación, señales de tensión y corriente, filtros activos y pasivos.

Abstract

This document is the result of the development of the methodology implemented for the review and determination of energy quality problems and mitigation techniques in distribution microgrid systems through the framework of the diploma in quality of electric energy offered by the electrical engineering program of the University of Pamplona.

The quality of energy has significantly detected its degree of importance since it is an issue that is relevant today both for the company that provides the service and for the end user. The considerable growth of technologies for the generation of electrical energy different from the typical form (by means of hydroelectric, thermoelectric, etc.), is the case of this review where the factors that produce disturbing events in distribution microgrids are determined. These disturbing events are normalized by international standards (IEEE, IEC for example) and some national translations (UPME for example), in order to characterize each event according to time scales of duration and magnitudes, where the microgrids taking into account the use of power electronics, distributed generation, storage systems, control systems, mode of operation, some types of end user loads generate most of the problems such as voltage surges, voltage drops, interruptions, voltage harmonics and current among others.

After describing the behavior of the disturbing event, the determination of its causes and effects, whether in the network, network equipment or end-user equipment, I will address possible mitigation techniques for these power quality problems in where, according to the bibliographic review, it is carried out by means of equipment specifically designed to counteract the affectation of the disturbing event, also supported by the bases of intelligent control to have a relationship and manipulate the variables involved in the proper functioning of the distribution microgrid as they are voltage, current and frequency among others. The robustness of the implemented control largely defines the effectiveness of the operation of the microgrid; on the other hand, the possibility of implementing the selected mitigation techniques in a national context is determined by analyzing regulations, product performance verification certificates, costs and benefits, considering that mitigation techniques are based on equipment with a specific purpose.

Keywords: energy quality, power quality, microgrids, mitigation techniques, intelligent control, disturbing events, power electronics, types of loads, distributed generation, renewable sources, power factor, mitigation equipment, voltage signals and current, active and passive filters.

1 INDICE GENERAL

1.	Capítulo I.....	12
1.1	Introducción.....	12
1.2	Descripción del Problema y justificación	13
1.3	Objetivos.....	13
1.3.1	Objetivo general.....	13
1.3.2	Objetivos específicos.....	14
1.4	Acotaciones.....	14
1.5	Marco Teórico.....	14
1.5.1	Concepto y estructura de una microrred.....	14
1.5.2	Calidad	17
1.5.3	Problemas de calidad de la energía eléctrica.....	17
1.5.4	Confiabilidad	17
1.5.5	Resiliencia	18
1.5.6	Calidad de la energía	18
2	Capítulo II.....	18
2.1	PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGIA CON MAYOR IMPACTO EN MICRORREDES	19
2.1.1	Características de las ondas de tensión y de corriente	19
2.1.2	Parámetros que me definen la calidad de la energía	20
2.1.3	Incidencia electromagnética.....	20
2.2	Descripción de los fenómenos electromagnéticos.....	21
2.2.1	Transitorio impulsivo.....	21
2.2.2	Transitorio oscilatorio	21
2.3	Variaciones de corta duración	22
2.3.1	Depresiones	22
2.3.2	Crestas	24
2.3.3	Interrupciones.....	25
2.4	Variaciones de larga duración	26
2.5	Tipos de variaciones de tensión de larga duración	27
2.5.1	Sobretensiones.....	27
2.5.2	Sub – tensiones	28
2.5.3	Interrupción sostenida	28
2.5.4	Desbalance de tensión	29

2.6	Distorsión de la forma de onda	31
2.6.1	Nivel de DC.....	31
2.6.2	Armónicos.....	31
2.6.3	Interarmónicos.....	33
2.6.4	Muestras de tensión (notching).....	33
2.6.5	Ruido.....	34
2.7	Fluctuaciones de tensión.....	34
2.8	Variaciones en la frecuencia del sistema de potencia.....	36
3	Capítulo III.....	36
3.1	TECNICAS DE MITIGACION DE LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGIA SELECCIONADOS EN SISTEMAS DE MICROREDES.....	36
3.2	Eventos de corta duración:.....	40
3.3	Sags.....	40
3.3.1	Transformadores de tensión constante.....	40
3.3.2	Motor generador.....	41
3.3.3	Acondicionador/Regulador de tensión activo.....	42
3.3.4	Autotransformador	43
3.4	Swell.....	44
3.5	Restauradores dinámicos de tensión (DVR).....	44
3.5.1	Compensación en serie	44
3.5.2	¿Qué es un restaurador dinámico de tensión?	45
3.5.3	Principio de operación de un restaurador dinámico de tensión.....	45
3.5.4	Técnicas de control para la inyección de tensión Vinj.....	45
3.5.5	Otras características de los DVR	46
3.6	Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido.....	46
3.6.1	Modelo del sistema de control y simulación.....	46
3.6.2	Control de mitigación en sistemas de distribución eléctrico.....	46
3.6.3	Objetivo del sistema – Agente líder	46
3.6.4	Nodos del sistema – Agente seguidor.....	47
3.6.5	Consenso del sistema eléctrico de distribución	47
3.6.6	Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 4 nodos ..	49
3.6.7	Simulación de perturbación en el sistema IEEE 4 node test feeder.....	50
3.6.8	Perturbación trifásica en el sistema IEEE 4 node test feeder	50

3.7	Eventos de larga duración:	54
3.8	Armónicos	54
3.8.1	Armónicos de tensión	54
3.8.2	Armónicos de corriente	55
3.9	Factor de potencia	56
3.10	Medidas para corregir el factor de potencia	58
3.10.1	Medidas preventivas	58
3.10.2	Medidas compensativas	58
3.11	Tipos de corrección del factor de potencia	59
3.11.1	Corrección distribuida	59
3.11.2	Corrección por grupos	60
3.11.3	Corrección centralizada	60
3.11.4	Corrección mixta	61
3.11.5	Corrección automática	61
3.12	Mitigación de armónicos	62
3.12.1	Reactores de línea	62
3.12.2	Filtro pasivo de armónicos	63
3.12.3	IoT con PQ-connect	65
3.12.4	Filtro de armónicos activo	66
3.12.5	Reactancia de rechazo	67
3.12.6	Banco de condensadores desintonizados	67
3.12.7	Inversores	68
3.12.8	Variador powerflex 755T con sección de entrada activa	69
3.12.9	Impedancia virtual	70
3.12.10	Control de reparto de energía armónica y reactiva	71
3.13	Control Difuso	71
3.13.1	Control de nivel cero	72
3.13.2	Control de primer nivel	72
3.13.3	Control de segundo nivel	72
3.13.4	Control de tercer nivel	72
4	Capítulo IV	73
4.1	TECNICAS DE MITIGACION DE PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA APLICABLES EN EL CONTEXTO NACIONAL	73

4.2	Aplicación de las técnicas de mitigación en un contexto nacional	75
4.2.1	Transformador de tensión constante	75
4.2.2	Motor generador.....	75
4.2.3	Regulador de tensión activo	75
4.2.4	Autotransformador	76
4.2.5	Restauradores dinámicos de tensión.....	76
4.2.6	Generación distribuida	76
4.2.7	Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido	77
4.2.8	Equipos y técnicas para mitigación de armónicos.....	77
5	Capítulo V.....	80
5.1	Conclusiones y recomendaciones.....	80
6	Capítulo VI.....	81
6.1	Análisis e Impacto de los resultados	81
7	Referencias	81

1. Capítulo I

1.1 Introducción

El planeta tierra a lo largo de su existencia ha venido presentando un cambio climático antropogénico debido a la necesidad de desarrollo que presenta el ser humano lo cual nos lleva a hacer uso de los recursos naturales para la satisfacción y ejecución de actividades del diario vivir. Con el paso del tiempo esto nos conduce al aprovechamiento de dichos recursos naturales para la generación de energía ya sea por medio de fuentes de energía renovables como la energía solar, eólica, hidráulica entre otras y no renovables como los combustibles fósiles (carbón, gas natural) .[1]

Teniendo en cuenta que en el territorio nacional colombiano según la empresa ISA INTERCOLOMBIA la mayor transportadora de energía en el país con cubrimiento nacional existen dos tipos de generación de energía que son las más usadas en Colombia primero tenemos la generación hidroeléctrica que utiliza el agua de los ríos la cual es represada para así darle forma a los embalses y que además se considera que es energía limpia y renovable; por otro lado tenemos la generación de energía térmica o termoeléctrica que emplean combustibles fósiles en su proceso de generación de energía eléctrica. [1]

La generación hidroeléctrica es una tecnología que usa un recurso renovable como lo es el agua pero aun así no es netamente una generación de cero emisiones de gases de efecto invernadero ya que la construcción de los embalses para llevar a cabo el proceso de producción genera un porcentaje bajo de emisiones que sin duda alguna debe tenerse en cuenta y debe sumarse al gran porcentaje de gases de efecto invernadero de la generación por termoeléctricas debido a la excesiva dependencia de los combustibles fósiles. [2]

Tomando una postura que aporte al cuidado y preservación de la tierra en cuanto a su avanzado deterioro por el cambio climático podemos hacer uso inteligente y adecuado de las energías limpias y renovables para la generación de energía eléctrica del cual se pueda suplir el gasto de su demanda energética implementando tecnologías como la de las microrredes de distribución.

La microrred es un sistema de distribución que se puede ver como un grupo de fuentes de generación de energía y sus respectivas cargas las cuales son operadas en una red separada que pueden utilizarse de dos formas diferentes en modo isla o conectándose a la red pública, esta conexión y desconexión está ligada a los requisitos económicos y técnicos. Los recursos energéticos distribuidos en una microrred están formados por varias fuentes de generación de energía controladas independientemente para así poder construir una infraestructura de red confiable y segura. Esta posición de operatividad garantiza la sostenibilidad del sistema de microrredes de distribución aunque algunas de las fuentes parten de la etapa de generación. [3]

Partiendo del punto de que la energía producida sea lo más amigable posible con el medio ambiente lo esencial sería que las fuentes de generación de energía sean renovables en su mayoría e integrando generadores distribuidos, por ejemplo, los paneles fotovoltaicos y las turbinas eólicas; la inherente importancia y expansión de las fuentes de energía renovable y la generación distribuida en un comienzo era conocida como redes pasivas con flujo en un único sentido pero ahora se convierte en sistemas activos con un flujo bidireccional de la energía eléctrica. En otras palabras la microrred integra las fuentes de generación de energía renovable y la generación distribuida en los sistemas de distribución para así conectarlos a diferentes tipos de cargas ya sea residencial, industrial entre otras.

Ahora podemos analizar la calidad de energía que nos proporciona un sistema eléctrico de distribución en microrredes teniendo en cuenta que esto depende de muchos factores como por ejemplo el modo de operación, la frecuencia fundamental de operación, problemas de calidad de potencia manifestados en desviaciones de tensión, corriente o nuevamente en la frecuencia y todo esto puede resultar en una falla del equipo consumidor.

En el presente documento se exponen los parámetros que me definen la calidad de la energía como la calidad del servicio es decir asegurando una continuidad del servicio eléctrico , confiabilidad del servicio, por otra parte también influyen la amplitud, frecuencia y forma de la onda donde podemos presentar irregularidades como presencia de armónicos lo que produce una distorsión armónica.

Una vez definidos algunos de los problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica de forma bastante considerable nos adentramos en el campo de las técnicas de mitigación para así hacerle frente y resolver las irregularidades que pueda presentar la calidad de la energía eléctrica evitando fallas en consumidores finales o perdidas por ejemplo en la industria por las interrupciones del fluido eléctrico que se ve reflejado en el factor económico y productivo.

1.2 Descripción del Problema y justificación

En el campo de la calidad de energía existe una diversidad equipos dedicados a su mejoramiento y normativas para su regulación, en Colombia la penetración de los estándares internacionales se limita a traducciones literales empleadas en regulaciones conservadoras con falta de contexto y centrada en el funcionamiento en estado estacionario. Adicionalmente existe un sistema de certificación de productos de funcionamiento exclusivo en Colombia basado en el cumplimiento del reglamento interno RETIE, que evalúa aspectos generales de los equipos y no considera parte esencial de estos para garantizar su compatibilidad electromagnética, en donde las microrredes de generación en Colombia utilizan estos equipos sin verificación afectando de esta forma las redes eléctricas con eventos de calidad de la energía de difícil detección para los operadores de red, por lo cual es relevante evaluar la diversidad de las soluciones en el presente campo, evaluando los problemas (eventos perturbadores) o causas que generan un funcionamiento inadecuado en la prestación del servicio eléctrico implementando un sistema de microrredes de distribución, de la misma forma se indaga sobre las técnicas de mitigación de los problemas calidad de la energía eléctrica en la microrred y por último se pretende definir cuales técnicas son viables de implementar en un contexto nacional.

El motivo del desarrollo de este proyecto se fundamenta en la determinación de los problemas que afectan con mayor influencia la calidad de la energía eléctrica en las microrredes, además de también determinar las técnicas de mitigación que permitan disminuir o eliminar por completo los comportamientos anormales del servicio eléctrico en sistemas de microrredes de distribución y por ultimo determinar si estas técnicas de mitigación se pueden aplicar en un contexto nacional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

- Determinar las técnicas de mitigación de problemas de calidad de la energía en microrredes de generación.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar los problemas de calidad de la energía de mayor influencia en microrredes.
- Determinar las técnicas de mitigación de los problemas de calidad de la energía seleccionados en sistemas de microrredes.
- Establecer las técnicas de mitigación de problemas de calidad de la energía aplicables en el contexto nacional.

1.4 Acotaciones

- El alcance de esta monografía va dirigido a una revisión de la literatura sobre los problemas de la calidad de la energía en microrredes y sus técnicas de mitigación, además de también soportar la información recolectada en el marco del diplomado de calidad de la energía eléctrica del programa de ingeniería eléctrica.
- Otro medio de obtención de información se hizo por medio de revistas científicas, indexadas, artículos de revisión y libros de la biblioteca virtual de la universidad de pamplona
- En cuanto a lo que tiene que ver con análisis de datos de casos particulares en el área de la calidad de la energía, la información se limita a las bases de datos que tiene la universidad de pamplona y fue transmitida por medio del diplomado en calidad de la energía.

1.5 Marco Teórico

1.5.1 Concepto y estructura de una microrred

Con el paso del tiempo y prestando atención según el uso y la aplicación de las microrredes el significado o la definición se ha venido transformando tomando una respuesta a cada momento en específico. A continuación se mencionan algunas de las múltiples definiciones que existen y han surgido a través de las diferentes investigaciones sobre este tema:

Con la importante necesidad de integración de los recursos de generación renovables distribuidos de forma eficiente y confiable se ha tomado un gran impulso de desarrollo de las tecnologías de microrredes eléctricas, es propio de las microrredes permitir la integración de las fuentes de energía renovables y limpias en las redes de distribución específicamente de media/baja tensión. [4]

Podemos entender que la microrred es como un grupo de cargas que están interconectadas y recursos de energía distribuidos con límites eléctricos establecidos en el diseño de la microrred con el fin de tener un control único con respecto a la red principal; para el modo de operación la microrred puede conectarse (modo interconectado) o desconectarse (modo aislado) de la red principal. [5]

A partir de esta definición las instalaciones de recursos de energía distribuida podrían considerarse como una microrred si cumplen con los siguientes tres aspectos [5]:

- Deben tener límites eléctricos precisos [5].
- Un controlador maestro para operar y controlar los recursos de energía distribuidos y las cargas como una única entidad [5].
- Se debe tener en cuenta que la capacidad de generación instalada debe superar la máxima carga crítica, según esta característica la microrred podría desconectarse de la red principal

o publica y operar en modo aislado suministrando cargas críticas locales sin presentar ningún inconveniente [5].

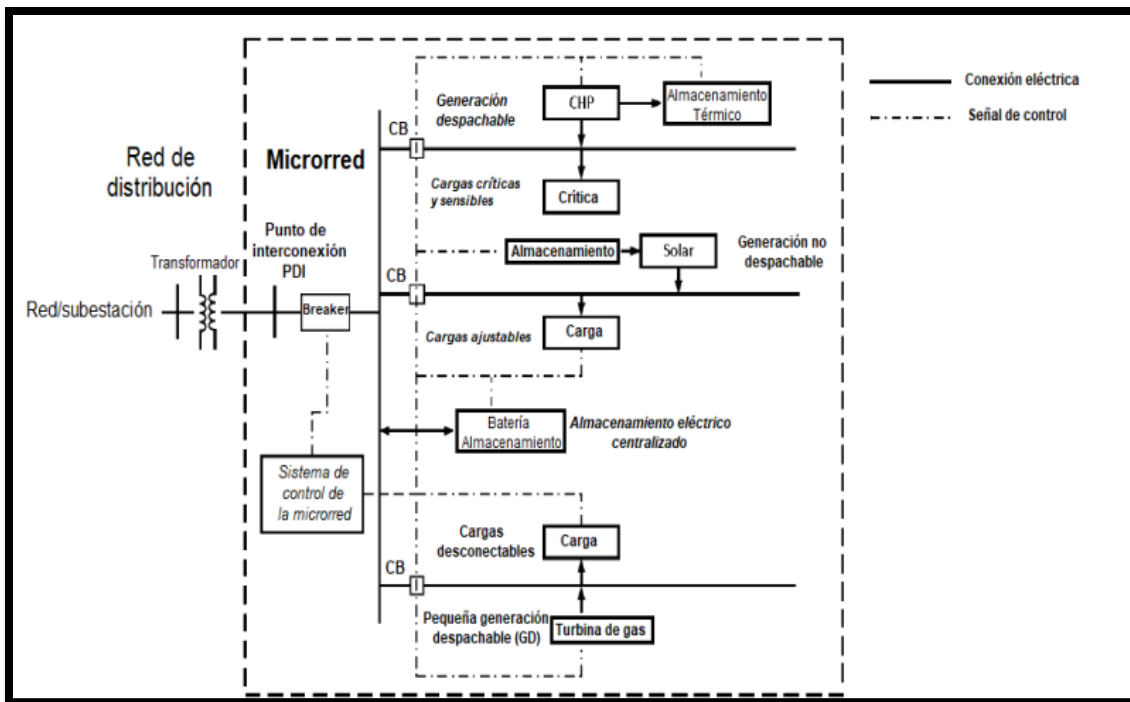


Figura. 1. Estructura y componentes de una microrred. Adaptado de [5]

Fuente: [4]

La conexión de la microrred con la red principal y publica se hace en un único punto de interconexión (PDI) o en un punto común de acople (PCC) por medio de un breaker, en cuanto a los tipos de cargas podemos encontrar: cargas críticas, cargas sensibles, cargas ajustables y cargas desconectables [4].

- Cargas críticas: son aquellas que al dejar de funcionar ponen en peligro la vida humana, la seguridad del personal y/o ocasiona grandes perjuicios económicos entre estas cargas podemos tener por ejemplo salas de cirugía o cuidados intensivos, centros de datos y control, telecomunicaciones virtuales y sistemas de seguridad pública y privada [4].
- Cargas sensibles: son aquellas que requieren de un suministro de alta calidad, es decir, que esté libre de variaciones de frecuencia o tensión en donde por ejemplo los equipos electrónicos son más susceptibles que los equipos electromecánicos tradicionales. Ejemplos de estas cargas son equipos de instrumentación, de diagnóstico y tratamientos médicos, por otro lado la domótica, maquinas con controles automáticos y telecomunicaciones [4].
- Cargas ajustables: son aquellas cargas no lineales que son alimentadas por una tensión sinusoidal y demandan una corriente distorsionada o no sinusoidal, estas cargas contienen electrónica en su etapa de entrada (diodos, transistores, tiristores, etc.) y son ejemplos de cargas ajustables en varios niveles como aires acondicionados [6] [7].
- Cargas desconectables: son aquellas que se pueden abrir en cualquier instante de tiempo para permitir balancear una alta carga respecto a la generación disponible, como ejemplo tenemos los sistemas de bombeo o la carga de las baterías [4].

Los recursos de la energía distribuida están compuestas por unidades de generación distribuida y sistemas de almacenamiento de energía distribuidas, que se podría implementar en las instalaciones de prestación de servicios públicos eléctricos y también en las instalaciones de los consumidores finales de electricidad [5].

Los recursos de energía distribuida que son de generación distribuida como por ejemplo los grupos electrógenos impulsados por diésel para convertir la capacidad calorífica en energía mecánica y luego se convierte en energía eléctrica son despachable lo que significa que pueden ser controladas por el control inteligente de la microrred y están dispuestas a una serie de restricciones técnicas según el tipo de unidad. La generación distribuida también existe de tipo no despachable que es propia de las energías renovables y limpias como la generación fotovoltaica y eólica de donde es claro que esta generación no se puede controlar por medio del controlador inteligente de la microrred debido a que la fuente de entrada es incontrolable. Analizando la variabilidad presente en este tipo de generación y en las cargas puede llevar a complementar su uso por medio del almacenamiento de energía, como en tanques de almacenamiento hidráulico, capacitancias térmicas o bancos de baterías eléctricas; este refuerzo de almacenamiento es necesario por la intermitencia de la generación que indica que no siempre está disponible y la variabilidad está indicando que la generación presenta fluctuaciones a diferentes escalas de tiempo; otro aspecto importante es la manera de conectar estos recursos la cual en su mayoría se hace vía convertidores electrónicos de potencia como los convertidores bidireccionales de baterías, inversores para generar corriente directa fotovoltaica y para la generación eólica con convertidores AC/DC/AC [4].

El control inteligente implementado y diseñado exclusivamente para la microrred y su sector de aplicación es aquel que esta puesto para la toma de decisiones además de algunos elementos de medida, comunicación y actuación. Pero el sistema de control en si se encarga de regular la frecuencia que es pieza importante para la sincronización de los elementos generadores y también la regulación de tensión en los nodos de la red, el desplazamiento de cargas, el despacho económico y por supuesto la interactividad con el sistema de potencia y por último la decisión en el modo de operación ya sea interconectado o aislado.

Las microrredes es una tecnología en constante desarrollo que nos ofrece una serie de beneficios que se deben analizar y considerar al momento de su implementación [4]:

- En tiempos donde simplemente la variabilidad del clima en un territorio nos refleja el cambio climático que está sufriendo la tierra por tanta contaminación de diferentes fuentes, las microrredes reducen el impacto ambiental causado por el uso de fuentes fósiles de energía.
- Reducción de la potencia en líneas de transmisión y distribución [4].
- Reduce las pérdidas de la energía eléctrica.
- Aumenta la confiabilidad y calidad del suministro del servicio eléctrico en los usuario finales; por otro lado también crece el factor seguridad y de igual forma aumenta la resiliencia de la red [4].
- Satisface el crecimiento de la demanda y además son una solución a la globalización de la energía eléctrica es decir que se puede implementar el suministro eléctrico en zonas no interconectadas [4].
- Rentabilidad económica lo que da entrada a nuevos mercados y a una generación más llamativa para los usuarios finales [4].

1.5.2 Calidad

Tenemos que este es un término muy importante ya que se refiere al cumplimiento de las características y expectativas reales de un producto o proceso con las características esperadas; en otras palabras es garantizar el funcionamiento normal y estable o si fuese posible un funcionamiento casi ideal de una operación segura y sin daños manteniendo los parámetros dentro de la normativa que me define dicha calidad [8].

1.5.3 Problemas de calidad de la energía eléctrica

En cuanto a calidad de la energía eléctrica esto depende y está ligado a múltiples factores los cuales en un comportamiento netamente ideal podría ser una ausencia total de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidos por contenido armónico en la onda ya sea de tensión o de corriente en la red además de variación de la tensión R.M.S suministrada al usuario. Pero en realidad los sistemas no solamente eléctricos no funcionan de manera ideal [5].

Se puede decir que tenemos problemas con la calidad de la energía cuando ocurre cualquier tipo de desviación atípica de la tensión, la corriente o la frecuencia lo que puede provocar una mala operación de los equipos de usuario final o afectar el bienestar del usuario final [5].

Los problemas de la calidad de la energía puede tener efectos negativos como:

- Incrementan las pérdidas de energía eléctrica [5].
- En un ambiente industrial tenemos daños a la producción, a la economía y a la competitividad empresarial [5].
- Deterioro de la confiabilidad, de la disponibilidad y el confort que ofrece el suministro eléctrico [5].

Un sistema de microrredes de distribución la podemos estudiar y analizar a través de tres propuestas de suma importancia y muy atractivas para que los operadores de la red puedan respaldar el rendimiento de la red, son las siguientes: mejora de la confiabilidad, re silencia y por supuesto la calidad de la energía [5].

1.5.4 Confiabilidad

Este es uno de los aspectos con mayor impacto en las microrredes, mejorar la confiabilidad del suministro eléctrico de los consumidores, lo que se traduce en una calidad del servicio que se refiere a la continuidad del servicio eléctrico [5].

La confiabilidad esperada por el consumidor generalmente se evalúa en términos de la frecuencia y duración promedio de las interrupciones ya sea del sistema y del usuario final; estas interrupciones son provocadas por condiciones climáticas como tormentas eléctricas, fallas en los equipos, etc., y afectan los niveles de confiabilidad al aumentar la frecuencia, distorsionar la forma de la onda y aumentar la duración de las interrupciones [5].

Sin embargo esta tecnología de las microrredes de distribución permite mejorar o controlar estos factores de manera más eficiente y esto se debe a la inteligencia intrínseca (sistemas de control y automatización) de las microrredes y la utilización de los recursos de energía distribuidos con los que aseguramos la operación en modo aislado de la red pública [5].

1.5.5 Resiliencia

La mejora de la resiliencia es una propuesta que hace más llamativas las microrredes, entendiendo la resiliencia de un sistema eléctrico como la capacidad del mismo para resistir los impactos causados por eventos de poca probabilidad, minimizando posibles cortes o interrupciones de energía y regresando rápidamente al estado normal de operación. Estos eventos poco probables se deben a los fenómenos climáticos como terremotos, inundaciones, tormentas eléctricas, etc., a estos eventos se tienen que enfrentar las empresas encargadas del suministro eléctrico en donde si el sistema se ve afectado es decir las instalaciones generadoras o infraestructura de transmisión y distribución sufren daños críticos esto nos puede producir interrupciones en el servicio con una duración dependiendo de la gravedad de la dificultad es decir que se pueden presentar interrupciones de días o incluso semanas; la crisis provocada por estos eventos la podemos minimizar implementando las microrredes que me hacen posible el suministro a diferentes tipos de cargas locales incluso cuando la red pública no está trabajando con normalidad o no está disponible [5].

1.5.6 Calidad de la energía

El consumidor final con el paso del tiempo demanda un aumento en la necesidad de una energía con mayor calidad esto se debe a la creciente aplicación de cargas sensibles al voltaje, incluyendo una gran variedad de cargas electrónicas y led. Las empresas de servicios públicos en la búsqueda de mantener la calidad de la energía indagan formas eficientes de mejorar los problemas de la calidad de la energía abordando las afectaciones que predominan y se derivan de los contenidos armónicos y las variaciones del voltaje [5].

El control local de la frecuencia, el voltaje en los nodos de la red, la carga y la respuesta rápida de los sistemas de almacenamiento de energía en las microrredes nos brindan una respuesta bastante rápida y eficaz para abordar estas necesidades [5].

Por último, actualmente la calidad de la energía eléctrica es el resultado generado por una atención continua; donde en los últimos años el incremento considerable de cargas sensibles en los sistemas de distribución requieren de una atención permanentemente importante, debido a que dichas cargas por si solas terminan siendo un factor de degradación para la calidad de la energía eléctrica [9].

2 Capitulo II

Se realiza como primer paso un marco teórico acerca de temas generales como que es la calidad de la energía sus posibles problemas y técnicas de mitigación teniendo en cuenta un sistema de microrredes de distribución, luego de esta primera revisión de la bibliografía pasamos a un análisis más exploratorio sobre el tema específico de cuáles son los principales eventos de la calidad de la energía que me afectan en general los sistemas de distribución y por ende el suministro eléctrico.

En donde por medio de las normativas o estándares a nivel mundial y nacional se llega al primer objetivo planteado en este trabajo, el estándar IEEE 1159 de 1995 para determinar en términos de la duración del evento, en los que se presentan perturbaciones como transitorias, sags, swell, interrupciones, desbalances de voltaje, presencia de contenido armónico, entre otros.

Una vez identificados los problemas de la calidad de la energía se lleva a cabo una metodología que determine en el campo de las técnicas de mitigación de los problemas de la calidad de la energía donde por medio de valores estándar se definen rangos de operación adecuada para las señales de

tensión, corriente y valores de frecuencia y por medio de esto se hace posible la generación de equipos y técnicas por ejemplo de control para mitigación.

El último paso está centrado en el análisis de viabilidad de las técnicas de mitigación ya expuestas pero con el fin de ser aplicadas en el contexto nacional para la solución de problemas de la calidad de la energía en microrredes.

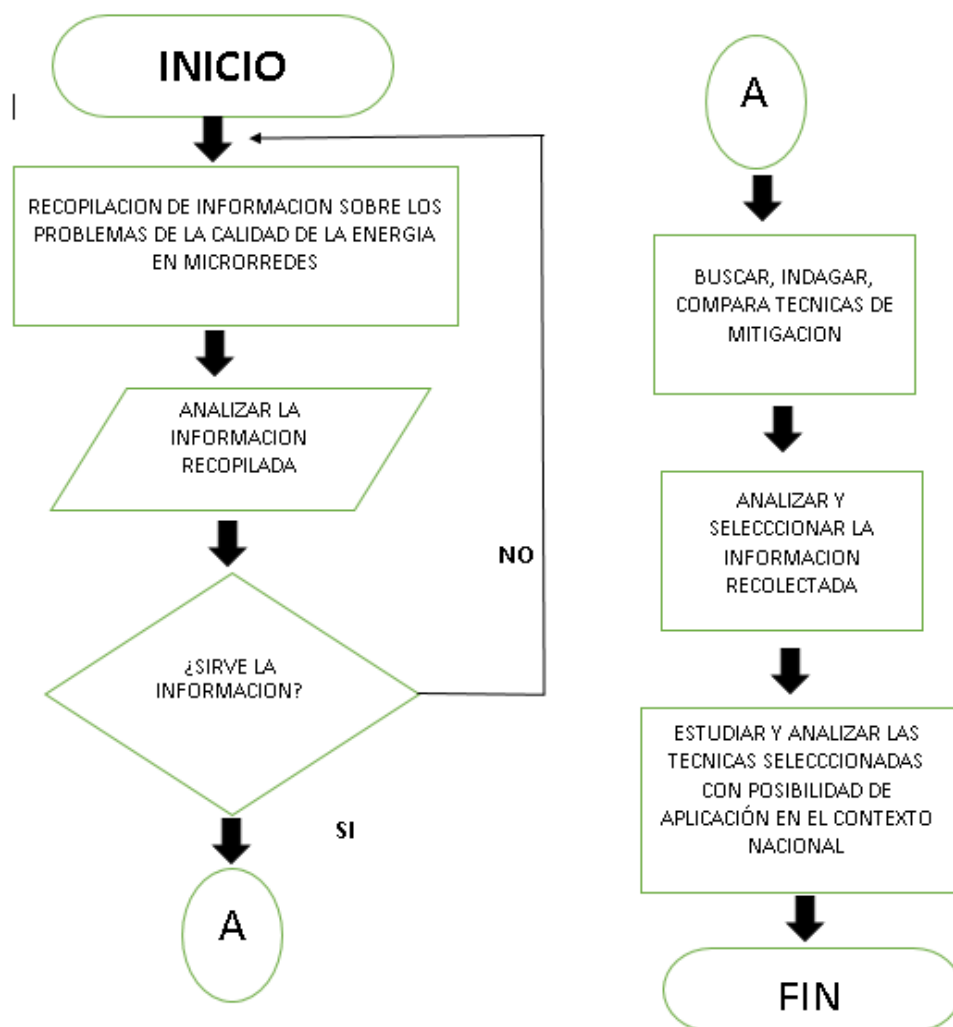


Figura. 2. Diagrama de flujo de la metodología de la investigación

Fuente: [10]

2.1 PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGIA CON MAYOR IMPACTO EN MICRORREDES

2.1.1 Características de las ondas de tensión y de corriente

Las condiciones en las que llega la energía eléctrica al usuario final están definidas por las siguientes características principales [9]:

1. Fase: la fase lo que nos indica es la situación actual o instantánea en un ciclo para una magnitud que varía cíclicamente con el tiempo [9].
2. Amplitud de la onda: se define como el valor máximo positivo y negativo que toma la forma de onda sinusoidal ; siendo el máximo valor positivo la cresta o pico, el valor máximo negativo es el vientre o valle de la onda y donde la amplitud tiene un valor de cero se le llama nodo o punto de equilibrio [9].
3. Frecuencia de la onda: la frecuencia definida por la letra F del movimiento ondulatorio y periódico se define como el número de oscilaciones completas o ciclos por segundo. La frecuencia está definida por la siguiente expresión $F = 1 / T$ siendo T el periodo de la onda, por ultimo cabe resaltar que la frecuencia estándar de operación en Colombia es a 60 Hz.
4. Forma de la onda: en lo posible que sea muy similar a una señal sinusoidal pura [9].

2.1.2 Parámetros que me definen la calidad de la energía

La calidad de la energía eléctrica tomo una definición según la normativa definida por instituciones que tratan y regulan el tema según el país, como las siguientes [11]:

- EPRI(Electric power research institute) es proveniente de los estado unidos y dice que la calidad de la energía eléctrica es cualquier problema de potencia reflejado en desviaciones de la tensión, la corriente o de la frecuencia; es decir que se alejan de los valores nominales de operación ocasionando falla o mala operación de un equipo de usuario final [11].
- En la normativa IEC (61000-2-2/4)(Comisión Electrónica Internacional) y la norma CENELEC (Comité Europeo De Normalización Electrónica) definen la calidad de la energía eléctrica como una característica física del suministro eléctrico, donde esta característica debe llegar al usuario final sin presentar perturbaciones ni interrupciones en los procesos del mismo [11].
- En la norma IEEE (1159 DE 1995) (El Instituto De Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) dan la definición de la calidad de la energía eléctrica haciendo énfasis a una amplia variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y las corrientes eléctricas en un tiempo y ubicación determinada en el sistema de potencia [11] .

Con base a las diferentes normativas se puede decir que de alguna manera la calidad de la energía está definida por las siguientes variables [11]:

- La amplitud [11].
- La frecuencia [11].
- La forma de la señal [11].
- El balance entre fases [11].
- Calidad del servicio [11].

2.1.3 Incidencia electromagnética

La calidad de la energía ha sido tema de estudio a lo largo del tiempo, donde en un principio se tenían en cuenta un porcentaje bajo o limitado de fenómenos, que hoy en día ha aumentado considerablemente por ejemplo por la implementación de la electrónica en el sistema de potencia lo cual produce contenidos armónicos en las señales de tensión y de corriente; este aumentó de los indicadores de calidad de la energía trae consigo efectos sobre la confiabilidad, el costo, el consumo, la demanda y por supuesto el diseño del sistema eléctrico [9].

Entendiendo la normalización IEEE estándar 1159 de 1995 encontramos que los fenómenos electromagnéticos pueden ser clasificados en:

- Presencia de variaciones del valor RMS de la tensión o la corriente [9].
- Perturbaciones de tipo transitorio [9].
- Deformaciones en la forma de onda [9].

2.2 Descripción de los fenómenos electromagnéticos

2.2.1 Transitorio impulsivo

Son eventos que no son repetitivos en el tiempo, ocurren de manera puntual en el tiempo, el disturbio se suma a la forma de onda nominal y puede ser producido por ejemplo por acciones de conmutación, descargas atmosféricas sobre la red o cerca a la red, etc. [9].

También son un cambio repentino y en una sola dirección ya sea positiva o negativa sobre la condición de estado estable de la tensión, la corriente, ambas y de frecuencia diferente a la frecuencia del sistema de potencia [9].

Poseen una duración medida en microsegundos y pueden tener una moderada o elevada magnitud, suelen ser caracterizados por los tiempos de subida y bajada y por su contenido espectral [9].

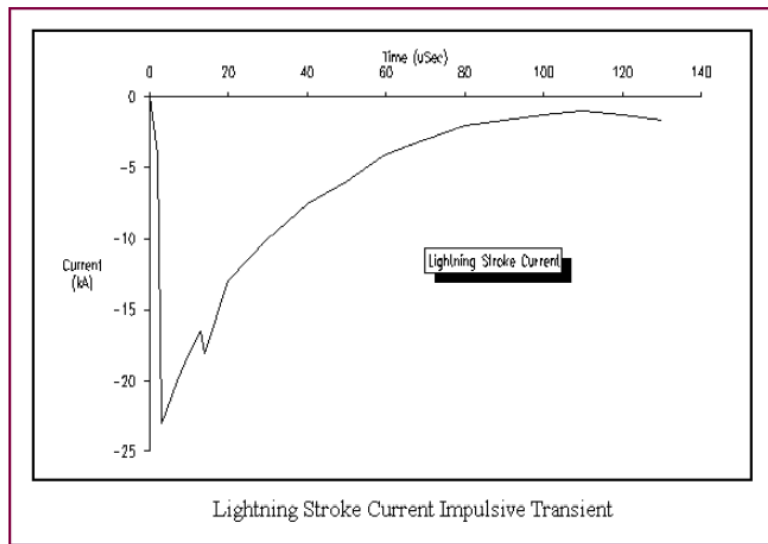


Figura. 3. Transitorio impulsivo

Fuente: [9]

2.2.2 Transitorio oscilatorio

ahora ya no tenemos solo un impulso, sino un cambio súbito del estado estable de la señal de tensión, la corriente o las dos, es decir que el fenómeno que presenciamos ahora es una oscilación con diferentes polaridades tanto positivas como negativas y frecuencia diferente a la de operación del sistema.

Este tipo de transitorio oscilatorio se caracteriza por su contenido espectral, por su duración que es de menos de medio ciclo y su magnitud. Respecto a la frecuencia los podemos clasificar en:

- Transitorios oscilatorios de alta frecuencia [9].
- Transitorios oscilatorios de media frecuencia [9].
- Transitorios oscilatorios de baja frecuencia [9].

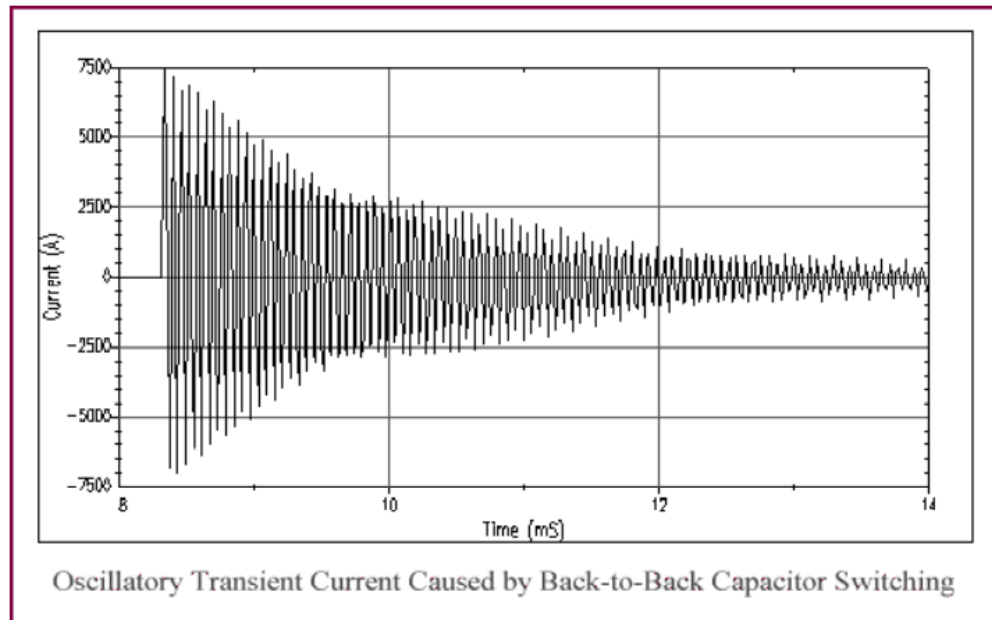


Figura. 4. Transitorio oscilatorio

Fuente: [9]

Por ejemplo para transitorios oscilatorios menores a 5 KHz los cuales según la tabla de categorías y características de los fenómenos electromagnéticos estaría en el rango de baja frecuencia, y está presente en los niveles de subtransmisión, distribución, sistemas industriales y es causado por diferentes eventos como acciones de conmutación o descargas atmosféricas [9].

2.3 Variaciones de corta duración

2.3.1 Depresiones

Las depresiones también llamadas sag, hundimiento, valles o huecos son reducciones inesperadas y momentáneas del valor nominal eficaz R.M.S de la tensión o corriente, estas reducciones están entre 0,1 y 0,9 P.U. (por unidad) y tienen una duración de que varía desde los 0,5 ciclo hasta 1 minuto [9].

Los SAGs es una de las perturbaciones que causa mayor impacto en los equipos instalados en el sistema eléctrico y está ligado a la configuración del sistema, condiciones operativas y de mantenimiento.

Los Sags normalmente son causados por [9]:

- Fallas del sistema.
- Fallas en la fuente de alimentación del sistema de potencia, del sistema eléctrico propio o puede ser de los vecinos también [9].
- Energización de una carga relativamente grande o pesada para el sistema de potencia, la cual exige una corriente de energización grande [9].
- Arranque de motores con elevada potencia [9].
- Elevaciones en la demanda, se eleva la potencia lo que nos produce una mayor circulación de corriente por el circuito y se aumenta la impedancia Z del cable alimentador del conductor de alimentación lo que provoca una mayor caída de tensión. [9]

Los Sags los puedo medir o caracterizar teniendo en cuenta lo siguiente:

- Duración del hundimiento: teniendo en cuenta cuando la señal sale de los límites permisibles y cuando nuevamente regresa al límite permisible [9].
- Magnitud del hundimiento: tensión máxima a la que llega el hundimiento [9].
- Profundidad del hundimiento: medida desde la tensión de alimentación declarada hasta la magnitud del hundimiento [9].

Los Sags también me generar algunos efectos como los siguientes:

- Paradas de procesos [9].
- Funcionamiento defectuoso de equipos [9].
- En algunos dispositivos de iluminación se reduce la luz visible emitida por el mismo.
- Cambios de velocidad en las máquinas de inducción.
- Desconexión de operación de dispositivos de cómputo (PC) y controladores electrónicos (PLC) [9].
- Teniendo en cuenta la potencia activa y reactiva, si tengo una depresión esto me redonda en un aumento de la potencia reactiva lo que me puede generar costos adicionales en la factura del servicio público, es decir y según la regulación que hace la CREG el consumo de potencia reactiva debe ser menor o igual al 50% de la potencia activa, de no ser así el excedente de energía reactiva es penalizado [12].

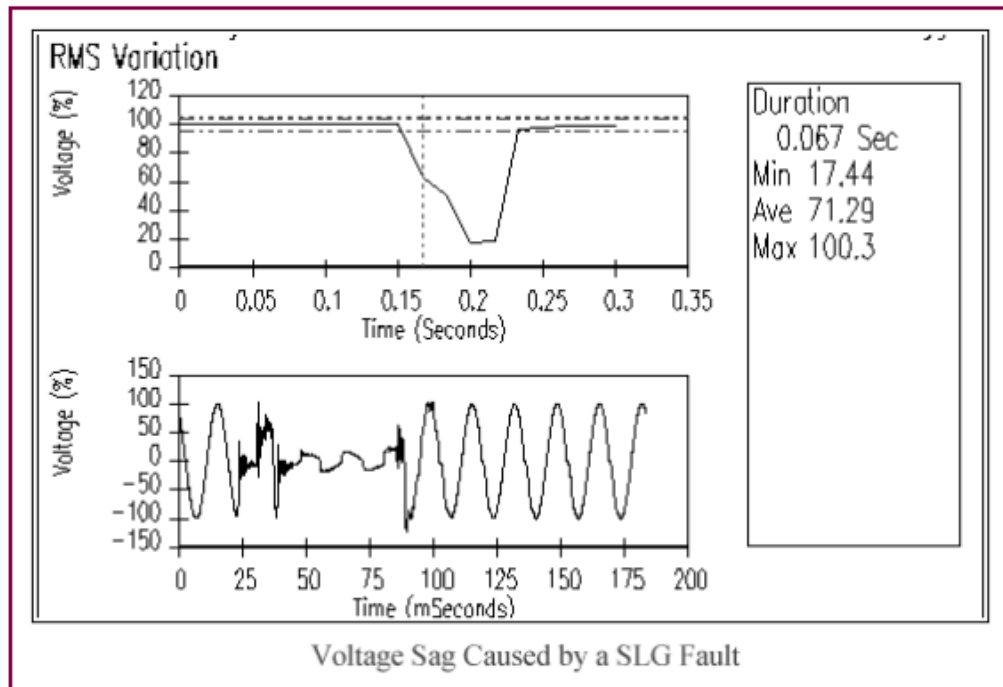


Figura. 5. Depresiones de tensión

Fuente: [9]

2.3.2 Crestas

Llamados también Swell o elevaciones son aumentos abruptos y momentáneos del valor eficaz R.M.S. de la señal de tensión o de corriente entre 1,1 y 1,8 P.U. con una duración desde 0,5 ciclo a un minuto. Su frecuencia de aparición es baja comparándola con el voltaje Sag. Las crestas son caracterizadas por la duración y la tensión máxima alcanzada por la elevación [9].

Los SWELL pueden ser causados por diferentes motivos como:

- Pueden ser causados por corto circuito, salidas de carga o fenómenos de resonancia. Un caso común es la sobretensión temporal en las fases no falladas durante una falla de línea a tierra [9].
- La desconexión de cargas grandes para el sistema o la energización de grandes bancos de capacitores [9].
- El funcionamiento de grandes sistemas de alimentación ininterrumpida (UPS) [9].
- Operaciones de cargas controladas por tiristores [9].

Los Swells traen consigo algunos efectos como:

- Pueden fallar los componentes de un equipo, pero todo depende de la frecuencia de ocurrencia del evento [9].
- La vida útil de dispositivos electrónicos disminuye incluyendo variadores de velocidad, computadores, maquinas rotativas, transformadores de tensión o de corriente, etc. [9].
- Los relés de protección pueden operar de una manera errónea o no deseada

- Se produce un efecto visual, es decir un incremento de la luz visible en algunos dispositivos de iluminación [9].

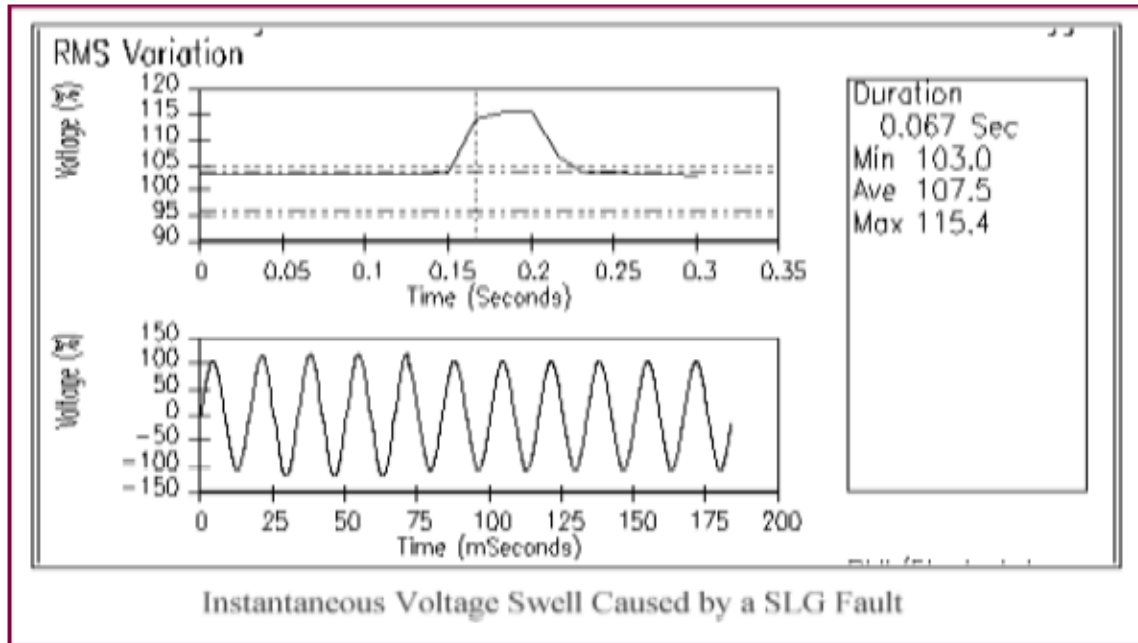


Figura. 6. crestas de tensión

Fuente: [9]

2.3.3 Interrupciones

Las interrupciones ocurren cuando la tensión o la corriente de la carga decrecen por debajo de un valor de 0,1 P.U. y en un lapso de tiempo menor a un minuto.

Las interrupciones se pueden caracterizar por la duración del evento y pueden ser momentáneas (entre 0,5 ciclos y 3seg), temporales (entre 3seg y 1 min) y sostenidas (mayores a 1 min); la magnitud sigue siendo la misma, es decir, por debajo del 10% del valor nominal R.M.S. de la señal de tensión o de corriente [9].

Las interrupciones pueden ser causadas por:

- Generalmente resultan por algún tipo de daño a la red de suministro eléctrico, como la caída de un rayo, accidentes con animales, accidentes con vehículos, condiciones atmosféricas destructoras (vientos fuertes) [9].
- Algunos equipos averiados [9].
- Por el mal funcionamiento de los sistemas de control. [13]

Las interrupciones también son responsables de algunos efectos como:

- Interrupción de procesos y equipos [9].
- Salida repentina y reinicio del sistema [9].

- Pérdida de programación de PLC y equipos electrónicos (computadores, controladores de potencia, mandos electrónicos de maquinaria rotativa) [9].
- Apagado de sistemas de iluminación [9].

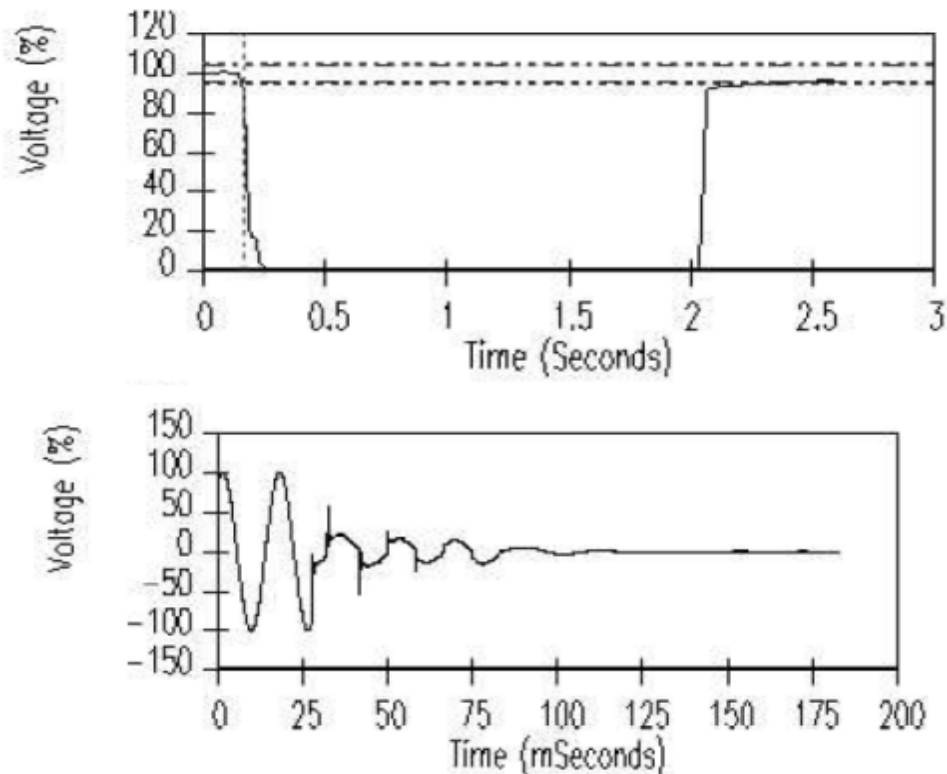


Figura. 7. interrupciones

Fuente: [9]

2.4 Variaciones de larga duración

Desde el punto de vista de la duración del evento, las variaciones de larga duración son aquellas superiores a un minuto en donde se presenta una desviación del valor eficaz R.M.S de la tensión [9].

Teniendo en cuenta la norma ANSI C84.1 (estándar nacional americano para sistemas y equipos de energía eléctrica – clasificación de voltajes a 60Hz) la cual nos esclarece las tolerancias en la tensión del sistema de potencia en estado estable; se trata de una variación de voltaje de larga duración cuando se exceden los límites de la norma ANSI por más de un minuto [9] [14].

En el territorio nacional colombiano estos límites los define la resolución de la CREG 024 de 2005 (comisión de regulación de energías y gas) en su apartado Los estándares en calidad de la potencia suministrada, que me dice, el valor de las tensiones en un estado estacionario a la frecuencia de

operación en Colombia (60 Hz) no deben ser menores al 90% del valor de tensión nominal ni estar por encima del 110% de esta durante un ciclo superior a un minuto [15].

Tabla 1. Tabla de tolerancias para tensiones de acuerdo a la norma ANSI

VALOR NOMINAL	RANGO DESEABLE	RANGO ACEPTABLE
120	126 - 114	127 - 110
208	218 - 197	220 - 191
240	252 - 228	254 - 220
277	291 - 263	293 - 254
480	504 - 456	508 - 440
2.400	2.525 - 2.340	2.540 - 2.280
4.160	4.370 - 4.050	4.400 - 3.950
4.800	5.040 - 4.680	5.080 - 4.560
13.800	14.490 - 13.460	14.520 - 13.110
34.500	36.230 - 33.640	36.510 - 32.780

Fuente: [9]

2.5 Tipos de variaciones de tensión de larga duración

Todos los eventos anormales en el sistema eléctrico son importantes a la hora de evaluar la calidad de la energía, pero en cuanto a reportes en Colombia, semanalmente los operadores de red toman y pasan el reporte a la CREG teniendo en cuenta solamente a los eventos de larga duración que son los que pueden afectar la red de manera considerable [9].

2.5.1 Sobreensiones

Es el aumento en el valor eficaz R.M.S. de la tensión de alimentación a un nivel por encima al 110% del valor de tensión nominal de CA o frecuencia de potencia con una duración mayor a un minuto, las sobreensiones difieren de los swell y su diferencia es el periodo de duración [9].

Las sobreensiones pueden ser causadas por la desconexión de grandes cargas, variaciones en la carga, operaciones de conmutación, conexión de bancos de capacitores, etc. [9].

Usualmente si el sistema es muy frágil como para mantener la regulación adecuada de tensión o cuando el control de la tensión es incorrecto o inadecuado se observan las sobreensiones [9].

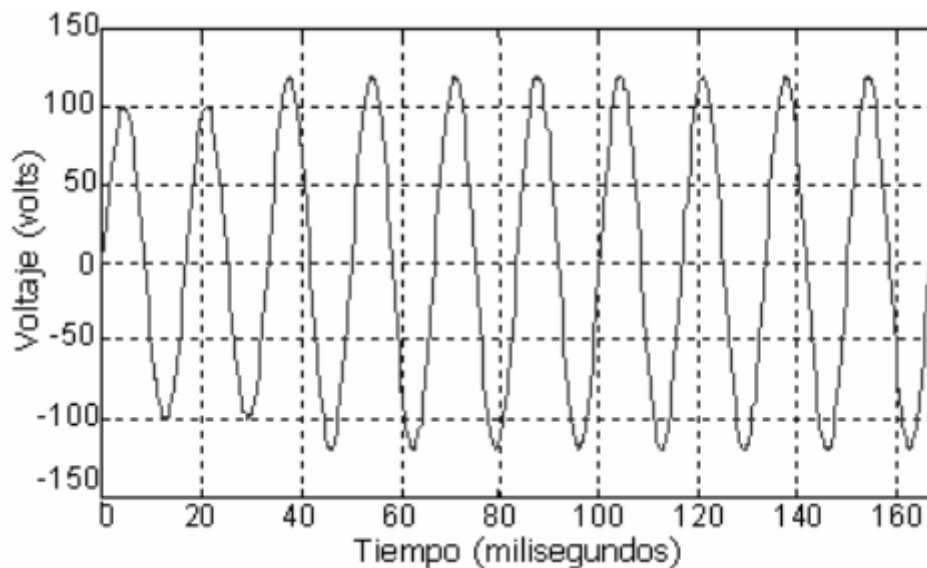


Figura. 8. Señal de tensión con sobretensiones

Fuente: [16]

2.5.2 Sub – tensiones

Una subtensión o una presencia de baja tensión se entienden como la reducción del valor eficaz R.M.S de la tensión de alimentación por debajo del 90% y por encima del 10% del valor nominal de CA a frecuencia de potencia con una duración mayor a un minuto; las subtensiones difieren de los Sag pero duran mucho más [9].

Las subtensiones las podemos causar cuando se hace la conexión de una carga, cuando tenemos circuitos sobrecargados, cuando se hace la desconexión de un banco de capacitores y hasta que los equipos de regulación actúen correctamente se reestablecerá la tensión normal de operación [9].

Cabe resaltar que la sobretensión y baja tensión normalmente no se deben a fallas en el sistema, se dan comúnmente por variaciones de la carga y operaciones de conmutación [9].

2.5.3 Interrupción sostenida

Tenemos una interrupción sostenida cuando observamos una ausencia de tensión, es decir, cuando el voltaje de suministro es casi cero y que además se prolonga por más de un minuto, como es una interrupción permanente se requiere de la intervención del operador de red para reestablecer el sistema a condiciones normales de operación [9].

Pueden ser el resultado de las fallas en el sistema de potencia, fallas en el equipo, deficiencia de generación, mal funcionamiento del sistema de control, etc. [17].

2.5.4 Desbalance de tensión

Este desbalance de tensiones en un sistema eléctrico se produce cuando las tensiones entre las tres líneas (sistema trifásico) no son iguales; este indicador define la magnitud y las asimetrías del ángulo de fase de las tres líneas en estado estable [9].

El desbalance de tensión es causado principalmente por:

- Asimetría de la impedancia de línea: en cuanto a sistemas trifásicos, la asimetría es un estado de operación en el que los valores de las tensiones de las tres líneas no son los mismos además los ángulos entre las tres líneas es diferente de 120° [15].
- Desbalances de carga [9].

También tenemos fuentes de desbalance como:

- Las cargas monofásicas desbalanceadas conectadas a sistemas trifásicos [9].
- Transformadores conectados en configuración delta – abierto [9].
- Quema de fusibles por ejemplo sobre una fase del banco de condensadores trifásico [9].

Además también tenemos efectos asociados a los desbalances de tensión como:

- Reducción de la vida útil del aislamiento en motores por efecto de sobrecalentamiento.
- Si el desbalance es bastante pronunciado, esto puede generar vibración en máquinas y eso produce un desajuste mecánico en las máquinas [9].

Por otra parte tenemos un factor de desbalance de tensión (Ifv):

Que nos permite hacer una medida definida como la máxima desviación del promedio de las tres líneas de tensión o de las corrientes trifásicas sobre el promedio de las tensiones o corrientes trifásicas y se expresa en porcentaje [9].

El Ifv se representa por medio de la siguiente expresión: tomada de la norma IEEE Std: 141 de 1969 para el desequilibrio de tensiones y expresa el desequilibrio por medio de la medición de la magnitud de las tensiones fase – tierra [18].

$$\text{Ifv} = \frac{\text{desviación máxima del voltaje promedio}}{\text{voltaje promedio}} * 100\%$$

Donde:

VP = voltaje promedio

$$VP = \frac{Va + Vb + Vc}{3}$$

DMVP = desviación máxima del voltaje promedio

$$DMVP = \max\{[VP - Va], [VP - Vb], [VP - Vc]\}$$

Otra manera de definir el desbalance es por medio del método de las componentes simétricas teniendo como referencia la norma IEC 61000-4-27 que define la relación de la componente de secuencia negativa entre la componente de secuencia positiva medida a la frecuencia del sistema y también se expresa en porcentaje [18].

$$Ifv = \frac{V2}{V1} * 100\%$$

Donde:

V2= componente de secuencia negativa

V1= componente de secuencia positiva

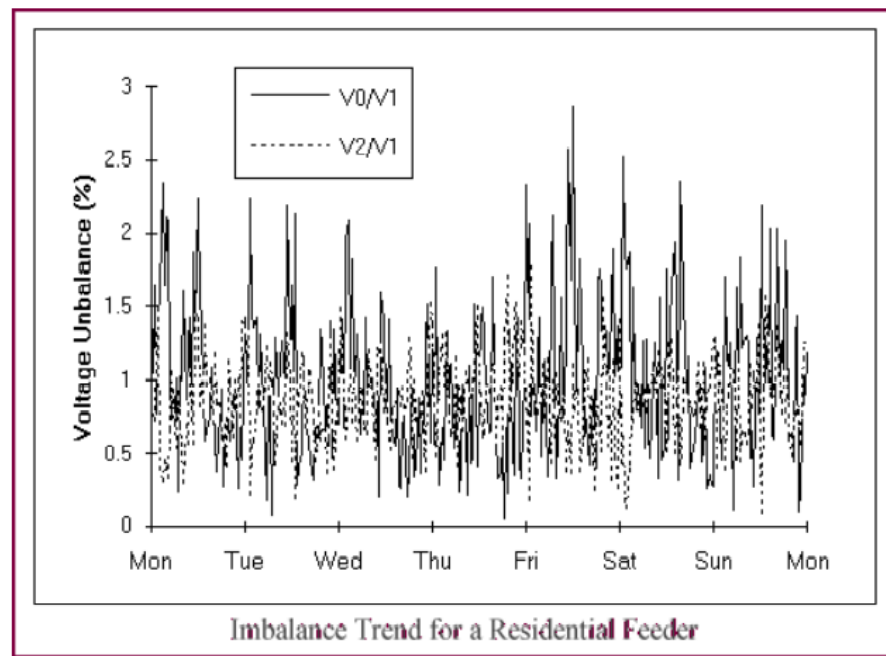


Figura. 9. Desequilibrio de tensiones

Fuente: [9]

Según la unidad de planeación minero energética de Colombia (UPME) se recomienda que el desbalance de tensiones sea menor al 2%.

2.6 Distorsión de la forma de onda

La distorsión en estado estable de la forma de onda es una desviación del comportamiento de una señal sinusoidal ideal de la tensión o la corriente de frecuencia de potencia del sistema y se puede caracterizar por el contenido espectral de la desviación [9].

En otras palabras la señal sinusoidal tiene componentes de frecuencia adicionales a la frecuencia normal (60 Hz en Colombia) además de que la forma de onda se aleja de una sinusoidal pura.

Existen cinco tipos primarios de distorsión de la forma de onda:

- Nivel de DC (offset) [9].
- Armónicos [9].
- Interarmónicos [9].
- Muecas (notching) [9].
- Noise (ruido) [9].

2.6.1 Nivel de DC

Cuando hay presencia de una tensión o corriente directa (DC) en un sistema de corriente alterna (AC) de potencia es llamado offset de DC y este nivel de DC puede ser positivo o negativo.

Este evento puede ocurrir por:

- Efectos de rectificación de media onda [9].
- Disturbios geomagnéticos [9].
- Asimetría de los convertidores electrónicos de potencia [9].

Efectos de la presencia de DC en las redes de AC:

La aparición de una corriente de CA en redes de CA genera efectos perjudiciales en el momento de polarizar los núcleos del transformador de forma que lleguen al punto de saturación en operación normal provocando calentamiento excesivo y pérdida de la vida útil en estos equipos [9].

El nivel de offset DC es una causa posible del aumento de la corrosión en los electrodos de puesta a tierra, en otros conductores y conectores.

Como ejemplo tenemos la siguiente señal sinodal:

$$f(t) = 0,6 + \text{sen}(377t) \text{ p.u.}$$

Donde el nivel de offset está representado por el valor de 0,6

2.6.2 Armónicos

El contenido armónico son las tensiones o corrientes sinusoidales en donde su frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema (60Hz).

Las formas de onda que periódicamente son distorsionadas pueden descomponerse, de acuerdo con la transformada de Fourier, en la sumatoria de una componente fundamental más las componentes

armónicas. Esta distorsión armónica se puede generar por las características no lineales de las cargas Conectadas al sistema de potencia [9].

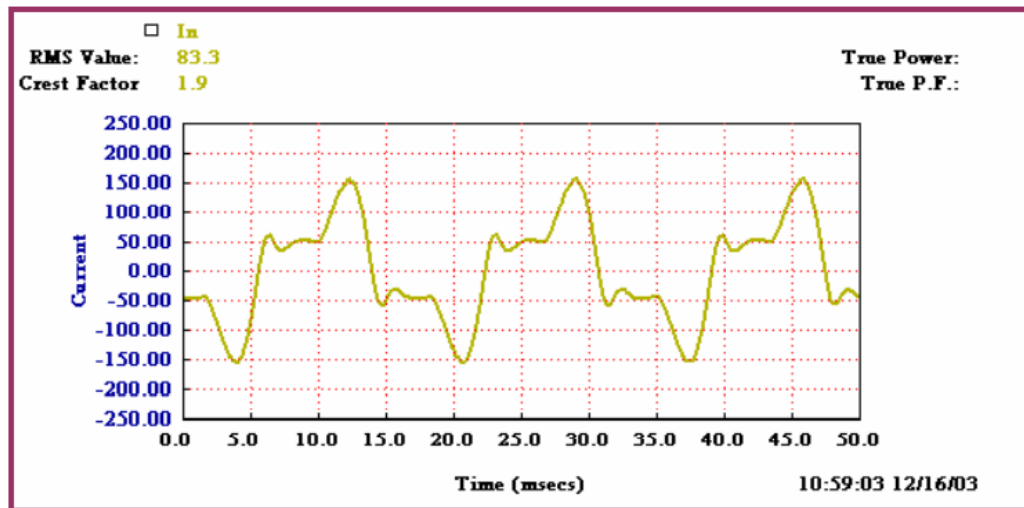


Figura. 10. Corriente armónica

Fuente: [9]

La tensión de una carga por ejemplo $V_a(t)$ puede ser reemplazada por las tres componentes que derivan de la transformación de Fourier.

$$V_a(t) = V_{a1}(t) + V_{ah}(t) + V_{a0}(t)$$

Donde la componente fundamental $V_{a1}(t)$ es igual a:

$$V_{a1}(t) = \sqrt{2} * V_{a1} * \text{sen}(wt + \theta_1)$$

El contenido armónico se calcula de la siguiente manera;

$$V_{ah}(t) = \sum_{h=2}^{50} \sqrt{2} * V_{ah} * \text{sen}(hwt + \theta_h)$$

Y la componente de DC está definida por:

$$V_{a0}(t) = \frac{1}{T} * \int_0^T V_a(t) dt$$

Siendo:

W =frecuencia angular, $w=2*\pi*f$

Θ = desfase de la onda

$T = 1/f$

El nivel de distorsión armónica se describe por el espectro armónico total por medio del valor de las magnitudes y el ángulo de desfase de cada componente por individual, por otra parte es usual utilizar

un criterio de medición de la distorsión llamado distorsión total armónica (THD) por sus siglas en ingles [9].

Se debe tener en cuenta que un sistema eléctrico no debería tener presencia de armónicos ya que esto nos lleva a tener algunos efectos como [9]:

- Se pueden causar errores en las lecturas de los equipos de medición de electricidad [9].
- Las fuerzas electrodinámicas producidas por las diferentes corrientes armónicas causan vibración y ruido en transformadores, reactores y maquinas rotativas [9].
- Causan interferencias en las comunicaciones y en los circuitos de control [9].
- Producen disminución del factor de potencia [9].
- Los armónicos de tensión pueden ocasionar disturbios en los sistemas de potencia electrónicos, es decir pueden por ejemplo afectar el desempeño normal de los tiristores [9].

2.6.3 Interarmónicos

Son las tensiones o corrientes que tienen componentes de frecuencia pero que a diferencia de los armónicos, estas componentes de frecuencia no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental.

Se pueden encontrar en redes de todos los tipos de tensiones y las fuentes de estos interarmónicos pueden ser los convertidores estáticos de frecuencia, los ciclo-convertidores, motores asíncronos y los dispositivos de arco [9].

Los interarmónicos son eventos poco comunes, son casos muy esporádicos y no debería estar presentes.

2.6.4 Muestras de tensión (notching)

La aparición de muescas es un disturbio periódico de tensión, originado por la operación normal de dispositivos de electrónica de potencia, en casos como cuando la corriente es conmutada de una fase a otra por ejemplo [9].

Debido a que es un fenómeno que ocurre de forma frecuente, se puede caracterizar a través del espectro de contenido armónico de la tensión afectada y por ultimo siempre se restan y tienden a cero [9].

Las muescas de tensión pueden aparecer por las siguientes causas [9]:

- Por dispositivos donde la conmutación es el principio de su funcionamiento [9].
- Los convertidores trifásicos que producen corriente DC [9].
- Por inversores, variadores de frecuencia, reguladores de tensión, entre otros [9].

Las muescas de tensión también generan algunos efectos por su aparición [9]:

- Causan fallas en las impresoras láser, CPU'S, y mal funcionamiento de algunos equipos electrónicos [9].
- Pueden generar fallas de funcionamiento en dispositivos de control asociado a los equipos, dado que producen variaciones de tensión respecto al tiempo podrían afectar a los

componentes inductivos y también pueden producirse oscilaciones de alta frecuencia que induzcan tensión a circuitos cercanos [9].

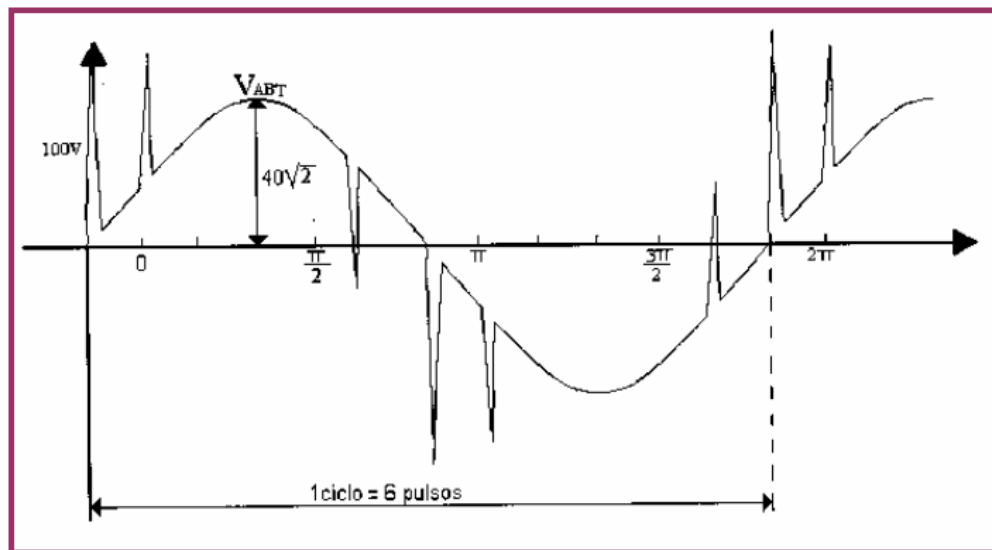


Figura. 11. Señal de voltaje con muescas de tensión

Fuente: [9]

2.6.5 Ruido

Son señales eléctricas adicionales de alta frecuencia que generan efectos no deseables en los circuitos de control en los que se presenta. Tienen un contenido espectral por debajo de los 200 KHz y se superponen a la tensión o corriente del sistema bien sea en los conductores de las fases, neutros del sistema o las líneas de señales [9].

Los dispositivos del circuito de electrónica de potencia, circuitos de control, equipos de arco, cargas con rectificadores de estado sólido y fuentes conmutadas [9].

El ruido en otros términos es cualquier señal eléctrica presente en un circuito y que no sea la señal deseada y no pueden ser clasificadas como transitorio o distorsión armónica pero si se pueden tener dos clases de ruido:

- ruido en modo común: es el ruido que hay entre el conductor del neutro y la tierra.
- ruido en modo normal: es el ruido que hay entre los conductores de fase y tierra [17].

2.7 Fluctuaciones de tensión

También es llamado este fenómeno con su nombre en inglés Flicker, titilación o parpadeo que son cambios aleatorios y bruscos de la tensión cuya magnitud usualmente está dentro de los rangos especificados por la norma ANSI C84.1 y básicamente se consideran fluctuaciones de amplitud menor al 10% y por periodos de tiempo inferiores a una hora [9] [14].

Analizando el Flicker desde el punto de vista de la calidad de la potencia se podría dar una definición donde esté el conjunto de todos los fenómenos de distorsión, transitorios y las fluctuaciones de tensión ya sea que tengan un periodo, o no. Este conjunto de fenómenos en el proceso de

transformación de energía eléctrica a energía lumínica producen un efecto sensitivo de inestabilidad visual humana inducida por estímulos de luz cambiante en los cuales hay fluctuaciones en la luminosidad o distribución espectral en la tensión de suministro de baja tensión [19].

Por mucho tiempo el Flicker se ha indagado como un problema de percepción visual, donde se puede resaltar que ha sido posible señalar umbrales de severidad para los cuales el fenómeno es visible y produce molestias visuales a los usuarios de la energía lumínica. La rigurosidad de este fenómeno de parpadeo está caracterizada por dos factores: la magnitud de la fluctuación de tensión y su frecuencia de ocurrencia [19].

El Flicker puede ser motivo de las variaciones repetitivas de tensión causadas por algunas cargas industriales como:

- Las máquinas de soldadura que me generan un corto circuito [9].
- Motores grandes con cargas variables.
- Hornos de arco [20].

Además de causas el Flicker también me produce algunos efectos:

- El parpadeo es un efecto con consecuencias en la percepción visual humana ya que puede producir inestabilidad o irritación visual, fatiga general, dolores de cabeza que en parte dependen de la exposición a este fenómeno [20].
- Variación en los niveles de iluminación de lámparas ya sea con bombillos incandescentes y bombillas de descarga [20].
- Efecto estroboscópico: es una peligrosa causa del Flicker en procesos industriales, que me produce un efecto sobre los objetos en donde aparenta estar trabajando a una velocidad diferente a su velocidad real lo que hace que se perciba una posición diferente a su posición verdadera [19].

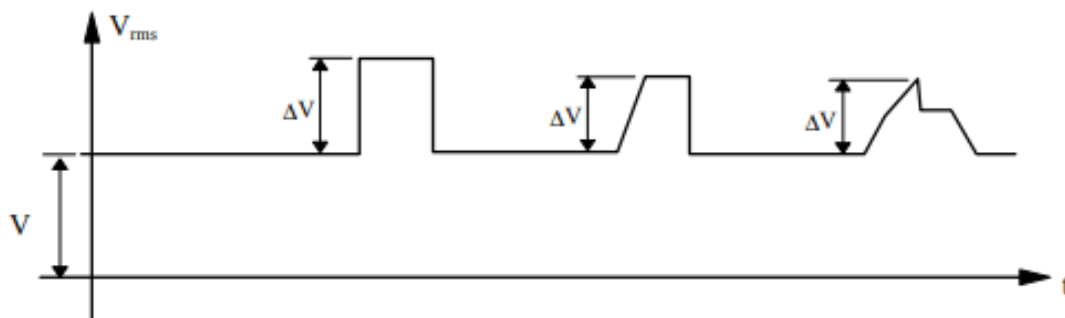


Figura. 12. Fluctuaciones de tensión en el valor eficaz de la tensión

Fuente: [21]

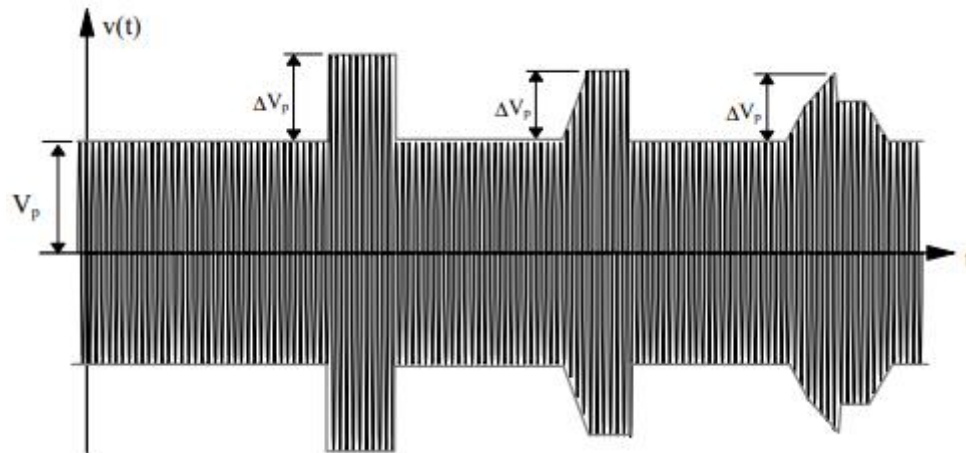


Figura.13. Fluctuaciones instantáneas en la tensión,

Fuente: [21]

2.8 Variaciones en la frecuencia del sistema de potencia

Las variaciones de la frecuencia de potencia están definidas como la desviación de la frecuencia fundamental del sistema de potencia de su valor nominal especificado (en Colombia tenemos 60Hz). la frecuencia fundamental está estrechamente en relación con la operación de las maquinas como en la velocidad de rotación en generadores que componen un sistema. Usualmente se presentan variaciones de frecuencia por el desbalance entre la generación y la carga del sistema de potencia, y se pierde la sincronía con los elementos conectados al sistema. Una falla de este tipo por ejemplo de un segundo es bastante notoria desde el punto de vista de que en un sistema de potencia se percibe como si fuese más de un segundo periodo en el que pueden pasar muchos efectos como el daño de un devanado de un transformador de potencia [9].

3 Capitulo III

3.1 TECNICAS DE MITIGACION DE LOS PROBLEMAS DE CALIDAD DE LA ENERGIA SELECCIONADOS EN SISTEMAS DE MICROREDES

Con el aumento de la conexión de las fuentes de generación distribuida, se han presentado cambios notorios en cuanto a operatividad y control. Las redes, ya sean domésticos o industriales con consumidores finales de electricidad y generación distribuida se pueden definir como microrredes de generación, las cuales pueden operar en modo aislado, interconectado a la red principal o conectada a otras microrredes. En cuanto a reducción de pérdidas, buena confiabilidad y operaciones descentralizadas en condiciones de falla y el flujo de energía en dos direcciones en la red de distribución, estrategia de control flexible son algunas ventajas de las microrredes trabajando interconectadas a la red principal; pero si por el contrario la microrred está operada en modo aislado sus características eléctricas cambian, debido a ello las perturbaciones que me afectan la calidad de la energía pueden aumentar su gravedad de igual manera se evidencia un impacto negativo en cargas y dispositivos de generación distribuida. La utilización de dispositivos de electrónica de potencia muestra una respuesta diferente a la de los generadores síncronos, por lo tanto el funcionamiento de la microrred con dispositivos de electrónica de potencia es completamente diferente al sistema tradicional sobretodo en el periodo transitorio, entendiendo este periodo transitorio como el

funcionamiento de una red o un sistema cuando se produce un cambio en las magnitudes de tensión o corriente decimos que salimos del periodo permanente para entrar a un periodo transitorio . [22]

La finalidad de esta parte del documento es una vez determinados y analizados los eventos que me afectan de manera negativa la calidad de la energía se debe indagar en el campo de las técnicas de mitigación de dichos eventos ya sea para controlar la magnitud del evento o desaparecer en lo posible dicho evento perturbador del sistema eléctrico de microrredes en este caso.

Viendo un poco las características del sistema de potencia de la microrred en cuanto a su funcionamiento estable – transitorio, esta revisión me permite obtener una orientación sobre el diseño y la planificación de la misma [23].

En la siguiente figura podemos apreciar la topología de una microrred:

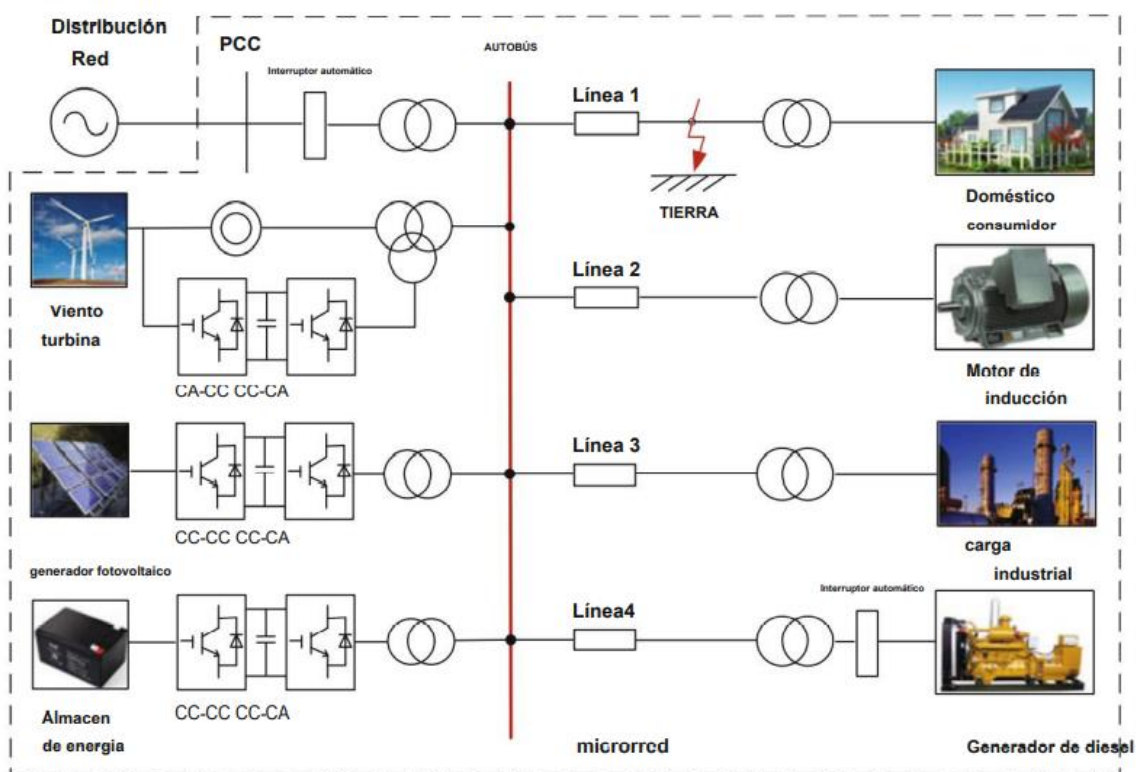


Figura. 14. Topología de una microrred

Fuente: [22]

- Capacidad térmica limitada:

Los dispositivos de electrónica de potencia como por ejemplo IGBT, MOSFET, JFET, entre otros, son los dispositivos necesarios para ejercer control en la conversión de energía de manera más flexible. Según [23] usualmente estos dispositivos se eligen teniendo en cuenta el doble del valor nominal. Aunque de todas formas en el periodo transitorio se produce una corriente de irrupción lo que me aumenta la temperatura en los dispositivos y probablemente afecte la seguridad de los mismos [23].

- Fuerte no linealidad:

Al tener los dispositivos del sistema de potencia que me realizan la conversión de energía por medio del control en el encendido y apagado de los interruptores electrónicos de potencia, con el cambio de estado del interruptor tenemos que la topología del sistema varía con el tiempo lo que me define entonces que el sistema de potencia es un sistema no lineal variable en el tiempo [23].

- Respuesta dinámica de múltiples escalas de tiempo:

Como una microrred hace conversiones de energía de manera rápida y flexible esto me genera una respuesta más dinámica en un amplio rango de frecuencia haciendo la comparación con el sistema tradicional de energía; tenemos que los interruptores de potencia responden a un tiempo en μs (microsegundos), también hay otras fuentes de energía distribuida (PV, turbina eólica, almacenadores de energía) que me responden en un rango de μs a minutos [23].

- Inercia pequeña y capacidad de anti – perturbaciones débil

Teniendo en cuenta que no existe una unidad giratoria física en los dispositivos de electrónica de potencia, debido a esto solo pueden proporcionar una inercia limitada al sistema por medio de los equipos de almacenamiento de energía como por ejemplo super condensadores y además agregando un control adecuado. Cuando presentamos perturbaciones en el sistema de potencia esto probablemente me lleve a tener oscilación de potencia y a una inestabilidad debido a la inercia pequeña y al coeficiente de amortiguamiento [23].

- Fuentes de alimentación intermitente:

Como la energía solar, eólica, etc., los paneles fotovoltaicos, las turbinas eólicas y otras unidades de transformación de energía hacen su conexión con los dispositivos de electrónica de potencia por medio de los cuales se ejecuta la conversión de energía. Pero se tiene claro que las fuentes de energía renovable son directamente dependientes de las condiciones climáticas y algunas otras condiciones atmosféricas incontrolables como la temperatura y la zona de ubicación; entonces tenemos que la potencia de salida no es continuo en un rango de tiempo prolongado y aunque el sistema de almacenamiento puede equilibrar la oscilación de esta potencia de salida, esto me genera un gasto adicional considerable del sistema [23].

1. Consideraciones

La calidad de la energía eléctrica está ligada a la calidad de la potencia eléctrica y en sistemas eléctricos como el de las microrredes de distribución al hacerse la integración de dispositivos de electrónica de potencia junto con el tipo de carga que se pretenda conectar, todo esto me genera desviaciones de los indicadores más representativos de un sistema, fundamentalmente asociados a las formas de onda de la tensión y la corriente teniendo en cuenta los valores de referencia nominales. [24]

Por la penetración de cargas no lineales de los usuarios finales además de los sistemas de generación distribuida y con la interacción de los dispositivos de electrónica de potencia esto seguro me lleva a presentar problemas de calidad de la energía en las microrredes, como la variación de la tensión, las caídas y aumentos de tensión, el titileo, armónicos, desequilibrio, problemas con la potencia real y reactiva [23].

Podemos abordar el problema de calidad de la energía desde los elementos principales de una microrred ya que estos están relacionados, los cuales son:

- Sistemas de generación distribuida:

Siendo estos recursos energéticos que alimentan las cargas y en este caso aplicado a microrredes tenemos equipos sin inercia como por ejemplo generadores 100% electrónicos (sis. Fotovoltaicos, pequeñas turbinas eólicas); debido a ello podemos sufrir problemas de estabilidad de voltaje y frecuencia además de también sufrir distorsión en la forma de onda (armónicos) generados por la intermitencia de los sistemas fotovoltaicos y turbinas eólicas [23].

- Tipo de carga:

Independientemente de la aplicación de la carga ya sea residencial, industrial, comerciales las podemos clasificar como dispositivos lineales o no lineales. Enfatizando un poco en las no lineales tenemos algunas comunes como computadoras, lámparas fluorescentes compactas, cargadores de baterías y variadores de frecuencia ajustables. Estas cargas electrónicas son una fuente común de distorsión de la forma de onda y Flicker que los debemos tener en cuenta porque son los principales problemas de calidad de la energía eléctrica en los sistemas de distribución [23].

- Control

Se puede clasificar como:

- ✓ Ejercer un control propio de los dispositivos generadores y cargas [23].
- ✓ Establecer un control de la interacción entre la generación y el consumo (gestión y demanda) [23].
- ✓ Un esquema que me permita el control referente al modo de operación de la microrred (aislado o interconectado) [23].

El sistema de control tiene bastante relación con los elementos de la microrred y en consecuencia también me relaciona la calidad de la energía eléctrica [23].

- Sistemas de almacenamiento

Si tenemos una microrred operando en modo aislado los sistemas de almacenamiento juegan un papel importante que permite aplicar una compensación de desequilibrios entre la generación y carga con lo que se incrementa y se garantiza la fiabilidad del suministro eléctrico de energía. Algunas opciones de los sistemas de almacenamiento son las siguientes [23]:

- ✓ Baterías [23].
- ✓ Volantes de inercia para almacenar energía [23].
- ✓ Súper condensadores o ultra condensadores [23].
- ✓ Almacenamiento de energía magnética superconductora [23].
- ✓ Aire comprimido [23].
- ✓ Energía hidroeléctrica bombeada [23].
- ✓ Almacenamiento de energía térmica [23].

Donde cabe resaltar que dependiendo de las características del tipo de sistema de almacenamiento, la funcionalidad de operación de la microrred puede variar [23].

Cuando se presenta una mayor inestabilidad y las relaciones mutuas entre carga y recursos distribuidos modifican el valor de las impedancias de la microrred en rangos mucho más grandes lo que produce que la microrred se debilite y esto nos produce un evento de variaciones en el voltaje considerablemente pronunciadas, se repiten más y su duración es más larga, además de esto la microrred puede sufrir efectos adversos por resonancia a bajas frecuencias y me podría llevar a presentar un aumento de los armónicos de voltaje. Este fenómeno de la impedancia de línea en problemas de calidad de la energía es inherente cuando la microrred está operando en modo interconectado y se cambia a modo aislado afectando el sistema con desviaciones de tensión [23].

3.2 Eventos de corta duración:

3.3 Sags

Describiendo un sistema por medio de sus características reales, se deduce que un sistema de energía eléctrica tiene numerosas características no ideales que me afectan desfavorablemente la calidad de la potencia, los hundimientos también son originados en parte por estos comportamientos reales y además tenemos que es imposible evitar estos hundimientos por completo [25].

Existe una razón principal para ocasionar los sags y es una corriente de alta magnitud que fluye por alguna parte de la red y que produce una caída de tensión sobre las impedancias de la red hasta llegar a tener un corte de energía que lo provoca las protecciones de sobre corrientes del sistema [25].

Existen diferentes posibilidades de mitigar los sags, una de ellas consiste en estabilizar la señal de tensión a través de acondicionadores de red [9].

Generalmente los métodos no están enfocados en proporcionar una energía de respaldo al sistema sino por el contrario garantizar la restauración del valor eficaz de la señal de tensión, además de ello estos métodos están más que todo pensados para aplicaciones industriales [25].

A continuación se presentan los métodos para mitigar los hundimientos:

3.3.1 Transformadores de tensión constante

Este equipo tiene un regulador ferro resonante que está compuesto por un inductor lineal y otro no lineal, un condensador en un circuito resonante en paralelo con el inductor no lineal [25].

La función de estos transformadores ferro resonantes es sostener el nivel de tensión de la onda de salida constante para un rango razonable de tensiones de entrada, este transformador tiene una importante característica de limitación de corriente, lo que claramente me limita la corriente máxima a plena salida de tensión viéndose reflejada en una limitación por ejemplo al arrancar motores o unidades de procesamiento computacional [25].

Este transformador cuenta con una cantidad pequeña de energía almacenada que circulara a través de interrupciones de aproximadamente un ciclo, teniendo en cuenta que siempre que la interrupción no sea generada por algún evento que este cerca a la entrada por que se gastaría toda la energía que esta almacenada pero aun así este dispositivo puede ser capaz de soportar hasta 50% del hundimiento durante un tiempo de 0,5 segundos, con esta característica es probable que se despeje la falla y no llegue a afectar el sistema [25].

En la siguiente figura se puede ver el transformador de tensión constante:

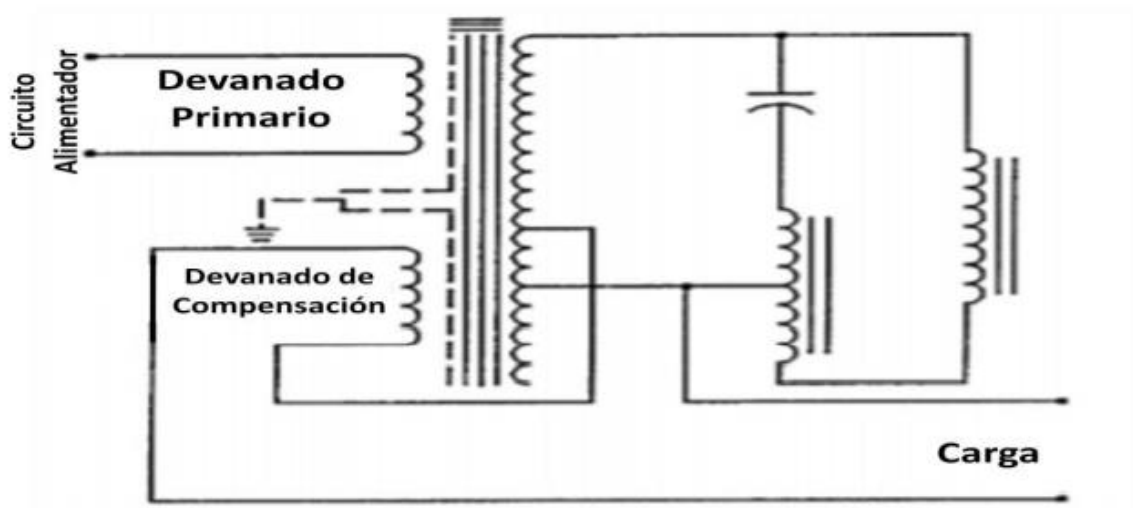


Figura. 15. Transformador de tensión constante

Fuente: [25]

3.3.2 Motor generador

Estos equipos que vienen compuestos de motor generador contienen motores eléctricos que accionan los generadores de la corriente alterna, donde la carga es suministrada por el generador y está en completo aislamiento eléctrico de la red de distribución. Estos generadores con capaces de mantener en aislamiento de la carga de eventos como impulsos, sags y elevaciones de tensión para variaciones del valor nominal de operación de más o menos 20%, lo que permite mantener un valor de tensión nominal en la carga [25].

Además de lo anterior el motor generador puede mitigar las interrupciones bruscas dado que la inercia incluida es capaz con interrupciones hasta por 0.3 segundos pero también cabe resaltar que se puede aumentar la inercia del equipo agregando un volante de inercia y esto permite que pueda minimizar interrupciones hasta de más de 0.3 segundos. El hecho de tener mayor inercia me da un tiempo adicional para brindar protección mientras se despeja el evento que provoca defectos en la calidad de la energía del sistema de distribución eléctrico [25].

Además de estos beneficios el equipo tiene un par de inconvenientes:

1. Uno de ellos está ubicado específicamente en el lado de la carga debido a la alta impedancia de salida del generador, este inconveniente me puede producir caídas de tensión como respuesta a cambios abruptos de la carga [25].
2. A lo largo de su vida útil este equipo presenta una eficiencia baja entonces los costos de energía eléctrica pueden ser considerables [25].
3. También se debe analizar que hay la posibilidad de presentar ruido electromagnético en su estado normal de operación [25].

Eligiendo este motor generador como posible mitigador de los hundimientos se debe tener en cuenta:

1. Las características físicas del equipo ya que este tiende a disipar calor [25].
2. Se debe disponer de un lugar para la instalación adecuado a su peso y tamaño [25].
3. Para su funcionamiento correcto el mantenimiento preventivo es esencial y por ultimo este equipo tiene alta confiabilidad [25].

En la siguiente imagen se puede apreciar los componentes de un motor generador:

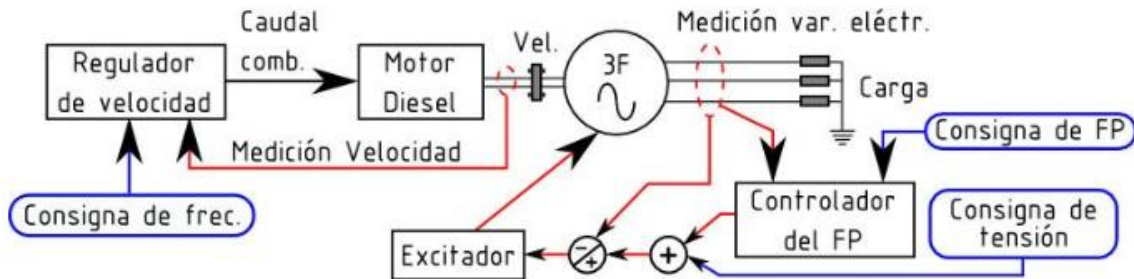


Figura. 16. Motor generador

Fuente: [26]

3.3.3 Acondicionador/Regulador de tensión activo

Estos equipos son acondicionadores de potencia apoyados en los inversores de bajo voltaje y su diseño esta puesto para tener la capacidad de desplazar la caída de tensión a los equipos trifásicos industriales [25].

En cuanto a tamaño de este equipo se puede encontrar en el rango entre 10KVA hasta los 200KVA y usualmente dependen de los componentes electronicos, tambien se pueden encontrar los reguladores de tension activos de una capacidad mas grande en el rango de los 200KVA hasta 10MVA y a difeencia del rango anterior estos pueden utilizar un transformador de inyeccion [10].

Cuenta con algunas características y ventajas de su utilizacion como: 1) buena eficiencia 2) potencia nominal 3) una profundidad de la curva de tension permisible 4) tiempo de correccion de la falla 5) por ultimo el dimensionamiento de estos equipos esta puesto para caidas de tension hasta con un 30% de profundidad [25]. En la siguiente imagen tenemos el regulador de tension activo:

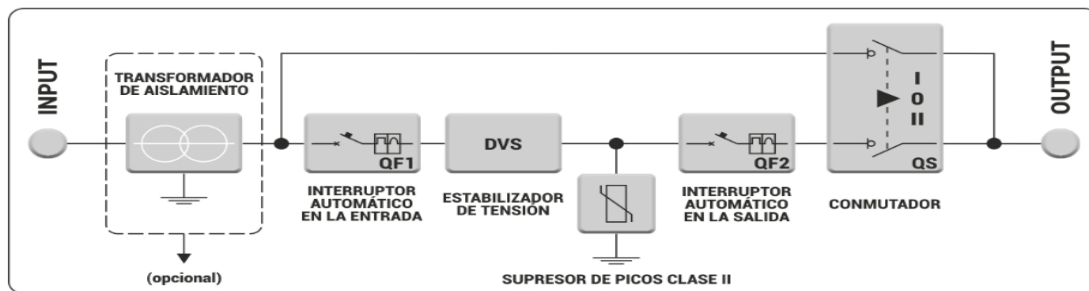


Figura. 17. Regulador de tensión activo

Fuente: [27]

3.3.4 Autotransformador

El autotransformador es uno de los tipos de transformador eléctrico donde tenemos que el devanado primario y secundario están en una configuración donde tanto primario como secundario tienen un único devanado en común, dicho esto en otra forma, es un transformador de una única bobina [28].

Tenemos que este equipo es más económico en comparación a un transformador convencional, cuenta con una regulación en las líneas de transmisión, produce una potencia mayor y por otro lado presenta algunas desventajas como la ausencia del aislamiento del devanado primario del secundario [28].

Un autotransformador se implementa para ejercer un ajuste de los voltajes de línea ya sea para cambiar su valor o mantenerlo constante en su valor nominal lo que permite poder mitigar los Sags, analizando el funcionamiento en condiciones de carga, tenemos que una parte de la corriente de la carga se adquiere del suministro local y la parte faltante se obtiene por la acción producida por el transformador, otra característica que refleja su capacidad de mitigar los Sags es que su funcionamiento es como el que realiza un regulador de tensión [28].

Estos equipos frecuentemente se usan en sistemas eléctricos de potencia para hacer la conexión de circuitos que funcionan a voltajes diferentes pero que sea relativamente cercana la relación por ejemplo 400kv / 230kv, en la industria se implementan para conectar máquinas diseñadas para un valor de tensión nominal diferente a la fuente de alimentación como por ejemplo un motor de 480v que está conectado a una alimentación de 600v; por otro lado también se puede implementar para conectar cargas sensibles como electrodomésticos y cargas menores en las alimentaciones más comunes (entre 100 – 130 v a 200 – 150 v en AC) [28].

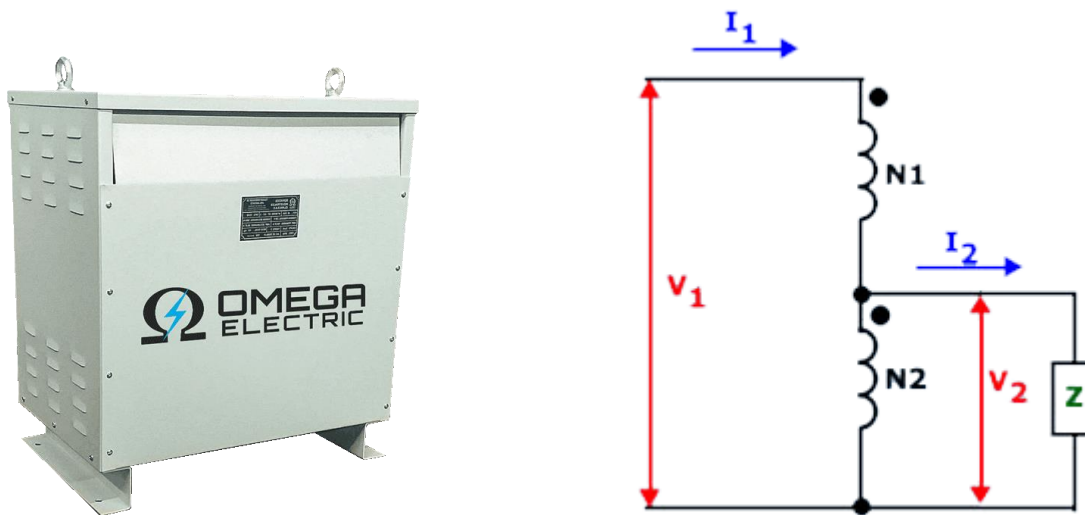


Figura. 18. Autotransformador y circuito del autotransformador en configuración reductor

Fuente: [28]

3.4 Swell

En este caso para las elevaciones de tensión podemos notar que el equipo motor-generador tiene capacidad para aislar la carga de posibles eventos que me afectan la calidad de la energía como impulsos, hundimientos y elevaciones de tensión que como se había nombrado en los sags está dado para cambios de más o menos 20% incluso en algunos casos se tiene un porcentaje mayor a 20% lo que permite mantener el nivel de tensión eficaz en la carga. Además tenemos también que el acondicionador/reguladores de tensión activos también cuenta con la capacidad de mitigar los swell haciendo una regulación de la salida de tensión que va hacia la carga a la que por medio de este equipo se le garantiza la señal de tensión [25], otro equipo que al igual que el motor-generador y el regulador de tensión activo cumple con la función de mitigar los Swells es el autotransformador debido a su capacidad ajustable de los valores de tensión de operación evitando así que se produzcan estas elevaciones de tensión [28].

Por otro lado se puede analizar que el hecho de utilizar el concepto y la aplicación de la generación distribuida conectadas al sistema eléctrico principal es decir cuando tenemos la operación de la microrred en modo interconectado, con el fin de que el sistema responda y sea capaz de mitigar eventos que ocurren sobre las redes de distribución y que por ultimo me pueda desatar en un sag o swell de tensión nominal del sistema [25].

La implementación de la generación distribuida trae consigo la confiabilidad que ofrece a los sistemas eléctricos de distribución en casos como la presencia de una interrupción sostenida en el sistema, además de esto también se debe tener en cuenta que esta solución a la mitigación a eventos como sags, swell, interrupciones puede traer un aumento de costos de inversión por motivos de mantenimiento y la infraestructura de generación [25].

El suministro eléctrico debe tener una alimentación constante y confiable que es muy importante para usuarios finales residenciales o para la industria. Haciendo un énfasis en la industria se puede analizar la viabilidad de inversión en grupos de generación distribuida con el fin de garantizar su propia confiabilidad sin depender directamente de la red principal [25].

Siguiendo el hilo de la importancia de la generación distribuida se presenta un modelo con el cual se pueda garantizar el valor de operación para usuarios y sistema eléctrico, por lo tanto se propone utilizar equipos de generación distribuida que estarán conectados al sistema de distribución y también comunicados por los valores de tensión en cualquier instante de tiempo en el sistema eléctrico [25].

3.5 Restauradores dinámicos de tensión (DVR)

Son un tipo de sistemas en conexión serie entre la red de potencia eléctrica y la carga, estos circuitos lo que producen es una inyección de una tensión V_{inj} que según el caso se adiciona o se resta a la tensión de red, y así de esta manera contrarrestar tanto a Sags como Swells, por otra parte dichos sistemas es posible su implementación en los sistemas de distribución por medio de los operadores de red o también en las instalaciones de los usuarios finales [28].

3.5.1 Compensación en serie

En este tipo de configuración el convertidor normalmente es una fuente inversora de tensión que está conectada en serie a la red en el PCC provocando un cambio en la impedancia de línea X_s , esta

variación de la impedancia de línea hace posible el control del flujo de potencia. La tensión V_{inj} de AC inyectada puede ser de magnitud, frecuencia y Angulo de fase variable que debe ser restada o sumada según el tipo de evento que aparezca en la tensión nominal. Esta compensación en serie e permite hacer compensación sobre la potencia activa y reactiva [28].



Figura. 19. Configuración de compensación en serie

Fuente: [28]

3.5.2 ¿Qué es un restaurador dinámico de tensión?

Se puede definir como un convertidor electrónico de potencia orientado en los compensadores en serie síncronos estáticos dinámicos (D-SSSS), que se encargan de proteger cargas críticas de eventos perturbadores en la señal de tensión como los Sags y los Swells, la incorporación de un DVR busca aumentar la transferencia de potencia y ejercer un control en la tensión de la carga crítica. Tenemos que estos sistemas pertenecen a los dispositivos de potencia a medida (CPD) caracterizados por tener una configuración serie para hacer la compensación de tensión [28].

3.5.3 Principio de operación de un restaurador dinámico de tensión

Estos DVR se conectan en serie entre la fuente de alimentación del sistema de distribución en el PCC y la carga sensible donde también aparte de mitigar Sags y Swells puede también absorber o producir potencia activa y reactiva en sus respectivos terminales de AC, luego entonces este sistema debe inyectar la tensión V_{inj} de una específica magnitud y frecuencia para así poder restaurar la tensión en la carga a el valor que había sido declarado cada vez que suceda un evento perturbador de tensión [28].

3.5.4 Técnicas de control para la inyección de tensión V_{inj}

Estas técnicas conforman una clasificación general de estos sistemas y además en gran parte el buen rendimiento de los DVR, las técnicas son:

- Presag :

En este caso la tensión al lado de la carga o la tensión de salida luego de hacer una restauración se asume en fase con el presag de tensión y así podemos tener una tensión inyectada de valor considerable, se debe aplicar esta técnica solo en casos donde la carga es sensible a cambios en el ángulo de la fase [28].

- En fase:

Se aplica si la carga no es sensible a variaciones del ángulo de la fase, la magnitud de V_{inj} es mínima. Teniendo en cuenta el valor de la caída de tensión en el PCC, el DVR produce una tensión de la misma magnitud [28].

- Mínima energía:

Si tenemos que la inyección de potencia es bastante critica se aplica esta técnica, teniendo en cuenta la capacidad del dispositivo de almacenamiento, si tenemos el ángulo de la tensión de la carga se determina des pues de hacer la restauración se aplica la técnica [28].

3.5.5 Otras características de los DVR

- Eliminan Sags cada vez más profundos [28].
- Compensan largos periodos de perturbaciones [28].
- Eliminación de Swells [28].
- Supresión de picos de tensión [28].
- Flujo energético en dos direcciones [28].
- Alta eficiencia [28].
- Mayor tiempo de respuesta [28].
- Inducción mínima de contenido armónico a la red [28].
- Control para la mitigación de armónicos [28].

3.6 Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

3.6.1 Modelo del sistema de control y simulación

Para el desarrollo de esta propuesta se toman como base dos modelos que se encuentran detallados en el artículo de la IEEE radial distribution test feeders, los cuales son un circuito de 4 nodos y otro circuito de 34 nodos. En base a estos dos circuitos se llegara a establecer pros y contras de su aplicación al momento de realizar alguna acción sobre el sistema de distribución eléctrico, y lógicamente teniendo en cuenta la configuración en la que se presente el evento: monofásico, bifásico, trifásico [25].

3.6.2 Control de mitigación en sistemas de distribución eléctrico

La simulación del sistema se hace basándose en una configuración de trafo dirigido con un agente líder y sus seguidores en donde el funcionamiento sería más o menos una vez el sistema detecta la presencia de un evento de perturbación de la calidad de la energía (Sag/Swell de tensión) que cumpla con lo expuesto en la tabla característica de eventos de calidad de la energía de la IEEE 1159 [25] [11].

3.6.3 Objetivo del sistema – Agente líder

El objetivo del sistema agente-líder es el voltaje que además será considerado como el agente líder de las señales de tensión del sistema eléctrico de distribución, además también se plantea considerar la existencia de un sistema de comunicación y de instrumentación para ejecutar la verificación en cada instante de tiempo de la tensión nominal del sistema con el objetivo de detectar desviaciones

que afecten la calidad de la potencia. El sistema de comunicación e instrumentación también se encuentra en constante comunicación con los actuadores y generadores distribuidos para imponer un control y mitigar las desviaciones que se presenten [25].

El sistema multi-agente es modelado como un grafo dirigido definido por $G = (V, E)$ en donde:

V: son los nodos del grafo, para este modelo es el equivalente al voltaje presente en el sistema para un sistema trifásico en por unidad (P.U.)

E: son los nodos con el líder del sistema y es equivalente al sistema de comunicación [25].

3.6.4 Nodos del sistema – Agente seguidor

Cuando nos referimos al voltaje nodos del sistema es el valor en un instante de tiempo de la señal y que a su vez me representa una perturbación para el mismo. Se puede asumir que cada nodo del sistema posee un sistema de comunicación y un conjunto de dispositivos con la capacidad de generar reportes en cada instante de tiempo del valor de la señal de voltaje con la finalidad de que el sistema de control multi-agente pueda tomar la decisión correcta, del mismo modo tenemos el agente líder se representa por un nodo en el grafo y el sistema de comunicación es la arista, el sistema de comunicación toma importancia porque por medio del se establecen parámetros de inicio para alcanzar el propósito final del agente líder [25].

En la siguiente figura está el esquema transformador dirigido líder – seguidor:

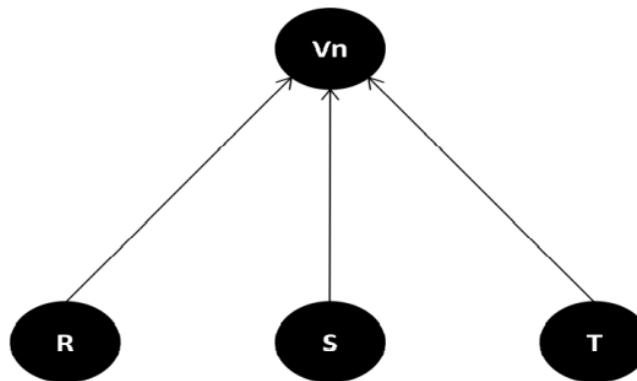


Figura. 20. Transformador dirigido líder seguidor

Fuente: [25]

3.6.5 Consenso del sistema eléctrico de distribución

Entendiendo el consenso como el acuerdo establecido entre los agentes y que su objetivo principal es que cada agente (líder y seguidor) alcance su propósito y que el sistema se encuentre dentro de los rangos permisibles de operación, para este caso tenemos [25].

$$\dot{X} = -Lx \quad (1)$$

La solución de la ecuación (1) esta descrita por:

$$x(t) = x(t_0) * e^{-L(t-t_0)} \quad (2)$$

De (2) tenemos:

L = matriz laplaciana

$X(t_0)$ = es la matriz de entrada que equivale a los valores de tensión en P.U. de cada fase del sistema de distribución eléctrico [25]. En la siguiente imagen se presenta el funcionamiento en un diagrama de flujo del sistema de control.

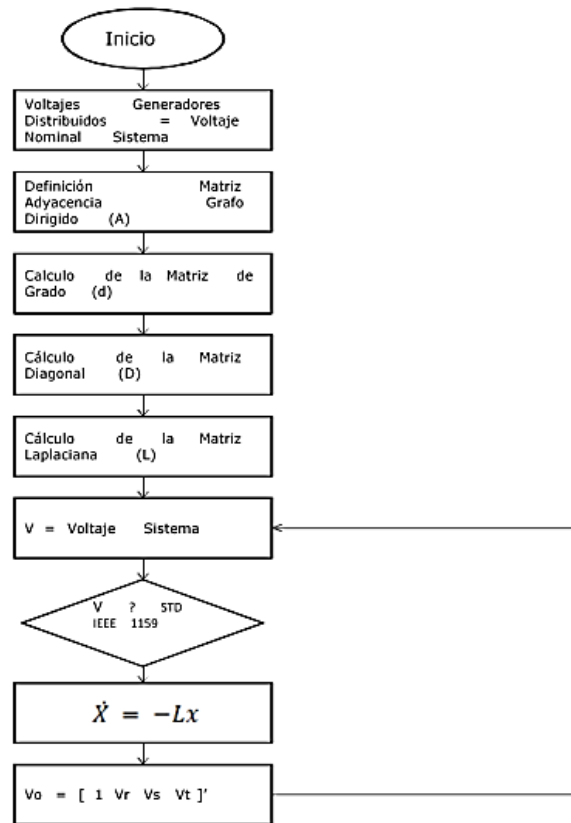


Figura. 21. Diagrama de flujo del esquema de control para la mitigación de las perturbaciones de tensión en sistemas de distribución eléctrico

Fuente: [25]

3.6.6 Análisis del modelo del sistema de control para el circuito compuesto por 4 nodos

Se plantea el modelo del sistema de control para un circuito conformado por 4 nodos como el siguiente:

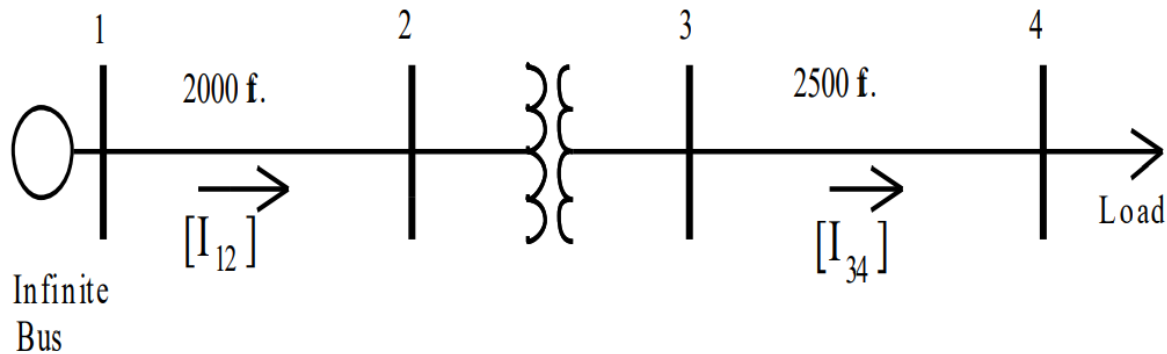


Figura. 22. Circuito IEEE 4 Nodos test feeder

Fuente: [25]

Se consideró el grafo dirigido que tiene 3 nodos que hacen alusión a las magnitudes de tensión de cada una de las fases del sistema siendo estas los agentes seguidores que pretenden alcanzar el objetivo propuesto por el agente líder el cual es mantener la tensión normal de operación [25].

Tenemos que para el control del seguimiento se realizó por medio de la simulación de su comportamiento en Matlab/Simulink tomando como punto de partida un estado estacionario con parámetros dentro de la tensión nominal de operación normal, la siguiente figura sería el circuito en simulink [25].

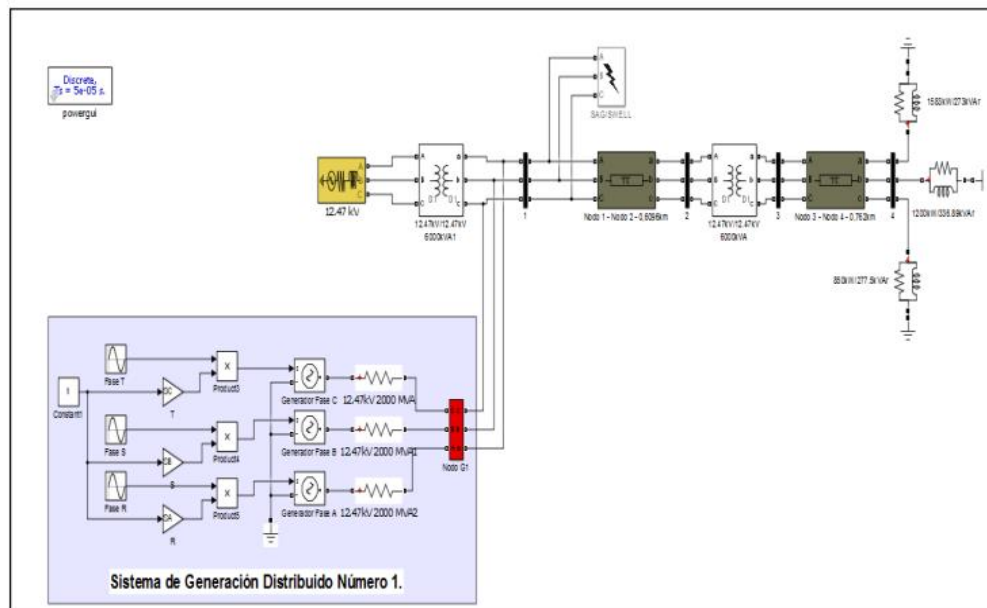


Figura. 23. IEEE 4 Nodos test feeder en Simulink,

Fuente: [25]

En el circuito creado en simulink se generara una perturbación (Sag, Swell) para verificar y validar como los agentes seguidores y tensiones de fase convergen al objetivo planteado por el nodo líder para un valor establecido. Se debe resaltar que como es un sistema trifásico cada fase se compone de una magnitud y ángulo de fase pero para el case en cuestión se trabaja como un sistema trifásico balanceado y la única variable que se puede modificar su valor de tensión eficaz de cada una de las 3 fases haciendo de manera individual o todas a la vez [25].

3.6.7 Simulación de perturbación en el sistema IEEE 4 node test feeder

Se establece que para apreciar los efectos de la mitigación se realizara con un grupo de generación distribuida que está ubicado en el diagrama de simulink exactamente en el bloque de “sistema de generación distribuido número 1” y dentro de este bloque de demarca el nodo G1 ubicado inmediatamente después de la fuente principal del sistema de distribución, el bloque número 1 se considera una fuente de voltaje ideal con la capacidad suficiente de entregar la corriente que el sistema requiera y que garantice la operación con normalidad [25].

3.6.8 Perturbación trifásica en el sistema IEEE 4 node test feeder

Para observar cual sería la respuesta del modelo del sistema de control se hace una simulación para cuando en el sistema de distribución se presente una perturbación que me afecte las tres fases, la cual será simulada como una falla de corto circuito entre cualquier fase y tierra dejando como variación únicamente el valor de la resistencia de falla que me proporciona diferentes profundidades del Sag [25].

Ahora podemos continuar observando el desarrollo del sistema de control capaz de mitigar a través del sistema de generación distribuido donde obtenemos como resultado la siguiente matriz adyacencia [25]:

1. Matriz de Adyacencia:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2. Matriz de Grado:

$$d = [0 \quad 1 \quad 1 \quad 1]$$

3. Matriz diagonal:

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

4. Matriz Laplaciana:

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura. 24. Desarrollo del sistema de control capaz de mitigar a través del sistema de generación

Fuente: [25]

Otra parte del desarrollo del sistema de control es la Dinámica Global del Sistema:

Donde está basada en la ecuación (1), por otra parte se presentan los resultados obtenidos bajo simulación para un evento que ocasiona una perturbación de la calidad de la energía en este caso trifásica para distintos valores en P.U. [25].

En las tablas que se presentan a continuación se observa la información que será reflejada en las gráficas resultantes de la simulación en matlab [25].

Tabla 2. Tabla de resultados de las simulaciones en simulink/matlab sin mitigación

Sistema sin mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.8200	0.1800	9/0.15	Instantáneo
S	0.8188	0.1882		
T	0.8185	0.1815		

Fuente: [25]

Tabla 3. Tabla de resultados de las simulaciones en simulink/matlab con mitigación

Sistema con mitigación Evento Trifásico				
Fase	Magnitud Hundimiento pu	Profundidad Hundimiento pu	Duración Evento Ciclos/Seg	Tipo Evento
R	0.8784	0.1216	2.5/0.042	Instantáneo
S	0.8650	0.1350		
T	0.8688	0.1312		

Fuente: [25]

Tabla 4. Tabla de resultados de las simulaciones en simulink/matlab resultado final

Resultado Final de Tensión	
Fase	Resultado Final V pu
R	1.001
S	0.995
T	1.009

Fuente: [25]

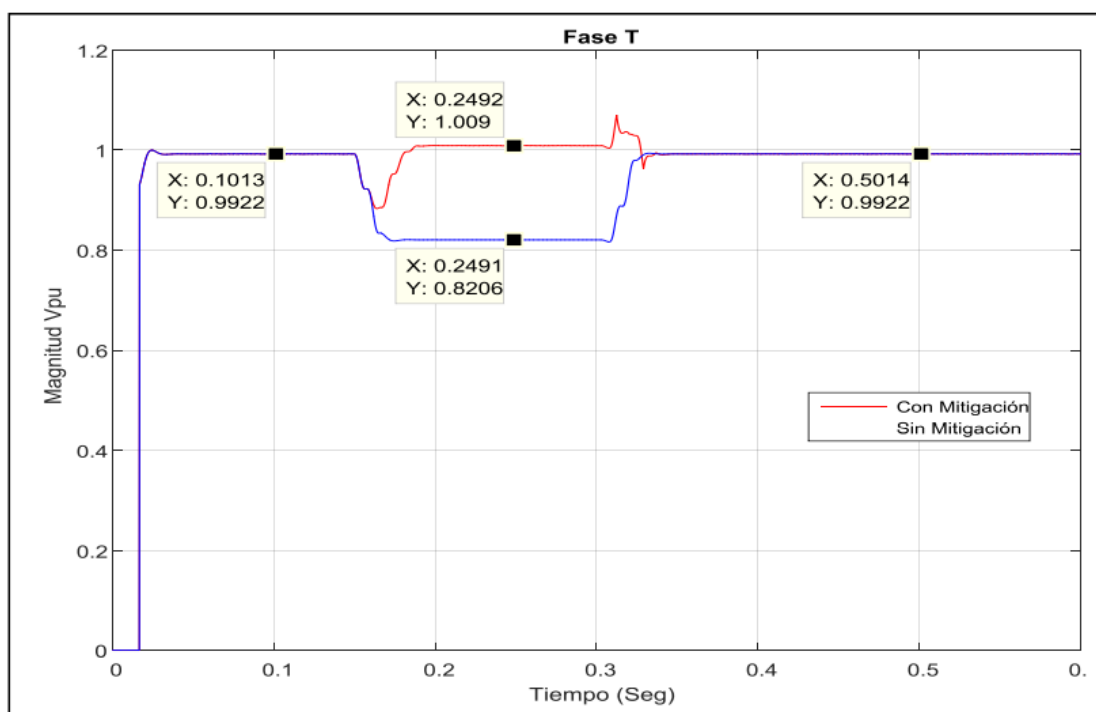


Figura. 25. resultado de la fase T con profundidad del hundimiento de 0.1815 P.U.

Fuente: [25]

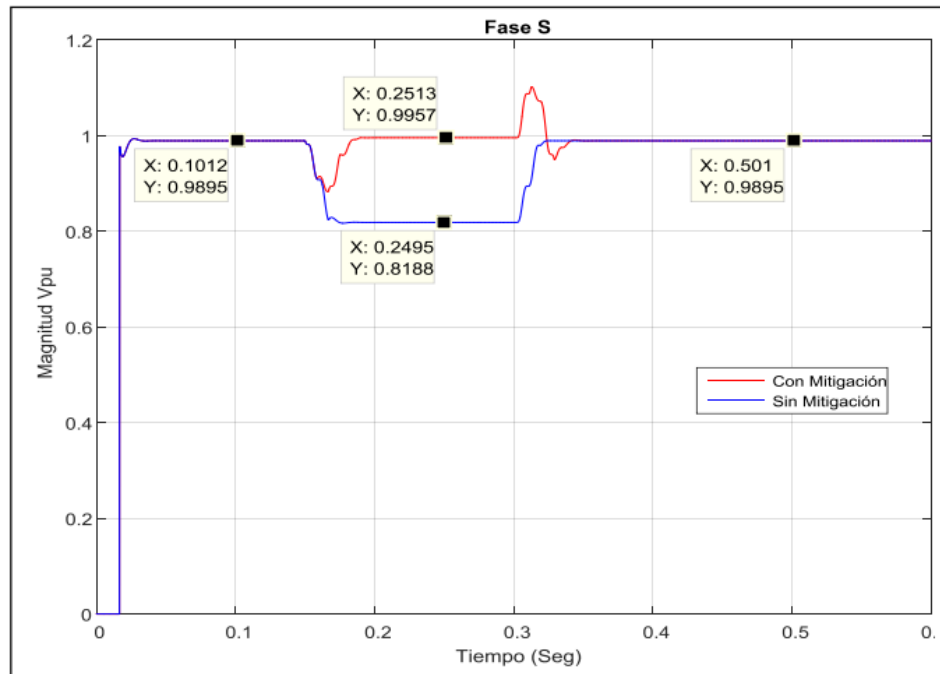


Figura. 26. resultado de la fase S con profundidad del hundimiento de 0.1882 P.U.

Fuente: [25]

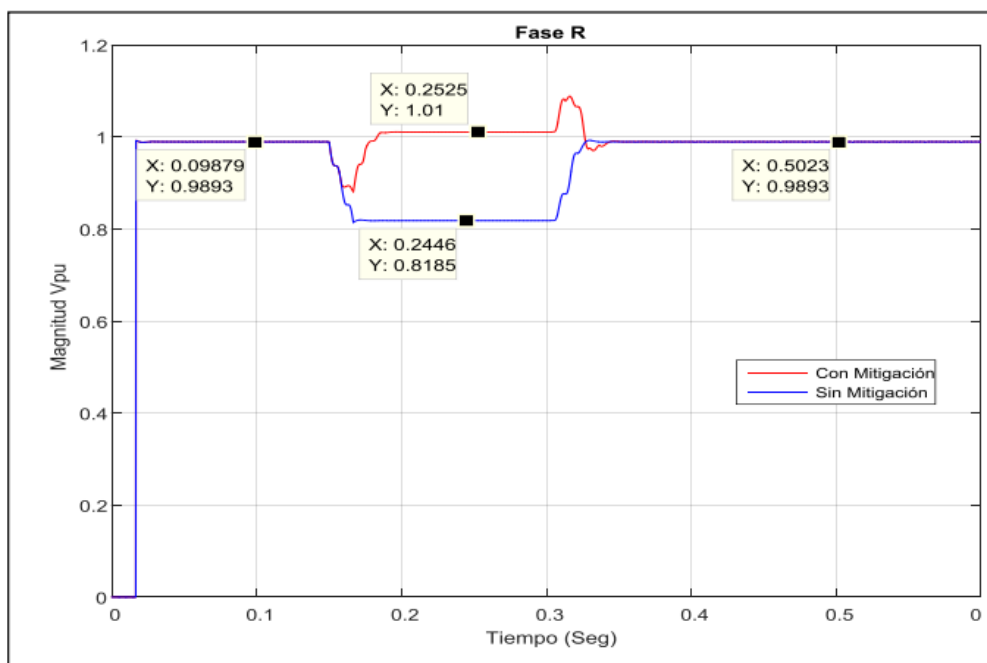


Figura. 27. resultado de la fase R con profundidad del hundimiento de 0.1800 P.U.

Fuente: [25]

Para el presente caso se puede llegar a la conclusión de que el sistema para la mitigación de eventos perturbadores que se pueden convertir en hundimientos o elevaciones de tensión tiene una respuesta eficiente y es capaz de mantener el valor de los niveles de tensión eficaz de operación del sistema de distribución, esto puede deberse a la respuesta dinámica que da la ecuación [25]:

$$x(t) = x(t_0) * e^{-L(t-t_0)} \quad (2)$$

3.7 Eventos de larga duración:

3.8 Armónicos

El contenido armónico presente en una señal de corriente o tensión ocasionan daños o fallas al equipo por acción de sobrecalentamiento de devanados y en los circuitos eléctricos. Estas características nos puede conducir a una destrucción del equipo afectado o a una pérdida total de la vida útil del equipo de usuario final [10].

En cuanto a normativa para este evento de calidad de la energía eléctrica el estándar IEEE 519-2014 trae una serie de recomendaciones prácticas para definir la cantidad de armónicos que pueden ser producidos, las cantidades que pueden fluir por el sistema de potencia y recomienda límites de cuantos armónicos de corriente pueden ser inyectados al sistema por el usuario final. Por otro lado se tiene también el estándar IEC 61000 (EMC) en donde la sección 4 trata los límites de emisión de armónicos de corriente de equipos de baja tensión de corrientes menores a 16 amperios [19].

3.8.1 Armónicos de tensión

Teniendo en cuenta la metodología de la guía metodológica del análisis de calidad de la potencia en redes de distribución de la EPM (empresas públicas de Medellín) [24] para evaluar esta perturbación es importante verificar los siguientes parámetros: nivel de tensión nominal, tipo de red (monofásica o trifásica), punto de medición del THD por cada fase y el circuito que se va a evaluar [24].

La metodología es la siguiente:

1. Se debe calcular el percentil al 95% de los valores de la distorsión armónica individual (D_v) y la distorsión armónica total de tensión (THD $_v$), para cada fase durante un periodo de tiempo de una semana [21].

Para el D_v se tiene la siguiente ecuación:

$$D_v = \frac{V_h}{V_1} * 100\%$$

Siendo:

V_h : la magnitud de la componente armónica individual (V_{rms} armónicos)

V_1 : la magnitud de la componente de la frecuencia fundamental (V_{rms} fundamental)

Y para el THD $_v$ se tiene la siguiente ecuación:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} * 100\%$$

2. Para el segundo paso se comparan los resultados del ítem anterior con el valor de referencia de los percentiles que se presentan en la siguiente tabla, cabe resaltar que los resultados por cada fase deben ser menores o iguales a los valores de referencia [21].

Tabla 5. Valores de referencia de THD

Rango de tensión	Distorsión Armónica Individual (Dv) (%)	Distorsión Armónica Total (THDv) (%)
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

Fuente: [24]

3.8.2 Armónicos de corriente

Para evaluar esta perturbación es importante verificar los siguientes parámetros: nivel de tensión nominal, tipo de red (monofásica o trifásica), punto de medición del THDi por cada fase y el circuito que se va a evaluar [24].

La metodología a seguir es la siguiente:

1. Se debe calcular el percentil al 95% de los valores de la distorsión armónica individual de corriente (Dh) y la distorsión armónica total de la demanda (TDD), para cada fase durante un periodo de tiempo de una semana [24].

Para el Dh tenemos la siguiente ecuación:

$$Dh = \frac{I_h}{I_l} * 100\%$$

Siendo:

Ih: la magnitud de la componente individual armónica (Arms)

IL: es la corriente de carga de demanda máxima en el PCC (componente de la frecuencia fundamental Arms).

Y para el TDD tenemos la ecuación:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_l} * 100\%$$

Ahora para la distorsión total de la demanda THDi tenemos la ecuación:

$$THDi = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} I_h^2}}{I_1} * 100\%$$

Siendo:

I1: la magnitud de la componente de la frecuencia fundamental (Arms)

Para IL se recomienda que se calcule como el valor máximo de corriente eficaz de todas las fases en intervalos de tiempo de 10 minutos durante un periodo de mínimo una semana [24].

Tanto el TDD como el THDi se pueden relacionar por medio de la siguiente formula:

$$TDD = THDi * \frac{I1}{I_L}$$

2. Para el segundo paso nuevamente se comparan los resultados del ítem anterior con el valor de referencia TDD de la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores límites de distorsión armónica de corriente TDD para sistemas desde 120v hasta 69 KV

Máximas distorsiones armónicas en porcentajes de I_L						
(Isc = corriente máxima de corto circuito en el punto PCC)						
Orden de armónicos individuales^{a,b}						
Isc/I_L	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h ≤ 50	TDD
<20^c	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fuente: [24]

Por ultimo en [24] se hacen una serie de notas a tener en cuenta para la caracterización de armónicos:

- i) en cuanto a armónicos pares estos son limitados al 25% de los limites dados a los armónicos impares [24].
- ii) estas distorsiones de corriente que nacen en un nivel de offset como por ejemplo los convertidores de media onda no son permitidas [24].
- iii) todos los equipos que intervienen en la generación de potencia, se limitan a estos valores de distorsión de corriente sin darle importancia a la relación real Isc/IL [24].

Una vez se conoce la forma de medición o caracterización de los armónicos tanto de tensión como de corriente según las normativas que los rigen, en el campo del análisis de armónicos tenemos que el factor de potencia decrece debido al contenido armónico por lo que se debe hacer una corrección al factor de potencia ante el peligro de resonancia en donde finalmente y nuevamente el análisis gira entorno a la penetración de cargas no lineales en el sistema de distribución [29].

3.9 Factor de potencia

Tenemos que el indicador cualitativo que me representa un correcto y adecuado aprovechamiento de la energía, es el factor de potencia, que se refiere a la cantidad de energía eléctrica que ha sido capaz de convertirse en trabajo, debido a que el tipo de carga y la cifra de consumo me producen cambios en el factor de potencia [30].

Por medio de la implementación de capacitores se puede plantear una solución para problemas de pérdidas de potencia, perfiles de tensión dentro de los sistemas de distribución además de esto también el capacitor actúa como un filtro de armónicos [30].

Cuando se trabaja la compensación de potencia reactiva utilizando capacitores y hay cargas no lineales en el sistema, se podrían presentar condiciones de resonancia eléctrica lo que genera un incremento del nivel de distorsión de la señal de tensión y corriente [29]. En el panorama de la calidad de la potencia el fenómeno más relevante es la distorsión de las ondas provocada por las cargas no lineales por sus materiales de construcción como materiales ferromagnéticos, también están conformadas por impedancias no lineales o están implementadas sobre equipos donde la base de funcionamiento es la conmutación [30].

Para hacer posible una mitigación de los efectos provocados por resonancia se utilizan filtros con múltiple propósito como minimizar las pérdidas de potencia y mejorar el factor de potencia en un sistema de microrredes de distribución [30].

Para una primera definición del factor de potencia tenemos la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos \theta$$

Donde:

P: potencia activa total en KW

S: potencia aparente en KVA

Cos (θ): cociente entre la potencia activa y aparente [30].

Ahora haciendo uso de la metodología de evaluación en [24] se tiene lo siguiente:

Se toma como primera consideración de medida el punto PCC y se sigue con: [24].

- i) Primero se debe determinar la corriente armónica fundamental (Arms)
- ii) Se realiza la evaluación del FP definiendo intervalos de tiempo en periodos de 10 minutos con un muestreo de 12 ciclos que es equivalente a 200 milisegundos. Si se va a realizar una evaluación contratada o requerida por el usuario el rango de medición se hace en un tiempo de una semana pero si es para diagnostico o fines estadísticos el rango se modifica a un ciclo de trabajo [24].

Otra forma de calcular el factor de potencia en [24] se hace con la siguiente ecuación:

$$FP = \frac{I_{rms}(1)}{I_{rms}} * \cos \theta = Kp * Kd$$

Donde:

I_{rms}: es la corriente rms

I_{rms} (1): es el valor rms de la corriente armónica fundamental

Cos (θ)=Kd: es el factor de potencia de desplazamiento

Kp: es el factor de distorsión armónica

El poder relacionar el factor de potencia (FP) con la distorsión armónica total (THD) se puede hacer por que las cargas conectadas al sistema de distribución pueden deformar la onda de tensión y corriente, por este motivo el factor Kp se puede expresar de la siguiente manera [24]:

$$Kp = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}}$$

- iii) Se debe determinar el tipo de factor de potencia ya sea capacitivo o inductivo, analizando la relación entre potencia activa trifásica y potencia reactiva trifásica [24].
- iv) Hacer la verificación de si el 95% de los resultados arrojados del factor de potencia está en el rango permisible de la siguiente tabla, si es el caso contrario se deben tomar medidas eh instalar equipos para controlar este parámetro [24].

Tabla. 7. Rango de valores para cumplimiento del factor de potencia

Factor de potencia	Resultados	Angulo Ø del diagrama de potencia	Acción a realizar para resultados fuera de rango
0.9-1 Inductivo	El 95 % de los resultados	$-25^\circ < \phi < 25^\circ$	Instalar equipos apropiados para controlar este parámetro
0.9-1 capacitivo	El 95 % de los resultados	$-25^\circ < \phi < 25^\circ$	Instalar equipos apropiados para controlar este parámetro

Fuente: [24]

La normativa que fue establecida sobre el artículo 25 de la resolución número 108 de 1997 fue generada para que el factor de potencia la cumpla y dice lo siguiente: [24].

Parágrafo 1º. El factor de potencia inductiva (coseno phi inductivo) de las instalaciones tiene que ser igual o mayor a 0.90. La empresa deberá exigir a aquellas instalaciones donde se tiene que el factor de potencia inductivo está violando este límite, y recomienda que instalen equipos apropiados para controlar y medir la energía reactiva [24].

Otro dato importante es que los armónicos presentes en las instalaciones eléctricas son muy habituales y por eso existen algunos valores típicos de THDi superiores a 40% que tienen impacto en el factor de potencia [31].

En [29] se presentan unas medidas para corregir el factor de potencia que son las dos siguientes:

3.10 Medidas para corregir el factor de potencia

3.10.1 Medidas preventivas

Se debe tener en cuenta el balance de carga en la línea de distribución, el tamaño del conductor eléctrico y la selección de operación del equipo tienen que ser correcta, por otro lado la mayor parte de las fábricas industriales tienen factor de potencia relativamente bajos. Una posible solución sería la implementación de equipos compensadores [30].

3.10.2 Medidas compensativas

Los métodos pasivos se utilizan para procesos de rectificación del factor de potencia donde primordialmente se rectifica el factor de potencia de desplazamiento por motivos de la empresa de suministro eléctrico. Por otro lado tenemos que se pueden utilizar métodos pasivos para hacer el

filtrado de las componentes armónicas pero si se quiere hacer un control más efectivo y mejorar el factor de potencia se hace necesario implementar métodos activos, por lo que es necesario garantizar el mínimo de contenido armónico y así poder ajustar otros parámetros como la frecuencia de resonancia que la ocasionan las cargas no lineales [30].

Otro aspecto importante en [30] es la definición de los tipos de corrección del factor de potencia, donde tenemos:

3.11 Tipos de corrección del factor de potencia

Analizando el comportamiento de los capacitores, es de resaltar que no existen reglas para hacer la instalación de un banco de condensadores, dado que la instalación se puede hacer en cualquier punto ya que es preciso la evaluación y verificación de su operación práctica y económica [30]. A continuación se describen los tipos de corrección:

3.11.1 Corrección distribuida

Se puede obtener una corrección distribuida realizando la conexión de un banco de condensadores con las dimensiones correctas y conectándolo a las terminales de los equipos que se requieran suministrar potencia reactiva, esta instalación es breve y económica al mismo tiempo ya que la carga y el condensador se favorecen por las protecciones contra sobre corrientes [30].

Se resalta que se debe utilizar esta corrección para equipos grandes con cargas constantes y un factor de potencia en conexiones largas, usualmente se emplea para cargas como motores y lámparas fluorescentes [30].

En siguiente figura se muestran los diagramas de conexión para rectificación del factor de potencia de motores:

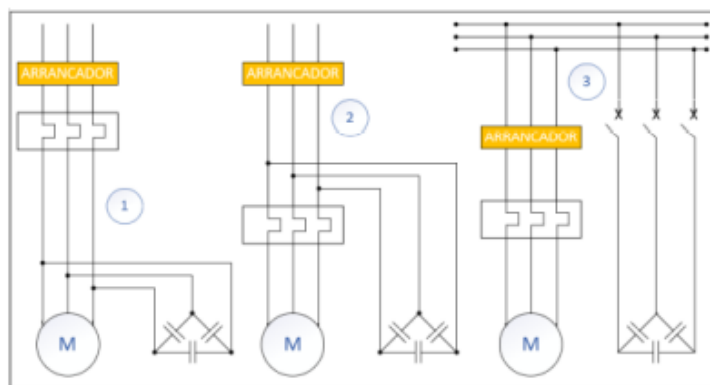


Figura. 28. Diagrama correspondiente a la corrección distribuida de motores

Fuente: [30]

3.11.2 Corrección por grupos

Partiendo de que el factor de potencia se rectifica en un banco de carga con características de operación parecidas haciendo la instalación de un banco de condensadores, esta también es una solución con un buen factor económico ya que los beneficios que ofrece esta rectificación únicamente afecta a las líneas aguas arriba tomando como referencia el punto donde se instala el banco de compensadores [30]. En la siguiente imagen se presenta el diagrama de la forma correcta de instalación del banco de condensadores para la rectificación del factor de potencia de un grupo de cargas [30].

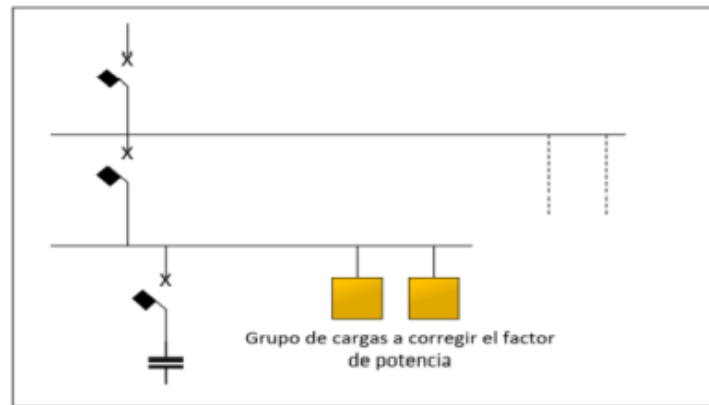


Figura. 29. Representación del diagrama de corrección por grupos de carga

Fuente: [30]

3.11.3 Corrección centralizada

El comportamiento de las cargas es importante para elegir el tipo de corrección más apropiado por que las cargas en la instalación pueden funcionar todas al mismo tiempo por otra parte algunas cargas pueden ser conectadas pocas horas en el día es decir de manera intermitente y por ejemplo una corrección distribuida podría resultar costosa porque a largos periodos de tiempo donde se encuentran inhabilitados los condensadores instalados [30].

Entonces tenemos que utilizar un único sistema de corrección en el punto de partida de la red que reduce considerablemente la suma de potencia de los condensadores instalados. A continuación se presenta en la figura el diagrama de instalación de un banco de condensadores para la rectificación del factor de potencia con características de corrección centralizada para incrementar el factor de potencia de una carga establecida [30].

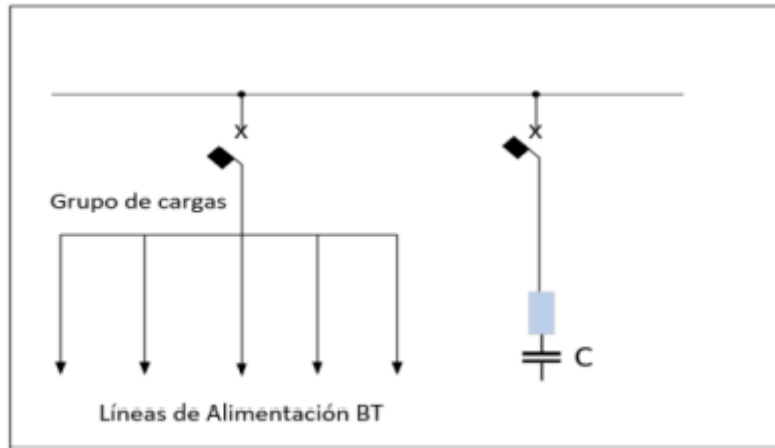


Figura. 30. Representación del diagrama de corrección centralizada

Fuente: [30]

3.11.4 Corrección mixta

Se considera mixta por el enlace creado de la corrección distribuida y centralizada, el planteamiento de esta solución se consideran las ventajas de las dos correcciones involucradas ya que de esta forma se utiliza la corrección distribuida para instalaciones con equipos eléctricos con mayor potencia y para la parte restante se implementa la corrección centralizada, lo que permite una operación en conjunto de dichas correcciones con el fin de ser más eficiente [30].

3.11.5 Corrección automática

La corrección automática de los cambios del factor de potencia y el sistema de detección en el regulador, su pueden conectar o desconectar automáticamente diferentes bancos de condensadores ya que este hace un seguimiento de la potencia reactiva introducida para poder tener constante el factor de potencia en la instalación de un sistema eléctrico [30].

Existen algunos tipos de corrección automatizados conformados por:

- Detectores que permiten encontrar señales del voltaje y la corriente
- Unidad inteligente que compara el factor de potencia medio requerido con lo que puede conectar o desconectar los bancos de condensadores durante la operación
- Elementos de protección que incluye equipos de maniobrabilidad y protección
- Por ultimo banco de condensadores [30].

Por otro lado tenemos en una microrred de AC en la que las fuentes de energía pueden ser en AC o DC, según esto se define qué tipo de convertidor que se debe utilizar (AC/DC, DC/DC o DC/AC) [4].

Por ahora se analizan los siguientes convertidores:

- Convertidor AC/DC: también llamados rectificadores, se implementan por medio de dispositivos que operan a baja frecuencia como tiristores o también con dispositivos que conmutan a altas frecuencias como MOSFETS o IGBTs, se puede implementar un tipo de rectificador AFE (active front end) que me permite garantizar un factor de potencia igual a la unidad evitando así introducir contenido armónico a la red de AC [4].

- Convertidor DC/DC: es uno de los más usados en aplicaciones fotovoltaicas, el convertidor DC/DC elevador. Existen variedad de estructuras dependiendo de los requerimientos tales como: capacidad de elevación/reducción del voltaje, número de dispositivos en conmutación, baja inyección de armónicos entre otras [4].

3.12 Mitigación de armónicos

3.12.1 Reactores de línea

Cuentan con un doble propósito, primero la mitigación del contenido armónico de la señal y por otro lado también me bloquea eventos transitorios [31].

También tiene doble beneficio, primero tenemos la impedancia – rechaza altas frecuencias y los cambios bruscos en la forma de onda de corriente alterna AC con opciones de impedancia de 3%, 5% y 10% además también prolonga la vida útil de los componentes de drive [31].

En la siguiente figura se aprecia el reactor de línea KDR:



Figura. 31. Reactor de línea

Fuente: [31]

En la siguiente figura podemos apreciar el comportamiento de la señal de corriente con y sin la presencia del reactor de línea:

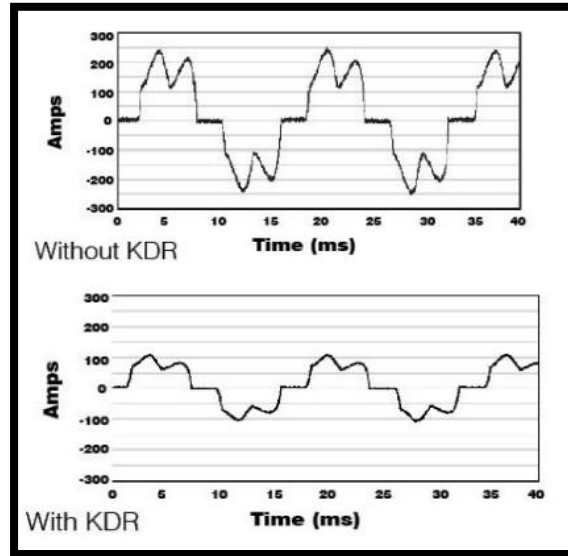


Figura. 32. Señal de corriente con y sin el KDR

Fuente: [31]

3.12.2 Filtro pasivo de armónicos



Figura. 33. Filtro pasivo de armónicos

Fuente: [31]

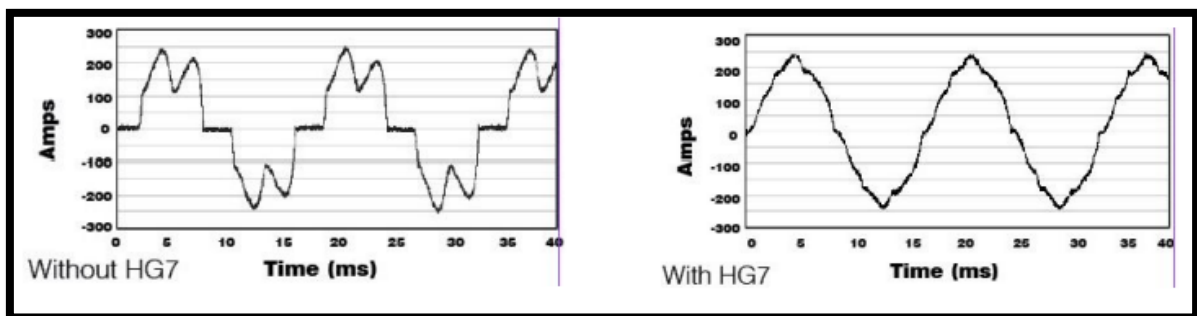


Figura. 34. Filtro pasivo de armónicos con y sin el filtro pasivo de armónicos

Fuente: [31]

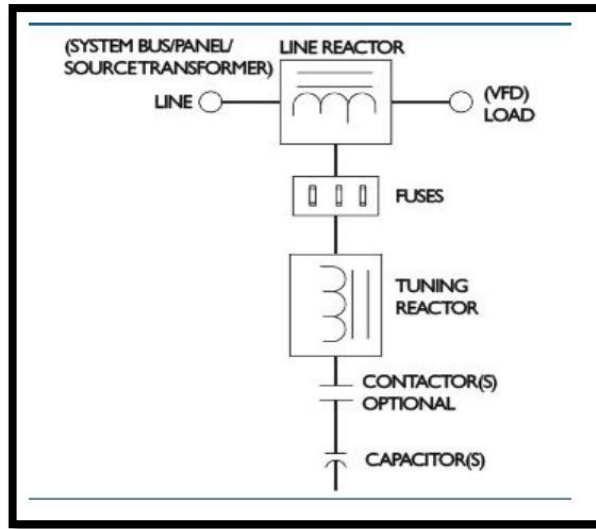


Figura. 35. Esquema eléctrico estándar del filtro pasivo de armónicos

Fuente: [31]

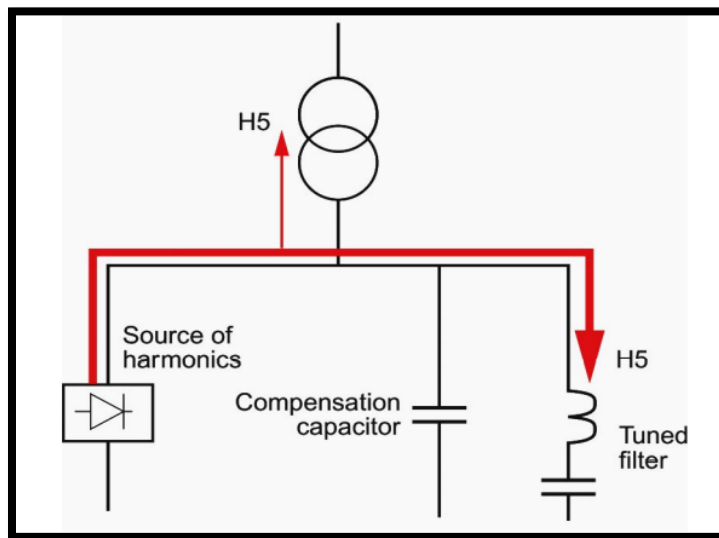


Figura. 36. Sentido de flujo de la corriente armónica en el filtro pasivo de armónicos

Fuente: [31]

Los filtros pasivos shunt o paralelo señalan un camino de baja impedancia para las corrientes armónicas, viene conformado por una rama rlc en conexión serie que se conecta en paralelo puede ser con la barra o el sistema de alimentación. También es llamativa esta estrategia de mitigación de armónicos porque es más económica y transporta solo las corrientes para las cuales se sintonizo el filtro además hay la posibilidad de que el filtro pasivo produzca parte de la potencia reactiva del sistema [32]. En la siguiente ecuación se define la impedancia del filtro:

$$Z = Rf + j[wLf - \frac{1}{wCf}]$$

Donde:

W: frecuencia angular

Rf: resistencia del filtro

Lf: reactor del filtro

Cf: capacitancia del banco de condensadores [32].

3.12.3 IoT con PQ-connect

El PQ-connect es el nuevo dispositivo instalado para filtros pasivos que me da la posibilidad de hacer la conversión a filtros inteligentes [31].

Este filtro me arroja información en tiempo real al sistema de adquisición de datos como por ejemplo un Scada por medio de comunicación remota (modbus RTU) [31].

Capaz de hacer mediciones de: voltaje y corriente del filtro a la entrada y salida, THDi%, THDv% además también presenta detección de alertas en el filtro como [31]:

- Baja sintonía en el circuito de los KVAR por medio de la corriente en el circuito de sintonía [31].
- Excesiva inyección de KVAR en el sistema de distribución eléctrica [31].
- Estado del contactor si es equipado en el filtro [31].
- Estado de los fusibles [31].



Figura. 37. Filtro pasivo de armónicos con contactor de aislamiento y PQ-connect

Fuente: [31]

3.12.4 Filtro de armónicos activo

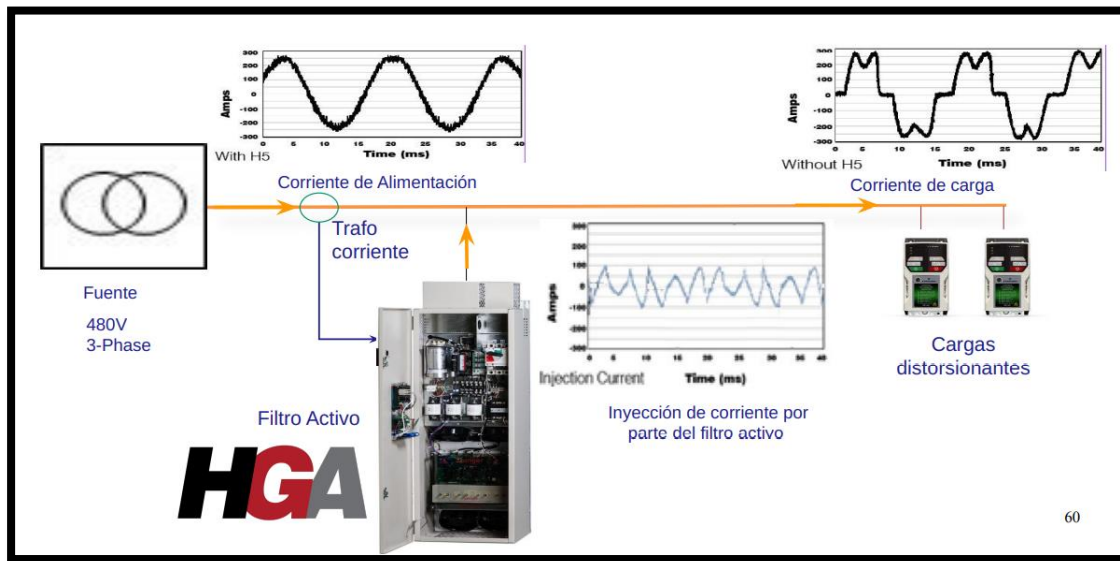


Figura. 38. Filtro activo de armónicos con la señal de corriente con y sin el filtro

Fuente: [31]

La implementación de este tipo de filtros nos ofrece una serie de beneficios [31]:

- Hay existencia de módulos desde 50 hasta 500 amperios para sistemas más grandes [31].
- Posee un factor de potencia cercano a la unidad [31].
- Es posible hacer la conexión de las unidades en paralelo y sin ser necesaria una calibración del equipo [31].
- Tiene una interfaz amigable hombre – máquina [31].
- Tiene variedad de puertos de comunicación como: modbus RTU sobre RS485, Ethernet/IP, modbus TCP/IP Y DeviNet [31].
- El filtro de armónicos activo (Harmonic Guard HGA) realiza un monitoreo de la corriente de carga y reacciona antes los cambios que pueda presentar la carga de forma muy rápida casi instantánea. Se hace la inyección de contra corriente para cancelar los armónicos y sincronizar las formas de onda de corriente y tensión [31].
- Con la rectificación del factor de potencia activo en el filtro, el factor de potencia real será devuelto con un valor cercano a la unidad [31].
- Este HGA se adapta a lugares estrechos lo que me permite generar una solución para los centros de control de motores ya que me elimina la necesidad de un filtro por cada drive [31].
- Por su conexión en paralelo por lo que una falla del equipo no detiene o apaga procesos [31].
- Con su funcionamiento maestro – esclavo proporciona una mayor precisión sin precedentes, además se pueden conectar hasta seis filtros HGA en paralelo para conseguir un aumento de la capacidad de corrección [31].
- La construcción del filtro está diseñada por medio de tecnología digital lo que me permite una mayor flexibilidad a cambios en el producto, solamente actualizando el Firmware en lugar de intervenir el hardware como se haría en filtros analógicos [31].

- Por los dispositivos digitales tiene mayor precisión y no requiere calibración manual, ofreciendo la función de auto calibración [31].

3.12.5 Reactancia de rechazo

Tenemos que los bancos de condensadores se enfrentan a problemas cuando son instalados en redes de distribución con un alto contenido armónico, y los capacitores pueden caer en resonancia eléctrica a cierta frecuencia armónica y amplificar las corrientes exponiendo los capacitores a sobrecargas que me afecta la vida útil de los mismos. En [31] se presenta una solución como la mejor para proteger los condensadores y al mismo tiempo evitar la resonancia eléctrica y es por medio de la instalación de reactancias de rechazo a cada paso del banco y sintonizadas cerca del cuarto armónico ($F=240\text{Hz}$) [31].

“para instalaciones donde la distorsión armónica total de tensión (THDv), sea superior al 5% en el punto de conexión, los bancos de capacitores deben ser dotados de reactancias de sintonización o en su defecto se deben implementar filtros activos de armónicos” RETIE 2013 Num 20.11 [33].

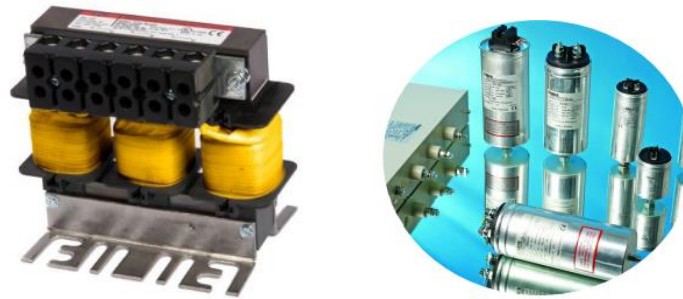


Figura. 39. Reactancias de rechazo

Fuente: Fuente: [31]

3.12.6 Banco de condensadores desintonizados

En un banco de condensadores desintonizado un reactor desintonizado de anti resonancia esta inter construido en la unidad para ofrecer una protección extra contra el contenido armónico, de igual forma esta puesto para prevenir fallas en el equipo, garantizando una reducción de los costos y aumentando la vida útil del sistema [31].



Figura. 40. Banco de condensadores desintonizado

Fuente: [31]

3.12.7 Inversores

Una de las medidas más atractivas de gran aprovechamiento que ofrecen los inversores es el buen tratamiento del contenido armónico, establecido en su totalidad bajo la norma IEEE 519 nos dice que el límite de distorsión armónica total (THD) en el punto común de acople (PCC), para niveles de tensión en el punto de interconexión menores o iguales a 1 KV debe ser menor al 8% lo que se entiende como una limitación al contenido armónico que pueda emitir el inversor [4] [29].

En los inversores, uno de los mecanismos para reducir la distorsión armónica de voltaje son las técnicas de control de los dispositivos por medio de la modulación de ancho de pulso (PWM). El PWM me genera la secuencia para la activación de los transistores; la modulación sinodal triangular es una de las técnicas más comunes y se hace mediante un control bipolar o unipolar donde el control unipolar es más complicado que el control bipolar pero tiene la ventaja de un contenido armónico bajo [4].

Otra técnica que se podría implementar para disminuir el porcentaje de THD sería con el PWM pero con eliminación selectiva de armónicos (SHE PWM) que hace necesario el uso de métodos numéricos para definir la secuencia de conmutación de los dispositivos [4].

Por otro lado tenemos los inversores multinivel que nacen como otro medio que me hace posible la reducción del contenido armónico [34] en los cuales la onda de tensión a trozos puede tener tres, cinco, siete o inclusive más niveles, esto me genera mejoras mayores al 10% en el contenido armónico haciendo una comparación con el inversor típico de dos niveles [4].

Los inversores multinivel requieren de una mayor capacidad de control debido a la gran cantidad de dispositivos de conmutación, normalmente se tienen frecuencias de conmutación de estos

inversores por encima de los 2KHz y el impacto de la mejora del THD de la señal entregada por el inversor reduce la necesidad del filtro (LC, LCL) para hacer la conexión a microrredes [4].

Los inversores cuentan con funciones como:

- El control de voltaje [4].
- Métodos activos para la operación anti – isla [4].
- Conexión y desconexión automática [4].

Y los inversores que conforman los sistemas de generación también cuentan con algunas funciones particulares como [4]:

- Hacer control de V/I [4].
- Control de potencia activa (P) y reactiva (Q) [4].
- Protecciones internas de sobre-corrientes en el lado de DC [4].
- Limitación de la corriente reactiva [4].
- Protecciones de sobre/bajo voltaje [4].
- Mediciones instantáneas de tensión, corriente y frecuencia [4].
- Control de operación aislada e interconectada [4] [35].

3.12.8 Variador con sección de entrada activa

Esta técnica lo que hace es monitorear y regular activamente la corriente de entrada para poder mantener un consumo de corriente de una onda lo más similar a una onda sinusoidal. Dicha técnica genera una distorsión de voltaje mínima que hace posible que el convertidor de alimentación de la entrada efectivamente este dentro de los límites de la norma IEEE 519 en los terminales de entrada del variador. Esta técnica es eficaz tanto en aplicaciones de un solo variador como en sistemas grandes de bus común con más de un variador [36].

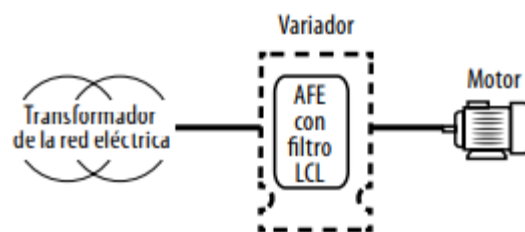


Figura. 41. Variador con sección de entrada activa

Fuente: [36].

Tabla 8. Características del variador con sección de entrada activa

Lista de comprobación de soluciones de mitigación de armónicos		PowerFlex 755T con sección de entrada activa
Distorsión armónica de corriente típica (ITHD)		3 - 5%
Cumple la norma IEEE 519		Sí
Eficiencia		97%
Tamaño total (comparado con el variador de 6 impulsos)		1.5 - 2.5
Eficacia en cuanto a costos		Costo menor para conformidad con la norma IEEE 519 y sistemas de bus de CC común
Efecto de un desequilibrio de voltaje del 1 %		Mínimo
Bus de CC baja potencial		No
Resonancia potencial del sistema		No
Factor de potencia total típico, sin carga/a plena carga		1.0
Mantenimiento predictivo de los componentes principales		Sí ¹
Detección de armónicos altos en el lado de la línea (alarma)		Sí
Facilidad de mantenimiento		Sí

Fuente: [36].

3.12.9 Impedancia virtual

Tenemos en [35] un enfoque de control jerárquico de dos niveles para inversores de fuente de voltaje que son utilizados para interconectar generadores distribuidos en microrredes de distribución. Dicha estructura de control la conforman los niveles primario y secundario [37].

Entonces el nivel primario se define como un controlador local basado en control interno de voltaje y corriente para fijar el voltaje del condensador del filtro y un bucle de impedancia virtual primordial para armónicos de voltaje y compensación de desbalance [35]. Además esta impedancia virtual se establece por el controlador secundario para mitigar la distorsión de voltaje en el bus de carga sensible [37].

Por otra parte tenemos el controlador secundario que se conecta a una unidad de medida para obtener los datos del contenido armónico de voltajes y desbalance en la microrred en el bus de carga sensible y de esta manera poder transmitir los comandos necesarios para ajustar la impedancia virtual de cada unidad [37].

Ahora consideremos un caso particular presentado en [35] con un armónico de voltaje combinado y una distorsión de desequilibrio, en este caso en cuanto a la distorsión de voltaje se puede mitigar por medio de la inserción selectiva de impedancias virtuales capacitivas para la secuencia negativa del componente fundamental, así como también para secuencias positivas y negativas de armónicos principales- fundamentales, por ultimo como las capacitancias virtuales se determinan en función de

la calidad del voltaje requerido en el bus de carga por este motivo este esquema se llama impedancia virtual adaptativa [37].

3.12.10 Control de reparto de energía armónica y reactiva

En [36] se propone una estrategia de control para lograr un mejor intercambio de potencia reactiva y de corriente armónica para microrredes que operan de manera aislada, entonces tenemos que para la microrred aislada que cuenta con cargas lineales locales y cargas públicas no lineales. Este trabajo se basa en el modelo integrador general de segundo orden (SOGI) y como se vio en el ítem anterior también se hace uso de la impedancia virtual [38].

Esta estructura SOGI tiene la función de filtrar la corriente fundamental y la corriente armónica respectivamente, el siguiente paso es hacer uso de la impedancia virtual en este caso será una inductancia virtual y una resistencia virtual a la corriente fundamental y a la corriente armónica respectivamente, que deben cumplir con condiciones típicas de la aplicación de control de caída de frecuencia/voltaje y de esta manera se consigue una mejora de la precisión del uso compartido de la potencia reactiva. En conclusión se puede compartir la corriente armónica pública y también se obtienen mejoras en la calidad de la energía eléctrica en el PCC. Por ultimo en [38] se especifica que las pruebas de verificación a la estrategia propuesta se realizan por medio de simulación en Matlab.

En la siguiente tabla se presenta la variación del THD de dos microrredes aisladas con cargas diferentes tipos de carga y estrategias de control.

Tabla 9. Variación del de dos microrredes con diferentes cargas y estrategias de control

generación	carga	Estrategia de control	Caso base en THD%	Control en THD%
BASE ELECTRONICA	LINEAL Y NO LINEAL	IMPEDANCIA VIRTUAL	0,6 – 8,7	0,1 – 4,7
BASE ELECTRONICA	NO LINEAL	CONTROL ARMONICO	11,38	4,85

Fuente: [23]

3.13 Control Difuso

Un problema común en las microrredes se evidencia en la fase de cambio durante las operaciones aisladas, en este paso el controlador de voltaje utilizado en el nivel de control cero se apaga mientras que el otro controlador que es de corriente se utiliza para controlar la corriente durante el modo de operación interconectado a la red se enciende. En el proceso de transición se ve un pico de voltaje en los procesos de conmutación si llegado el caso la salida de los dos controladores no en la misma trayendo consigo afectaciones a la estabilidad del sistema total de las microrredes [39].

Luego entonces en [39] se presenta una técnica de mitigación para mejorar la calidad de la energía eléctrica en presencia de cargas no lineales teniendo en cuenta ambos modos de operación, la base de la propuesta está en la implementación del control lógico difuso.

En el nivel cero se utilizan dicho controlador lógico difuso para obtener una regulación precisa de la tensión y así mismo rechazar cualquier perturbación que pueda afectar el sistema de control, el mismo controlador se conserva durante el modo de operación interconectado para hacer control sobre la corriente estableciendo los factores de escala de los coeficientes que me definen el control difuso correspondientes al control apropiado durante la fase de cambio, además también se garantiza una transición suave [39].

Teniendo en cuenta esta ventaja de que solo necesitamos un único controlador para ambos modos de operación, de esta forma se hace que la arquitectura de la microrred sea menos compleja y esto me da como resultado el rendimiento adecuado de ambos modos de operación [39]. Con la integración de un filtro activo paralelo (PAF) con teoría PQ se reduce el contenido armónico de la línea de corriente y voltaje en el PCC durante el modo aislado.

Por medio de la combinación del control difuso y el filtro (PAF) se fortalece el control y se ve reflejado el resultado en una buen THD durante las operaciones aisladas, el contexto manejado en [39] se basa en el control jerárquico [39].

El control de la microrred sigue la estructura jerárquica dividida en cuatro niveles de control:

3.13.1 Control de nivel cero

Su función es controlar el voltaje de salida del inversor [39].

3.13.2 Control de primer nivel

Llamado también control primario se encarga de estabilizar el voltaje y la frecuencia en el PCC y compartir la potencia activa y reactiva de potencial nominal de los inversores de fuente de voltaje [39].

3.13.3 Control de segundo nivel

El control secundario es el controlador central de la microrred (MCC) se encarga de restaurar las desviaciones de frecuencia y voltaje de la microrred a sus valores nominales por medio de la comunicación de ancho de banda bajo [39].

3.13.4 Control de tercer nivel

Por último el control terciario es el control más lento que permite controlar el flujo de potencia regulando la magnitud y la frecuencia de la tensión cuando el modo de operación de la microrred es interconectado [39].

Uno de los controles que se usan para el control de nivel cero son los controles PI. El control del esquema implica un bucle de voltaje externo y un bucle de corriente interno para que por medio de un limitador de corriente se pueda mantener la corriente del inversor en un rango seguro, además en este esquema con el fin de garantizar una robustez del sistema y el rechazo de perturbaciones se agrega una relación de flujo de servicio a la salida del controlador actual [39].

De la misma forma en [37] se presenta otro tipo de controlador de modo deslizante adaptativo para garantizar la robustez orientada a la variación de parámetros y también para disminuir el número de bloques en la regulación del bucle, esta técnica de mitigación me produce una respuesta dinámica y

seguimiento preciso, pero también genera un fenómeno parlanchín de oscilaciones de gran frecuencia y magnitud que causan aumentos de temperatura que me pueden afectar a la planta [39].

Si ahora analizamos el periodo de transición de la microrred en el que pasa de un modo de operación a otro, este periodo me genera perturbaciones y desviaciones de voltaje y frecuencia lo que puede terminar causando sobrecargas y potencias circulantes en la generación distribuida, para tener una transición limpia y sin problemas en [39] se presenta otro controlador resonante proporcional con la función de regular la salida de voltaje, este método presenta ventajas considerables como el rendimiento de seguimiento preciso, el rechazo de perturbaciones y una baja distorsión armónica y que por el hecho de la mejora aplicada a otro tipo de controlador pero controlador de caída universal se ha podido llegar a que el sistema mantenga el mismo controlador para los dos modos de operación de la microrred y así se puede asegurar la buena transición entre los modos.

Otra forma de asegurar la buena transición entre modos se debe hacer que la corriente de línea se reduzca a cero antes de hacer el cambio al modo de control de voltaje independiente, pero esta técnica no tiene en cuenta la carga no lineal lo que no me permite generar control de armónicos [39].

Para finalizar este análisis el propósito en [39] es proponer una estrategia de control basada en los controladores lógicos difusos (FLC) además del método mamdani para hacer la regulación de voltaje de la fuente inversora de tensión (VSI) en el control de nivel cero del modo de operación aislado y controlar la potencia activa y reactiva de los generadores distribuidos durante el modo interconectado a la red principal.

Por medio de los FLC en el modo de operación de la microrred se permite realizar una transición suave por su rápida respuesta transitoria y el rechazo de perturbaciones, esta ventaja permite evitar la necesidad de otro controlador para la fase de transición; también este regular propuesto hace el control menos complejo por no tener la necesidad de un modelo matemático del sistema. Como una sola estructura de control maneja el voltaje y las regulaciones actuales en el nivel cero en modo aislado e interconectado de la microrred [39].

4 Capítulo IV

4.1 TECNICAS DE MITIGACION DE PROBLEMAS DE LA CALIDAD DE LA ENERGIA APLICABLES EN EL CONTEXTO NACIONAL

Una vez presentados y caracterizados los eventos que me deterioran la calidad de la energía eléctrica en sistemas de distribución en microrredes y en general para sistemas de distribución, podemos pasar a la determinación de cómo se puede hacer posible la mitigación de dichos eventos perturbadores por medio de las técnicas desarrolladas y aplicadas a cada caso en específico pero teniendo en cuenta la aplicación en un contexto nacional. Desde puntos de vista como la adquisición del equipo, límites dentro de las normas de operación normal, certificados de funcionamiento del producto en Colombia y un análisis costo beneficio de la aplicación del equipo y también dependiendo del control inteligente establecido para darle más robustez a la microrred en cuanto a su funcionamiento en general [25].

Por otro lado tenemos que el panorama energético del territorio colombiano lo estudia y analiza el ESMAP procedente del banco mundial y llega a la conclusión de que en Colombia la penetración de

tecnologías no convencionales es menor que en otros países de Latinoamérica y además recalca que Colombia debe mejorar los siguientes aspectos: entrega de subsidios, patrocinar costos de implementación iniciales, sana competencia, asesoría por medio de capacitaciones y falta de regulación en el tema [25].

A continuación se presenta la tabla de resumen de las técnicas de mitigación de los eventos perturbadores determinadas en el presente documento:

Tabla 10. Técnicas de mitigación seleccionadas para eventos perturbadores seleccionados

Técnicas de mitigación para Sags	Técnicas de mitigación para Swells	Técnicas de mitigación para a Armónicos
Motor generador	Motor generador	Reactores de línea
Acondicionador/Regulador de tensión activo	Acondicionador/Regulador de tensión activo	Filtro pasivo de armónicos
Transformadores de tensión constante	Generación distribuida	oT con PQ-connect
Generación distribuida	Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido	Filtro activo de armónicos
Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido	autotransformador	Reactancia de rechazo
autotransformador	Restauradores dinámicos de tensión	Banco de condensadores desintonizados
Restauradores dinámicos de tensión		Inversores
		Variador con sección de entrada activa
		Impedancia virtual
		Control de reparto de energía armónica y reactiva
		Control difuso

Fuente: Autor

4.2 Aplicación de las técnicas de mitigación en un contexto nacional

4.2.1 Transformador de tensión constante

Teniendo en cuenta que este transformador de tensión constante se encuentra en el mercado internacional por ejemplo en páginas de internet como en [40], [41] donde se debe resaltar la importancia del buen criterio de elección en cuanto a el mejor proveedor del equipo, se puede argumentar que es posible la adquisición del equipo, además de que está disponible en el mercado se debe hacer un estudio a fondo sobre las características específicas de funcionamiento, costo y beneficios que me puede ofrecer el equipo en la red para evitar casos en el que se adquiriera el equipo y no sea posible aprovecharlo al máximo [40] [41].

Además de tener en cuenta sus características de operación y de instalación, para hacer posible la implementación en un sistema de microrredes de distribución en el contexto nacional también podemos tener en cuenta su campo o sector de aplicación:

- En equipos de industria de PLCs (automatización y control) [40].
- Equipo de marina [40].
- Transmisión de circuito cerrado de la televisión [40].
- Sistemas de sonido [40].

Con ello se evidencia que es posible la aplicación de este equipo como técnica de mitigación de Sags, Swells, interrupciones, ruido, armónicos, impulsos debido a que los sectores de aplicación nombrados se trabajan en Colombia. Para resumir haciendo un análisis de su hoja de datos y verificando que está dentro de los rangos necesarios para una aplicación definida solo sería cuestión de adquirir el equipo [40].

4.2.2 Motor generador

Partiendo del punto de que un motor generador básicamente son centrales eléctricas mucho más pequeñas que una central eléctrica típica de generación en Colombia, da la posibilidad de generar energía eléctrica que puede reemplazar o complementar la red eléctrica principal, y además según el combustible que se queme para crear movimiento ya se a base de diésel, gas natural, propano, gasolina y biocombustibles que son algunos de los más comunes se puede hacer un análisis en cuanto a disponibilidad del combustibles, impacto ambiental según el combustible y costo del mismo. Por otra parte también es necesario verificar características del motor generador y cuál va a ser su aplicación o función específica; en base a esto también es posible definir como viable la implementación del motor generador para mitigar Sags, Swells, interrupciones en el contexto nacional [42].

4.2.3 Regulador de tensión activo

Naturalmente es otro dispositivo disponible en el mercado que se puede adquirir siempre y cuando cumpla con las características que se necesitan para la aplicación y lógicamente analizando el costo beneficio.

Una gran masa de equipos electrónicos que se sostienen en funcionamiento constante es decir conectados a la red eléctrica casi las 24 horas del día como por ejemplo televisores, sistemas de sonido, refrigeradores, lavadoras, computadoras, etc., esto me deja expuesto los equipos y puede ocurrir que por algún evento perturbador en la red eléctrica me suspenda el suministro eléctrico,

pero al momento en el que nuevamente está disponible el suministro eléctrico el uso de un regulador de tensión activo se hace importante ya que la conexión del dispositivo me estabiliza el voltaje que al llegar lo puede hacer con mucha intensidad causando daños a los equipos finales [43]. por estas razones queda expuesto que si es viable la implementación de este equipo como técnica de mitigación.

4.2.4 Autotransformador

La implementación del autotransformador como técnica de mitigación de eventos perturbadores como Sags y Swells es totalmente viable en el contexto nacional teniendo en cuenta que se llega a esta determinación por medio de las características que me ofrece el equipo, normativas y certificados de funcionamiento dentro de los estándares de regulación y también considerando el costo beneficio de la implementación del equipo.

4.2.5 Restauradores dinámicos de tensión

La implementación de estos sistemas en un contexto nacional también es viable, teniendo en cuenta que también es un equipo de aplicación específica y que se llega a la determinación de su implementación por medio de las características que me ofrece el equipo, normativas y certificados de funcionamiento dentro de los estándares de regulación y también considerando el costo beneficio de la implementación del equipo.

4.2.6 Generación distribuida

En el campo de la generación distribuida es necesario contemplar las condiciones técnicas para hacer la interconexión a la red de servicios eléctricos de los nuevos generadores para mantener los niveles de la confiabilidad, en Colombia estas son algunas causas que permitieron la evolución de la generación distribuida: generación de desarrollo de tecnologías nuevas e innovadoras, restricciones para trazar líneas de transmisión nuevas, aumento de la demanda de la electricidad confiable, políticas comprometidas con el cambio climático [25].

Para llevar a cabo un proyecto de generación distribuida en Colombia se debe tener en consideración el estándar IEEE 1547 – standard for interconnecting distributed resources with electric power system en el cual se declaran los requisitos y especificaciones necesarias para la interconexión de proyectos con generación distribuida con el sistema de red eléctrica principal pública. Por medio de este estándar ya existen lineamientos para motivar el aprovechamiento de las fuentes nuevas, limpias y renovables. Dicho esto se evidencia que si es posible la implementación de la generación distribuida como técnica de mitigación [25].

A continuación se enumeran algunas legislaciones para fuentes no convencionales de energía eléctrica en Colombia:

- Ley 697 de 2001 [25].
- Ley 788 de 2002 [25].
- Ley 1715 de 2014 [25].
- Decreto 2469 de 2014 [25].
- Decreto 2492 de 2014 [25].
- Decreto 2143 de 2015 [25].
- Resolución CREG 055 de 1994 [25].

- Resolución CREG 024 de 1995 [25].
- Resolución CREG 025 de 1995 [25].
- Resolución CREG 084 de 1996 [25].
- Resolución CREG 086 de 1996 [25].
- Resolución CREG 070 de 1998 [25].

Colombia está tratando de hacer llamativa la implementación de nuevas tecnologías de generación de energía y en cuanto a la viabilidad normativa y regulatoria se puede determinar que hay condiciones favorables para hacer posible la expansión del uso de la generación distribuida [25].

4.2.7 Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido

La investigación realizada en [24] tiene lugar precisamente en una universidad colombiana (universidad de los andes en Bogotá) la cual fue revisada en la sección anterior, teniendo en cuenta esto podemos definir que es una técnica de mitigación viable para implementar en Colombia debido a que en [24] se especifican normativas, legislaciones y decretos que me favorecen y promueven la generación distribuida en el país.

4.2.8 Equipos y técnicas para mitigación de armónicos

Gran parte del análisis de la mitigación de armónicos se hizo basado en [30], donde tenemos una empresa peruana que brinda soluciones para hacer efectiva la mitigación del contenido armónico de las señales de tensión y corriente. Donde queda claro que la implementación de estos equipos (Reactores de línea, Filtro pasivo de armónicos, IoT con PQ-connect, Filtro activo de armónicos, Reactancia de rechazo, Banco de condensadores desintonizados) como solución a los eventos de perturbación de armónicos está ligada estrechamente al criterio de elección del mejor dispositivo en cuanto a características física, eléctricas, además de obviamente un análisis de costo - beneficio.

Por otra parte en cuanto a inversores, Impedancia virtual, Control de reparto de energía armónica y reactiva y el control difuso son técnicas de mitigación que en algunos casos hacen uso de los equipos nombrados anteriormente para así por medio de técnicas de control ejercer la correcta y eficiente mitigación de los armónicos. Se puede notar que son técnicas de control que implementadas y reguladas bajo normativas especializadas en el tema son motivo de estudio en el campo de la ingeniería eléctrica y electrónica en Colombia ya sea en universidades como instituciones técnicas en resumen la base de estas técnicas es el control aplicado a la microrred con el fin de gestionar el mejor funcionamiento de la red y que al ser un tema de constante estudio en Colombia se puede implementar nuevamente bajo las características y resultados simulados de dichos tipos de control para definir el que tenga una mejor respuesta.

Por otra parte haciendo un criterio de selección de equipos en cuanto a las técnicas que podrían ejercer la mitigación de una manera más eficaz respecto a las otras técnicas tenemos que para los Sags, Swells y armónicos dichas técnicas son:

4.2.9 Valoración según beneficios de la técnica de mitigación

- Acondicionador/Regulador de tensión activo

Cuenta con algunas características y ventajas de su utilización como: 1) buena eficiencia 2) potencia nominal 3) una profundidad de la curva de tensión permisible 4) tiempo de corrección de la falla 5) por último el dimensionamiento de estos equipos está puesto para caídas de tensión hasta con un 30% de profundidad [25].

Sus características lo convierten en la técnica para mitigar Sags y Swells más adecuada resaltando que tiene un porcentaje del 30% de profundidad o elevación.

- Motor – generador

Capaces de mantener en aislamiento de la carga de eventos como impulsos, sags y elevaciones de tensión para variaciones del valor nominal de operación de más o menos 20%, lo que permite mantener un valor de tensión nominal en la carga [25].

puede mitigar las interrupciones bruscas dado que la inercia incluida es capaz con interrupciones hasta por 0.3 segundos pero también cabe resaltar que se puede aumentar la inercia del equipo agregando un volante de inercia y esto permite que pueda minimizar interrupciones hasta de más de 0.3 segundos.

En segundo caso y de gran importancia para mitigar Sags y Swells el motor-generador también es uno de los equipos que gracias a su rápida respuesta ante interrupciones bruscas y con el 20% de porcentaje de profundidad o elevación lo hacen bastante llamativo a la hora de implementar una técnica de mitigación.

- Autotransformador

Este tipo de transformador comparándolo con los demás tipos de transformadores nos ofrece más facilidades para su implementación como una de las técnicas más viables de aplicar: es menos costoso, tiene mejor regulación, tiene poco índice de pérdidas, cuenta con mayor potencia y es de fácil construcción.

Teniendo en cuenta que su funcionamiento es similar al de un regulador de tensión por medio de esta característica se determina que sería el tercer equipo a tener en cuenta para mitigar Sags y Swells además de su amplio ajuste de voltajes de línea que mitiga tanto caídas como elevaciones abruptas de tensión.

Dejando claro que para el acondicionador, motor generador y autotransformador también se debe determinar su compra al mejor proveedor y teniendo en cuenta el costo beneficio que cada uno me genere.

Además para la mitigación de los contenidos armónicos podemos resaltar dos técnicas:

- Filtro activo de armónicos
- Filtro pasivo de armónicos

Tabla 11. Cuadro comparativo entre filtro activo y filtro pasivo

Pasivo	Activo
Se requiere uno por cada carga/variador	Se requiere uno para varios Drives en un barraje
Problemas adelantando el factor de potencia y rendimiento en baja carga. (TCI ofrece opción de filtro Pasivo HGP con <i>Contactor</i>)	Factor de potencia estable y corrección independiente de la carga.
Se puede sobrecargar si se le excede su capacidad	No se sobrecargará porque nunca va a entregar más corriente de la que tiene como nominal
Conectado en Serie con la carga/variador : Si se debe hacer mantenimiento hay que desconectar la carga	Conectado en paralelo con las cargas. Una intervención o salida del filtro no afecta el proceso ni las cargas. Facilita mantenimiento y aumenta la confiabilidad del proceso
No tiene lecturas ni interfaz hombre-maquina, es " Ciego ", no puede dar alarmas ni indicar una falla sino hasta cuando el variador se daña y se evidencia. (TCI ofrece opción de filtro pasivo HGP con <i>Monitor de Fusibles</i>)	Viene dotado con HMI y posibilidad de integración en SCADA para que se tenga posibilidad de Leer, Configurar, Estados de Alarmas, etc. Esta información se podría ver remotamente. " Ve todo "
Podría llegar a tener restricciones de funcionamiento dependiendo del tipo de cargas . Típicamente están diseñados solo para cargas no lineales, específicamente variadores de 6 pulsos.	Funciona de manera optima con cualquier tipo de carga . Corrige hasta 50 armónica.

Fuente: [31]

Se puede determinar según el cuadro comparativo que el filtro activo de armónicos me presta más facilidades y beneficios para hacer una mitigación eficaz teniendo en cuenta que es una tecnología mucho más innovadora.

Tabla 12. Cuadro de valoración según el beneficio de implementación de la técnica

Técnicas de mitigación para Sags	Técnicas de mitigación para Swells			Técnicas de mitigación para Armónicos	
Motor generador	+++	Motor generador	+++	Filtro pasivo de armónicos	+++
Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido	+++	Mitigación de perturbaciones en calidad de la potencia en sistemas de distribución usando control distribuido	+++	oT con PQ-connect	+++
Acondicionador/Regulador de tensión activo	++	Acondicionador/Regulador de tensión activo	++	Filtro activo de armónicos	+++
autotransformador	++	autotransformador	++	Inversores	++
Restauradores dinámicos de tensión	++	Restauradores dinámicos de tensión	++	Variador con sección de entrada activa	++

Transformadores de tensión constante	+			Banco de condensadores desintonizados	++
				Reactores de línea	++
				Reactancia de rechazo	++
				Impedancia virtual	+++
				Control de reparto de energía armónica y reactiva	+++
				Control difuso	+++

Fuente: Autor

En donde según las características, prestaciones y beneficios que cada técnica ofrece expuestas en el capítulo anterior, según eso se genera este criterio:

+++ Significa una técnica apta para implementar

++ Significa una técnica aprobada para implementar

± Significa una técnica no muy implementada

5 Capítulo V

5.1 Conclusiones y recomendaciones

- En base a los objetivos propuestos en la presente revisión se logra concluir que se determinan los eventos de la calidad de la energía que pueden estar presentes en una microrred de distribución, además de determinarlos, se exponen cada uno con sus causas y efectos. Esto se logra por medio de los estándares encargados de regular los límites máximos y mínimos de las perturbaciones (IEEE 1159 de 1995).
- También se logra llegar a la determinación de algunas técnicas de mitigación de problemas de la calidad de la energía en microrredes en los eventos perturbadores seleccionados: sags, swell, interrupciones, elevaciones de tensión, caídas de tensión y armónicos. Llegando a ello por medio de la revisión de la información recolectada en donde se exponen dichas técnicas que en su mayoría se basan en la implementación de equipos diseñados con el fin de mitigar estos eventos, además estos equipos se relacionan con técnicas de control inteligente lo que me hace más robusta la técnica de mitigación ya que con el control puedo manipular de una manera más eficiente los factores que me definen la calidad de la energía.
- Por otra parte desde el punto de vista de la aplicación de las técnicas de mitigación en Colombia se concluye por medio de esta revisión que los equipos diseñados para

contrarrestar estos eventos perturbadores que son importados pueden no contar con una verificación de compatibilidad electromagnética y aun así se trabaja con estos equipos que inducen problemas de la calidad de la energía en microrredes, de esta forma se pueden conseguir equipos con una certificación de producto que está basada en el RETIE y nada más en cuanto a normatividad de su funcionamiento. Este aspecto se debe tener en cuenta ya que en la implementación del control inteligente está implícito el control de estos equipos de mitigación como los inversores en la microrred y esto me sigue generando eventos de la calidad de la energía así se haga un buen control de los parámetros que determinan la calidad de la energía eléctrica.

6 Capítulo VI

6.1 Análisis e Impacto de los resultados

Los problemas y las técnicas de mitigación de los problemas de la calidad de la energía en microrredes muestran un impacto en el factor económico ya que la implementación de medidas para garantizar la calidad de la energía provoca un valor económico sostenible al optimizar el desempeño de funcionamiento de los equipos y el control de la microrred. Por ejemplo un menor consumo de potencia activa me genera un ahorro económico debido a la reducción del contenido armónico de tensión.

En la búsqueda del cuidado del medio ambiente el presente documento tiene un papel importante ya que se trabaja enfocado en una alternativa a la generación de energía eléctrica tradicional. Con el fin de hacer la generación de la energía de la mejor manera en cuanto a emisiones nocivas para el medio ambiente por medio de las fuentes alternativas de energía renovable.

Otro factor de impacto puede ser en un contexto investigativo ya que el presente documento de revisión puede dar comienzo a futuros estudios en el área de la calidad de la energía eléctrica.

7 Referencias

- [1] M. H. Zaar, «Cambio climático antropogénico y decrecimiento,» *Ar@cne. Revista Electrónica de Recursos en Internet sobre Geografía y Ciencias Sociales*, vol. Vol. XXV., nº Núm. 250, pp. 1-30, 2021.
- [2] t. l. d. s. reservados, «bbwa,» ¿Qué es el combustible fósil? La energía que se obtiene de la materia orgánica?, 21 enero 2022. [En línea]. Available: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-el-combustible-fosil-la-energia-que-se-obtiene-de-la-materia-organica/>. [Último acceso: 31 marzo 2022].
- [3] E. K. N. B. Naser Mahdavi Tabatabaei, *arquitecturas de microrredes, control y proteccion de metodos*, Baku, Azerbaiyán: Springer Nature Suiza AG 2020, 2019.
- [4] C. d. E. C. -. S. d. d. y. g. d. G. d. t. -. cigre C6.2, «Control en Microrredes de A.C: Control Jerárquico,» colombia, 2020.

- [5] i. a. E. Society, «IEEE 2030.7-2017,» *Estándar IEEE para la especificación de controladores de microrredes*, Vols. 1 de 2 DRI/2030.7 - Integración de recursos de distribución WG/Microgrid Controllers TF, nº 978-1504445160, pp. 1-10, 2017.
- [6] I. d. s. reservados, «TranspowerSRL,» IECOR, 10 noviembre 2021. [En línea]. Available:
] <https://transpowersrl.com/2021/11/10/calidad-de-energia/#:~:text=El%20est%C3%A1ndar%20IEC%2061000-4-30%20define%20el%20t%C3%A9rmino%20%E2%80%9Ccalidad,a%20un%20conjunto%20de%20par%C3%A1metros%20t%C3%A9cnicos%20de%20referencia..> [Último acceso: 5 abril 2022].
- [7] t. l. d. s. reservados, «Iso Test Instrumentación electrónica,» [En línea]. Available:
] http://www.isotest.es/web/Soporte/Formacion/Presentaciones/fluke/Seminario_Calidad_El%C3%83%C2%A9ctrica_Fluke.pdf. [Último acceso: 6 abril 2022].
- [8] W. Ltda., «gestiopolis,» definición de calidad, 2022. [En línea]. Available:
] <https://www.gestiopolis.com/una-definicion-de-calidad/>. [Último acceso: 16 junio 2022].
- [9] upme y colciencias, «calidad de la energía eléctrica,» [En línea]. Available:
] <https://www1.upme.gov.co/paginas/indicadores-de-energia.aspx>. [Último acceso: 20 abril 2022].
- [10] A. F. S. M. Christian Eduardo Meza Cely, «Análisis de Metodologías para la cuantificación de pérdidas económicas por presencia de armónicos eléctricos y ocurrencia de SAGS de tensión,» universidad la salle, bogotá, 2018.
- [11] t. l. d. s. reservados, «IECOR,» calidad de la energía eléctrica, 29 junio 2006. [En línea]. Available:
1] <https://www.iecor.com/historia-de-iecor/>. [Último acceso: 27 abril 2022].
- [12] C. Celsia S.A. - Medellín, «celsia,» Conoce todo lo que debes saber sobre energía reactiva. ¿Por qué se refleja en tu factura la energía reactiva?, 2 febrero 2022. [En línea]. Available:
<https://www.celsia.com/es/blog-celsia/conoce-todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-reactiva-por-que-se-refleja-en-tu-factura-la-energia-reactiva/#:~:text=%C2%BFC%C3%B3mo%20se%20calcula%20el%20cobro,el%20consumo%20de%20energ%C3%ADa%20reactiva..> [Último acceso: 29 abril 2022].
- [13] V. Mercado Polo, o. B. Peña y L. Pacheco, «redalyc,» 2 abril 2017. [En línea]. Available:
3] <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007009>. [Último acceso: 2 mayo 2022].
- [14] Blogger., «Calidad de la energía en sistemas eléctricos,» Una compilación de información, problemas, aplicaciones, tecnologías, noticias y actualizaciones de calidad de energía, 2 abril 2011. [En línea]. Available: <http://www.powerqualityworld.com/2011/04/ansi-c84-1-voltage-ratings-60-hertz.html>. [Último acceso: 3 mayo 2022].
- [15] c. d. r. d. e. y. gas, «CREG resolución 024 de 2005,» de *resolución 024 de 2005*, Colombia, 2005.

- [1] u. n. a. mexico, «disturbios electricos,» [En línea]. Available:
6] <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/626/4/A4.pdf>. [Último acceso: 13 junio 2022].
- [1] l. d. s. reservados, «instalaciones electromecanicas,» calidad de la energia electrica, 29 agosto
7] 2019. [En línea]. Available: <https://ie2mmo.wordpress.com/2019/07/02/t2-6-calidad-de-la-energia-electrica/>. [Último acceso: 8 mayo 2022].
- [1] sonel, «cuidado con la asimetria causas, consecuencias, medicion y control,» sonel.com, los
8] derechos son reservados, los derechos son reservados.
- [1] a. e. d. r. p. u. g. sara ines betancur tirado, «estudio de los principales problemas que afectan a
9] la calidad de la energia electrica,» universidad pontificia bolivariana, medellin, 2002.
- [2] radthink, «Código de Red, Calidad de la potencia (Parte 2: Flicker),» codigo de red, todos los
0] derechos son reservados todos los derechos son reservados todos los derechos son reservados.
[En línea]. Available: <https://radthink.com.mx/codigo-de-red-calidad-de-la-potencia-parte-2-flicker/>. [Último acceso: mayo16 2022].
- [2] J. Cidrás y C. Carrillo, Universidade de Vigo, [En línea]. Available:
1] https://carrillo.webs.uvigo.es/publicaciones/Apuntes_Flicker_prot.pdf. [Último acceso: 13 junio 2022].
- [2] Zhikang-shuai, características transitorias, modelado y estabilidad y analisis de la microrred,
2] Changsha, Hunan, China: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2021.
- [2] A. M. B. M. R.-L. J. M. P. Vanessa Quintero-Molina, «Calidad de Potencia en Microrredes
3] Aisladas AC: Marco de Referencia Técnico y Revisión del Estado del Arte,» *scielo*, vol. vol.40, nº no.3, p. no especifica, 2021.
- [2] e. p. medellin, «Guía Metodológica: Análisis de calidad de la potencia en redes de distribución,»
4] EPM-UCET-NYL-GM-13, medellin, 2019.
- [2] J. A. Ducuara Valenzuela, «Mitigación de perturbaciones en calidad de potencia en sistemas de
5] distribución usando control distribuido,» Universidad Nacional de Colombia, Bogota, 2017.
- [2] e. 2022, «esquema.net,» Esquema de un generador eléctrico, derechos reservados derechos
6] reservados 2022. [En línea]. Available: <https://esquema.net/generador-electrico/>. [Último acceso: 20 mayo 2022].
- [2] i. e. ortea, «ortea,» [En línea]. Available:
7] https://www.ortea.it/es/categorie_prodotti/estabilizzadores-de-tension-especiales-dvs/. [Último acceso: 25 mayo 2022].
- [2] á. d. m. Omega Electric, «Omega Electric servicios industriales olaya S.A.C.,»
8] Autotransformador, [En línea]. Available:
<https://transformadoressiosac.com/autotransformador/>. [Último acceso: 2022 junio 21].

- [2] IEEE, «Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems», *IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992)*, vol. vol., nº no., pp. 1-29, junio 2014.
- [3] E. A. Rosero, «Corrección del factor de potencia en microrredes eléctricas ante el peligro de resonancia por la alta penetración de cargas no lineales», universidad politécnica salesiana, Quito, 2020.
- [3] T. Ingeniería, «¿Por qué y cómo mitigar armónicos & compensar adecuadamente la energía reactiva?», <http://www.tecnoing.pe/>, Perú, 2022.
- [3] L. Astudillo Mora, A. Vásquez Vega y J. Rojas Serrano, «redalyc», 10 octubre 2015. [En línea].
 2] Available: <https://www.redalyc.org/journal/614/61447568001/html/>. [Último acceso: 28 mayo 2022].
- [3] A. G. D. R. 9. 0708, «Reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETE)», 13 agosto 2013. [En línea]. Available:
<file:///C:/Users/Hp/Documents/libros%20diplomado/Anexo%20General%20del%20RETE%20vigente%20actualizado%20a%202015-1.pdf>. [Último acceso: 25 mayo 2022].
- [3] A. Sinha, K. Chandra y M. Kumar, «An Inclusive Review on Different Multi-level Inverter Topologies, their Modulation and Control Strategies for a Grid Connected Photovoltaic Systems», Solar Energy, NO ESPECIFICA, 2018.
- [3] 2. CIGRE JWG, «Modeling of Inverter-Based Generation for Power System Dynamic Studies», CIGRE 5] Technical Brochures., JWG C4/C6.35/CIGRE, 2018.
- [3] R. Automation, «Soluciones para armónicos», Variadores de frecuencia variable, octubre 2018.
 6] [En línea]. Available:
https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/br/drives-br012_es-p.pdf. [Último acceso: 21 junio 2022].
- [3] M. Savaghebi, Q. Shafiee, J. Vasquez y J. Guerrero, «"Adaptive virtual impedance scheme», *IEEE 7] Power & Energy Society General Meeting*, pp. pp. 1-5, 2015.
- [3] J. Yang, C. Ying, M. Dong y H. Han, «"A harmonic and reactive power sharing control strategy for 8] islanded microgrids",» *Chinese Automation Congress (CAC)*, pp. pp. 1422-1427, 2015.
- [3] L. Hicham, Y. Sayouti y E. K. Youssef, «ontrol of a flexible microgrid during both modes of 9] operations with presence of nonlinear loads», *Journal of the Franklin Institute*, vol. Vol. 357, nº Issue 11, pp. 6498-6538, 2020.
- [4] Allied Electronics, Inc., «allied electronics & automation», [En línea]. Available: <https://es-co.alliedelec.com/product/solahd/23-23-230-8/70098584/>.
- [4] Wenzhou Modern Group Co., Ltd. (Wenzhou Modern Completed Electric-power Equipment 1] Co., Ltd.), « Modern Power Solution Provider», [En línea]. Available:

<http://spanish.acpowerstabilizer.com/quality-2574777-1kva-low-voltage-constant-voltage-transformer-50-60hz>.

[4 t. l. d. reservados, «cummins inc,» ¿que es un generador de energia y como funciona?, [En 2] línea]. Available: <https://www.cummins.com/es/generators/power-generators>. [Último acceso: 29 MAYO 2022].

[4 P. E. & T. S. d. CV, «Acesores en Alta Tecnologia,» REGULADOR DE VOLTAJE, [En línea]. 3] Available: <https://altatecnologia.com.mx/regulador-de-voltaje/#~:text=Regulaci%C3%B3n%20activa%3A%20si%20por%20el,correcto%20funcionamiento%20de%20los%20aparatos>. [Último acceso: 1 junio 2022].

[4 F. Quintela y R. Redondo Melchor, «Diccionario de Ingeniería Eléctrica. Universidad de 4] Salamanca.,» [En línea]. Available: <https://electricidad.usal.es/Diccionario> . [Último acceso: 24 MAYO 2022].

Anexos

Anexo 1. Clasificación y características de los fenómenos electromagnéticos, tomada de [9] y adaptada del estándar IEEE 1159 - 1995

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL	DURACIÓN	MAGNITUD DE VOLTAJE
VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN			
TEMPORALES			
Interrupciones		3 s - 1 min	< 0.1 pu
Sag (Valles)		3 s - 1 min	0.1 - 0.9 pu
Swell (Crestas)		3 s - 1 min	1.1 - 1.2 pu
VARIACIONES DE LARGA DURACIÓN			
Interrupciones sostenidas		> 1 min	0.0 pu
Bajo Voltaje		> 1 min	0.8 - 0.9 pu
Sobrevoltajes		> 1 min	1.1 - 1.2 pu
Desbalance de Voltaje		Estado Estable	0.5 - 2%
DISTORSIÓN DE FORMA DE ONDA			
Desplazamiento de C.D.		Estado Estable	0 - 0.1%
Armónicos	0 - 100th H	Estado Estable	0 - 20%
Interarmónicos	0 - 6 kHz	Estado Estable	0 - 2%
Hendiduras		Estado Estable	
Ruidos	Banda - ancha	Estado Estable	0 - 1%
FLUCTUACIONES	< 25 Hz	intermitente	0.1 - 7%
VARIACIONES DE FRECUENCIA		< 10 s	

CATEGORÍAS	CONTENIDO ESPECTRAL	DURACIÓN	MAGNITUD DE VOLTAJE
TRANSIENTES			
IMPULSIVOS			
Nanosegundos	5 ns rise	< 50 ns	
Microsegundos	1 μ s rise	50 ns - 1 ms	
Milisegundos	0.1 ms rise	> 1 ms	
OSCILATORIOS			
Baja Frecuencia	< 5 kHz	0.3 - 50 ms	0 - 4 pu
Media Frecuencia	5 - 500 kHz	20 μ s	0 - 8 pu
Alta Frecuencia	0.5 - 5 MHz	5 μ s	0 - 4 pu
VARIACIONES DE CORTA DURACIÓN			
INSTANTÁNEAS			
Sag (Valles)		0.5 - 30 cycles	0.1 - 0.9 pu
Swell (Crestas)		0.5 - 30 cycles	1.1 - 1.8 pu
MOMENTÁNEAS			
Interrupciones		0.5 cycles - 3 s	< 0.1 pu
Sag (Valles)		30 cycles - 3 s	0.1 - 0.9 pu
Swell (Crestas)		30 cycles - 3 s	1.1 - 1.4 pu