

**REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA:
ESTADO DE SU APLICACIÓN Y MODELADO**

I.E. ANGÉLICA MARÍA GARCÍA GUALDRÓN

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2014**

**REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA:
ESTADO DE SU APLICACIÓN Y MODELADO**

I.E. ANGÉLICA MARÍA GARCÍA GUALDRÓN

**Trabajo de grado para optar al título de Master en Ingeniería
Área de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica**

**Director
PhD. Idi Amin Isaac Millán
Doctor en Ingeniería**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2013**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma Presidente del Jurado

Firma de Jurado

Firma de Jurado

Le dedico este trabajo a todos los profesionales investigadores que quieren innovar con nuevas tecnologías que ayuden a conservar el planeta y mejorar el diario vivir de nosotros, los seres humanos.

Agradezco inmensamente la constante colaboración de Diego Rojas y Esteban Restrepo, las asesorías de Idi Amin Isaac Millán, Gabriel López; y sobretodo la paciencia de mis amigos y familiares.

TABLA DE CONTENIDO

1.	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.	13
1.1.	RESEÑA HISTÓRICA DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.	13
1.2.	CONCEPTO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.	14
1.2.1.	SISTEMAS MONOPOLARES Y BIPOLARES	15
1.3.	COMPONENTES.	16
1.3.1.	TRANSFORMADORES DE Tensión.	16
1.3.2.	ESTACIONES DE CONVERSIÓN.	17
1.3.3.	CONTROL DE DISPARO DE IGBTs.	20
1.3.4.	CONDUCTORES.	22
1.3.5.	FILTROS DE ARMÓNICOS.	22
1.3.6.	PROTECCIONES	23
1.3.7.	CARGAS.	23
1.4.	VIGILANCIA TECNOLÓGICA.	24
1.4.1.	ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.	24
1.4.2.	PATENTES.	25
1.5.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS	25
1.5.1.	VENTAJAS.	25
1.5.2.	DESVENTAJAS	27
2.	MODELADO Y SIMULACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.	28
2.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO.	28
2.2.	CÁLCULOS MATEMÁTICOS Y METODOLOGÍA DE DISEÑO.	30
2.2.1.	ANÁLISIS DE CARGA.	30
2.2.2.	CÁLCULO DE COMPONENTES PASIVOS DE LOS CONVERTIDORES BUCK Y BOOST.	33
2.2.1.	CÁLCULO DE COMPONENTES PASIVOS DEL CONVERTIDOR CA/CC.	38
2.2.2.	SISTEMA DE CONTROL DE DISPARO DE IGBTs.	40
2.2.3.	CÁLCULO DE COMPONENTES DEL FILTRO DE ARMÓNICOS RLC.	43
2.2.4.	METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.	45
3.	SIMULACIONES Y RESULTADOS.	48
3.1.	CASO 5: CARGA NOMINAL	49

3.2.	MEJOR RENDIMIENTO: CASO 10.	57
3.3.	PEOR RENDIMIENTO: CASO 26.....	61
3.4.	RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES	64
4.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	66
4.1.	CONCLUSIONES.....	66
4.2.	PRINCIPALES APORTES	68
4.3.	TRABAJOS FUTUROS.	69
	BIBLIOGRAFÍA.....	70
	ANEXOS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama unifilar de un sistema de distribución en ca.	14
Figura 2 Diagrama unifilar de un sistema de distribución en cc.	15
Figura 3 Topología sistema de distribución en cc monopolar [11]	15
Figura 4 Topología sistema de distribución en cc bipolar [11].....	16
Figura 5 Conversor monopolar de 6 pulsos [19].....	18
Figura 6 Esquema de un conversor de 6 pulsos para topología bipolar.[20]	19
Figura 7 Esquema de un conversor de 12 pulsos. [15]	19
Figura 8 Circuito esquemático del conversor Boost (a) y del conversor Buck (b).	20
Figura 9 Diagrama simplificado de un puente rectificador controlado [21].	20
Figura 10 Señales utilizadas por el SPWM para generar los pulsos de disparo de los IGBTs.....	21
Figura 11 Disposición de los conductores (a) para redes de ca; (b), (c) y (d) para redes de cc bipolares y (e) para redes monopolares.	22
Figura 12 Topología de filtros, (a) filtro L, (b) filtro LC, (c) filtro LCL y (d) filtro L+LC [25]..	22
Figura 13 Tiristor interruptor de dos estados [29].	23
Figura 14 Red de distribución en cc.	29
Figura 15 Modelo fototermoelectrico de una luminaria compuesta por N LEDs [46].	31
Figura 16 Circuito equivalente de la iluminación LED.	32
Figura 17 Fases de operación del conversor Buck.	33
Figura 18 Conversor Buck para conexión del cargador de batería de VE.	35
Figura 19 Fases de operación del conversor Boost.	35
Figura 20 Diseño final del conversor Boost.	37
Figura 21 Rectificación de onda trifásica.	38
Figura 22 Diseño del rectificador trifásico.....	40
Figura 23 Diagrama esquemático del control de disparo de los IGBTs del rectificador trifásico [21].	40
Figura 24 Diagrama de bloques del control [21].	41
Figura 25 Señales de control senoidal (verde) y triangular portadora (azul).	42
Figura 26 Pulsos generados por el control de tensión PWM.....	43
Figura 27 Diagrama esquemático del filtro activo de banda eliminada.	43
Figura 28 Respuesta en frecuencia de un filtro de banda eliminada [49].....	44
Figura 29 Filtro de armónicos.	45
Figura 30 Diagrama de flujo de la metodología de diseño de redes de cc.....	46
Figura 31 Tensión rectificada de cc.	50
Figura 32 Evolución del sistema de control durante el tiempo de simulación	50
Figura 33 Tren de pulsos generados para disparo de los IGBTs.	51
Figura 34 Corriente de carga.....	51
Figura 35 Tensiones de cc de la red de distribución.	52
Figura 36 Potencia activa consumida por un polo de la red de cc.	52
Figura 37 Tensiones de ca.	54
Figura 38 Corrientes de ca.	55

Figura 39 Tensión rectificada en el caso 10.	57
Figura 40 Ondas de corriente de cc del caso 10.	58
Figura 41 Tensiones de salida del conversor Boost.	58
Figura 42 Tensiones en ca, caso 10.....	59
Figura 43 Corrientes de ca, caso 10.....	60
Figura 44 Tensión rectificada, caso 26.....	61
Figura 45 Corrientes de cc, caso 26.....	62
Figura 46 Tensión de cc a la salida del conversor Boost.	62
Figura 47 Corrientes de ca, caso 26.....	63
Figura 48 Corrientes de ca, caso 26.....	64
Figura 49 Cantidad de publicaciones vs Año de publicación.	103
Figura 50 Porcentaje de publicaciones según el tipo.	103
Figura 51 Dinámica de cantidad de publicaciones anuales clasificadas por fuente.	104
Figura 52 Cantidad de publicaciones por autor.	105
Figura 53 Porcentaje de participación en investigaciones según su país de origen.	105
Figura 54 Recurrencia de las palabras claves en la búsqueda de artículos.	106
Figura 55 Cantidad de patentes por dispositivo.	106
Figura 56 Cantidad de patentes registradas por fabricante.....	107
Figura 57 Datos de placa del transformador de tensión trifásico.	108
Figura 58 Circuito de las cargas de la habitación, vivienda estrato 2.....	110
Figura 59 Circuito de las cargas de la cocina, vivienda estrato 2.....	110
Figura 60 Circuito de iluminación de la vivienda estrato 2.	111
Figura 61 Composición del circuito de la habitación, vivienda estrato 4.	112
Figura 62 Circuito de cocina, vivienda estrato 4.....	112
Figura 63 Circuito de iluminación de la vivienda estrato 4.	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Opciones de componentes electrónicos para estaciones de conversión.	17
Tabla 2 Tipos de cargas modeladas en cc.	24
Tabla 3 Coeficientes de transmisión de potencia y regulación de tensión [11]	26
Tabla 4 Cargas de la red de distribución cc.	30
Tabla 5 Corrientes de las cargas del modelo.	32
Tabla 6 Casos de simulación.....	49
Tabla 7 Regulación de la tensión en la red de cc.	56

GLOSARIO Y SIGLAS.

ABB: Asea Brown Boverly.

ARMÓNICOS: Tensiones o corrientes senoidales que tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia natural del sistema, los efectos de los armónicos afectan el funcionamiento adecuado de los equipos del sistema.

C: Capacitancia.

ca: corriente alterna.

cc: Corriente continua.

CIRED: Del francés (*Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement*) Centro Internacional de Investigación sobre el Desarrollo y el Medio Ambiente.

CONVERSOR: Dispositivo electrónico que se encarga de aumentar o disminuir el nivel de tensión de corriente continua.

CORRIENTE ALTERNA: Es la corriente eléctrica en la que su dirección y magnitud varían con respecto al tiempo, tomando tanto valores positivos como negativos.

CORRIENTE CONTINUA: Se genera por el flujo de cargas eléctricas o electrones que fluyen siempre en una misma dirección, se caracteriza por tener un valor de tensión constante.

EFFECTO PELICULAR: También conocido como efecto "skin". Es un fenómeno en CA en el cual la densidad de la corriente es mayor en la superficie de un conductor que en su centro, de modo tal que la resistencia efectiva del conductor se hace mayor.

EFICIENCIA: En un sistema de potencia implica altas capacidades de transporte de energía eléctrica, con lo cual se logra la maximización de la utilización del sistema, y la utilización del mismo bajo condiciones para las cuales no se presente ningún tipo de riesgo.

EPM: Empresas Públicas de Medellín.

ESTABILIDAD: La capacidad que tiene el sistema para que todos sus generadores operen en sincronismo y en estado estable.

FILTRO: Dispositivo que sirve para eliminar determinadas frecuencias que componen la corriente que circula a través de él.

IEEE: (*Institute Of Electric And Electronic Engineers*) Instituto de ingenieros electricistas y electrónicos.

IGBTs: Transistor bipolar de puerta aislada que generalmente se usa como interruptor controlado en circuitos de electrónica de potencia.

POTENCIA ELÉCTRICA ACTIVA: Representa la capacidad o facultad para ejercer un trabajo físico.

IMPEDANCIA: Propiedad que posee un componente para limitar el paso de la corriente a través de un circuito.

INTERRUPTOR: Dispositivo de maniobra que permite desviar o interrumpir el curso de la corriente eléctrica.

INVERSOR: La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.

L: Inductancia.

LED: Light Emitting Diode.

LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN BIPOLAR: Constan de dos conductores, cada uno con una polaridad (positiva o negativa) y opuestas entre ambas. El retorno de la corriente puede ser diseñado como retorno metálico o retorno por tierra [1].

LÍNEAS DE DISTRIBUCIÓN MONOPOLAR: Utilizan una sola polaridad para la transmisión, generalmente negativa, con un solo conductor y puede diseñarse para ser la primera etapa de un sistema de transmisión bipolar u homopolar. El retorno de la corriente puede ser diseñado como retorno metálico o retorno por tierra.

LVdc: (*Low Voltage Direct Current*) Corriente continua en bajas tensiones.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

POTENCIA ELÉCTRICA ACTIVA: Transformación de energía eléctrica en trabajo, con unidades de W (Vatio).

POTENCIA ELÉCTRICA REACTIVA: Parte imaginaria Q de la potencia compleja, con unidades de voltamperios reactivos (vars).

POTENCIA ELÉCTRICA: Cantidad de energía absorbida por un elemento eléctrico en un tiempo determinado.

POTENCIA REACTIVA: Necesaria en el proceso de conversión, muy importante a la hora de diseñar un filtro ya que suministran, consumen y controlan este tipo de potencia en el sistema, de esta depende el flujo de potencia activa.

PSCAD/EMTDC: (*Power System CAD*) Herramienta de análisis eléctrico que por medio de una interfaz gráfica permite dibujar un sistema eléctrico, simular su comportamiento y analizar los diferentes fenómenos que se presenten en dicho sistema [4].

PWM: (*Pulse Width Modulation*) Modulación de ancho de pulso.

RECTIFICADOR: Circuito o dispositivo capaz de convertir una señal de corriente alterna en una señal de corriente continua por medio de diodos u otros componentes electrónicos.

RED DE DISTRIBUCIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA: Es un subsistema del sistema eléctrico de potencia que se encarga de suministrar la energía desde la subestación hasta los usuarios finales en baja tensión.

RETIE: Reglamentos técnico de instalaciones eléctricas.

THD: Distorsión armónica total.

TOPOLOGÍA: Configuración o disposición física utilizada por una red para la distribución de la energía.

TRANSFORMADORES: Elementos eléctricos que permiten variar la tensión en un circuito de CA ya sea aumentando o disminuyendo la tensión manteniendo la potencia estable.

UE: Unión Europea.

VOLTAJE: Es el trabajo necesario para desplazar la unidad de carga eléctrica entre dos puntos determinados.

LISTA DE UNIDADES

A: Ampers

F: Farads

H: Henrios

Hz: Herz.

m: metros

mm: milímetros

°C: Grados Celsius

ohm: Ohms

V: Voltios

VA: Volt-Ampers

Vca: Voltios en corriente alterna

Vcc: Voltios en corriente continua

W: Watts

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN EN CC.

1.1. RESEÑA HISTÓRICA DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN EN CC.

En 1880 el científico Tomas A. Edison da inicio a la era de la distribución de energía en cc con la invención del bombillo incandescente y la creación de la primera central de generación eléctrica en cc, Pearl Street en New York, Estados Unidos [1][2]¹[3]. La popularización del bombillo y las altas demandas de energía, obligan a la surgente industria eléctrica a aumentar la cobertura de las redes eléctricas haciéndolas más largas y más densas, lo que para el poco desarrollo tecnológico existente en la época se traduce a mayores pérdidas de energía y mayores costos de implementación [1]. Años más tarde Nikola Tesla funda Westinghouse Electric (1886) y construye la represa de las Cataratas del Niagara (1895) para dejar atrás a la corriente continua y consolidar a la corriente alterna como el principal tipo de corriente para utilizar en las redes eléctricas [1][2].

El aumento del desarrollo de la electrónica de potencia en el siglo XIX ha puesto nuevamente a la cc en la mesa de diseño de grandes sistemas energéticos y nuevas aplicaciones de modo tal que su campo de acción de ha aumentado al área de la medicina, robótica, electrodomésticos, aeronáutica, navegación, sistemas de control, comunicaciones, entre otros. Estos nuevos dispositivos conectados a la red hacen que aumente la demanda de energía y se generen problemas relacionados con la calidad de la misma, presentando la necesidad de implementar un nuevo sistema energético que a su vez permita reducir las pérdidas y facilite la incorporación de energías renovables como son los parques eólicos marinos del mar báltico en Europa y los paneles solares conectados en la red de distribución de la isla de Bornholm en Dinamarca [2][4][5]. Debido a que esta tendencia de mejora de la calidad del servicio eléctrico en mundial, distintos entes desarrolladores e investigativos, tanto privados como estatales han conformado grupos de investigaciones que desarrollen distintos componentes eléctricos y electrónicos de alta eficiencia que reduzcan significativamente las pérdidas y aumenten la eficiencia del sistema; tal es el caso de las empresas ABB y Siemens que son apoyadas por la Unión Europea en cada uno de sus programas de investigación en sistemas de distribución en cc, tanto en el área de protecciones como en el área de diseño [2]. Por otro lado, los entes reguladores de Japón, Europa y América del Norte han mostrado su interés en estas nuevas redes de distribución publicando distintas normas que especifican máximos niveles de tensión, máximo niveles de pérdidas y máximos niveles de distorsión

¹ La tesis “Estado Del Arte De Las Redes De Distribución en Corriente Continua” elaborada por Diego Rojas, hace parte de esta tesis de Maestría.

armónica entre otros importantes aspectos a tener en cuenta en el momento del diseño de las redes [6][7].

Aunque los avances son escasos y muy lentos, distintos países en el mundo le apuestan a las redes de distribución en cc como una alternativa viable para mejorar la calidad del suministro de energía y se proyecta hacia un futuro como un módulo fundamental de las Redes Inteligentes (*Smart Grids*).

1.2. CONCEPTO DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN EN CC.

Un sistema eléctrico de distribución de baja tensión está compuesto básicamente de una fuente de potencia, un conductor y una carga que dependiendo del tipo de distribución, del tipo de carga, de la distribución espacial de la carga y otros factores, puede variar su diseño y especificaciones técnicas de los componentes. Los sistemas eléctricos de distribución alimentados con ca están compuestos en su mayoría de configuraciones por un transformador trifásico de alta tensión a media tensión (34,5/13,2 kV Dd), una red de distribución trifilar de media tensión (13,2 kV), un transformador trifásico de media tensión a baja tensión (13,2/0,120 kV, Dy) y finalmente las líneas de distribución de baja tensión (120 V) con llegada al usuario final tal como se puede apreciar en la Figura 1.

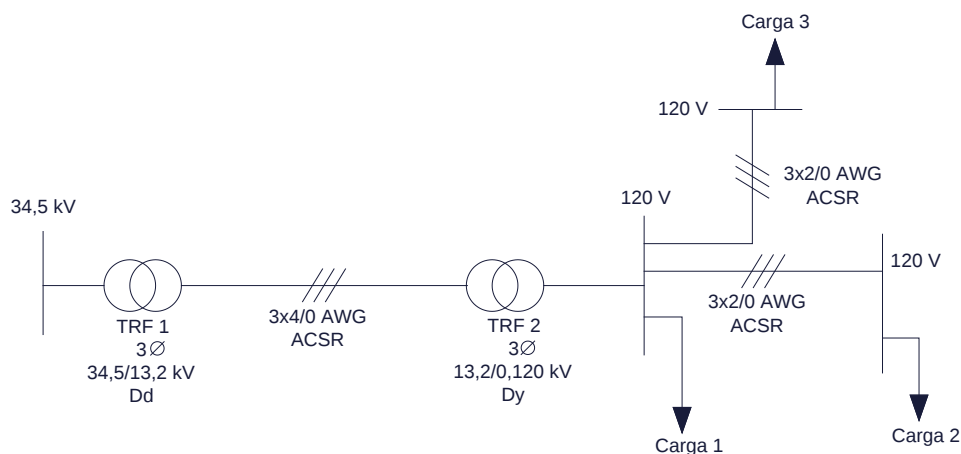


Figura 1 Diagrama unifilar de un sistema de distribución en ca.

En un sistema de distribución en cc se mantienen los componentes de transformación del nivel de tensión de ca y los conductores, pero su estructura se diferencia con la estructura de la red de ca al introducir un rectificador de tensión justo después del transformador 2 (13,2/0,120 kV) para asegurar los niveles de cc deseados según el diseño que se desee implementar que puede ser en media tensión (13,2 kV) o en baja tensión (120 V), en la Figura 2 se puede apreciar la estructura de una red de distribución en cc. Según las condiciones tomadas en cuenta para el diseño de la red en cc hay que tomar como una alternativa un conversor cc-cc para obtener el nivel de tensión deseado y este puede ser instalado en cualquier punto de la red.

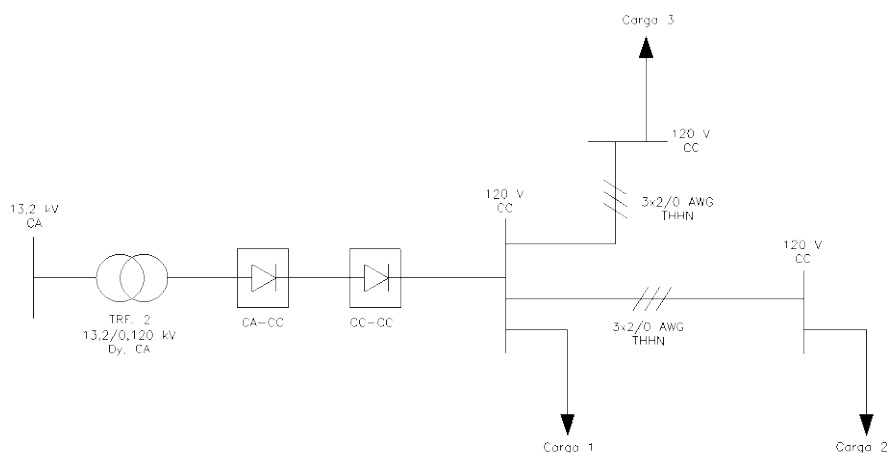


Figura 2 Diagrama unifilar de un sistema de distribución en cc.

1.2.1. SISTEMAS MONOPOLARES Y BIPOLARES

- SISTEMA MONOPOLAR

Como su nombre lo indica, el sistema monopolar tiene un único nivel de tensión. La red de conductores está compuesta por dos grupos que tendrán uno o más conductores, uno de estos grupos estará energizado a la tensión de referencia y el otro grupo será energizado a la tensión nominal del sistema y todos los usuarios están conectados a ese nivel de tensión [8]. En la Figura 3 se puede apreciar la topología básica de una red de distribución en cc monopolar [2].

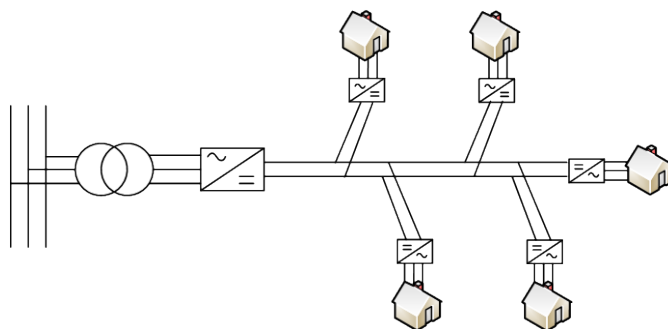


Figura 3 Topología sistema de distribución en cc monopolar [8]

Por sugerencia de la normativa europea 2006/95/CE [7] se debería energizar el sistema a una tensión de 1500 Vcc; sin embargo tal nivel de tensión hace que el uso de la estructura de conexiones monopolares en cc sean indeseables, ya que los convertidores electrónicos de potencia disponibles comercialmente que tienen una tensión nominal de 1500 Vcc también tienen corrientes nominales muy altas, lo que hace que su costo aumente [9]; por lo tanto queda a disposición del diseñador de la red seleccionar la tensión a la cual debe ser energizada para mantener un equilibrio entre los aspectos económicos y técnicos.

- SISTEMA BIPOLAR

Una red de distribución en cc bipolar es un sistema monopolar en cascada, es decir que el sistema tiene dos tensiones de energización con el mismo valor absoluto $|V_{cc}|$, y un punto de conexión común que será la tensión de referencia del sistema. En este tipo de sistema hay tres grupos de conductores, el primero conectado a la polaridad positiva ($+V_{cc}$), el segundo conectado al nivel de tensión de referencia y el tercero conectado a la polaridad negativa ($-V_{cc}$)[10], el usuario tiene la posibilidad de conectarse a los niveles de tensión de múltiples formas, las alternativas de conexión son [9][11][12]:

- a) Entre la polaridad positiva y neutro (1).
- b) Entre la polaridad negativa y neutro (2).
- c) Entre las dos polaridades, positiva y negativa, de este modo se tendrá el doble de nivel de tensión nominal que las conexiones a) y b) (3).
- d) Conexión entre las dos polaridades pero conservando una tercera conexión al punto de referencia de la red (4).

En la Figura 4 se pueden observar las posibles conexiones de los usuarios finales al sistema bipolar.

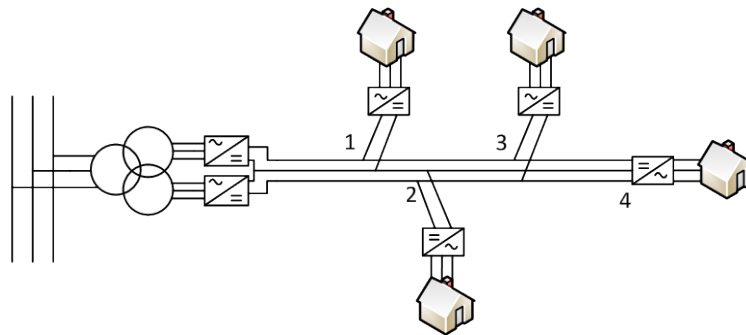


Figura 4 Topología sistema de distribución en cc bipolar [8].

1.3.COMPONENTES.

1.3.1. TRANSFORMADORES DE TENSIÓN.

A pesar de que el tipo de red de distribución modelada en este trabajo es de corriente continua es necesario tener una fuente de energía que permita tener este tipo de corriente. Las fuentes que permiten este tipo de corriente pertenecen al grupo de las fuentes de energía no convencionales o alternativa como los paneles solares y los microgeneradores eólicos; otra opción de fuente mucho más común, son los transformadores de tensión trifásicos que acompañados de un dispositivo adicional, el rectificador de ca/cc (1.3.2), son una excelente fuente de energía en cc.

Los transformadores trifásicos que son los más apropiados para este esquema de distribución son los transformadores de baja tensión, 13,2/0,120 kV, que pueden ser de dos tipos:

- Transformador Trifásico Bidevanado con una conexión delta en su primario y estrella en el secundario.
- Transformador Trifásico Tridevanado, para utilizar este equipo se requiere una conexión delta en el primario, estrella en secundario y delta en el terciario; adicional a esto se necesita que los dos devanados de 120 V tengan una relación de transformación 1:1 entre ellos.

1.3.2. ESTACIONES DE CONVERSIÓN

Son los componentes más importantes de una red de distribución en cc y existen dos tipos de convertidores, el primer tipo es el encargado de realizar la conversión ca/cc también llamado rectificador y el segundo es comúnmente conocido como inversor que realiza la función de convertir las ondas de cc a ca [13][14]. Estos dispositivos pueden ser construidos por tres diferentes tipos de componentes electrónicos listados en la siguiente tabla con sus respectivas ventajas y desventajas:

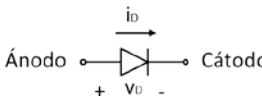
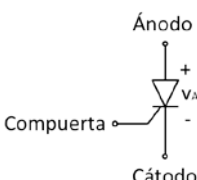
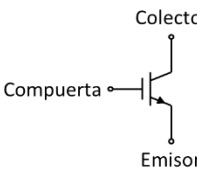
Componente	Ventajas	Desventajas
Diodo [13][14]: 	• Tiene un funcionamiento simple. • Tiempo de apertura y cierre fijos • No necesita control para su operación.	• No permite el control de paso de corriente. • No permite el paso bidireccional de corriente
Tiristor [13][14]: 	• Tiene funcionamiento simple de apertura y cierre. • Permite control de potencia. • Tiempo de operación rápido. • Soportan altas corrientes y altas tensiones.	• Se necesita un control de disparo para su funcionamiento. • No permite el paso bidireccional de corriente. • Bajas frecuencias de conmutación.
Transistor (IGBT) [13][14]: 	• Tiene funcionamiento controlado de apertura y cierre. • Permite el paso bidireccional de corriente. • Tiempo de operación rápido. • Soportan altas corrientes y altas tensiones. • Tiene altas frecuencias de conmutación.	• Necesita control avanzado de apertura y cierre.

Tabla 1 Opciones de componentes electrónicos para estaciones de conversión.

Estos dispositivos tienen diferentes topologías y modos de construcción, sin embargo solo 3 configuraciones son las más utilizadas en los sistemas trifásicos, diferentes topologías tienen modos distintos de controlar el flujo de energía, cuanto más controlada puede ser la potencia, mayor es el costo del convertidor; una buena interfaz de ca y cc para un sistema futuro de distribución en cc deberá presentar un enlace de cc altamente controlado, alta calidad de potencia, permitir su flujo bidireccional y un alto rendimiento durante fallas y perturbaciones [15].

- **CONVERSOR DE 6 PULSOS MONOPOLAR:**

Este tipo de convertidor es muy utilizado si se desea un sistema monopolar, es el más simple de los convertidores y se emplean seis dispositivos electrónicos que de preferencia son IGBTs; ellos ayudan a reducir los armónicos de corriente y se hace posible el control de la tensión, a cambio de un mayor costo en la implementación en comparación con los demás dispositivos [16]. Su salida se encuentra filtrada por un capacitor como se muestra en la Figura 5 obteniendo así un solo nivel de tensión.

Para el control de los diferentes convertidores el método más indicado a emplear es el PWM, que permite mantener un nivel de tensión según lo necesite el sistema y se puede alcanzar una alta calidad de la potencia [21] [22].

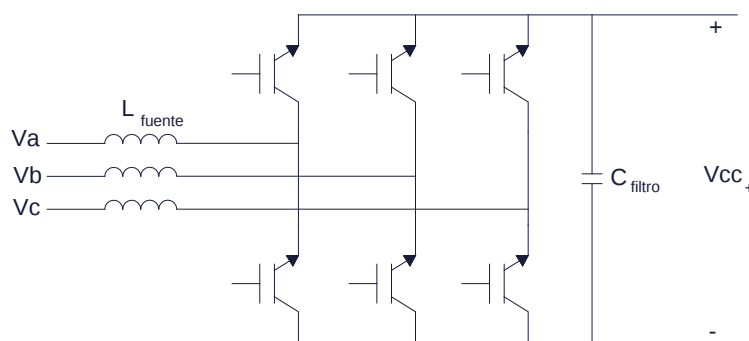


Figura 5 Convertor monopolar de 6 pulsos [16].

Por otro lado, con una pequeña modificación a la configuración anterior se puede obtener una salida bipolar. El capacitor de salida que se utiliza para filtrar la tensión en cc se divide en 2 utilizando la teoría de capacitores equivalentes en serie y se obtienen dos capacitores del mismo valor; en esta configuración se tienen tres puntos de conexión, dos de ellos energizados a un valor absoluto de tensión igual pero con signos opuestos y un tercero que sirve de referencia y se encuentra ubicado en la derivación de los capacitores, ver Figura 6, y así se obtienen dos tensiones monopolares del mismo valor de la tensión de alimentación y una tensión bipolar de 2 veces la tensión de alimentación.

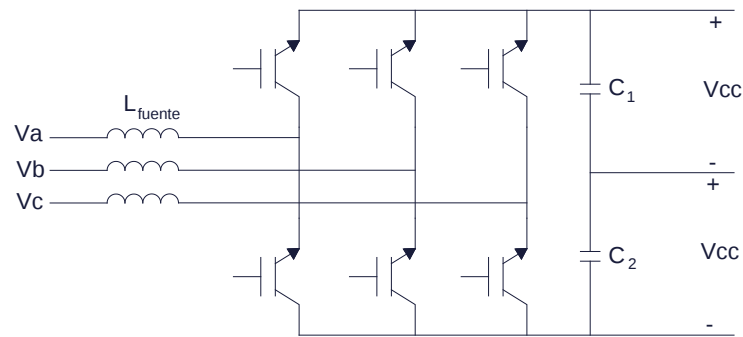


Figura 6 Esquema de un conversor de 6 pulsos para topología bipolar.[17]

- CONVERSOR DE 12 PULSOS

Un rectificador de 12 pulsos es la combinación de dos rectificadores de 6 pulsos como se puede apreciar en la Figura 7, estos dos rectificadores se encuentran unidos por un punto común que en la conexión de la red se utiliza como punto referencia para la conexión de las cargas; para utilizar esta configuración es necesario contar con un transformador trifásico tridevanado que cumpla las condiciones enunciadas en 1.3.1. [2]

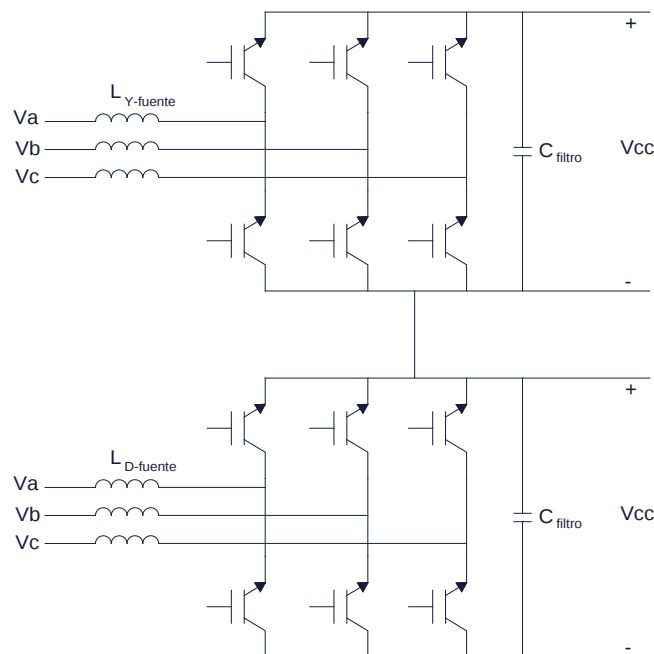


Figura 7 Esquema de un conversor de 12 pulsos. [12]

Con esta configuración se obtienen dos tensiones monopolares de 2 veces la tensión de alimentación y una tensión bipolar de 4 veces la tensión de alimentación. Y al igual que en el rectificador de 6 pulsos, se utiliza el control SPWM para el disparo de los IGBTs pero mucho más complejo.

- CONVERSORES CC/CC: BOOST Y BUCK

Debido a que los transformadores de ca no pueden ser empleados para aumentar el nivel de tensión de cc, se necesita utilizar otro tipo de dispositivo que permita aumentar el nivel de tensión en puntos estratégicos de la red y mejorar la regulación; para este propósito se encuentran los conversores Boost y Buck [2] [14].

El primero produce un voltaje medio de salida más alto que el voltaje medio de entrada, y se utiliza en fuentes de energía de cc reguladas y en el frenado regenerativo de motores; el segundo conversor, el Buck, disminuye el nivel de tensión de cc y sus aplicaciones principales son en fuentes de energía de cc regulada [2] [13].

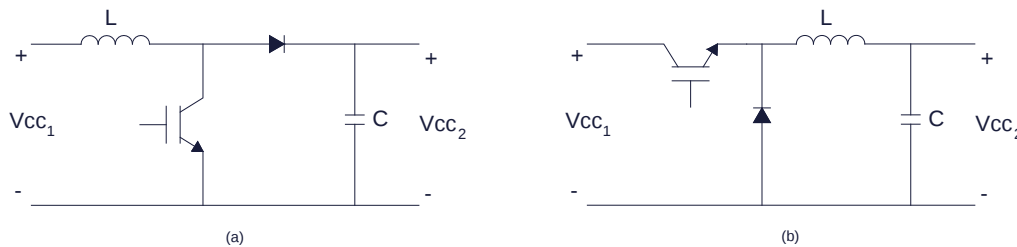


Figura 8 Circuito esquemático del conversor Boost (a) y del conversor Buck (b).

Para un correcto funcionamiento de estos conversores se recomienda en [14] que la frecuencia de conmutación de los IGBTs este entre 20 kHz y 25 kHz; en el ítem 2.2.2 se dan las especificaciones de funcionamiento de estos conversores

1.3.3. CONTROL DE DISPARO DE IGBTs.

Como se nombra en el numeral anterior, para el correcto funcionamiento de los puentes rectificadores se debe tener un apropiado control de disparo de los IGBTs. Existen muchas técnicas de disparo pero según [14], [18] y [19] la mejor forma de realizar este control es con el método de modulación senoidal de ancho de punto (SPWM), con este tipo de control se exige a los IGBTs a conducir y no conducir sin tener en cuenta sus condiciones naturales de conducción.

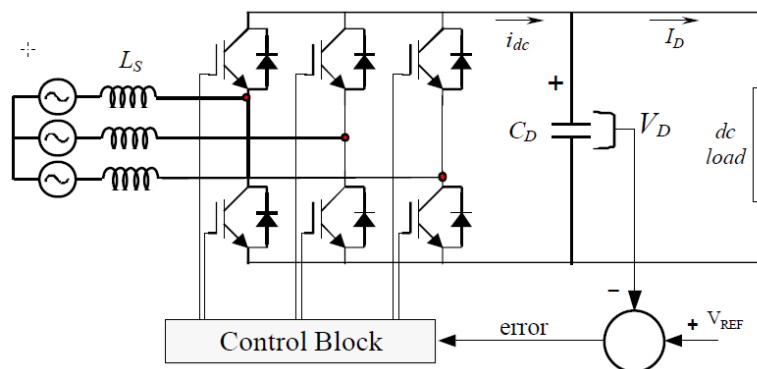


Figura 9 Diagrama simplificado de un puente rectificador controlado [18].

En este método se utilizan dos ondas periódicas que se comparan entre sí para generar los pulsos de conducción de los IGBTs, ver Figura 10, una de ellas es la señal portadora que es del tipo triangular con una frecuencia y amplitud fijas mientras la segunda señal se llama señal de control que es una señal senoidal con una frecuencia fija y con amplitud variable según el algoritmo de control implementado para mantener la tensión de salida del rectificador en un valor aproximadamente constante [14] [18]. Los pulsos de conducción pueden ser generados por una de dos condiciones lógicas; que la onda portadora sea mayor que la onda de control o de forma contraria, es decir que la onda de control sea mayor que la onda portadora.

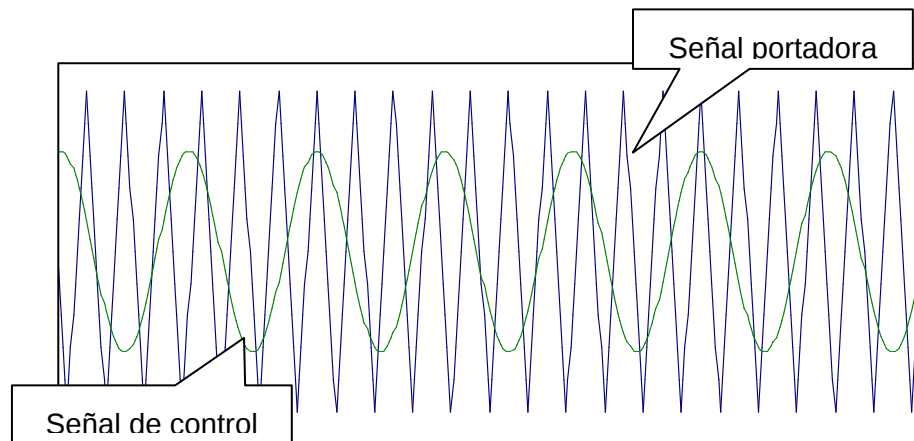


Figura 10 Señales utilizadas por el SPWM para generar los pulsos de disparo de los IGBTs.

Para generar la amplitud de la señal senoidal de control se utiliza un controlador proporcional e integral (PI) que cumpla con los siguientes criterios de estabilidad:

$$I_{fuente} \leq \frac{C * V_{carga}}{3 * K_p * L_{fuente}} \quad (1)$$

$$I_{fuente} \leq \frac{K_p * V_{fuente} * fp}{2 * R * K_p + L_{fuente} * K_i} \quad (2)$$

Dónde:

C – Capacitor.	V_{fuente} – Tensión en la fuente.	K_p – Constante proporcional.	R – Resistencia de la fuente.
L_{fuente} – Inductancia propia de la fuente.	V_{carga} – Tensión en la carga.	K_i – Constante integral	fp – Factor de potencia.

Con las anteriores ecuaciones del control SPWM se puede tener control tanto de la potencia activa como de la potencia reactiva, permitiendo cierto grado de corrección del factor de potencia y un filtrado de armónicos en las señales de la fuente de alterna [13] [18].

1.3.4. CONDUCTORES.

A diferencia de los anteriores dispositivos los conductores son los únicos componentes de la red que se pueden utilizar tanto en las redes de distribución de ca y de cc, siempre y cuando cumplan con las restricciones de operación impuestas por los sistemas de distribución en baja tensión como la resistencia mecánica, la estabilidad térmica en operación continua, la estabilidad térmica en servicios de corto tiempo y las caídas de tensión, entre otras [2][20][21].

Los conductores existentes en las redes de distribución de ca son principalmente de 4 y 5 hilos como se ven en la Figura 11 y pueden ser utilizados en las redes de distribución de cc realizando una serie de ajustes en sus conexiones para tomar ventaja de todos los conductores, la disposición física de los conductores depende de la topología implementada, ya sea bipolar o monopolar. En el futuro se espera introducir nuevos cables que estén diseñados especialmente para sistemas en cc.

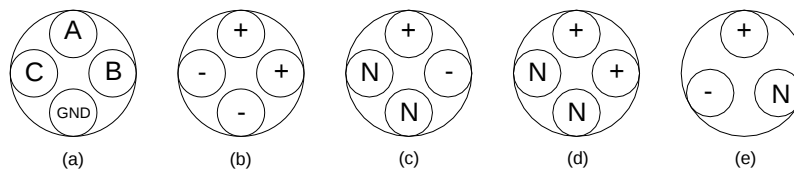


Figura 11 Disposición de los conductores (a) para redes de ca; (b), (c) y (d) para redes de cc bipolares y (e) para redes monopolares.

1.3.5. FILTROS DE ARMÓNICOS

A pesar de que la cc no posee componentes armónicas, los rectificadores de ca/cc no atenúan los armónicos que se presentan en el lado de ca luego se hace necesario incluir en estos sistemas filtros de armónicos en el lado de ca. Existen distintas técnicas de filtrado de armónicos como los filtros activos compuestos por integrados electrónicos y los filtros pasivos compuestos por inductancias y capacitores. Según [22], los filtros de armónicos que mejor se adaptan para cumplir con los requisitos de la calidad de la potencia son los filtros pasivos que pueden ser LC, LCL o L+LC (hibrido) como se aprecia en la Figura 12.

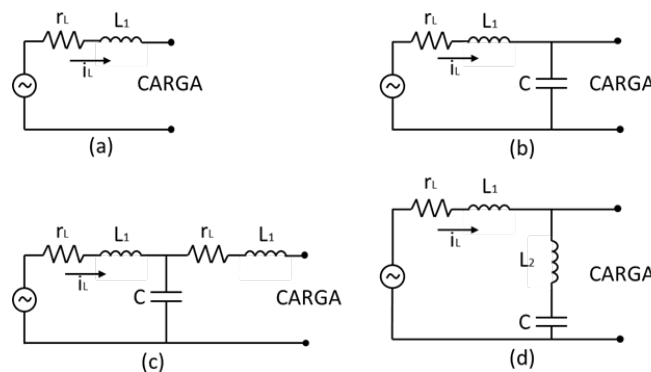


Figura 12 Topología de filtros, (a) filtro L, (b) filtro LC, (c) filtro LCL y (d) filtro L+LC [22].

A pesar de que los filtros pasivos son los más recomendados, también se considera utilizar los filtros activos compuestos por elementos electrónicos que permiten un filtrado mucho más rápido y eficiente de la corriente [23] [24], sin embargo sus componentes electrónicos podrían entrar en conflicto con el funcionamiento de la red total; el potencial uso de este tipo de filtros se encuentra en estudio y resolviendo sus inconvenientes, se perfilan como el reemplazo de los filtros pasivos [24].

1.3.6. PROTECCIONES

Para los sistema de distribución en cc se consideran distintas fallas tales como fallas bipolares sin neutro, fallas bipolares a neutro, fallas monopoles a neutro y fallas monopoles sin neutro entre otras posibles fallas [25][26] y los actuales esquemas de protección que se implementan en los sistemas de distribución en ca pueden ser de gran aplicabilidad en las redes de distribución en cc, desafortunadamente estas protecciones funcionan con los principios de oscilación de ca que cc no posee y por esto se deben incluir funcionalidades especiales adicionales para integrarse al sistema con el fin de tener un esquema de protección óptimo ante todas las posibles situaciones de falla [27].

En [26] se muestran unos nuevos dispositivos de tiristores como interruptores de dos estados diseñados para las fallas por conmutación ver Figura 13 y en [28] se analizan diferentes tipos de interruptores y sus características con respecto a distintas fallas.

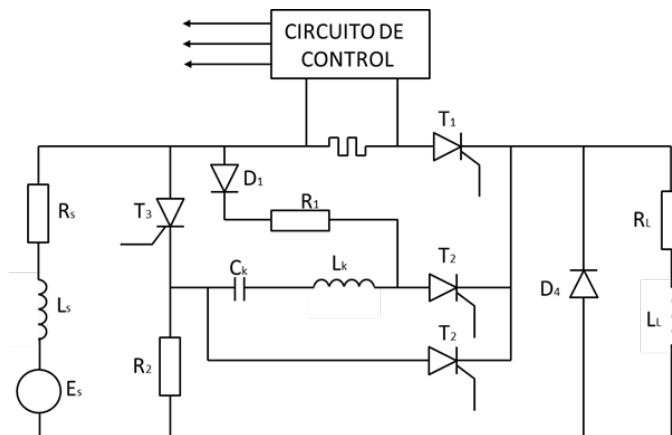


Figura 13 Tiristor interruptor de dos estados [26].

Hoy en día los equipos de protección para las redes de distribución en cc están en la etapa de investigación y desarrollo, no se tiene un equipo totalmente desarrollado de óptimo funcionamiento para ser instalado en redes de distribución en cc [2].

1.3.7. CARGAS.

En la actualidad los mercados comerciales tienen una gran variedad de equipos eléctricos y electrónicos que pueden ser alimentados tanto con corriente alterna como con corriente continua, pero muy pocas de estas cargas han sido objeto de estudio para modelar su

comportamiento cuando son alimentadas con cc. En [15] y en [29] se simulan las cargas domiciliarias más comunes clasificadas como de resistencia constante (CR), de corriente constante (CC) o de potencia constante (CP), todas ellas modeladas de acuerdo a la ecuación $P(V) = A_{CR}(V^2) + A_{CC}(V) + A_{CP}$ (3) que describe su consumo de potencia.

$$P(V) = A_{CR}(V^2) + A_{CC}(V) + A_{CP} \quad (3)$$

En la siguiente tabla se relacionan las cargas modeladas en [15] y [29] según su tipo:

Tipo de Carga	Carga
Resistencia constante	Cafetera, rizador, tetera eléctrica, sanduchera, estufa eléctrica.
Corriente constante	Lámpara incandescente, lámpara ahorradora de energía, iluminación LED.
Potencia constante	Televisor, monitor de computador y CPU.

Tabla 2 Tipos de cargas modeladas en cc.

Además de las cargas antes mencionadas existen otras cargas que pueden ser conectadas al sistema de distribución de cc como los motores de cc y los cargadores de baterías de vehículos eléctricos. El detalle del modelado y pruebas realizadas a estas cargas se encuentra debidamente documentado en [15], [29] y [30].

1.4. VIGILANCIA TECNOLÓGICA.

De acuerdo a las investigaciones, libros, tesis y distintas publicaciones existentes en las distintas bases de datos de artículos científicos se tienen los siguientes datos estadísticos

1.4.1. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS.

De acuerdo a la búsqueda de anteriores investigaciones publicadas acerca de redes de distribución en corriente continua, se cuenta con un registro histórico de 87 documentos publicados entre los años de 1995 y 2013, dentro de estos documentos se pueden encontrar libros, conferencias y publicaciones en revistas de investigaciones, en el ANEXO 3 se pueden consultar en más detalle las gráficas relacionadas con la dinámica de publicaciones.

Los años 2008 y 2009 son los años, que por ahora, tienen la mayor cantidad de documentos publicados, con 12 documentos cada uno. Por otra parte, la IEEE es la editorial con mayor cantidad de publicaciones con un total de 62 artículos publicados durante ese mismo periodo de tiempo y se puede concluir que el 63% de los documentos

encontrados en las distintas bases de datos corresponden a artículos presentados en conferencias y de lo cual se infiere que el tema ha sido socializado, en su mayoría, en encuentros académicos como conferencias, congresos y seminarios.

Dentro de los investigadores más destacados se encuentran Tero Kaipia, Jarmo Partanen, Pasi Peltoniemi y Pasi Salonen, todos adscritos a la Universidad Tecnológica de Lappeenranta en Finlandia, sin embargo hay 123 autores más de distintos países y universidades que han realizado investigaciones, de lo cual se infiere que es un tema de gran interés. Debido a que los autores con mayor cantidad de investigaciones y publicaciones son de origen finlandés, han posicionado a Finlandia como el país pionero en la investigación en redes de distribución en corriente continua; sin embargo, otros países con poca participación como Colombia, Tailandia, India y Bélgica, han aportado a la investigación en este tema y al aumento en el interés mundial de realizar más investigaciones.

1.4.2. PATENTES.

En forma paralela a las investigaciones hechas por distintos autores también es importante tener relacionadas las patentes registradas de los elementos que conforman la red, en el ANEXO 3 se pueden observar las gráficas de la dinámica de publicación de patentes durante el mismo periodo de tiempo. Los IGBTs y los convertidores cc/cc son los dispositivos con mayor cantidad de patentes registradas, con aproximadamente 860 patentes cada uno.

Los fabricantes con mayor cantidad de patentes son Sanken Electric Co. con 102 patentes, *Fujitsu Limited* con 85 patentes, ambas de origen nipón, y ABB de origen suizo con 88 patentes, el conteo de estas patentes involucra todas las patentes registradas de todos los dispositivos que se pueden utilizar en LVdc. A pesar de que estas empresas son de origen nipón y suizo, solo Japón se encuentra dentro de los países con más desarrollo en patentes junto con Estados Unidos de América, cada uno tiene 35% de patentes publicadas, para un total del 70%.

1.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS

Todo sistema de distribución lleva consigo ventajas y desventajas que hacen parte de las distintas ayudas que permiten determinar su viabilidad en una aplicación en específico. A continuación se describen las ventajas y desventajas más importantes de los sistemas de distribución en cc.

1.5.1. VENTAJAS

- Mayor capacidad de transmisión de energía: Debido a que en corriente continua la reactancia de los conductores solo se tienen en cuenta para los efectos transitorios y en estado estable su comportamiento tiene poco efecto en la red; solo la componente resistiva se tiene en cuenta para evaluar la regulación de la red la cual es

significativamente mejor que en las redes de ca. Los conductores tienen una componente resistiva de valor absoluto mucho menor al valor absoluto de la reactancia, lo que permite tener una mejor regulación de tensión con conductores de menor calibre [8] [31]. En la Tabla 3 se muestra un ejemplo comparativo de la regulación y límite térmico de un conductor entre ca y cc notándose que estos valores límite son mejores cuando el conductor es energizado con cc [2].

COEFICIENTES DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA Y DISTANCIA DE TRANSMISIÓN PARA EL CONDUCTOR AXMK 120 mm ² PARA SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN EN ca Y cc			
SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	SISTEMA TRADICIONAL DE 400 Vca	SISTEMA UNIPOLAR DE 900 Vcc	SISTEMA BIPOLAR DE $\pm$ 750 Vcc
Límite térmico	1	2,6	2,2
Límite de caída de tensión	1	5,1	7,0

Tabla 3 Coeficientes de transmisión de potencia y regulación de tensión [8]

Gracias a que las pérdidas de tensión son menores y la regulación es mejor se puede transportar energía a mayores distancias minimizando la restricción de expansión de la red, lo que beneficiaría a los usuarios del sistema eléctrico que se encuentran a distancias lejanas.

- Carencia de sincronismo: En los sistemas de ca en caso tal de que se necesite conectar alguna fuente de energía adicional se debe verificar la sincronía de la fuente con el sistema, pero al implementar un sistema de cc solo el voltaje debe ser controlado gracias a la ausencia de frecuencias y fases en las polaridades del sistema [16], por lo tanto no hay necesidad del proceso de sincronización para un correcto funcionamiento del sistema de potencia [2][32][33].
- Suministro ininterrumpido de energía: Una de las necesidades de los sistemas de distribución de energía modernos es poder almacenar la energía y tener disponible generación local para alimentar aquellas cargas que necesitan tener un suministro constante de energía y de calidad [2], en los sistemas de distribución en cc es posible conectar al sistema bancos de baterías y sistemas de almacenamiento en el menor tiempo posible debido a que no se necesita la sincronización para conexión de los mismos, lo que permite tener un soporte de alimentación confiable y rápido [29][34]. Además, permite la rápida incorporación de generación basada en fuentes no tradicionales de energía como la energía fotovoltaica y la generación por biomasa [33][35].
- Confiabilidad: Los sistemas de distribución en cc se caracterizan por tener buenos niveles de confiabilidad, dando la posibilidad de reemplazar ramales de media tensión minimizando las probabilidades de falla en nuevas redes de distribución [31]. Estos nuevos sistemas en cc son una tecnología prometedora para la implementación a

futuro de un sistema de distribución inteligente, con un alto nivel de rentabilidad y confiabilidad [27] permitiendo el intercambio de cargas entre los sistemas de ca y cc asumiendo un sistema híbrido.

1.5.2. DESVENTAJAS

- Complejidad: En comparación con el sistema de distribución de energía en ca, el sistema de distribución en cc es más complejo, lo que hace que el funcionamiento y análisis del sistema sea más difícil por motivo del control de los dispositivos electrónicos de potencia y del esquema de protección a implementar, ya que este último debe incluir funcionalidades especiales adicionales como generadores de cruce por cero de la onda de corriente.[8][36]; también se hace más complejo el análisis de una red de cc a medida que tiene más dispositivos asociados.
- Armónicos: Debido a la cantidad de dispositivos electrónicos presentes en la red de cc, los armónicos introducidos a la red ca aumenta y con ello disminuye la calidad de la potencia en el lado de ca [37] [38]. La naturaleza de las cargas no lineales genera corrientes armónicas que pueden causar problemas en el sistema de potencia y sobrecalentamiento en los transformadores, estas corrientes se derivan de las cargas hacia las fuentes de alimentación, siguiendo los caminos de menor impedancia, con frecuencias múltiples enteras de la frecuencia fundamental desviando la THD del 5% reglamentario [37].
- Protecciones: Todo sistema de distribución se debe contar con protecciones y este tipo de sistema de distribución en cc no es la excepción y debe cumplir con los mismos requerimientos de seguridad eléctrica que tienen los sistemas en ca [8]. Actualmente existen pocas investigaciones que documenten la operación y diseño de estas protecciones especiales para cc; sin embargo, es posible utilizar los mismos dispositivos de protección eléctrica que se utilizan en ca pero con modificaciones específicas que permitan una óptima integración al sistema, estas nuevas funcionalidades implican un cierto grado de complejidad en el diseño del sistema de protección aumentando el costo total de la red de cc [25][27].

Para comprobar que las redes de distribución en cc son una posible solución a los inconvenientes que presentan las redes de distribución en ca existentes, es necesario realizar pruebas sobre una red piloto con cargas que pueden ser alimentadas con cc sin distorsionar su funcionamiento. En el Capítulo 2 se presenta el diseño de una red de distribución en cc que permite validar la información ya presentada.

2. MODELADO Y SIMULACIÓN DE REDES DE DISTRIBUCIÓN DE BAJA TENSIÓN EN CC.

2.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO.

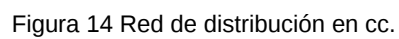
Tomando como base los componentes explicados en el ítem 1.3, el RETIE [39] y la norma NTC 2050 [40], se recomienda que las redes de distribución de baja tensión menores a 13,2 kV sean de configuración radial con una única fuente de alimentación que corresponde a un transformador de tensión 13,2/0,120 kV. El modelo construido contiene cargas residenciales estrato 2 y estrato 4, un motor de cc conexión shunt, iluminación LED de espacios públicos y un cargador de batería de vehículo eléctrico.

Como fuente de energía se toma un transformador de tensión trifásico bidevanado de 75 kVA con relación de transformación 13,2/0,120 kV (ver ANEXO 4); este transformador es modelado según su equivalente en el lado de baja tensión y es escogido tomando como base las redes actuales de distribución de ca que se encuentran en funcionamiento en el país, de tal forma que a partir de los elementos que componen las redes existentes se pueda construir una red de cc.

Adicional al transformador, se ponen filtros de armónicos que permitan minimizar los armónicos generados por la red de cc. La topología escogida es del tipo RLC de banda suprimida para minimizar los armónicos del 2º al 6º.

Tomando como base que el transformador escogido es trifásico bidevanado se escoge un rectificar de 6 pulsos con capacitor de derivación central como se muestra en la Figura 6 de tal forma que se tenga la mayor capacidad de transmisión de energía a 100 V_{CC} monopolar y a 200 V_{CC} bipolar.

Para mantener los niveles de tensión de cc en los mismos valores que los de una red de ca, se coloca un conversor cc-cc tipo Boost inmediatamente después del rectificador de cc que aumenta el nivel de tensión en 40 V_{CC} bipolar, lo que quiere decir que al rectificar la señal de ca se tiene un sistema de cc 120 V_{CC} monopolar y 240 V_{CC} bipolar [41], tal como se muestra en la Figura 14.



Por ultimo tenemos las cargas según se describen en la siguiente tabla, una descripción más detallada acerca de ellas se puede leer en el ANEXO 4:

Carga principal	
Vivienda estrato 2*	• Cocina • Habitación • Iluminación
Vivienda estrato 4*	• Cocina • Habitación • Iluminación
Iluminación publica	4 luminarias LED compuestas de 14 leds de 80,6 de flujo luminoso.
Motor cc Shunt	Motor de 10 HP.
Cargador de batería de vehículo eléctrico.	Batería de litio de 60 Ah.

Tabla 4 Cargas de la red de distribución cc.

2.2. CÁLCULOS MATEMÁTICOS Y METODOLOGÍA DE DISEÑO.

De acuerdo a los textos teóricos de ingeniería, todo sistema de transmisión y distribución de energía debe ser analizado matemáticamente para entender su comportamiento y diseñar sus componentes de acuerdo a las necesidades de las cargas. A continuación se describe la forma en la que se realizó el análisis de la red:

2.2.1. ANÁLISIS DE CARGA.

Una de las claves del análisis de distribución es conocer el tipo de carga que se va a conectar a la red, principalmente la corriente de carga. A continuación se presenta el análisis de carga hecho para este modelo:

- Vivienda Estrato 2:

Esta carga tiene tres circuitos en paralelo, habitación, cocina e iluminación general. En el circuito de la habitación se tiene en paralelo un bombillo incandescente, un computador y un monitor como se muestra en el ANEXO 4 y la corriente que consume este circuito es 0,8665 A, el circuito de la cocina conformado por una estufa eléctrica, una cafetera, una sanduchera y una aspiradora que en conjunto consumen 3,3596 A. Por ultimo tenemos el circuito de la iluminación general que consume 2,533 A y está conformado por 4 bombillos incandescentes y 3 luminarias ahorradoras de energía.

En total, la corriente consumida por la vivienda estrato 2 es de 6,7592 A.

- Vivienda Estrato 4:

Al igual que en la vivienda estrato 2, la vivienda estrato 4 tiene los mismos tres circuitos en paralelo pero con cargas adicionales para seguir los resultados de los estudios de

carga contemplados en la norma RA8-009 de EPM S.A. E.S.P. [42] donde se concluye que la vivienda urbana estrato 4 tiene más consumo de energía que la vivienda estrato 2.

El circuito de la habitación es monopolar a 240 V como se puede observar en el ANEXO 4y tiene en paralelo 2 lámparas ahorradoras de energía, un computador con su monitor y un televisor; este circuito tiene un consumo de corriente de 1,132 A. El segundo circuito que posee esta vivienda es el de alimentación de la cocina en el cual se pueden encontrar una estufa eléctrica, una sanduchera, una cafetera, un hervidor y una aspiradora como cargas y su consumo es de 5,651 A. Por ultimo tenemos el circuito de iluminación que contiene 6 lámparas ahorradoras de energía y 3 lámparas fluorescentes dispuestas eléctricamente como se muestra en el ANEXO 4, el consumo de corriente de este circuito es de 0,978 A.

En total la vivienda estrato 4, en estado estable, consume una corriente de 7,7611 A

Todas las cargas utilizadas en los circuitos de cada una de las viviendas anteriormente descritas, se encuentran documentadas y modeladas en [15].

- Iluminación Publica

De acuerdo a las últimas innovaciones tecnológicas y comerciales en productos ecológicos para tener un ambiente amigable podemos encontrar las luminarias compuestas por LEDs que consumen menos energía que las lámparas ahorradoras de energía y tienen una capacidad lumínica mayor por que las hacen las preferidas para iluminar espacios públicos. En [43] se muestra un modelo fototermoelectrico de una luminaria LED que se utilizó como carga para este modelo.

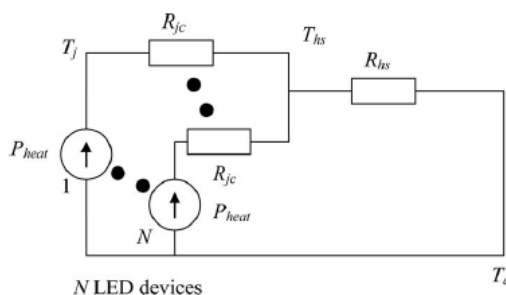


Figura 15 Modelo fototermoelectrico de una luminaria compuesta por N LEDs [43].

Cada una de las luminarias está construida por 14 LEDs, que a su vez están distribuidos en 2 circuitos en paralelo cada uno con 7 LEDs en serie, para este modelo se utiliza la referencia XLamp® XR-E LED fabricada por CREE, en el ANEXO 4 se puede apreciar la hoja de datos de los LEDs utilizados en este modelo y en [43].

Tomando el dato de resistencia termina de 8°C/W ($1^{\circ}\text{C/W} = 1\ \Omega$) y $4,1\ \Omega$ de la resistencia del plafón de la lámpara estipulado en [43], se tiene un equivalente por luminaria de $33,85\ \Omega$. Para balancear la carga en los 2 polos de la red de LVdc se conectan 2 luminarias al polo positivo y dos luminarias al polo negativo teniendo como resultado el siguiente circuito, la cantidad total de corriente que consumen es de 7,09 A.

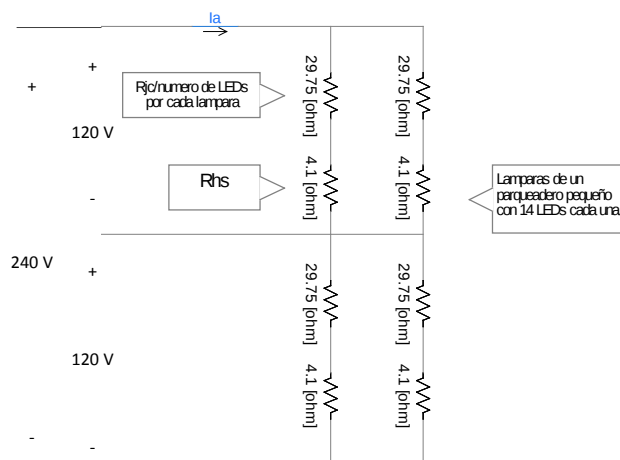


Figura 16 Circuito equivalente de la iluminación LED.

- Cargador de batería de vehículo eléctrico

La comercialización de Vehículos Eléctricos pone en evidencia la necesidad de que los usuarios finales tengan a disposición de toma corrientes a los cuales puedan conectar estos vehículos y cargar las baterías internas de los mismos. Estas baterías son cargadas con corriente continua a niveles de tensión menores a 10 V; la batería utilizada en este modelo se encuentra debidamente documentada y estudiada en [30], y su corriente de carga es de 3 A como se muestra en el ANEXO 4

- Motor de corriente continua tipo Shunt

Una de las tantas cargas que pueden ser los motores de cc con múltiples aplicaciones como los ascensores de carga y de personal. Como carga de este modelo, se utiliza un motor Dripproof de 70 HP fabricado por IMPERIAL ELECTRIC. Para modelar este dispositivo se utiliza el proyecto de ejemplo "dc_shunt.pscx" de la librería precargada de PSCAD™ /EMTDC™. Si el motor se encuentra energizado a 240 V como lo indican sus especificaciones, su corriente de carga es de 31,067 A.

La carga conectada al sistema tiene un consumo total de 55,68 A, ver Tabla 5.

Carga	Corriente
Vivienda Estrato 2	6,76 A
Vivienda Estrato 4	7,76 A
Iluminación LED	7,09 A
Cargador de batería de EV	3 A
Motor de cc	31,067 A
Corriente total	55,68 A

Tabla 5 Corrientes de las cargas del modelo.

2.2.2. CALCULO DE COMPONENTES PASIVOS DE LOS CONVERSORES BUCK Y BOOST.

Para poder tener niveles apropiados de tensión de 240 V para energizar la red y la tensión de 4,5 V necesaria para cargar la batería del carro eléctrico se deben diseñar dos tipos de conversores cc/cc. El primero que se debe calcular es el convertor tipo Buck del cual se va a alimentar la batería del vehículo eléctrico y seguido de este se debe diseñar el convertor

Para poder diseñar cualquiera de los dos conversores es necesario entender cada una de las etapas de su funcionamiento. El convertor Buck tiene 2 etapas, la primera es cuando el IGBT se encuentra cerrado y el diodo se encuentra abierto (a), el segundo estado es cuando el IGBT se encuentra abierto y el diodo se encuentra cerrado (b), los circuitos equivalentes se muestran en la Figura 17

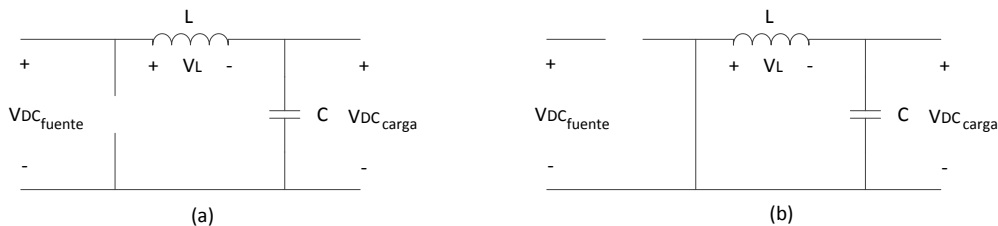


Figura 17 Fases de operación del convertor Buck.

Durante el estado (a), la ecuación de tensión que rige este circuito es:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{fuente} - V_{carga} \quad (4)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \quad (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT_{conmutación}} = \frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \quad (6)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \right) DT_{conmutación} \quad (7)$$

Durante el estado (b), la tensión tiene el siguiente comportamiento:

$$V_L = -V_{carga} = L \frac{di_L}{dt} \quad (8)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{-V_{carga}}{L} \quad (9)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{-V_{carga}}{L} \right) (1 - D) T_{conmutación} \quad (10)$$

Para mantener un nivel de corriente estable y con un mínimo de variación es necesario que los Δi_L producidos durante la conducción y la no conducción del IGBT sean iguales, es decir que las ecuaciones 7 y 10 sean iguales:

$$\left(\frac{-V_{carga}}{L}\right)(1-D)T_{conmutación} = \left(\frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L}\right)DT_{conmutación} \quad (11)$$

Despejando V_{carga} :

$$V_{carga} = V_{fuente}D \rightarrow D = \frac{V_{carga}}{V_{fuente}} \quad (12)$$

Retomando la ecuación 7 y teniendo un valor de Δi_L fijo en el diseño, se tiene que el valor mínimo de la inductancia es:

$$L_{min} = \left(\frac{V_{fuente} - V_{carga}}{\Delta i_L * f_{conmutación}}\right)\left(\frac{V_{carga}}{V_{fuente}}\right) \quad (13)$$

Para calcular el capacitor se tiene en cuenta que:

$$Q = C * V_{carga} \rightarrow \Delta Q = C * \Delta V_{carga} \quad (14)$$

Según el capítulo 6 de la referencia [14], la corriente del capacitor a una señal triangular, por lo tanto ΔQ es:

$$\Delta Q = \frac{T\Delta i_L}{8} \rightarrow \Delta V_{carga} = \frac{T\Delta i_L}{8C} \quad (15)$$

Tomando la ecuación (10) y reemplazándola en la ecuación anterior, la relación de variación de tensión de carga (ΔV_{carga}) con respecto a la tensión de la carga (V_{carga}) es:

$$\Delta V_{carga} = \frac{T_{conmutación}V_{carga}}{8CL}\left(1 - \frac{V_{carga}}{V_{fuente}}\right)T_{conmutación} \quad (16)$$

$$\frac{\Delta V_{carga}}{V_{carga}} = \frac{1}{8CLf_{conmutación}^2}\left(1 - \frac{V_{carga}}{V_{fuente}}\right) \quad (17)$$

Si se considera que $\frac{\Delta V_{carga}}{V_{carga}}$ corresponde al rizado o cambio máximo deseado de la tensión de salida del buck y despejando C:

$$C_{min} = \frac{1}{8L\left(\frac{\%rizado}{100}\right)f_{conmutación}^2}\left(1 - \frac{V_{carga}}{V_{fuente}}\right) \quad (18)$$

Dónde:

C_{min} – Capacitancia mínima requerida.

V_{fuente} – Tensión en la fuente.

Δi_L – Maxima variación de corriente que circula por la inductancia.

L_{min} – Inductancia mínima requerida.

V_{carga} – Tensión en la carga.

%rizado – Máxima variación permitida de V_{carga}

$f_{conmutación}$ – Frecuencia de conmutación del IGBT

Al tomar una frecuencia de conmutación de 25 kHz, un rizado de la tensión del 0,0001%, la tensión de la fuente en 120 V, la tensión de la carga en 4 V según especificaciones de la batería del vehículo eléctrico y si la máxima variación de corriente de la inductancia es de 0,05 A; la inductancia es de 3,093333 mH y la capacitancia de 62,5 mF, la configuración final del Buck es:

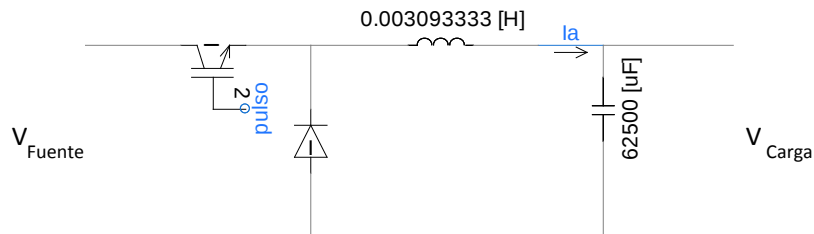


Figura 18 Conversor Buck para conexión del cargador de batería de VE.

El segundo equipo es el conversor Boost; que al igual que el conversor Buck, tiene las mismas dos etapas de funcionamiento, la primera es cuando el IGBT se encuentra cerrado y el diodo se encuentra abierto (a), el segundo estado es cuando el IGBT se encuentra abierto y el diodo se encuentra cerrado (b), los circuitos equivalentes se muestran en la Figura 19

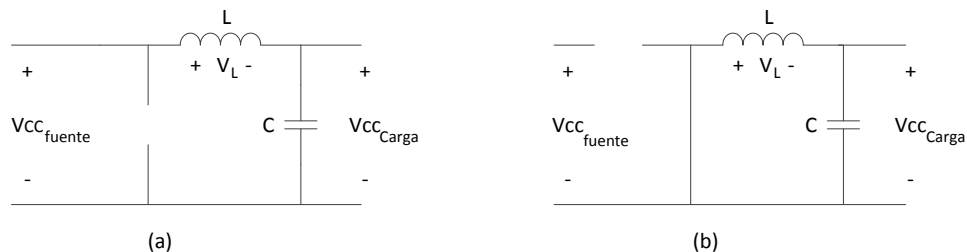


Figura 19 Fases de operación del conversor Boost.

Durante el estado (a), la ecuación de tensión que rige este circuito es:

$$V_L = L \frac{di_L}{dt} = V_{fuente} \quad (19)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{fuente}}{L} \quad (20)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{DT_{conmutación}} = \frac{V_{fuente}}{L} \quad (21)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_{fuente}}{L} \right) DT_{conmutación} \quad (22)$$

Durante el estado (b), la tensión tiene el siguiente comportamiento:

$$V_L = V_{fuente} - V_{carga} = L \frac{di_L}{dt} \quad (23)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \quad (24)$$

$$\Delta i_L = \left(\frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \right) (1 - D) T_{conmutación} \quad (25)$$

Para mantener un nivel de corriente estable y con un mínimo de variación es necesario que los Δi_L producidos durante la conducción y la no conducción del IGBT sean iguales, es decir que las ecuaciones ((22) y ((25) sean iguales:

$$\left(\frac{V_{fuente} - V_{carga}}{L} \right) (1 - D) T_{conmutación} = \left(\frac{V_{fuente}}{L} \right) D T_{conmutación} \quad (26)$$

Despejando V_{carga} :

$$V_{carga} = \frac{V_{fuente}}{1 - D} \rightarrow D = 1 - \frac{V_{fuente}}{V_{carga}} \quad (27)$$

Retomando la ecuación (22) y teniendo un valor de Δi_L fijo en el diseño, se tiene que el valor mínimo de la inductancia es:

$$L_{min} = \left(\frac{1 - \left(\frac{V_{fuente}}{V_{carga}} \right)}{\Delta i_L * f_{conmutación}} \right) V_{fuente} \quad (28)$$

Para calcular el capacitor se tiene en cuenta que:

$$Q = C * V_{carga} \rightarrow \Delta Q = C * \Delta V_{carga} \quad (29)$$

Si la corriente del capacitor es aproximada a una señal triangular tal como se muestra en el capítulo 6 de la referencia [14], ΔQ es:

$$\Delta V_{carga} = \frac{V_{carga} D T_{conmutación}}{\left(\frac{V_{carga}}{I_{carga}} \right) C} \quad (30)$$

$$\frac{\Delta V_{carga}}{V_{carga}} = \frac{1 - \left(\frac{V_{fuente}}{V_{carga}} \right)}{\left(\frac{V_{carga}}{I_{carga}} \right) C f_{conmutación}^2} \quad (31)$$

Y considerando que $\frac{\Delta V_{carga}}{V_{carga}}$ corresponde al rizado o cambio máximo deseado de la tensión de salida del boost y despejando C:

$$C_{min} = \frac{1 - \left(\frac{V_{carga}}{V_{fuente}} \right)}{\left(\frac{V_{carga}}{I_{carga}} \right) \left(\frac{\%rizado}{100} \right) f_{conmutación}^2} \quad (32)$$

Dónde:

C_{min} – Capacitancia mínima requerida.	V_{fuente} – Tensión en la fuente.	Δi_L – Maxima variación de corriente que circula por la inductancia.
L_{min} – Inductancia mínima requerida.	V_{carga} – Tensión en la carga.	$\%rizado$ – Máxima variación de tensión permitida en la tensión de carga
$f_{conmutación}$ – Frecuencia de conmutación del IGBT		

Este dispositivo se diseña para aumentar el nivel de tensión bipolar de 200 V a 240 V, es decir 40 V, con una frecuencia de conmutación de 25 kHz, un porcentaje de rizado de 0,001% y el máximo cambio de corriente es de 0,5 A teniendo como resultado un capacitor mínimo de 0,193323045 F y una inductancia mínima de 2,666667 mH. La configuración final del Boost es:

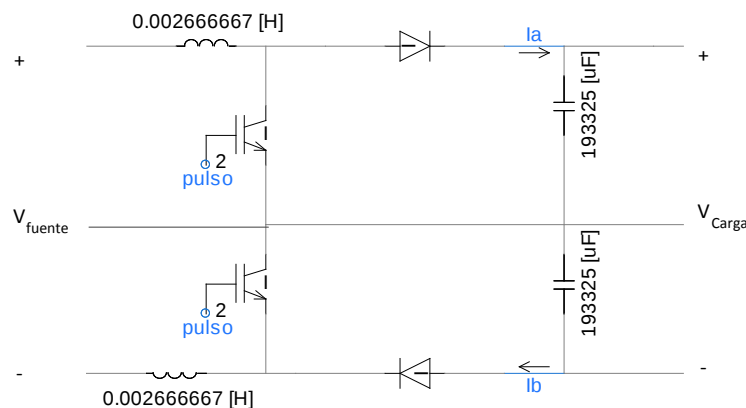


Figura 20 Diseño final del conversor Boost.

2.2.1. CALCULO DE COMPONENTES PASIVOS DEL CONVERTOR CA/CC.

Una vez los convertidores son diseñados, se procede a realizar los cálculos de los valores de los condensadores del rectificador ca/cc tomando el valor de corriente a carga nominal de 69 A, que incluye un 25% de pérdidas en la corriente, que circula hacia la carga. De acuerdo a [14], [19] y [41] se consideran 2 estados del capacitor, carga y descarga, cada uno con una respectiva ecuación:

$$V_C = \begin{cases} V_{L-N \text{ rms}}(\sin(120\pi t) - \sin(120\pi t - 120^\circ)), & \text{Carga del capacitor} \\ V_{L-N \text{ rms}}(\sin \theta - \sin(\theta - 120^\circ))e^{-(120\pi t - \alpha)/\omega RC}, & \text{Descarga del capacitor} \end{cases} \quad (33)$$

Dónde:

$V_{L-N \text{ rms}}$: Tensión rms de línea – neutro de ca.	θ : Angulo de inicio de la descarga del capacitor	R : Resistencia equivalente de la carga.
V_C : Tensión del capacitor	ω : Velocidad angular de la tensión de ca.	C : Capacitor equivalente a 200 V del rectificador

Si se considera que el ángulo en el cual la tensión de carga es igual a la tensión de descarga como $\pi/2 + \alpha$, tal como se muestra en la Figura 21.

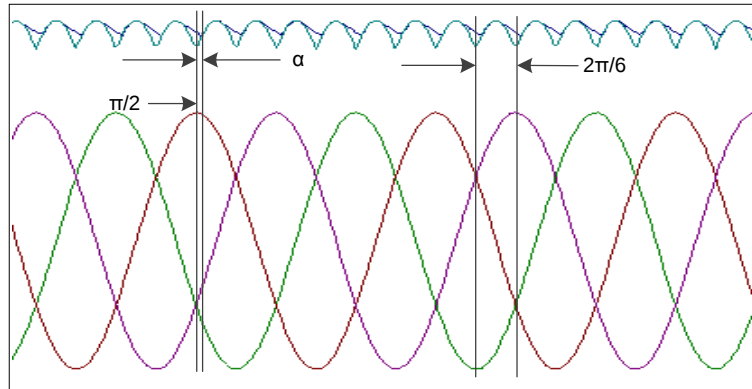


Figura 21 Rectificación de onda trifásica.

A demás de lo anterior, también se puede observar que el periodo de la señal rectificada es de $2\pi/6$ (60°); tomando estas consideraciones y reemplazándolas en la ecuación de descarga del condensador se tiene que:

$$V_{C_{min}} = V_{L-N \text{ rms}}(\sin(2\pi/6) - \sin(-2\pi/6))e^{-(\pi/2 + 2\pi/6 - 2\pi/6)/\omega RC} \quad (34)$$

$$V_{C_{min}} = V_{L-N \text{ rms}}(1,7321)e^{-(\pi/2)/\omega RC} \quad (35)$$

Utilizando las series de Fourier, la anterior ecuación se convierte en:

$$V_{cmin} = V_{L-N rms}(1,7321) \left(1 - \frac{\pi/2}{\omega RC}\right) \quad (36)$$

El rizo de la tensión de cc está dado por la resta de la máxima tensión de la carga del capacitor que será el nivel de tensión deseado y el mínimo de tensión que puede tener el capacitor (ecuación (36)):

$$\Delta V_{cc} = V_{cc} - V_{L-N rms}(1,7321) \left(1 - \frac{\pi}{2\omega RC}\right) \quad (37)$$

$$V_{cc} - \Delta V_{cc} = V_{L-N rms}(1,7321) \left(1 - \frac{\pi}{2\omega RC}\right) \quad (38)$$

Asumiendo que:

$$\Delta V_{cc} = V_{cc} \left(\frac{\%rizo}{100}\right) \quad (39)$$

Y despejando C:

$$C_{min2p} = \frac{1}{\left[1 - \left(\frac{V_{cc} - \left(V_{cc} \left(\frac{\%rizo}{100}\right)\right)}{V_{L-N rms}(1,7321)}\right)\right] 4f_{ca} \left(\frac{V_{cc}}{I_{cc}}\right)} \quad (40)$$

Para tener el mismo nivel de tensión en ambos polos del sistema de cc se asume que el capacitor anteriormente calculado es un arreglo en serie de dos capacitores idénticos, por lo que:

$$C_{min1p} = C_{min2p} / 2 \quad (41)$$

Dónde:

$V_{L-N rms}$: Tensión rms de línea
– neutro de ca.

$\%rizo$: máximo cambio de
tensión en porcentaje.

V_{cc} : Tensión de cc deseada.

I_{cc} : Corriente de carga del
sistema de cc.

f_{ca} : Frecuencia de la fuente
de ca.

C: Capacitor equivalente a
200 V (2p) o a 100 V (1p).

Para el modelo que se presenta en esta tesis se calcula un capacitor que cumpla con un nivel máximo de tensión de 200 V_{cc}, un rizo de 0,001%, una corriente de carga de 69 A,

alimentado por una fuente corriente alterna de 120 V a 60 Hz. El capacitor monopolar calculado es de 76744 μF y el circuito equivalente del rectificador es:

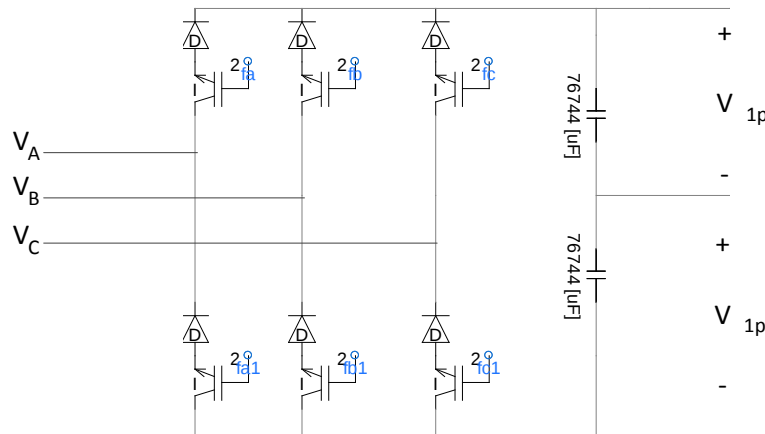


Figura 22 Diseño del rectificador trifásico.

2.2.2. SISTEMA DE CONTROL DE DISPARO DE IGBTs.

Como control de disparo de los IGBTs se utiliza el método SPWM, *Sinusoidal Pulse Width Modulation*, tal como se explicó en el ítem 1.3.3. De acuerdo a [18], este tipo de control ayuda a minimizar los armónicos inducidos a la red de ca siempre y cuando haya una buena selección de las constantes de la señal de referencia.

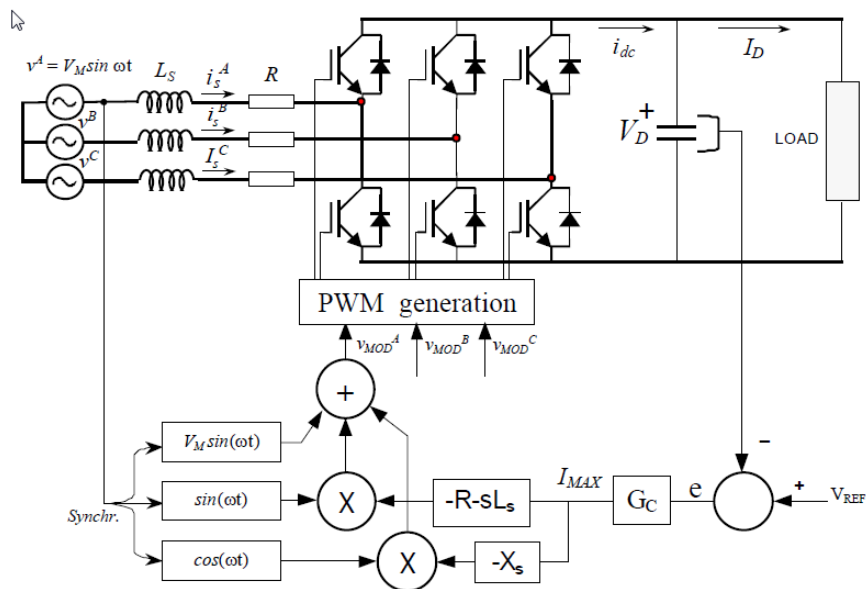


Figura 23 Diagrama esquemático del control de disparo de los IGBTs del rectificador trifásico [18].

Este tipo de control monitorea constantemente la tensión de salida del rectificador y la compara con un nivel de tensión de referencia generando un error que es procesado por un control PI, que a su vez genera una señal sinusoidal sincronizada con la fuente de ca

comparándola con una señal triangular para generar los pulsos de conducción de los IGBTs, el esquema completo de generación de pulsos se puede observar en la Figura 23.

Al igual que en cualquier sistema de control, se tiene una función objetivo con la cual se hace todo el procesamiento matemático para encontrar las constantes proporcional e integral que ayudan a converger el sistema a una salida muy cercana a su referencia. En la Figura 24, se muestra el diagrama de bloques de este control.

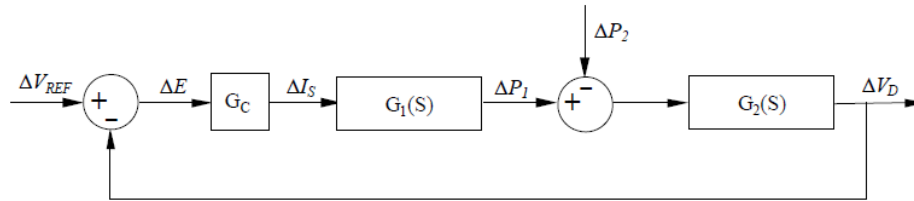


Figura 24 Diagrama de bloques del control [18].

Los bloques $G_1(s)$ y $G_2(s)$ corresponden a las funciones de transferencia del sistema, $G_1(s)$ corresponde a la relación entre la potencia de entrada y la tensión y $G_2(s)$ corresponde al cambio de energía almacenada en el capacitor.

$$G_1(s) = \frac{\Delta P_{in}(s)}{\Delta I_{in}(s)} = 3(V_{L-N} - 2R_{Trf}I_{in} - L_{Trf}I_{in}s) \quad (42)$$

$$G_2(s) = \frac{\Delta V_{cc}(s)}{\Delta P_{in}(s) - \Delta P_{out}(s)} = \frac{1}{V_{cc}Cs} \quad (43)$$

Dónde:

V_{L-N} : Valor de la tensión de alimentación ca.

R_{Trf} : Valor de la resistencia del transformador

I_{in} : Corriente de carga.

C : Capacitor del rectificador.

L_{Trf} : Inductancia del transformador.

V_{cc} : Tensión de salida en cc.

Tomando como base las anteriores ecuaciones, el criterio de estabilidad de control [44] y que en los circuitos reales la resistencia del transformador es despreciable en comparación con el valor de la impedancia, se tienen los siguientes criterios que sirven para hallar el valor máximo de K_p y de K_i del control PI:

$$I_{in} \leq \frac{V_{cc}2C_{1p}}{3K_pL_{Trf}} \quad (44)$$

$$I_{in} \leq \frac{K_pV_{L-N}}{L_{Trf}K_i} \quad (45)$$

Si tomamos un valor de corriente de carga de 69 A, tensión de salida en cc de 200 V, alimentación en ca de 120 V, capacitancia de 76744 μF y una impedancia de

transformador según sus datos de placa (ANEXO 4) de 14,2132 μH , la constante K_p máxima es 2586,066992 y K_i máxima es 318949870,98.

Debido a la naturaleza inestable del sistema de rectificación, después de 1,2 segundos aproximadamente el sistema pierde estabilidad y se hace necesario recalcular nuevas constantes de control que permitan tener una salida de tensión estable a un tiempo razonable. Para conseguir los nuevos valores de estas constantes se recurre al método de prueba y error; y se obtienen unas constantes finales de $K_p=7$ y $K_i=7000$ con una estabilidad en la tensión de salida de 200,5 V a full carga en 1,4 s.

- Señal Portadora

Para producir los pulsos de conducción de los IGBTs se utiliza una señal triangular que se compara con la señal de salida del anterior control; esta señal triangular debe cumplir con los requisitos de amplitud y frecuencia dados por las ecuaciones (46) y (47):

$$m = \frac{V_{control_{max}}}{V_{Triang_{max}}} \quad (46)$$

$$p = \frac{f_{Triang}}{f_{ca}} \quad (47)$$

Siendo m el factor de modulación de la amplitud y p el factor de modulación de la frecuencia. Según [18] y [45], para mejorar los niveles de distorsión armónica se debe escoger una modulación de amplitud entre 0,1 y 1, y la modulación de frecuencia debe ser múltiplo de 3 para tener una modulación idéntica en las tres fases e impar para eliminar los armónicos pares [18]. De acuerdo a lo anterior, se escoge una modulación de amplitud de 0,8 y una modulación de frecuencia de 81 para obtener una señal de control como se muestra en la Figura 25 y los pulsos que se pueden observar en la Figura 26.

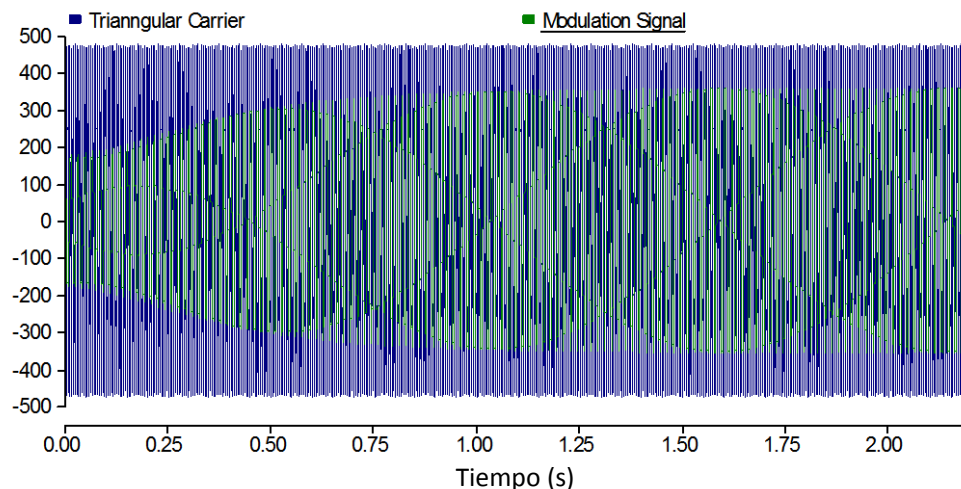


Figura 25 Señales de control senoidal (verde) y triangular portadora (azul).

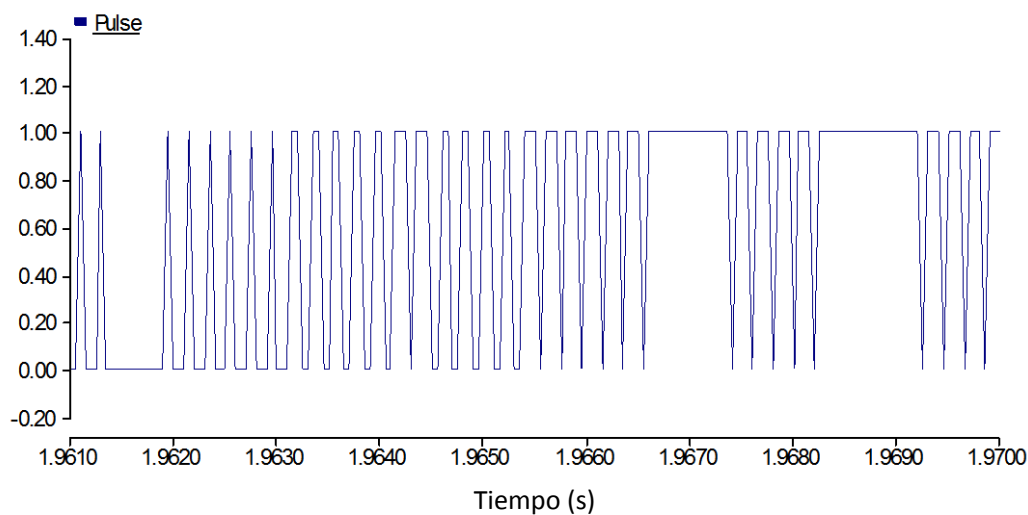


Figura 26 Pulsos generados por el control de tensión PWM.

2.2.3. CALCULO DE COMPONENTES DEL FILTRO DE ARMÓNICOS RLC.

Por último se diseñan los filtros que ayudaran a minimizar la presencia de armónicos en el lado de ca. Se diseña un filtro trifásico activo supresor de banda RLC serie, con el 5º armónico como armónico central de la banda, en la Figura 27 se puede observar su diagrama esquemático.

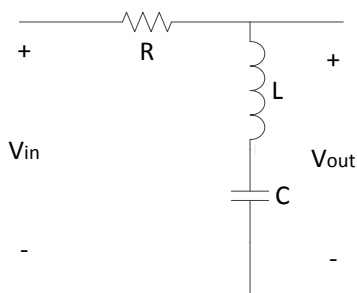


Figura 27 Diagrama esquemático del filtro activo de banda eliminada.

Siguiendo la metodología de diseño expuesta en [46], se busca que la respuesta en frecuencia del filtro sea como lo muestra la Figura 28 con ω_0 correspondiente al 5º armónico (1884,96 rad/s).

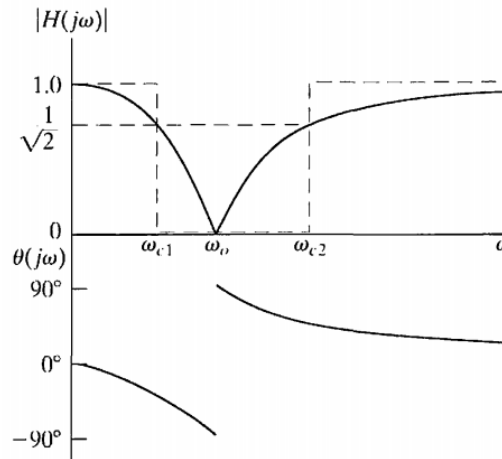


Figura 28 Respuesta en frecuencia de un filtro de banda eliminada [46].

Las ecuaciones de transferencia de magnitud y ángulo de este filtro son:

$$|H(j\omega)| = \frac{\left| \frac{1}{LC} - \omega^2 \right|}{\sqrt{\left(\frac{1}{LC} - \omega^2 \right)^2 + \left(\frac{\omega R}{L} \right)^2}} \quad (48)$$

$$\theta(j\omega) = -\tan^{-1} \left(\frac{\frac{\omega R}{L}}{\frac{1}{LC} - \omega^2} \right) \quad (49)$$

La frecuencia de corte o la frecuencia central de banda está definida para una ganancia $|H(j\omega)|=0$ y las frecuencias ω_{c1} y ω_{c2} están definidas por una ganancia de $|H(j\omega)|=1/\sqrt{2}$, luego estas frecuencias pueden ser calculadas según las ecuaciones (50), (51) y (52).

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (50)$$

$$\omega_{c1} = -\frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (51)$$

$$\omega_{c2} = \frac{R}{2L} + \sqrt{\left(\frac{R}{2L} \right)^2 + \frac{1}{LC}} \quad (52)$$

Tomando las ecuaciones (51) y (52) para determinar el ancho de banda (β) y el factor de calidad (Q), por lo que se tienen las siguientes ecuaciones para su cálculo:

$$\beta = \frac{R}{L} \quad (53)$$

$$Q = \sqrt{\frac{L}{R^2 C}} \quad (54)$$

Debido a que las ecuaciones (50), (51) y (52) no tienen una única respuesta, se hace necesario fijar un valor para una de las componentes y calcular las otras dos tomando como base las anteriores 2 ecuaciones. Según [46] y [47], el factor de calidad de los filtros proporciona una medida de la anchura de la banda de paso, medida que es independiente de la ubicación de la banda dentro del eje de frecuencias; se recomienda que este valor este entre 0 y 200; entre mas alto el factor de calidad, es mejor la selectividad del armónico central pero el ancho de banda es muy reducido; caso contrario si se escoge un factor de calidad pequeño, sin embargo es muy probable que la atenuación de los armónicos no sea la mejor y sigan presentes en la red eléctrica.

Para el modelo presentado en este proyecto de grado, se escoge el 5º armónico como frecuencia central de banda, un factor de calidad de 150 y como elemento fijo se tiene una resistencia de 0,01 Ω , a partir de estos valores se calcula un capacitor de 353,678 μF y un inductor de 795,775 μH , el circuito final se puede apreciar en la Figura 29, y minimiza el 4º, 5º y 6º armónico.

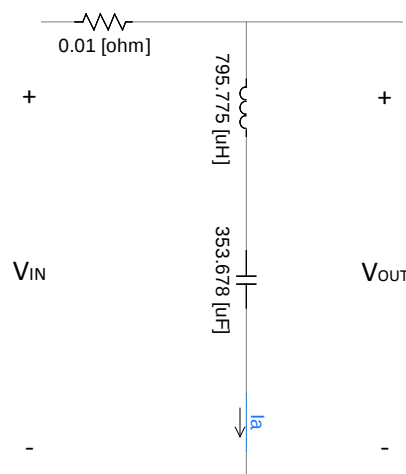


Figura 29 Filtro de armónicos.

2.2.4. METODOLOGÍA DE DISEÑO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.

Como resultado de los pasos seguidos para diseñar la red de distribución en cc, se pone en consideración una metodología de diseño de redes de distribución en cc que es presentada en la Figura 30.

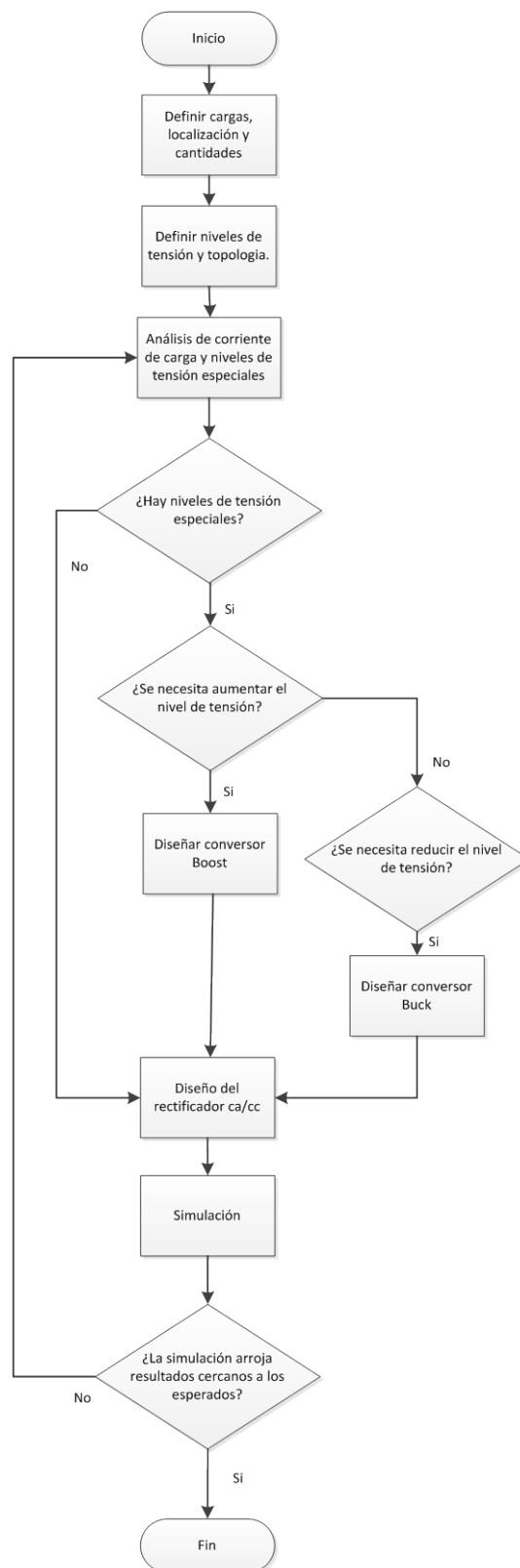


Figura 30 Diagrama de flujo de la metodología de diseño de redes de cc.

- Definir cargas, localización y cantidades: Se necesita conocer el tipo de carga que se desea conectar a la red, su localización geográfica con medidas reales y la cantidad de cada una de ellas, si su disposición física incluye arreglos en serie o en paralelo entre cargas de un mismo circuito así como la de los circuitos de la carga, niveles de tensión y corriente admisibles por cada una de ellas.
- Definir niveles de tensión y topología: Una vez definidas las cargas y sus características, se establecen los niveles de tensión a los cuales se energizarán; adicional a esto se detalla la topología del circuito que va muy de la mano con los niveles tensión que se utilizarán en la red. Recordando el capítulo 1, estas topologías pueden ser monopolar o bipolar.
- Análisis de corriente de carga y niveles de tensión especiales: En este paso del proceso se realiza el cálculo de la corriente total consumida por la carga y se especifican los valores de tensión especiales requeridos por las cargas; estos valores de tensión deben estar por fuera de los valores establecidos en el paso anterior.
- Diseño del convertidor Boost: Si del análisis de corriente y tensiones de carga se especifican niveles de tensión mayores a los a los valores nominales de la red, es necesario diseñar un convertidor Boost de acuerdo al ítem 2.2.2.
- Diseño del convertidor Buck: Si por el contrario al paso anterior, lo que se necesita es reducir el nivel de tensión para alimentar alguna carga en especial, se utiliza un convertidor tipo Buck según el ítem 2.2.2.
- Diseño del rectificador ca/cc: Una vez se tienen las corrientes de carga calculadas, y los niveles de tensión nominales y especiales debidamente establecidos; se procede a calcular los capacitores del convertidor ca/cc. Paralelo al cálculo de los capacitores, también se realiza el diseño del control de disparo de los IGBTs que debe garantizar estabilidad del sistema, mínimo error en la respuesta y reducción de armónicos en ca.
- Simulación: En este paso se construye el modelo de la red de cc que se desee estudiar o verificar, se debe tener presente si los conductores a utilizar son especificados por normas vigentes de redes de distribución o si por el contrario pueden ser seleccionados libremente para que cumplan con la regulación vigente. Se realizan diferentes simulaciones bajo distintos escenarios de carga para verificar que sus resultados sean acordes a los cálculos previamente realizados; si estos resultados son acorde a los cálculos teóricos de los pasos anteriores, se puede decir que el modelo queda terminado.

Una vez se han calculado los componentes pasivos que componen la red y se tiene definida la ubicación espacial de las cargas junto con las distancias a las cuales se encuentran, se realizan las simulaciones que permiten determinar las características funcionales de la red a plena carga, y los escenarios en los cuales se presenta el mejor rendimiento y el peor rendimiento de la red. Estos casos se presentan en el Capítulo 3.

3. SIMULACIONES Y RESULTADOS

Con el modelo construido y probado, se realizaron 64 simulaciones bajo distintos escenarios de carga para poder determinar el mejor y peor escenario de operación de la red de distribución en cc, estos casos fueron seleccionados de acuerdo al factor de potencia calculado en el lado de ca. En la siguiente tabla se enlistan todos los casos simulados:

Caso	Carga	Estado
1	Usuario 2 y 4: Cocina	On
	Usuario 2 y 4: Habitación	On
	Usuario 2 y 4: Iluminación	Off
	Motor cc	On
	Iluminación LED	Off
	Cargador de VE	Off
2	Usuario 2 y 4: Cocina	Off
	Usuario 2 y 4: Habitación	On
	Usuario 2 y 4: Iluminación	On
	Motor cc	On
	Iluminación LED	Off
	Cargador de EV	Off
3	Usuario 2 y 4: Cocina	On
	Usuario 2 y 4: Habitación	Off
	Usuario 2 y 4: Iluminación	On
	Motor cc	On
	Iluminación LED	Off
	Cargador de EV	Off
4	Usuario 2 y 4: Cocina	On
	Usuario 2 y 4: Habitación	On
	Usuario 2 y 4: Iluminación. La mitad de las luminarias prendidas, es decir, la mitad de un tipo de luminaria, más la mitad del otro tipo de luminaria.	On 50%
	Motor cc	On
	Iluminación LED	On 50%
	Cargador de EV	Off

Caso	Carga	Estado
5	Usuario 2 y 4: Cocina	On
	Usuario 2 y 4: Habitación	On
	Usuario 2 y 4: Iluminación	On
	Panel Solar	On
	Motor cc	On
	Iluminación LED	On
	Cargador de EV	On
6	Usuario 2	Off
	Usuario 4	On
	Motor cc	On
	Iluminación LED	On
	Cargador de EV	On
7	Usuario 2	On
	Usuario 4	Off
	Motor cc	On
	Iluminación LED	On
	Cargador de EV	On
8,9,10	Repetir casos 1, 2 y 3 con la iluminación led encendida	
11,12,13	Repetir casos 1, 2 y 3 con la iluminación led y el cargador EV encendido.	
14, 15, 16, 17	Repetir casos 1, 2, 3 y 4 con el cargador de EV encendido	
18,19,20	Repetir casos 11, 12 y 13 con el motor apagado.	
21,22,23	Repetir casos 1, 2 y 3 con la iluminación led encendida y el motor al 50% de carga	
24,25	Casos 6 y 7 con el motor al 50%	
26	Caso 4 con todas las cargas al 50%	
27-43	Repetir todos los casos pero con el motor al 25%.Excepto del caso 18 al 26	
44-60	Repetir todos los casos pero con el motor al 75%.Excepto del caso 18 al 26	
61-64	Repetir todos los casos 14, 15, 16 y 5 pero con el motor al 50% y el EV encendido.	

Tabla 6 Casos de simulación.

3.1. CASO 5: CARGA NOMINAL

Debido a que en este caso se tiene toda la carga conectada al 100%, es el caso propicio para realizar los cálculos de diseño de la red de cc; además de que es el caso base para comparar los distintos escenarios de carga que se simularon.

En esta simulación, el rectificador arroja un valor de tensión en cc de $200,5 V_{2p}$ y $103 V_{1p}$ y una forma de onda como se muestra en la Figura 31; el sistema logra su estabilización a los 1,25 s aproximadamente, lo que indica que el control de disparo de los IGBTs funciona de forma correcta y acertada.

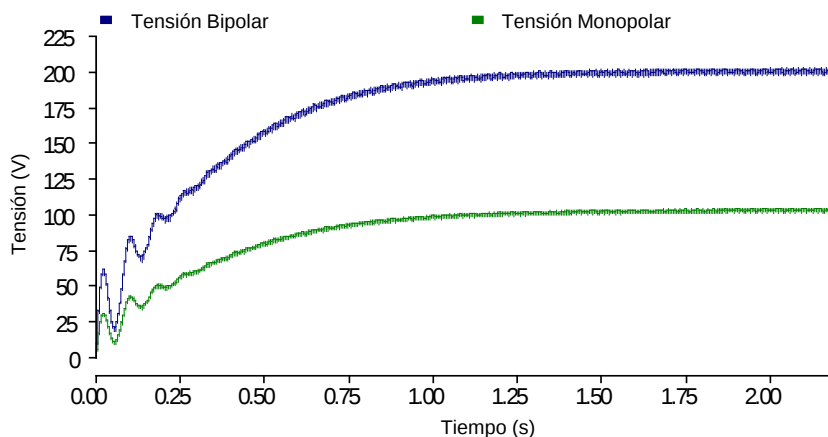


Figura 31 Tensión rectificada de cc.

Sin embargo esta tensión no es totalmente lineal y presenta un rizado de más del 0,01% del que fue diseñado; su mínima tensión de rizado es de 199,6 V para obtener un porcentaje de rizado de 0,45%.

En las siguientes gráficas se muestra la respuesta del control de disparo de los IGBTs durante el tiempo de simulación y los pulsos generados por este control.

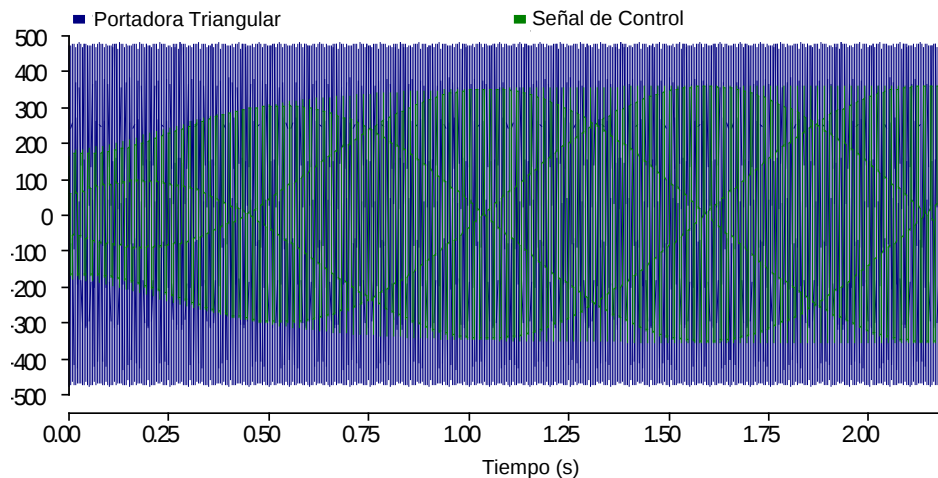


Figura 32 Evolución del sistema de control durante el tiempo de simulación

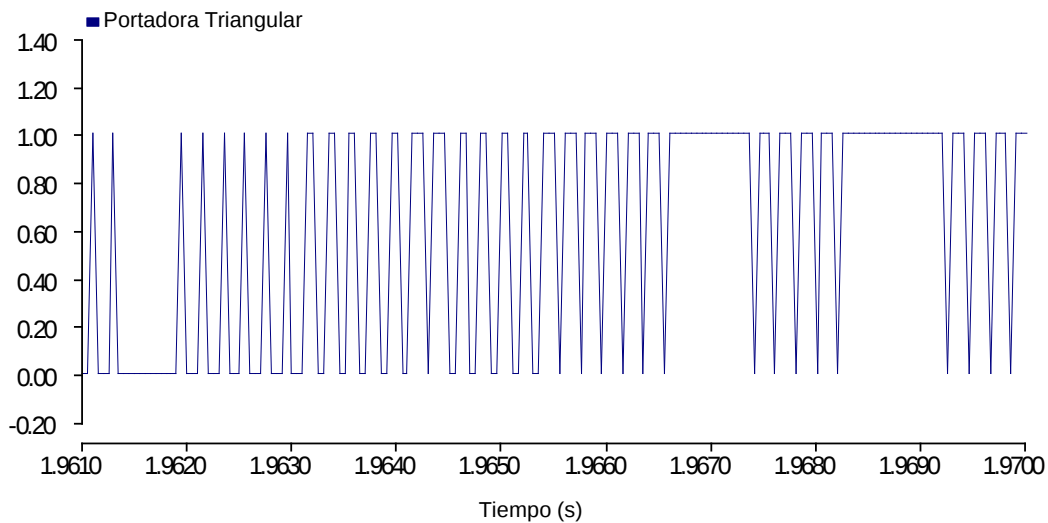


Figura 33 Tren de pulsos generados para disparo de los IGBTs.

La corriente consumida por la carga, en este caso de simulación, es de 68,63 A y su forma de onda es como se muestra en la Figura 34.

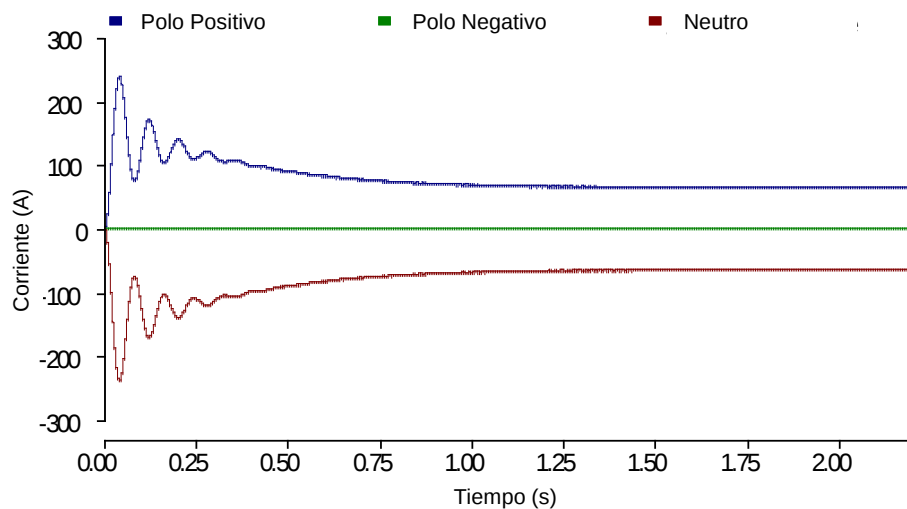


Figura 34 Corriente de carga.

Al detallar la forma de onda de la corriente de carga, se puede apreciar un transitorio que se va atenuando a medida que transcurre el tiempo; este transitorio es ocasionado por las componentes inductivas y capacitivas presentes en la red, ya sea de las cargas o de los convertidores y rectificador que deben alcanzar la totalidad de su capacidad de almacenamiento de energía para ofrecer una salida de corriente relativamente estable.

Como salida del convertidor Boost, se tienen $237 V_{2p}$, $121,7 V_{1pos}$ y $115 V_{1neg}$, ver Figura 35. A pesar que este dispositivo fue diseñado para aumentar el nivel de tensión bipolar en 40 V, en la simulación se obtiene un aumento de 37 V bipolares. Este dispositivo no solo

proporciona un aumento de la tensión sino que también mejora el rizado de la misma, obteniéndose una tensión mucho más estable y con rangos de variación admisibles por los dispositivos electrónicos conectados a la red.

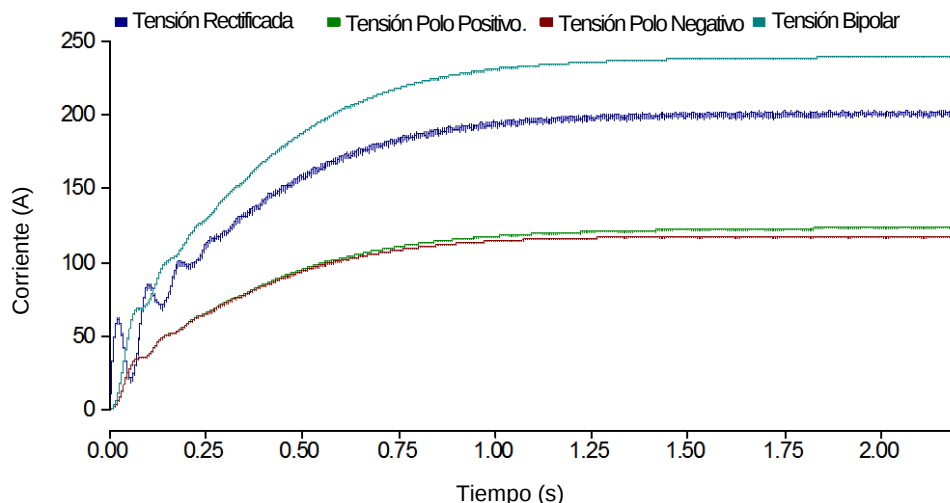


Figura 35 Tensiones de cc de la red de distribución.

Otra señal importante de la red de cc, es la cantidad de potencia consumida por la carga. De acuerdo a la simulación, la potencia activa consumida por la red de cc es de 7,65 kW, Figura 36.

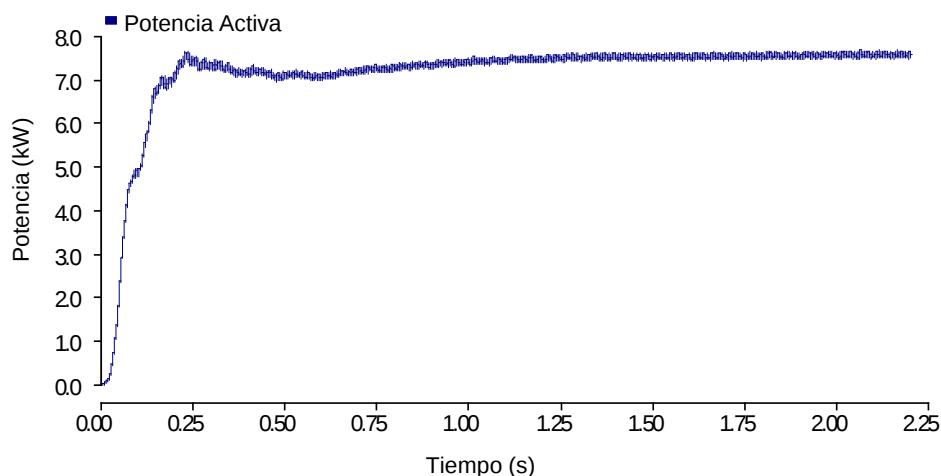


Figura 36 Potencia activa consumida por un polo de la red de cc.

Sin embargo, la cantidad de potencia aparente consumida por la red calculada con los datos de ca es de 12,832 kVA y el factor de potencia (fp) calculado es de 0,6; valor que no cumple con los estándares nacionales e internacionales de calidad de potencia en los cuales se estipula que se debe tener un fp mayor o igual a 0,9 para garantizar una red con baja presencia de armónicos y pérdidas de potencia.

A pesar de que se hace un diseño de la red de cc siguiendo las pautas y los conceptos teóricos de la electrónica de potencia y de las redes de distribución en baja tensión, la tensión en ca presenta distorsiones que afectan su índice de calidad de potencia y tensiones.

Debido al accionamiento de los IGBTs del puente de rectificación y de los convertidores cc/cc, se introducen armónicos y picos de tensión en la red de ca, ver Figura 37; los armónicos son reducidos por acción del filtro de armónicos diseñado en el numeral 2.2.3 obteniendo una distorsión armónica máxima de 3,7% en la fase A, menor al límite de 5% especificado en las normas internacionales; sin embargo, se siguen presentando picos de tensión que pueden alcanzar los 1500 V y distorsionan la onda de tensión, además pueden ocasionar daños a los distintos elementos eléctricos y electrónicos conectados a la red

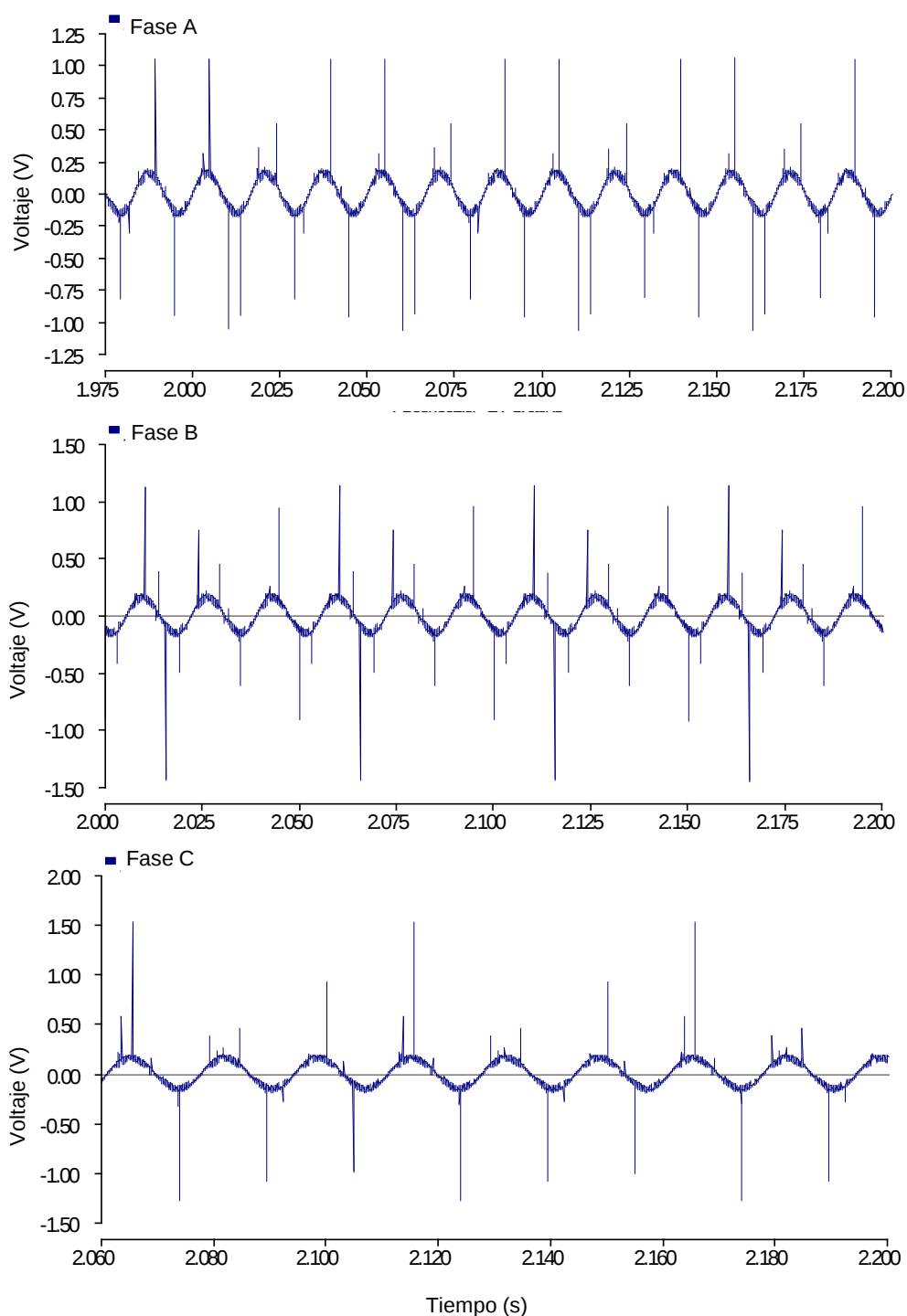


Figura 37 Tensiones de ca.

En la Figura 38 se muestran las ondas de corriente de alterna, en ellas se puede observar que el accionamiento de los IGBTs embebidos en el sistema de cc distorsiona la onda elemental introduciendo componentes armónicas y para minimizar estas componentes se

disponen de distintas técnicas y herramientas como los filtros activos y pasivos, así como con nuevos sistemas de control optimizado.

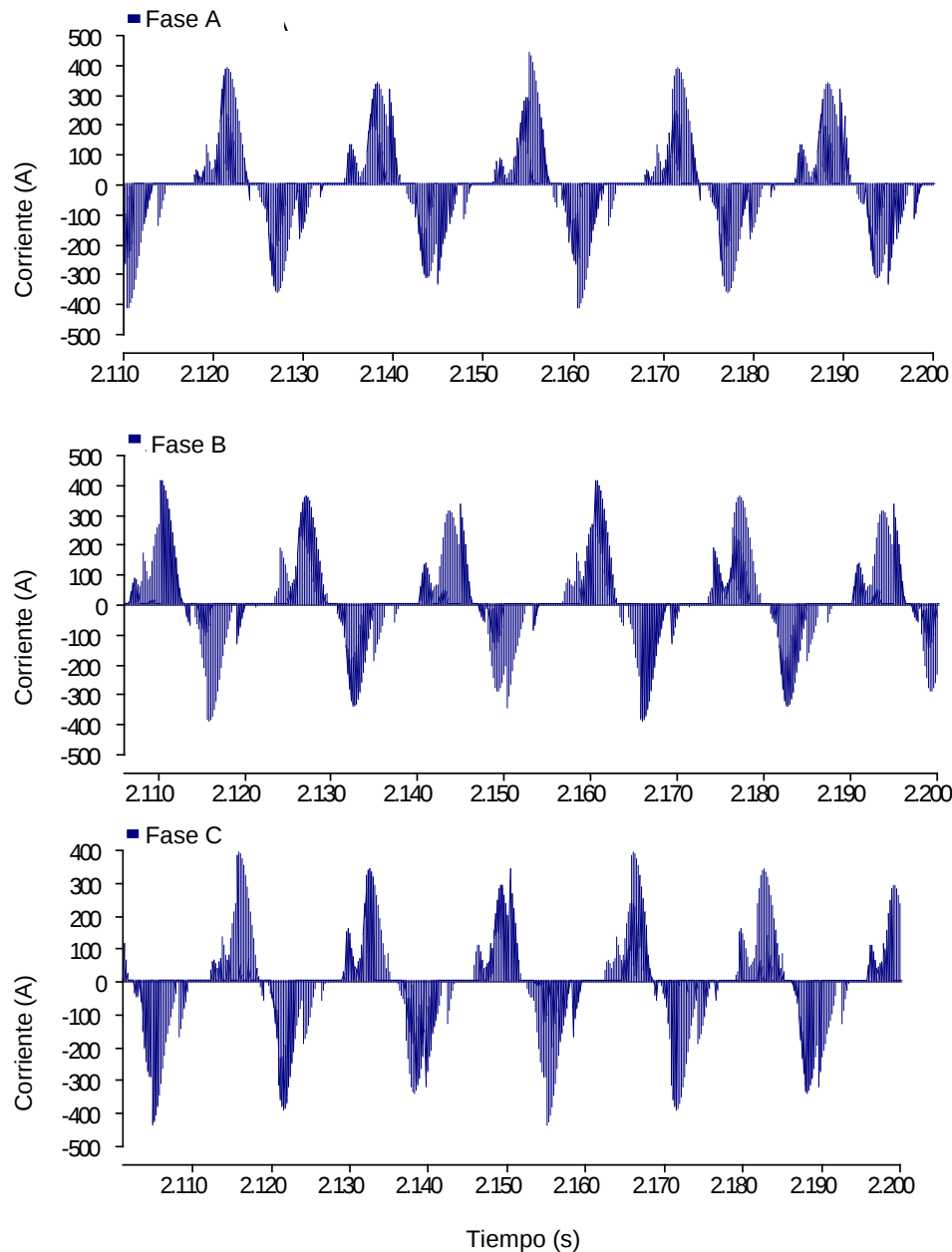


Figura 38 Corrientes de ca.

En las distintas investigaciones publicadas como [2], [8] y [15], se enuncia la mayor capacidad de transmisión de potencia de las redes de cc en comparación con las redes de ca debido a la ausencia del efecto piel de los conductores utilizados. Para este modelo se utilizó el cable ACSR 2/0 definido en el RETIE [39] y en las normas de los operadores de red como EPM S.A. E.S.P. [48] y ESSA S.A. E.S.P.[49] como el conductor que debe

ser utilizado para las redes de distribución y debe cumplir con el 5% de regulación de tensión en el punto más lejano de la red. En la red modelada se calcula la regulación en terminales del motor de cc, en terminales de la iluminación LED y en terminales de la vivienda estrato 4.

Nodo	Tensión (V)	Regulación
Motor cc	119	2,22%
Vivienda estrato 4	121,4	0,247%
Iluminación LED	121	0,575%

Tabla 7 Regulación de la tensión en la red de cc.

A pesar de que el motor de cc se encuentra a 190 m de la salida del conversor de cc/cc, se tiene una regulación de tensión bastante buena de 2,22%, menor que la regulación estipulada del 5%.

Si se quisiera ser estricto con cumplir la regulación del 5%, se necesitaría calcular el conductor que cumpla con este criterio y para esto se tiene en cuenta que se debe cumplir la regulación en el punto más lejano de la red que sería el punto de conexión del motor de cc y por lo tanto:

$$V_0 = 121,7 \text{ V}; I = 30 \text{ A}; \text{regulación} = 5\%; L = 190 \text{ m}$$

$$V_{conductor} = \frac{V_0(\text{regulación})}{100} = \frac{121,7(5)}{100} = 6,085 \text{ V} \quad (55)$$

$$R_{conductor} = \frac{V_{conductor}}{I} = \frac{6,085}{30} = 0,203 \text{ } \Omega \quad (56)$$

$$\rho_{conductor} = \frac{R_{conductor}}{L} = \frac{0,203}{0,19} = 1,0675 \text{ } \Omega/\text{km} \quad (57)$$

De acuerdo al anterior resultado el conductor que más se aproxima es el 3 AWG o Golondrina que tiene una resistividad en cc de 1,114 Ω/km y tiene una regulación del 5,217%. De esto se concluye que si es posible utilizar conductores de menos calibre para cumplir con las regulaciones vigentes o que con el mismo conductor propuesto por la norma eléctrica Colombia [39], 2/0 AWG, es posible aumentar la distancia de las redes de distribución y suministrar energía a usuarios finales más lejanos.

Por otro lado; si se mantiene el conductor 2/0 AWG que se especifica en las normas [39] y [48], se puede transmitir energía a una distancia de 487,58 m con 5% en la regulación de la tensión según lo calculado en las siguientes ecuaciones:

$$V_0 = 121,7 \text{ V}; I = 30 \text{ A}; \text{regulación} = 5\%; \rho_{\text{conductor}} = 0,416 \Omega/\text{km}$$

$$V_{\text{conductor}} = \frac{V_0(\text{regulación})}{100} = \frac{121,7(5)}{100} = 6,085 \text{ V} \quad (58)$$

$$R_{\text{conductor}} = \frac{V_{\text{conductor}}}{I} = \frac{6,085}{30} = 0,203 \Omega \quad (59)$$

$$L = \frac{R_{\text{conductor}}}{\rho_{\text{conductor}}} = \frac{0,203}{0,416} * 1000 = 487,58 \text{ m}. \quad (60)$$

3.2. MEJOR RENDIMIENTO: CASO 10.

En este caso de simulación se tienen todas las cargas encendidas al 100% exceptuando el circuito de la habitación de cada una de las viviendas y el cargador de la batería del VE que se encuentran apagados. El factor de potencia calculado es de 0,74 y su máxima distorsión armónica es de 3,75 en la fase A. En la Figura 39 se pueden observar las curvas de tensión rectificada.

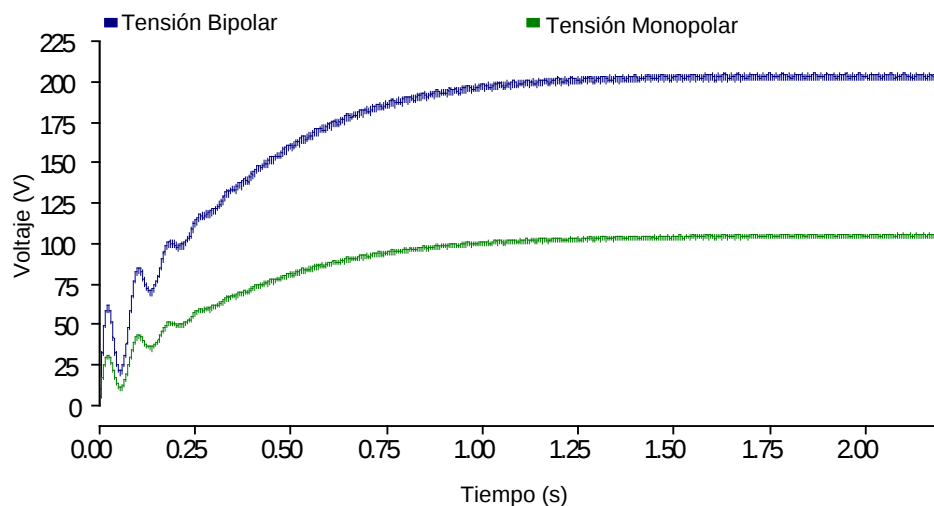


Figura 39 Tensión rectificada en el caso 10.

En este caso de simulación, la tensión de salida del rectificador es de 200,5 V bipolar y 100,25 V monopolar, 5 V más que en el caso de carga nominal y se reduce el tiempo de estabilización del sistema a 1 s debido a que las componentes capacitivas de los computadores y los monitores del circuito no están presentes. Estas componentes contribuyen a aumentar la componente capacitiva del circuito y el tiempo de estabilización del mismo; fenómeno que también se ve reflejado en las ondas de corriente de la Figura 40.

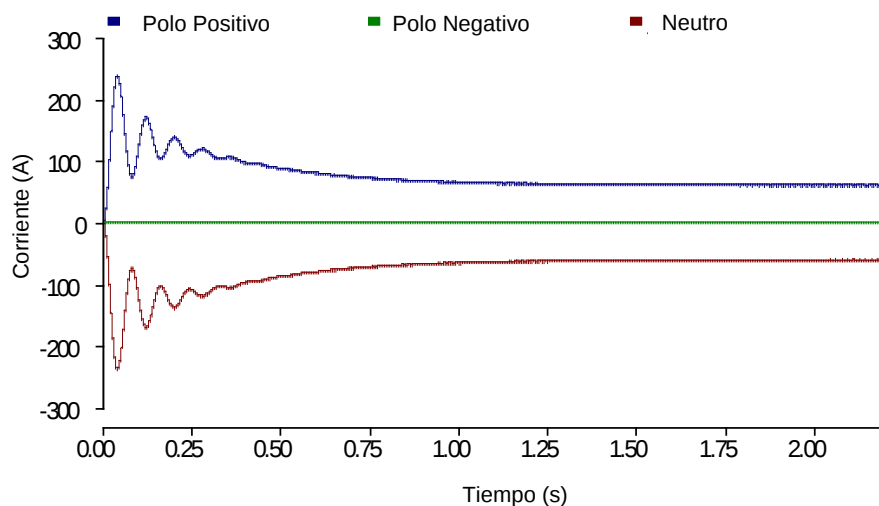


Figura 40 Ondas de corriente de cc del caso 10.

La corriente de carga también se ve afectada por la reducción de los elementos conectados, en este caso se reduce en 9,33 A, para un total de corriente consumida por la red de 50,67 A.

La salida de tensión del convertor cc/cc es de 238,2 V bipolares, ver Figura 41; aumenta 1,2 V con respecto a la misma tensión de salida en el caso de simulación de carga nominal.

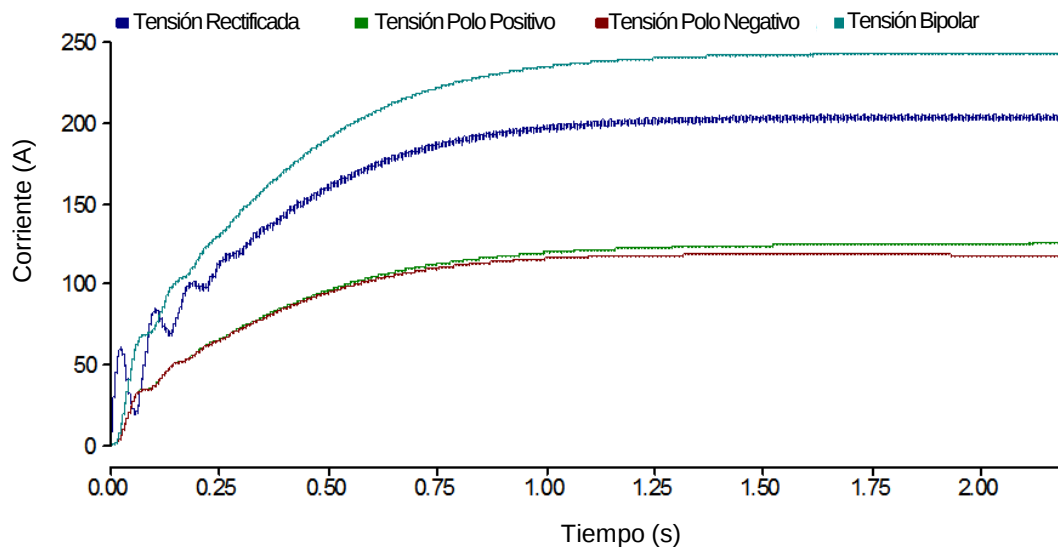


Figura 41 Tensiones de salida del convertor Boost.

Al igual que en las redes de distribución en ca, la tensión de operación de la red tiende a aumentar cuando se desconecta carga, lo que lleva a considerar que se necesitan compensadores (SVC) cuando la red tiene un tamaño considerable y cargas de un

determinado tamaño, que en caso de estas cargas se desconecten pueda presentarse desbalance de la red de cc.

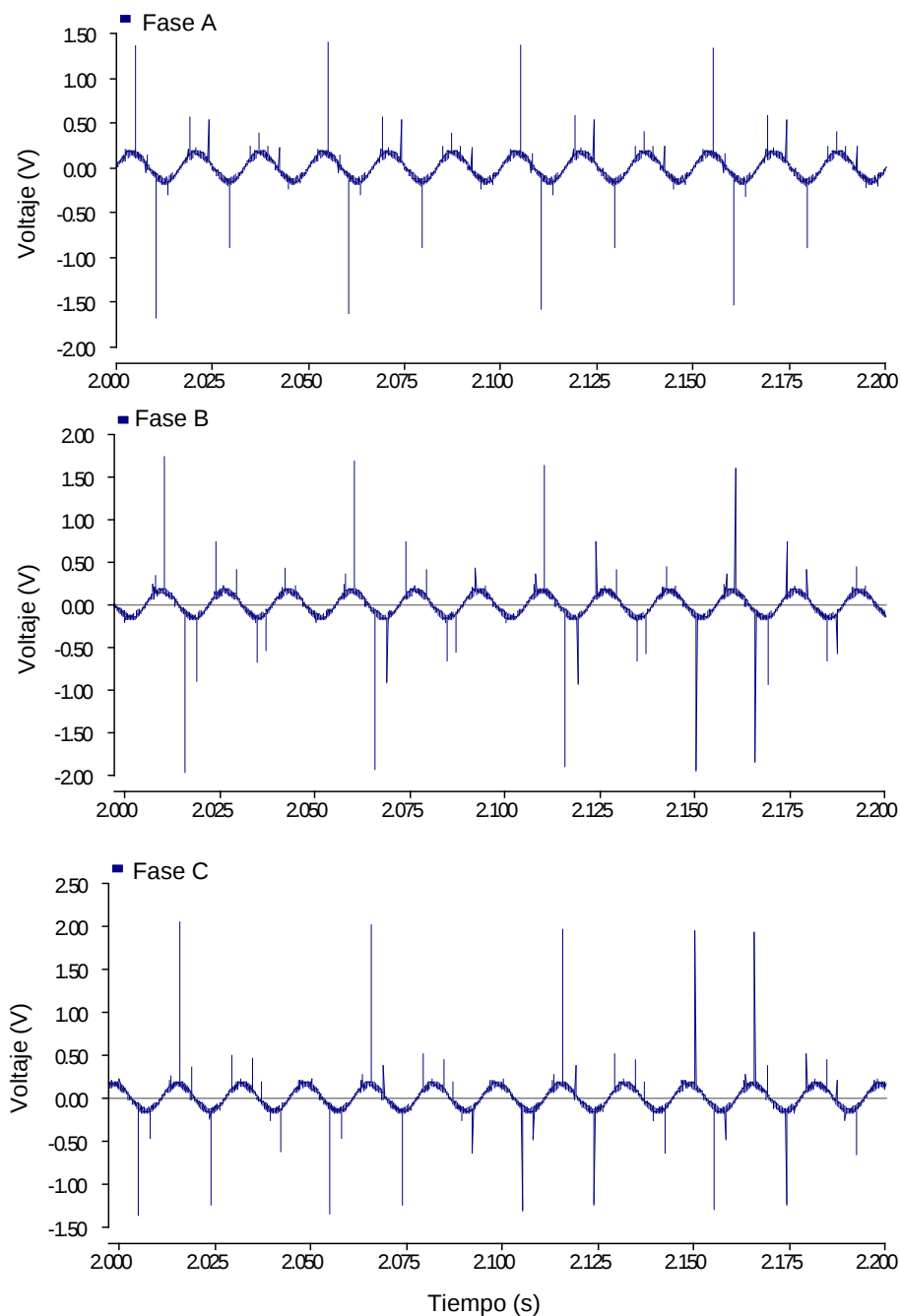


Figura 42 Tensiones en ca, caso 10.

La máxima distorsión armónica presente en este caso es del 3,753% en la fase A, que a comparación del caso de carga nominal permanece constante y no mejora en presencia de la desconexión de carga.

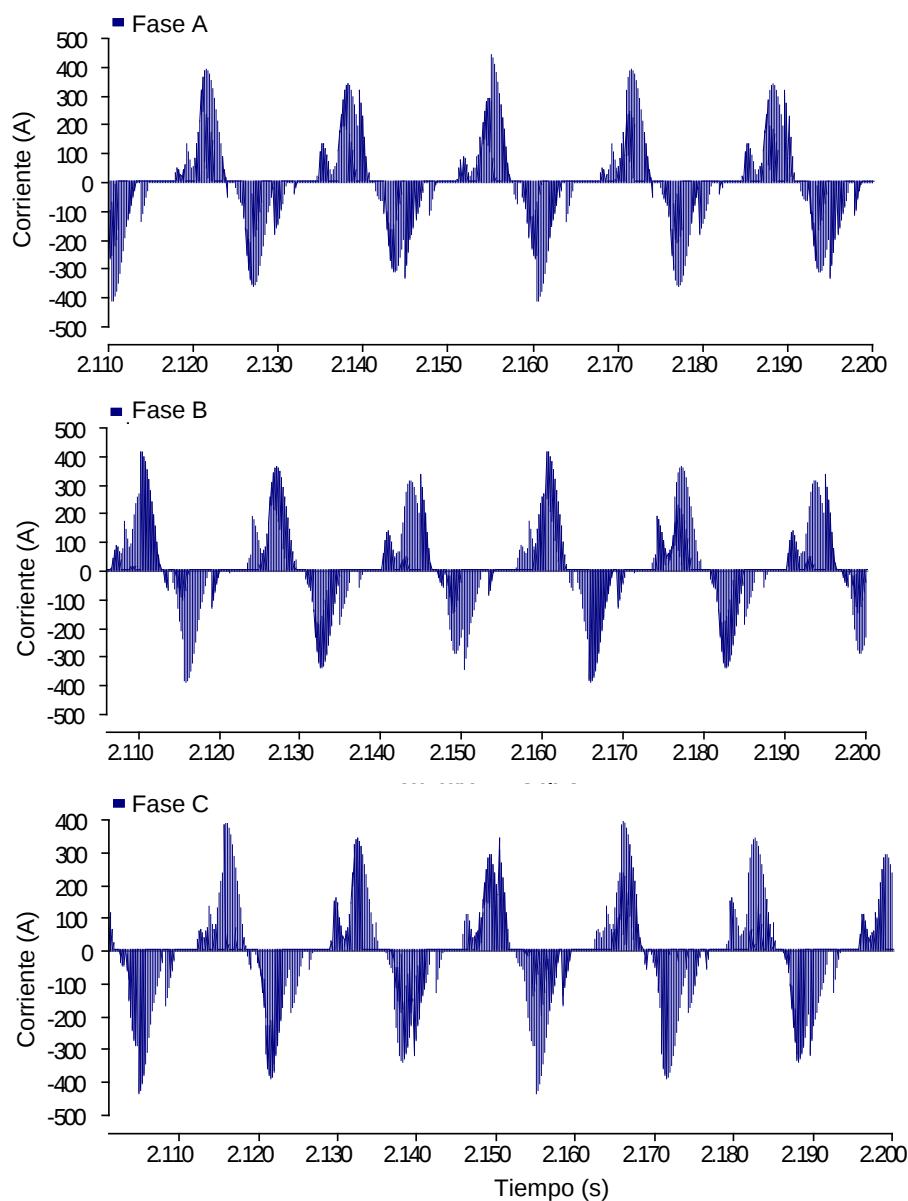


Figura 43 Corrientes de ca, caso 10.

En cuanto a las corrientes de ca, Figura 43, permanecen con la misma distorsión que en el caso de carga nominal. La desconexión de carga no es un factor de alto impacto para mejorar la distorsión armónica en ca.

3.3. PEOR RENDIMIENTO: CASO 26

Para este caso se configuraron todas las cargas al 50%, exceptuando el cargador del vehículo eléctrico que se encuentra al 100%, ya que la batería consume 30 A constantes sin importar su nivel de carga; este caso fue tomado como el escenario de peor funcionamiento debido a que el factor de potencia calculado es de 0,54 y la máxima distorsión armónica es de 4,01% en la fase A.

La salida de tensión rectificada es de 228 V bipolares, 28 V más que la salida de tensión en el caso de carga nominal, y el sistema alcanza su estabilidad a los 1,5 s aproximadamente. Ver Figura 44.

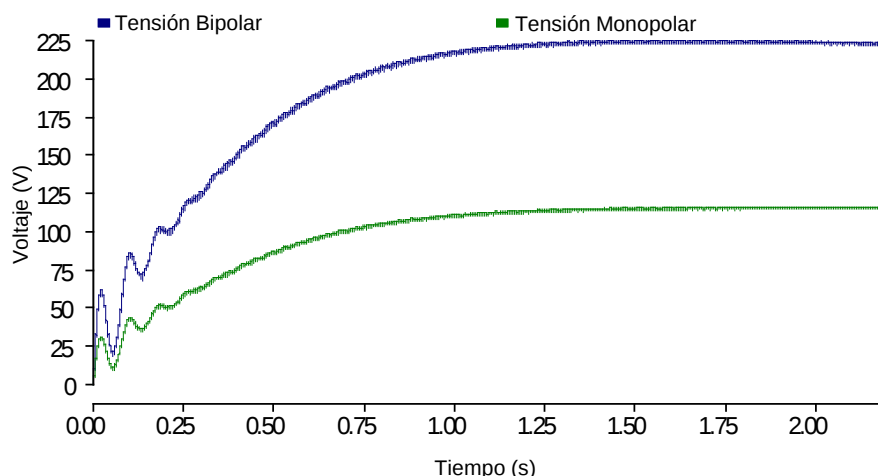


Figura 44 Tensión rectificada, caso 26.

La corriente total consumida por la red de cc es de 46,6 A, 17 A menos que el caso de carga nominal y coincide con la estabilización de tensión a los 1,5 s, ver Figura 45; este retraso en la estabilización del sistema se debe a la desconexión de cargas resistivas, lo que hace que su impedancia equivalente tenga una componente capacitiva mayor aumente la constante de tiempo de los capacitores del rectificador ca/cc. En este caso ocurre el mismo fenómeno de aumento de la tensión de operación del sistema y con mayor impacto debido a una mayor reducción de la carga en comparación con el caso de mejor rendimiento (caso 10).

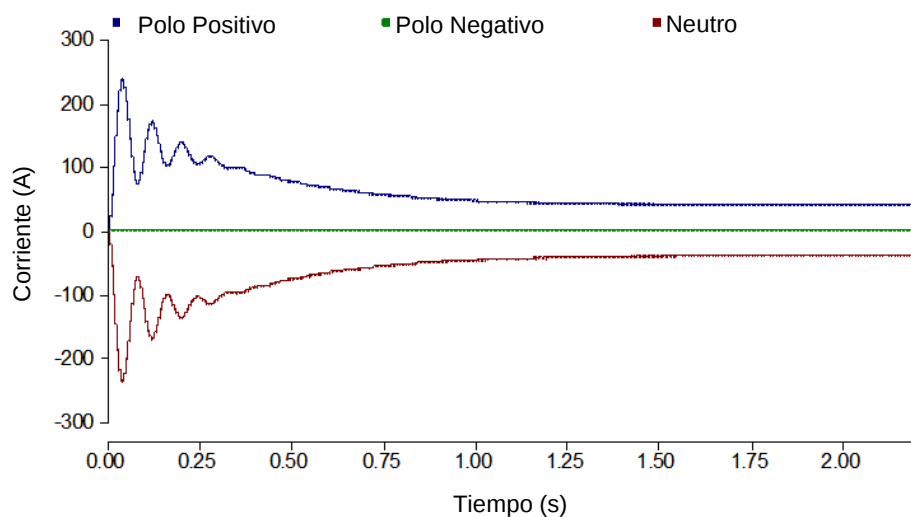


Figura 45 Corrientes de cc, caso 26.

En la Figura 46 se puede ver la tensión de cc en la salida del conversor Boost, la cual tiene un nivel de tensión de 264 V bipolares y menos rizado que la tensión rectificada.

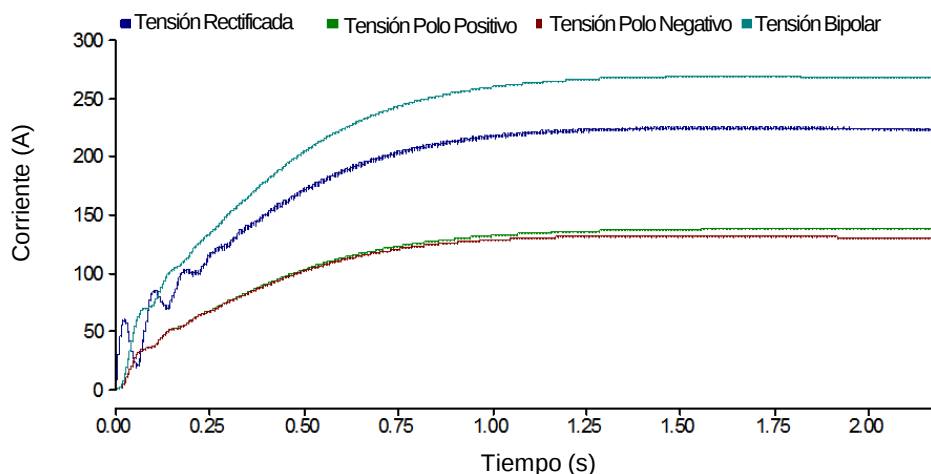


Figura 46 Tensión de cc a la salida del conversor Boost.

Por otro lado, las curvas de tensión de ca presentan picos instantáneos de tensión menores a las presentes en el caso 10 (Figura 47), sin embargo la distorsión armónica presente en las curvas de corriente es alarmante debido a la alta deformación de la onda tal como se puede observar en la Figura 48.

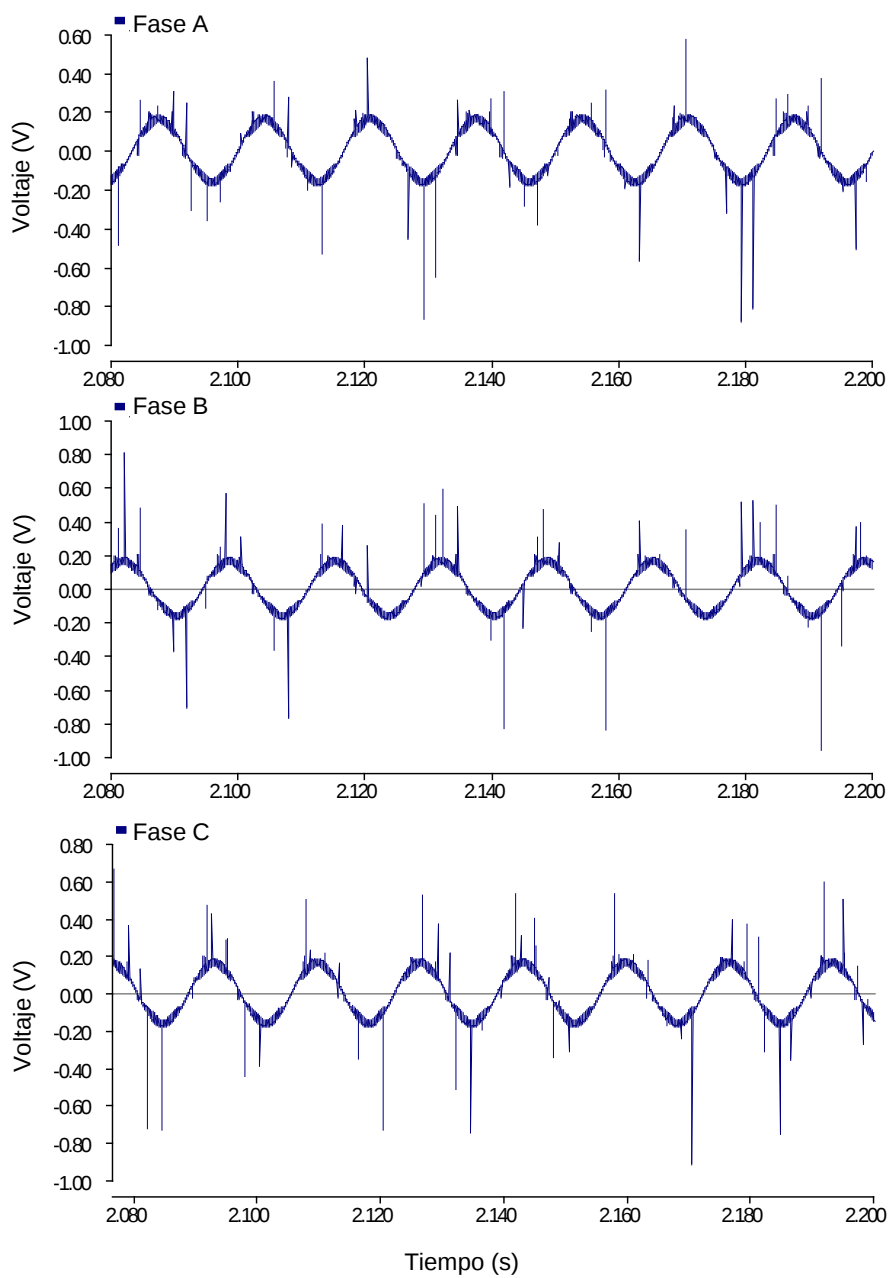


Figura 47 Corrientes de ca, caso 26.

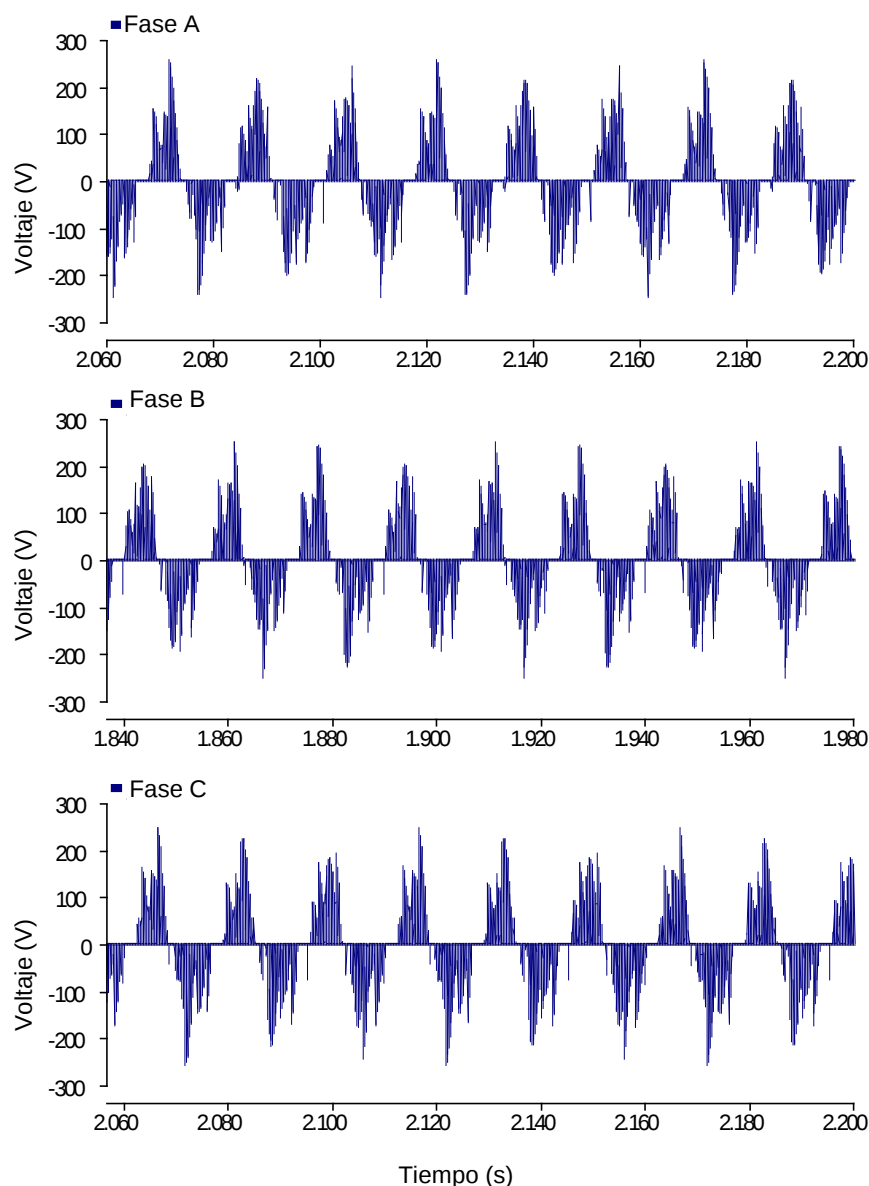


Figura 48 Corrientes de ca, caso 26.

3.4. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Según los 64 escenarios simulados, se puede concluir los siguientes aspectos acerca del comportamiento de las redes de cc:

- Debido a que el motor de cc es la carga de mayor consumo de corriente, 30 A; la variación de consumo de corriente de esta máquina tiene mayor impacto en la THD de las variables de ca. A medida que se disminuye la carga del motor se aumenta el THD de ca a causa de las características eléctricas propias de esta máquina.

- A medida que se desconectan cargas capacitivas, la corriente de carga es menor y por lo tanto el tiempo de carga de los capacitores del rectificador aumenta y en consecuencia el sistema de cc toma más tiempo en alcanzar un valor estable de tensión. La selección del tipo de cargas en el diseño de la red de cc debe garantizar que ante variaciones de carga se mantenga el tiempo de estabilización dentro de un rango razonable, que lo ideal sería de ms.
- Las redes de distribución en cc son una buena alternativa para abastecer de energía a las zonas más lejanas de un área operativa ya que su regulación es mejor que la regulación presente en los sistemas de ca. Si se mantiene el conductor especificado de 2/0 AWG se puede aumentar hasta 3 veces la distancia de la línea de distribución para conectar nuevos usuarios, pero también es posible reducir el calibre del conductor cuando las cargas del sistema están muy cerca y así reducir costos de la red.
- El aumento de tensión de cc ante la variación de carga se debe a que la ecuación de transferencia de la red cambia con estas variaciones y las constantes de control, integral y proporcional no son las más adecuadas dependiendo el caso simulado, por lo tanto, estas constantes deberían ser recalculadas para cada caso de carga para garantizar un nivel de 240 V bipolares en la salida del conversor Boost. Desafortunadamente la cantidad de escenarios de carga es demasiado que es tedioso recalcular estas constantes para cada uno de ellos y por esto es necesario explorar nuevos tipos de controles que sean adaptativos a la carga.

Contando con un conjunto de información práctica y teórica mucho más completa y confiable, es posible generar una visión más amplia acerca del comportamiento de la redes de cc, validar sus ventajas y desventajas, y proponer diversos temas y aspectos específicos de este tipo de redes que permitan seguir investigando en ellas, tal como se propone en el Capítulo 4

4. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

4.1. CONCLUSIONES

- De acuerdo a la cantidad de investigaciones y artículos publicados en las bases de datos durante los últimos años, se detectó que el interés en investigar en las redes de cc ha aumentado sobre todo en países como Finlandia, Estados Unidos de Norteamérica y Japón. La necesidad de encontrar alternativas para mejorar la cobertura del servicio eléctrico y la calidad de la potencia entregada al usuario, han llevado a las empresas, entidades educativas y entidades privadas de investigación a explorar los sistemas de distribución en corriente continua como una alternativa. Sin embargo las investigaciones son recientes y no se cuenta con una amplia información acerca de sus falencias que presentan estos sistemas tales como la falta de desarrollo de dispositivos de protección y la falta de normas internacionales que marquen pautas para el buen funcionamiento de estas redes o de sus fortalezas como la capacidad de incorporar nuevas tecnologías de generación de energía.
- Dentro de la información recopilada no se encontró un modelo existente y completo de una red de distribución de cc; pero, se lograron identificar los modelos de algunas cargas comerciales, la mayoría de ellas de uso residencial. Estos modelos fueron muy útiles para simular viviendas residenciales y algunas de ella también sirvieron para construir modelos de cargas industriales, pero aún falta por modelar en cc muchas otras cargas que se encuentran disponibles en el mercado y que en un futuro pueden ser conectadas a las redes de cc.
- Durante el desarrollo de este proyecto de grado se pudo construir un modelo de red de distribución en cc integrando los modelos de carga encontrados en las publicaciones consultadas; más específicamente, se conformaron cargas residenciales estrato 2 y 4, iluminación LED para espacios públicos, un motor de cc y un cargador de batería de vehículo eléctrico. Este modelo tiene la posibilidad de ser modificado ya sea aumentando o reduciendo las cargas, las distancias o la ubicación de las mismas sirviendo de base para las investigaciones futuras de este tipo de redes de distribución.
- Durante la simulación de los 64 escenarios de carga, se logró determinar que la onda de tensión rectificada tiende a cambiar su valor final o en estado estable dependiendo de la cantidad de carga que se encuentre conecta; esto implica que a menor carga conectada, menor cantidad de corriente de carga y por ende se aumenta el tiempo de estabilización del sistema y el rizado final de la tensión, así como también se logró apreciar que el valor de la tensión en estado estable aumenta proporcionalmente a la desconexión de la carga.

- La estabilidad de tensión en los sistemas de cc está ligada al sistema de control diseñado para los IGBTs del puente de rectificación ca/cc. El grado de inestabilidad se debe a que este sistema de control depende de una ecuación de transferencia típica del sistema que varía al modificar la carga total de la red y por ende las constantes proporcional e integral también varían impidiendo que el sistema de control alcance el valor de tensión deseado; por lo tanto es necesario revisar sistemas de control adaptativos que permitan modificar sus constantes de control de forma paralela al cambio de carga de la red.
- Al igual que las redes de distribución en ca, el diseño de las redes de distribución en cc está ligado a la carga, a su localización física y sus requisitos eléctricos; con base en estos aspectos se determinan los niveles de tensión operativos, las características de los módulos de reducción o aumento de tensión y la capacidad de los conductores que se deben utilizar en la red. La versatilidad de los módulos de rectificación permite en la red de distribución se alcancen niveles de tensión distintos a los especificados en una red de ca y la posibilidad de conectar distintas cargas con diferentes requisitos de tensión operativa.
- A medida que el modelo de la red de distribución en cc se construía, se estructuró una metodología de diseño de redes de cc que fue de gran importancia para verificar que el modelo construido tuviera un comportamiento similar a lo esperado según lo dicta la teoría. Este modelo contiene los pasos mínimos de diseño de redes de cc como la revisión teórica de las cargas, el cálculo y diseño de los elementos de rectificación y demás componentes de la red de cc.
- Los sistemas de distribución en cc son una alternativa para transferir carga de la red de ca cuando se encuentre saturada o cercana a su máxima potencia instalada. Las cargas sensitivas a los cambios de corriente o de tensión son las cargas ideales para ser transferidas ya que este tipo de red ofrece muy buena regulación de tensión con una selección apropiada del conductor; además de ofrecer la posibilidad de conectar usuarios que se encuentren a grandes distancias.
- Una de las mayores desventajas que poseen las redes de distribución en cc, es la gran cantidad de componentes armónicas presentes en la red de ca. Los dispositivos electrónicos que permiten la rectificación de la tensión y el aumento de nivel de la misma, reducen la calidad de la potencia en el lado de ca introduciendo componentes armónicas de corriente y picos instantáneos de tensión y por ende, se ve la necesidad de buscar nuevas técnicas de filtrado de armónicos para reducir este impacto y asegurar el equilibrio de interacción entre las dos redes de distribución.
- Como ventaja importante derivada de la buena regulación de las redes de cc, se tiene la posibilidad de utilizar los mismos conductores utilizados en las redes de ca a grandes distancias. Las componentes capacitivas e inductivas de los conductores cuando son energizados en cc son despreciables debido a que el efecto piel desaparece y se aprovecha el 100% del área transversal del conductor y su resistividad es menor, aumentando la distancia a la cual se puede transportar la

energía, siendo aproximadamente 3 veces para el 2/0 AWG en comparación con una red de distribución en ca.

- Una de las grandes ventajas que tienen las redes de cc es la facilidad para incorporar fuentes de generación no convencionales como la generación fotovoltaica y demás tipos de generación en cc que no necesitan de verificación de sincronismo o simplemente necesitan supervisión de la tensión del sistema para incorporarse al mismo.

4.2. PRINCIPALES APORTES

Al finalizar esta tesis se logró identificar distintos resultados que son útiles ya sea para continuar con los trabajos futuros o para complementar otras investigaciones relacionadas con el tema; estos resultados son:

- Modelo integrado de redes de distribución LVdc en PSCAD: Como resultado principal y número uno de esta tesis, se encuentra un modelo integrado de una red básica de LVdc que contiene cargas residenciales, industriales, públicas y especiales como lo son los vehículos eléctricos. Este modelo servirá de base para continuar con las investigaciones que se proponen en el numeral 4.3.
- Metodología propuesta de diseño: Durante la realización del modelo de la red de distribución, se propone una metodología de diseño de redes en LVdc para luego ser validada y reajustada de acuerdo a la teoría y normatividad que rige el comportamiento de este tipo de redes.
- Vigilancia tecnológica: Se obtuvo un informe detallado del estado de las investigaciones actuales existentes en las distintas bases de datos para determinar cuáles son los investigadores que más han profundizado en el tema y que sirven como referente en el mapa de ruta del desarrollo de las redes en LVdc. De igual forma, se identificaron las empresas del sector eléctrico y electrónico con mayor cantidad de patentes y el tipo de dispositivos que pueden ofrecer para construir una red de LVdc.
- Apoyo a la investigación formativa: Para el desarrollo de esta tesis, se contó con el apoyo de dos estudiantes de ingeniería eléctrica pertenecientes al semillero de investigaciones en transmisión y distribución de ingeniería eléctrica y con la constante interacción del grupo de investigaciones para realimentar otras investigaciones.
- Artículos técnicos publicables: Se lograron redactar 3 artículos científicos, dos de ellos fueron enviados a la revista Ingeniar de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín y el artículo restante fue enviado al Congreso Internacional de Transmisión y Distribución de Energía 2014 organizado por la IEEE PES (*Power & Energy Society*) Capítulo Colombia a desarrollarse en la ciudad de Medellín.

4.3. TRABAJOS FUTUROS.

Debido a que las investigaciones en redes de cc y su aplicabilidad son relativamente recientes, existen distintos aspectos de este tipo de redes que se hacen meritorios de seguir investigando y desarrollando para ahondar en sus debilidades y fortalezas; los temas más relevantes para continuar con su investigación son:

- Filtrado de componentes armónicas en ca: La presencia de altos niveles de distorsión armónica en el lado de ca hace necesaria una investigación más profunda en las distintas metodologías de filtrado de armónicos que se pueden encontrar en la literatura, sus ventajas y desventajas, la complejidad de su construcción, su nivel de efectividad y la viabilidad técnica y económica de implementarlos en las redes de cc.
- Sistemas de control de rectificadores de ca/cc: Tomando como base la constante variación de carga que se puede presentar en las redes de cc, es importante continuar con la búsqueda de nuevas alternativas de sistemas de control que se adapten automáticamente a las distintas variaciones de carga que puede presentar una red de cc. Dentro de las posibles alternativas se encuentran los sistemas de lógica difusa, los sistemas basados en la transformada dq o en sistemas híbridos que conjuguen las ventajas de dos o más sistemas de control.
- Mayor cantidad de cargas modeladas: Aunque en las investigaciones consultadas se encuentra una gran variedad de cargas simuladas, existen muchos más dispositivos comerciales que aún no han sido objeto de análisis para realizar un modelo computacional que se adapte a las redes de cc, tal es el caso de la lavadora, la nevera y los equipos de sonido.
- Incorporación de fuentes de energía no convencionales: El reciente auge en la utilización de fuentes de energía no convencionales y la ausencia de requisitos para la sincronización de nuevas fuentes de energía dan camino a la posibilidad de incorporar nuevas fuentes de energía y aumentar la confiabilidad de los sistemas de potencia.
- Sistemas de protección: Todos los sistemas eléctricos tienen fallas y es necesario realizar un análisis del tipo de fallas que se pueden presentar en los sistemas de distribución de cc y los distintos dispositivos de protección que se pueden utilizar en estas redes, ya sea que sean existentes con adaptaciones especiales o dispositivos diseñados exclusivamente para las redes de distribución en cc.
- Fenómenos transitorios: Debido a la dinámica de conexión y desconexión de cargas en la red, es de gran importancia investigar y analizar los fenómenos transitorios que se producen por el cambio de las condiciones operativas de la red de cc y así determinar el impacto y distorsiones que estas pueden generar en las tensiones y corrientes propias de la red.
- Normatividad: A nivel regulatorio se hace necesario plantear las condiciones mínimas que se deben cumplir para el buen funcionamiento de las redes de distribución y su integración con los sistemas de ca, las cuales deben quedar consignadas en una norma nacional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] "AC vs. DC: The Struggle for Power," 05-Sep-2012. [Online]. Available: http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/AC_vs._DC. [Accessed: 05-Sep-2012].
- [2] Diego Rojas, "Estado del Arte de las Redes de Distribución de Energía en Corriente Continua," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [3] Diego A. Restrepo Munera, "Análisis y simulación del sistema clásico de transmisión en corriente directa," Medellín, 2004.
- [4] Peter Fairley, "DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 10, no. 6, pp. 104–103, Nov. 2012.
- [5] "Danish Island Test Smart Grid - IEEE Spectrum." [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/podcast/at-work/innovation/danish-island-tests-smart-grid>.
- [6] "NEDO:Japan-U.S. Cooperation for Smart Grid International Standardization." [Online]. Available: http://www.nedo.go.jp/english/whatsnew_20120322_index.html. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [7] "EUR-Lex - 32006L0095 - ES." [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0095:ES:HTML>. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [8] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [9] Pasi Peltoniemi, "PHASE VOLTAGE CONTROL AND FILTERING IN A CONVERTER-FED SINGLE-PHASE CUSTOMER-END SYSTEM OF THE LVDC DISTRIBUTION NETWORK," Tesis de doctorado, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2010.
- [10] Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Pasi Peltoniemi, and Pertti Silventoinen, "Customer-End Inverter in an LVDC Distribution Network," p. 6, Jun. 2008.
- [11] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of load inverter topologies in a bipolar LVDC-distribution," 2010, p. 6.
- [12] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of Line and Load Converter Topologies in a Bipolar LVDC Distribution," p. 10.
- [13] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Daniel W. Hart, *Electrónica de potencia*. Madrid: Prentice Hall, 2001.
- [15] Daniel Nilsson, "DC Distribution Systems," Thesis for the degree of licentiate of engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [16] Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1620–1627, Jul. 2007.
- [17] Morris Brenna, George C. Lazaroiu, and Enrico Tironi, "High power quality and DG integrated low voltage dc distribution system," 2006, p. 6 pp.
- [18] J. W. Dixon, "Chapter 12 - Three-Phase controlled rectifiers," in *Power Electronics Handbook (Second Edition)*, Muhammad H. Rashid, Ph.D., Fellow IEE, and P. D.

- Fellow IEEEA2 - Muhammad H. Rashid, Eds. Burlington: Academic Press, 2007, pp. 201–243.
- [19] M. H. Rashid and V. González Pozo, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México [etc.]: Prentice Hall Hispanoamericana, 2004.
- [20] G. Byeon, H. Lee, T. Yoon, G. Jang, W. Chae, and J. Kim, “A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system,” 2011, pp. 543–550.
- [21] C. O. Gecan and R. Bindiu, “Power Capability in Low Voltage DC Distribution Systems,” *Sci. Bull. Petru Maior Univ. Tirgu Mures*, vol. 6, p. 6, 2009.
- [22] Pasi Peltoniemi, Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Markku Niemela, and Juha Pyrhonen, “Output filtering of the customer-end inverter in a low-voltage DC distribution network,” 2008, pp. 1763–1770.
- [23] Universidad Politecnica Salesiana, “Universidad Politecnica Salesiana - Capitulo III.” [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/4/CAPITULO%20III.pdf>.
- [24] Wajih Shireen and Li Tao, “A DSP-based active power filter for low voltage distribution systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, pp. 1561–1567, Mar. 2008.
- [25] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, “Protection scheme for an lvdC distribution system,” presented at the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 2009, p. 4.
- [26] Peter M. McEwan and Sarath B. Tennakoon, “A two-stage DC thyristor circuit breaker,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [27] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, “LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements.”.
- [28] Clive W. Kimblin and R. William Long, “Low-voltage power circuit breakers and molded case circuit breakers-a comparison of test requirements,” p. 7.
- [29] Daniel Nilsson and Ambra Sannino, “Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage dc systems,” 2004, vol. 2, pp. 774–780.
- [30] A. Gölle, P. Görbe, and A. Magyar, “Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems,” *J. Clean. Prod.*, vol. 34, pp. 138–145, Oct. 2012.
- [31] Tero Kaipia, Pasi Salonen, Jukka Lassila, and Jarmo Partanen, “APPLICATION OF LOW VOLTAGE DC-DISTRIBUTION SYSTEM - A TECHNO-ECONOMICAL STUDY,” presented at the 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007, p. 4.
- [32] Gilsung Byeon, Hwa-Min Lee, T. Yoon, Gilsoo Jang, Wookyu Chae, and Jong-Ahn Kim, “A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system,” 2011, pp. 543–550.
- [33] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, “Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec. 2010.
- [34] Ambra Sannino, Giovanna Postiglione, and Math H.J. Bollen, “Feasibility of a DC network for commercial facilities,” 2013, vol. 3, pp. 1710–1717.

-
- [35] Micaela Caserza Magro, A. Mariscotti, and Paolo Pinceti, "Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks," 2006, pp. 1885–1888.
- [36] Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, "Centralized ac/dc Power Conversion for Electronic Loads in a Low-Voltage dc Power System," 2012, pp. 1–7.
- [37] Alexey Khramov, "CONVERTER SUPPLY TRANSFORMER FOR LVDC DISTRIBUTION SYSTEM," Lappeenranta University of Technology, Finland, 2009.
- [38] Andrey Lana, Tero Kaipia, and Jarmo Partanen, "INVESTIGATION INTO HARMONICS OF LVDC POWER DISTRIBUTION NETWORK USING EMTDC/PSCAD DOFWARE," presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, España, 2010, p. 6.
- [39] Ministerio de Minas y Energía, "Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE." ICONTEC, 30-Aug-2013.
- [40] ICONTEC, "Codigo Eléctrico Colombiano NTC 2050." ICONTEC, 25-Nov-1998.
- [41] Esteban Restrepo, "MODELADO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN BAJA TENSIÓN (<1500V) EN CORRIENTE CONTINUA," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [42] EPM S.A. E.S.P., *RA8-009 SELECCIÓN DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN EN REDES DE EPM MEDIANTE CURVAS DE DEMANDA DIVERSIFICADA*. 2012, p. 7.
- [43] S. Y. R. Hui, H. Chen, and X. Tao, "An Extended Photoelectrothermal Theory for LED Systems: A Tutorial From Device Characteristic to System Design for General Lighting," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4571–4583, Nov. 2012.
- [44] K. Ogata, S. Dormido Canto, R. Dormido Canto, and S. Dormido Bencomo, *Ingeniería de control moderna*. Madrid; México: Prentice Hall, 2003.
- [45] M. P. Kaźmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Eds., *Control in power electronics: selected problems*. Amsterdam ; New York: Academic Press, 2002.
- [46] J. W., Riedel, Susan A Nilsson and Vuelapluma, *Circuitos eléctricos*. Madrid: Prentice Hall, Pearson, 2005.
- [47] R. C. Dorf, *Introduction to electric circuits*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [48] EPM S.A. E.S.P., "NORMAS DE REDES SECUNDARIAS (BAJA TENSION) NORMA FUNDAMENTAL RA4 - 000." EPM S.A. E.S.P.
- [49] ESSA S.A E.S.P., *Normas para Calculo y Diseño de Redes de Distribución*. 2005.
- [50] "PSCAD." [Online]. Available: <https://pscad.com/products/pscad>. [Accessed: 20-Sep-2012].
- [51] D. Nilsson and A. Sannino, "Efficiency analysis of low- and medium- voltage DC distribution systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, 2004, pp. 2315 –2321 Vol.2.
- [52] "Korea Smart Grid Institute." [Online]. Available: <http://www.smartgrid.or.kr/10eng4-1.php>. [Accessed: 22-Aug-2012].
- [53] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuut, P. Peltoniemi, and J. Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics 2008, Finland, p. 7.
-

-
- [54] T. Vornanen, A. Mäkinen, P. Järventausta, A. Lana, T. Kaipia, and P. Nuutinen, "PSCAD modeling and simulation of LVDC distribution networks," 15-Apr-2011. [Online]. Available: <http://dSPACE.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/19945>. [Accessed: 20-Aug-2012].
- [55] T. K. Jarmo Partanen, "POSSIBILITIES OF THE LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION SYSTEMS," Aug. 2006.
- [56] "Colombia un país con redes inteligentes de energía." [Online]. Available: <http://www.rutanmedellin.org/rutadeencuentros/Paginas/colombia-un-pais-con-redes-inteligentes-de-energia-smart-grid-251011.aspx>. [Accessed: 04-Sep-2012].
- [57] Daniel Nilsson, "DC Distribution Systems," Thesis for the degree of licentiate of engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [58] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [59] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements." .
- [60] D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [61] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [62] P. M. McEwan and S. B. Tennakoon, "A two-stage DC thyristor circuit breaker," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [63] "Free Patents Online," 25-Jan-2013. [Online]. Available: [HTTP://WWW.FREEPATENTSONLINE.COM/](http://WWW.FREEPATENTSONLINE.COM/). [Accessed: 25-Jan-2013].
- [64] *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*, 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2007.
-

ANEXOS

ANEXO 1

ANTEPROYECTO

Nombres y Apellidos del (los) estudiante(s):	Angélica María García Gualdrón	ID Kosmos	63542971
Título del proyecto: (100 caracteres máximo)	Redes De Distribución En Corriente Continua: Estado De Su Aplicación Y Modelado		
e-mail(s):	angedala2002@yahoo.es		
Teléfonos:	3706666 ext. 363		
Programa Académico (Especifique)	Inició cursos	Año / Semestre	Finalización (prevista) de cursos:
Maestría en Sistemas de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD)	:	2011 1	2012 2

*Dejar en blanco si aún no posee ID-kosmos.

Área evaluadora:	Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica		
Porcentaje de relación del tema del proyecto con el área (%):	100%		
Materias del plan de estudios relacionadas con el proyecto	Cursó	Cursará	No cursará
Modelación y Simulación	X		
Planeación y Diseño de Sistemas de Distribución	X		
Análisis de Sistemas de Transmisión	X		

Lista de congresos, pasantías, semilleros, etc., en el tema del proyecto, en los que ha(n) participado

1.	Fecha:
----	--------

DIRECTOR RESPONSABLE DEL PROYECTO

Nombre y título del director del proyecto:	Idi Amín Isaac Milán, PhD.	# kosmos*	71788496
--	----------------------------	-----------	----------

POSTULACIÓN DE JURADOS

Nombre y título de posible jurado #1:	Jorge Wilson González Sánchez		
Correo electrónico:	Jorgew.gonzalez@upb.edu.co	ID-kosmos*	
Celular:			

*Dejar en blanco si aún no posee ID-kosmos, y en ese caso anexar formato de solicitud de ingreso al sistema y CV.

LISTAS DE VERIFICACIÓN DE DOCUMENTOS ENTREGADOS Y DE CONTENIDOS DEL TEXTO

Si ha cancelado otros proyectos, antes de someter este, ¿cuántos?	No
Versión del Manual de Proyecto de Grado (MPG) utilizado	1.20
Verifica y/o contiene	SI NO
Entrega original y una copia, marcada como tal, del anteproyecto	X
Modalidad escogida según el MPG	X
Lista de símbolos y variables	X
Glosario	X
Objetivo general y particulares	X
Metodología (procedimientos, equipos y métodos que se usarán durante el desarrollo del proyecto)	X
Estado del arte (antecedentes en el tema según una revisión completa de las publicaciones recientes) con cita a las referencias relevantes	X
Referencias de libros, revistas y electrónicas en un formato estándar (Icontec, Harvard, Vancouver, etc.)	X
Listado de productos esperados	X
Tabla de presupuesto y financiación	X
Cronograma y dedicación	X
Acta de propiedad intelectual firmada por todas las partes	X
Propone dos jurados externos que cumplen requisitos del MPG	
El director cumple con los mismos requisitos del jurado según el MPG	X
Carta de aval, opcional, de un grupo de investigación reconocido por IEE	X

Certifico que toda la información suministrada es verídica y completa, acorde a las instrucciones, y que se han satisfecho ambas tablas de verificación.

Firma(s) de(los) estudiante(s) y C.C.

Tabla de verificación para quien recibe

Verifica	SI	NO
El texto de la formulación se entrega bien presentado y en una carpeta		
Carátula impresa en la tapa, o pasta transparente que dejan ver la portada		
El formato de evaluación está inserto justo después de la carátula, no al final		
Datos de contacto de alumno y director están completos en la carátula/portada		
El MPG utilizado por el estudiante es el vigente en http://www.upb.edu.co/		

**Firma de recibido
(Coordinador Académico TyD)**

Tabla de verificación para el ESTUDIANTE

[illegible]

MEMO DE TRABAJO PARA LA COORDINACIÓN Y EL COMITÉ

Redes De Distribución En Corriente Continua: Estado De Su Aplicación Y Modelado

SEGUNDA REVISIÓN

Recibió: _____ Fecha: _____

Lectura de asignación de evaluador en Comité # _____ Fecha: _____

Evaluación preliminar asignada a: _____

Decisión del comité en pleno:

Reprobado: ☐ Aplazado: ☐ Aprobado: ☐

Comité # _____ Firma Responsable: _____ Fecha: _____

Comentarios:

Redes De Distribución En Corriente Continua: Estado De Su Aplicación Y Modelado

Recibió: _____ Fecha: _____
Lectura de asignación de evaluador en Comité # _____ Fecha: _____
Evaluación preliminar asignada a: _____

Comité # _____ Firma Responsable: _____ Fecha: _____

[illegible]

TABLA DE CONTENIDO

1. INVOLUCRADOS.....	81
2. GLOSARIO Y SIGLAS	82
3. UNIDADES Y SIMBOLOS.....	82
4. MODALIDAD	83
5. TEMA DEL PROYECTO	83
6. JUSTIFICACION Y BENEFICIOS	84
7. OBJETIVOS	84
7.1 Objetivo General.....	84
7.2 Objetivos Específicos.....	85
7. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.	85
8. PRODUCTOS ESPERADOS.	85
9. ALCANCE.....	86
10. METODOLOGÍA.	86
11. TABLA PRELIMINAR DE CONTENIDO.	87
12. RECURSOS, MATERIALES Y PRESUPUESTO	88
13. FINANCIACIÓN	88
14. CRONOGRAMA Y OCUPACIÓN	89
15. BIBLIOGRAFÍA PRELIMINAR	90

1. INVOLUCRADOS

1.1 Datos del estudiante

Nombre: Angélica María García Gualdrón

Programa: Maestría en Sistemas de Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica (TyD)

1.2 Datos del Director

Nombre: Idi Amin Isaac Milán

Facultad/Institución/Empresa: Universidad Pontificia Bolivariana

Título(s): PhD. en Ingeniería

Fecha terminación pregrado: 2000

Fecha terminación postgrado: 2011

1.3 Datos del Asesor

Nombre: Gabriel Jaime López

Facultad/Institución/Empresa: Ingeniería Eléctrica

Título(s): MSc. en Ingeniería Eléctrica.

Fecha terminación pregrado: 2002

Fecha terminación postgrado: 2007

1.4 Datos del Grupo de Investigación

Nombre: Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica

Facultad: Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Proyecto(s) macro relacionados con el presente proyecto: Redes De Distribución En Corriente Continua: Estado Del Arte Y Modelado.

2. GLOSARIO Y SIGLAS

CC: Corriente Continua

CA: Corriente alterna

UPS: (Uninterruptable Power Supply) Banco de baterías que sirve como fuente de energía para cargas esenciales que necesitan suministro continuo.

Estabilidad: Propiedad de los sistemas eléctricos de mantener las distintas variables en rangos de distorsión aceptado por las normas locales.

Topología: Esquema de conexiones y configuración empleado en las redes de distribución de la energía.

Filtros: Elementos que reducen la magnitud de las componentes armónicas de la señal de corriente presente en los circuitos eléctricos.

Potencia reactiva: Componente vectorial de la potencia aparente presente por las componentes inductivas y capacitivas de los elementos de las redes eléctricas.

Eficiencia: Relación matemática entre la cantidad de energía consumida contra la cantidad de energía emitida por la fuente.

PSCAD/EMTDC: Potente simulador de transitorios de dominio en el tiempo para simular sistemas de potencia y sus controles, utiliza la interfaz gráfica de usuario para dibujar prácticamente cualquier equipo eléctrico y proporcionar una solución rápida y flexible.[50]

3. UNIDADES Y SÍMBOLOS

V: Voltios

Hz: Unidad de frecuencia

4. MODALIDAD

Investigación.

El proyecto de grado corresponde al Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, Grupo TyD, de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Dedicación al proyecto (en porcentajes):

Tipo		%
Teórico	Búsqueda / Estudio	60
	Desarrollo	40
Experimental		0
Aplicado	Prototipo	0
	De campo	0
Gestión		0
Total		100

5. TEMA DEL PROYECTO

Descripción:

Revisar la literatura existente para determinar el estado del arte y modelado de redes de distribución en corriente continua; unificar los modelos de simulación encontrados en la literatura en el software PSCADTM y analizar el comportamiento de la potencia, voltaje y corriente presentes en una red de distribución en corriente directa.

Áreas a trabajar:

Área	%
Análisis de Sistemas de Distribución.	40
Simulación Computacional.	30
Electrónica de Potencia	30
Total.	100

6. JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

Las redes de distribución de baja tensión (<1500 V) en corriente continua son una opción bastante viable para mejorar la calidad de la energía eléctrica que le es suministrada al usuario final. Los distintos dispositivos electrónicos que han sido incorporados al mercado, como los computadores personales, los televisores digitales, equipos médicos, entre otros funcionan principalmente con corriente continua y la obtienen a través de un conversor interno de corriente alterna a corriente continua que introducen armónicos a la red convencional de distribución y perjudican la calidad de la energía que es suministrada [51]. Por otro lado, el aumento de la demanda hace que el sistema llegue a su capacidad máxima y se planteen nuevas formas de optimizar la energía disponible ya que las posibles expansiones o reconfiguraciones del sistema son muy costosas.

Una de las posibles soluciones a la saturación y problemas de armónicos es la implementación de redes de distribución en corriente continua que con la ayuda de los nuevos avances tecnológicos como la electrónica del estado sólido y conductores mejorados, se puede diseñar una red eficiente para atender nuevas cargas emergentes como las ya mencionadas sin necesidad de agregar un dispositivo extra entre el usuario final y la red como lo son las UPSs.

Otro beneficio que este tipo de redes ofrece es una mayor capacidad de transmisión de energía que puede llegar a ser hasta 16 veces mayor que una red de distribución en corriente alterna si se utilizaran los mismos conductores [51], lo que permite que se conecten usuarios rurales que están a grandes distancias del transformador más cercano o se aproveche la red para transmitir la mayor cantidad de energía que el conductor soporte manteniendo las exigencias de regulación eléctrica.

Al incorporar nuevas tecnologías a los sistemas eléctricos, los agentes del mercado necesitan mejores modelos computacionales de estas nuevas tecnologías para analizar su comportamiento e interacción con los sistemas eléctricos existentes y definir los lugares estratégicos para la instalación de las mismas.

Por último la Universidad Pontificia Bolivariana se verá beneficiada con este proyecto al ser una de las pioneras en la investigación de estas nuevas tecnologías y brindar un apoyo investigativo a las empresas del sector eléctrico que se encuentren interesadas en la distribución de energía en corriente continua.

7. OBJETIVOS

7.1 Objetivo General

Estudiar en detalle el estado del arte, los principales referentes y estrategias de modelación de redes típicas en baja tensión (<1500 V) alimentadas con corriente continua, con el propósito de implementar simulaciones computacionales en PSCADTM que permitan inferir el comportamiento de dicha tecnología en sistemas de distribución de carga y diferentes escenarios de operación.

7.2 Objetivos Específicos

- Determinar el estado del arte de las redes de distribución en baja tensión en corriente continua según las investigaciones existentes en las diferentes bases de datos de artículos científicos.
- Identificar y describir los modelos existentes de redes de distribución en baja tensión en corriente continua en las investigaciones existentes en las diferentes bases de datos de artículos científicos
- Identificar y describir los modelos existentes de cargas típicas que funcionen con corriente continua y puedan ser incorporadas a equivalentes circuitales de la red de distribución en baja tensión en corriente continua.
- Realizar un modelo en el software PSCADTM de una red de distribución en baja tensión en corriente continua que integre los distintos modelos encontrados en la literatura.
- Analizar el comportamiento en estado estable de las distintas variables eléctricas de la red tales como la potencia activa, la corriente y la tensión en el modelo de la red de distribución en baja tensión en corriente continua hecho en PSCADTM.

7. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.

Durante los últimos años se ha incrementado el interés de reinventar las redes de distribución en baja tensión en corriente continua como parte integral de las redes inteligentes, las cuales se han venido investigando y haciendo desarrollos en muchos países del mundo como parte de la solución a diferentes problemáticas que presentan las redes eléctricas como alta demanda de energía, alimentación de cargas esenciales e interconexión de zonas apartadas.

En países como Corea, en la isla de Jeju, se han instalado redes inteligentes que incluyen redes en CC que facilitan la interconexión de fuentes de energías renovables a red de CA [52]. En Finlandia, más específicamente en la Universidad Tecnológica de Lappeeranta el doctor Tero Kaipia y compañeros de grupo de investigación han desarrollado varias investigaciones que incluyen modelado e implementación a pequeña escala de redes de LVdc [53][54][55], sus beneficios y su impacto en la interacción con redes de CA.

A pesar de que en Colombia este tema es novedoso y tiene muy pocos años en investigación con grandes resultados y varias empresas del sector eléctrico como XM y entidades de investigación gubernamental como RutaN [56] interesadas en su desarrollo en la parte práctica y experimental, no se han realizado avances significativos en las redes de distribución en baja tensión en CC las cuales son viables para ser implementadas en el territorio colombiano.

8. PRODUCTOS ESPERADOS.

TIPO DE PRODUCTO	PRODUCTO	CANTIDAD
Tesis o Trabajo de Grado	De Especialización o Maestría	1

TIPO DE PRODUCTO	PRODUCTO	CANTIDAD
Ponencia	Artículo Publicable o ponencia	1
Recurso electrónico	CD	1

9. ALCANCE.

Al finalizar este proyecto se dejará definido el estado de la aplicación de las redes de distribución en baja tensión en corriente continua, sus diferentes topologías, los elementos que la componen y las condiciones en las cuales su eficiencia es la mejor; se dejarán recomendaciones para continuar con su estudio.

El modelo computacional que se creará durante el desarrollo de este proyecto y que será uno de los productos finales del mismo, servirá como modelo básico y lo más aproximado posible a las redes de distribución en baja tensión en corriente continua, permitirá simular distintos escenarios o casos específicos para analizar su comportamiento y viabilidad.

Este proyecto se considerará concluido una vez se cumpla lo siguiente:

- Entrega de informe de trabajo de grado recibido a satisfacción por el director y jurados del proyecto, conforme a los lineamientos y requerimientos determinados por la Maestría.
- Entrega de borrador de artículo científico publicable.

10. METODOLOGÍA.

Para desarrollar este proyecto se plantean tres fases:

- Etapa Investigativa: En esta fase se pretende realizar una clasificación y extracción de información útil para definir el estado investigativo y práctico de estas redes; a su vez, la información concerniente a los modelos computacionales será redirigida a la fase 2.
- Etapa Práctica Computacional: Una vez realizadas las primeras clasificaciones de información acerca de las redes de distribución en corriente continua se procede a realizar la creación de los modelos de los distintos dispositivos de la red y su integración final. Se harán comparaciones de los resultados de las simulaciones con los resultados de las simulaciones encontradas en la literatura.
- Etapa Final: Por último se realizarán los ajustes finales al modelo de la red de corriente continua que servirá como herramienta para diseñar y analizar este tipo de redes. De igual manera se plantearán las conclusiones finales del estado del arte, sus ventajas, sus desventajas y retos que presentan estas redes.

11. TABLA PRELIMINAR DE CONTENIDO.

Glosario

Resumen

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1 ESTADO DEL ARTE DE LAS REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CORRIENTE CONTINUA

1.1. Elementos Básicos de una red de distribución en corriente continua

1.1.1. Conversores CA/CC y CC/CC.

1.1.2. Filtros de armónicos.

1.1.3. Conductores.

1.1.4. Cargas

1.2. Topologías

1.3. Ventajas y Desventajas de las redes de distribución en corriente continua

1.3.1. Ventajas

1.3.2. Desventajas

CAPÍTULO 2 MODELADO DE REDES DE DISTRIBUCIÓN EN CC.

2.1. Modelado de Componentes y Topologías

2.1.1. Conversores CA/CC y CC/CC.

2.1.2. Filtros de armónicos.

2.1.3. Conductores.

2.1.4. Cargas

2.1.5. Topologías

CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y ANÁLISIS

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

NOTA: Éste puede estar sometido a pequeños ajustes en el transcurso de su elaboración. Estos cambios, de ser necesarios, serían con el fin de entregar una mejor y más completa información.

12. RECURSOS, MATERIALES Y PRESUPUESTO

RECURSO	Participación (miles de pesos)				Implica desembolso	
	Estudiante	UPB	Empresa	Donación	Si(nuevo)	No(Existente)
Bibliografía		100				100
Papelería	100				100	
Telecomunicaciones	150					150
Software licenciado	500					500
Materiales	0					
Transporte	300				300	
Servicio de computo	0					
Asistencia a eventos	0					
Trabajo Estudiante 400h @ \$10k/h	4.080					4.080
Trabajo Director 50h @ \$50k/h	2.400					2.400
Trabajo Asesor 20h @ \$50k/h	1.200					1.200
SUBTOTAL	8.230	100			400	8.230
Imprevistos (10%)	823	10			40	823
TOTAL	9.553	110			440	9.553
GRAN TOTAL					9.663	

13. FINANCIACIÓN

La financiación de este proyecto será asumida tanto por el estudiante como por el grupo de investigación de TyD de la Universidad Pontificia Bolivariana, ya que a través de este se tiene acceso a las licencias del software PSCAD usado en su desarrollo, además se adquieren los artículos científicos empleados en su bibliografía.

14. CRONOGRAMA Y OCUPACIÓN

Actividad /Tiempo	2012												2013														
	Junio		Julio		Agosto		Septiembre		Octubre		Noviembre		Diciembre		Enero		Febrero		Marzo		Abril		Mayo		Junio		
Formulación del proyecto																											
Revisión Bibliografica																											
Clasificación de la información																											
Articulación del modelo																											
Analisis de resultados y ajustes del modelo																											
Documento final y entrega																											

15. BIBLIOGRAFÍA PRELIMINAR

- [1] "AC vs. DC: The Struggle for Power," 05-Sep-2012. [Online]. Available: http://www.ieeehqn.org/wiki/index.php/AC_vs._DC. [Accessed: 05-Sep-2012].
- [2] Diego Rojas, "Estado del Arte de las Redes de Distribución de Energía en Corriente Continua," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [3] Diego A. Restrepo Munera, "Análisis y simulación del sistema clásico de transmisión en corriente directa," Medellín, 2004.
- [4] Peter Fairley, "DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 10, no. 6, pp. 104–103, Nov. 2012.
- [5] "Danish Island Test Smart Grid - IEEE Spectrum." [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/podcast/at-work/innovation/danish-island-tests-smart-grid>.
- [6] "NEDO:Japan-U.S. Cooperation for Smart Grid International Standardization." [Online]. Available: http://www.nedo.go.jp/english/whatsnew_20120322_index.html. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [7] "EUR-Lex - 32006L0095 - ES." [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0095:ES:HTML>. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [8] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [9] Pasi Peltoniemi, "PHASE VOLTAGE CONTROL AND FILTERING IN A CONVERTER-FED SINGLE-PHASE CUSTOMER-END SYSTEM OF THE LVDC DISTRIBUTION NETWORK," Tesis de doctorado, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2010.
- [10] Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Pasi Peltoniemi, and Pertti Silventoinen, "Customer-End Inverter in an LVDC Distribution Network," p. 6, Jun. 2008.
- [11] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of load inverter topologies in a bipolar LVDC-distribution," 2010, p. 6.
- [12] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of Line and Load Converter Topologies in a Bipolar LVDC Distribution," p. 10.
- [13] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics : converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Daniel W. Hart, *Electrónica de potencia*. Madrid: Prentice Hall, 2001.
- [15] Daniel Nilsson, "DC Distribution Systems," Thesis for the degree of licentiate of engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [16] Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1620–1627, Jul. 2007.
- [17] Morris Brenna, George C. Lazaroiu, and Enrico Tironi, "High power quality and DG integrated low voltage dc distribution system," 2006, p. 6 pp.
- [18] J. W. Dixon, "Chapter 12 - Three-Phase controlled rectifiers," in *Power Electronics Handbook (Second Edition)*, Muhammad H. Rashid, Ph.D., Fellow IEE, and P. D. Fellow IEEEA2 - Muhammad H. Rashid, Eds. Burlington: Academic Press, 2007, pp. 201–243.

-
- [19]M. H. Rashid and V. González Pozo, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México [etc.]: Prentice Hall Hispanoamericana, 2004.
- [20]G. Byeon, H. Lee, T. Yoon, G. Jang, W. Chae, and J. Kim, "A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system," 2011, pp. 543–550.
- [21]C. O. Gecan and R. Bindiu, "Power Capability in Low Voltage DC Distribution Systems," *Sci. Bull. Petru Maior Univ. Tirgu Mures*, vol. 6, p. 6, 2009.
- [22]Pasi Peltoniemi, Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Markku Niemela, and Juha Pyrhonen, "Output filtering of the customer-end inverter in a low-voltage DC distribution network," 2008, pp. 1763–1770.
- [23]Universidad Politecnica Salesiana, "Universidad Politecnica Salesiana - Capitulo III." [Online]. Available: <http://dSPACE.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/4/CAPITULO%20III.pdf>.
- [24]Wajiha Shireen and Li Tao, "A DSP-based active power filter for low voltage distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, pp. 1561–1567, Mar. 2008.
- [25]Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "Protection scheme for an lvdC distribution system," presented at the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 2009, p. 4.
- [26]Peter M. McEwan and Sarath B. Tennakoon, "A two-stage DC thyristor circuit breaker," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [27]Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements." .
- [28]Clive W. Kimblin and R. William Long, "Low-voltage power circuit breakers and molded case circuit breakers-a comparison of test requirements," p. 7.
- [29]Daniel Nilsson and Ambra Sannino, "Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage dc systems," 2004, vol. 2, pp. 774–780.
- [30]A. Göllei, P. Görbe, and A. Magyar, "Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 34, pp. 138–145, Oct. 2012.
- [31]Tero Kaipia, Pasi Salonen, Jukka Lassila, and Jarmo Partanen, "APPLICATION OF LOW VOLTAGE DC-DISTRIBUTION SYSTEM - A TECHNO-ECONOMICAL STUDY," presented at the 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007, p. 4.
- [32]Gilsung Byeon, Hwa-Min Lee, T. Yoon, Gilsoo Jang, Wookyu Chae, and Jong-Ahn Kim, "A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system," 2011, pp. 543–550.
- [33]Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec. 2010.
- [34]Ambra Sannino, Giovanna Postiglione, and Math H.J. Bollen, "Feasibility of a DC network for commercial facilities," 2013, vol. 3, pp. 1710–1717.
- [35]Micaela Caserza Magro, A. Mariscotti, and Paolo Pinceti, "Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks," 2006, pp. 1885–1888.
- [36]Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, "Centralized ac/dc Power Conversion for Electronic Loads in a Low-Voltage dc Power System," 2012, pp. 1–7.
-

-
- [37] Alexey Khramov, "CONVERTER SUPPLY TRANSFORMER FOR LVDC DISTRIBUTION SYSTEM," Lappeenranta University of Technology, Finland, 2009.
- [38] Andrey Lana, Tero Kaipia, and Jarmo Partanen, "INVESTIGATION INTO HARMONICS OF LVDC POWER DISTRIBUTION NETWORK USING EMTDC/PSCAD DOFWARE," presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, España, 2010, p. 6.
- [39] Ministerio de Minas y Energía, "Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE." ICONTEC, 30-Aug-2013.
- [40] ICONTEC, "Codigo Eléctrico Colombiano NTC 2050." ICONTEC, 25-Nov-1998.
- [41] Esteban Restrepo, "MODELADO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN BAJA TENSION (<1500V) EN CORRIENTE CONTINUA," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [42] EPM S.A. E.S.P., *RA8-009 SELECCIÓN DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN EN REDES DE EPM MEDIANTE CURVAS DE DEMANDA DIVERSIFICADA*. 2012, p. 7.
- [43] S. Y. R. Hui, H. Chen, and X. Tao, "An Extended Photoelectrothermal Theory for LED Systems: A Tutorial From Device Characteristic to System Design for General Lighting," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4571–4583, Nov. 2012.
- [44] K. Ogata, S. Dormido Canto, R. Dormido Canto, and S. Dormido Bencomo, *Ingeniería de control moderna*. Madrid; México: Prentice Hall, 2003.
- [45] M. P. Kaźmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Eds., *Control in power electronics: selected problems*. Amsterdam ; New York: Academic Press, 2002.
- [46] J. W., Riedel, Susan A Nilsson and Vuelapluma, *Circuitos eléctricos*. Madrid: Prentice Hall, Pearson, 2005.
- [47] R. C. Dorf, *Introduction to electric circuits*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [48] EPM S.A. E.S.P., "NORMAS DE REDES SECUNDARIAS (BAJA TENSION) NORMA FUNDAMENTAL RA4 - 000." EPM S.A. E.S.P.
- [49] ESSA S.A E.S.P., *Normas para Calculo y Diseño de Redes de Distribución*. 2005.
- [50] "PSCAD." [Online]. Available: <https://pscad.com/products/pscad>. [Accessed: 20-Sep-2012].
- [51] D. Nilsson and A. Sannino, "Efficiency analysis of low- and medium- voltage DC distribution systems," in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, 2004, pp. 2315 – 2321 Vol.2.
- [52] "Korea Smart Grid Institute." [Online]. Available: <http://www.smartgrid.or.kr/10eng4-1.php>. [Accessed: 22-Aug-2012].
- [53] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuut, P. Peltoniemi, and J. Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics 2008, Finland, p. 7.
- [54] T. Vornanen, A. Mäkinen, P. Järventausta, A. Lana, T. Kaipia, and P. Nuutinen, "PSCAD modeling and simulation of LVDC distribution networks," 15-Apr-2011. [Online]. Available: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/19945>. [Accessed: 20-Aug-2012].
- [55] T. K. Jarmo Partanen, "POSSIBILITIES OF THE LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION SYSTEMS," Aug. 2006.
-

-
- [56] "Colombia un país con redes inteligentes de energía." [Online]. Available: <http://www.rutanmedellin.org/rutadeencuentros/Paginas/colombia-un-pais-con-redes-inteligentes-de-energia-smart-grid-251011.aspx>. [Accessed: 04-Sep-2012].
- [57] Daniel Nilsson, "DC Distribution Systems," Thesis for the degree of licentiate og engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [58] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [59] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements." .
- [60] D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [61] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [62] P. M. McEwan and S. B. Tennakoon, "A two-stage DC thyristor circuit breaker," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [63] "Free Patents Online," 25-Jan-2013. [Online]. Available: [HTTP://WWW.FREEPATENTSONLINE.COM/](http://WWW.FREEPATENTSONLINE.COM/). [Accessed: 25-Jan-2013].
- [64] *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*, 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2007.

ANEXO 2

A continuación se presenta el artículo enviado a la IEEE para el evento T&D LA 2014:

LVdc Distribution Systems: Concept and Modeling.

A.M. García – Gualdrón, I.A. Isaac, G.J. Lopez, J.W. Gonzalez
Electrical Engineering Faculty
Pontificia Bolivariana University
Medellín, Colombia

Abstract—The LVdc distribution system is becoming an alternative to improve the power quality, the reliability and the coverage area of the ac systems. The model presented in this paper can give a better view and understanding of the performance of the LVdc systems and its state of the art.

Index Terms— LVdc distribution systems, dc microgrids, direct current systems.

Introduction

During the last years the quality of the power delivered thru the electric grid has decrease due to the high amount of new technology loads; the LVdc distribution system is one of the possible mechanisms that can be used to improve the power quality of the electric grids. The LVdc distribution system can offer the possibility to connect loads able to work with dc to increase the power quality and reliability at the final user [57] [58].

The evolution of the power electronic components got into the point that the LVdc systems can be compare technically with the LVac systems having many advantages that are useful for microgrids and distributed generation such as the lack of synchronism and the voltage regulation [2], it also have disadvantages that need to be studied like the protection schemes and the THD induced to the ac side [58] [38]

Due to the high tendency to overcome the issues presented by LVdc grids, many companies around the world such as ABB and Siemens have developed new components supported by the European government in each of their programs [2][59]. Also, the IEC and the IEEE, among others,

are interested in developing new standards to guide the design and performance of the LVdc grids [57] [6] [5].

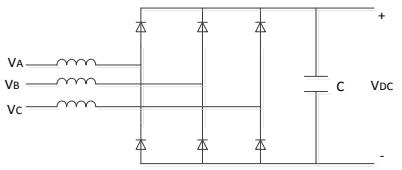
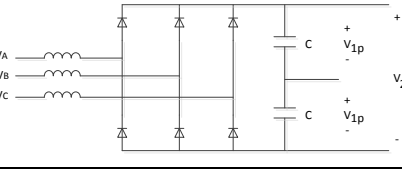
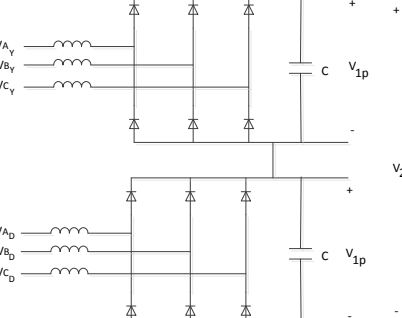
Lvdc Grids Concept.

The LVdc system is composed by an ac energy source, an ac/dc rectifier, dc converters, conductor and loads.

Voltage levels and rectifiers.

In the LVdc system is possible to have 2 voltage levels, one is the bipolar and the other is the monopolar; in order to get these 2 levels is necessary to connect an ac/dc rectifier. This rectifier could have 3 different types of topologies regarding the wanted level; the first one is a 6 pulse rectifier with capacitor filter, this topology offers a monopolar voltage level 2 times the rms value of the ac network and can be used with a two winding transformer; the second is a 6 pulse rectifier as the first one but with the difference that has 2 capacitors with central tap to have a bipolar level equal to the ac rms value, the central tap of the capacitors works a neutral point. The last one is a 12 pulse rectifier, this topology offers a dc level 4 times the ac rms value, but it can only be used with a three winding transformer [57] [2]. All of previous topologies are shown on Table I.

TABLE I. RECTIFIER TOPOLOGIES

Type of Rectifier	Schematic circuit
6 Pulse Monopolar	
6 Pulse Bipolar	
12 Pulse Bipolar	

Switching Valves

All the rectifiers are built with the same components either could be diodes, thyristors or IGBTs. The diodes have a simple performance but the voltage level and the transferred power cannot be controlled [60], the thyristor switches faster than the diode and tolerates high currents but its operation needs to be controlled in order to keep the voltage level, this could be an issue when the system is not stable [60]. At last, the IGBT is the fastest switch, allows the bidirectional circulation of current and high levels of it, also gives accurate voltage levels; but as the thyristor, it needs to be controlled to open and close giving more complexity to the control itself [60].

Switching Control.

In order to have an optimal dc voltage level, the switching valves need to be controlled by an external logical system. The most common control system is the SPWM (Sinusoidal Pulse Wide Modulation) using the Park and Clark

Transformation or the conventional PI controller [57] [18]. The Park and Clark transformation is also known as the dq transformation and is the most reliable control for ac/dc rectifiers, but this control scheme is difficult and expensive to build [9]. The SPWM control is easier to design and build, but is very unstable and needs to be readjust often [57] [18].

Voltage Level Converters.

A voltage level converter is also known as a dc/dc converter and it could be either to increase or decrease the voltage level and there are 2 types [60], one of them is the Buck converter that decreases the voltage, see Fig. 1 [60] [61].

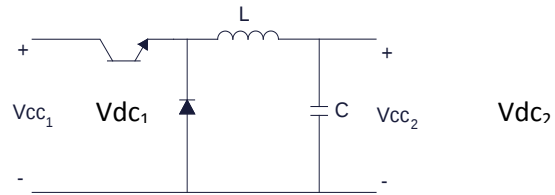


Fig. 1. Schematic of a Buck converter.

The other converter is the Boost converter designed to raise the voltage level and is shown on Fig. 2 [60] [61].

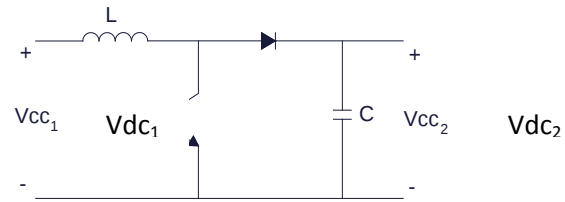


Fig. 2. Schematic of a Boost converter.

Conductors.

All distribution systems need to conduct the energy to the final user and as in the ac systems; the dc systems use cables to carry the energy. The cables used for the LVdc system are the same as in the ac system but with a different distribution regarding the topology of the system that could be monopolar or bipolar [58]; on Fig. 3 is shown the cable arrangement for an ac network (a), for a monopolar dc network (b) (d) and for a bipolar dc network (c) (e).

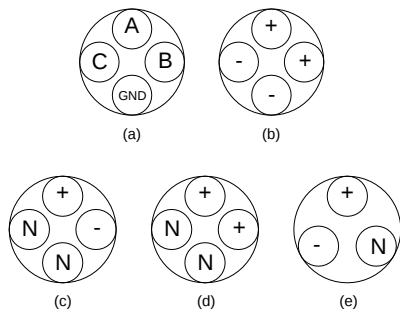


Fig. 3. Conductor arrangement for LVdc.

Harmonic Filters

The LVdc networks need the harmonic filters to improve the power quality at the ac side regarding the high amount of harmonics that power electronics introduce to the ac grid [22]. The harmonic filters can be active filters composed by amplifiers, or can be passive filters composed by resistances, inductances and capacitors [22] [24]. According to [9], the passive filters are the most common and reliable filters for LVdc networks; however, new investigations like [24] are proposing new technologies on filtering that can be more flexible and accurate than the passive filters.

Protection System

All electric system needs protection against undesirable events and the LVdc network is not the exception, but this network does not have the same operational conditions as the ac grids like the zero crossing of the current, very useful to ensure de opening of the circuit without causing any damage [59]. The protection used for the ac network can be used in the dc network with some special additional requirements [59] and also new investigations like [62] shows possible protection systems specially designed for dc grids.

Loads

Not all loads have the same performance if they are fed with dc as if they are fed with ac; hence, some loads have been model on [57], some of them are classified as resistive loads like the heaters, others are classified as constant current like fluorescent lamp and at last the constant power loads like the computer and the monitor [41].

LVdc Publications and Patents Dynamics

As the interest in the LVdc increases, more investigations are published and more patents are registered.

Papers

The IEEE is the science data base with the highest number of publications, with 62 papers between 1995 and 2013, most of them shown in conferences and seminars [2]. Also, the 23% of the papers are from the LUT (Lappeenranta University of Technology) made under the supervision of Tero Kaipia, Jarmo Partanen, Pasi Peltoniemi and Pasi Salonen [2].

Patents

The US and Japan are the countries with more patents registered during the last 16 years with 32% each of them. Many companies like General Electric, Sanken Electronics, Hitachi LTD., ABB and Denso Corporations have developed devices to be used in many application and the LVdc grids in one of them, all of these companies have at least 69 patents registered for all devices used in LVdc systems [2] [63].

LVdc Grids Modeling and Designing.

Modeling of LVdc grids is a helpful tool to understand how they work and the main aspects to be studied in a further future. The model presented in this paper is a 6 pulse bipolar system at $240 V_{dc}$ - $120 V_{dc}$ and a Boost converter; the loads considered are 2 residential loads, 1 dc motor of 10 HP made by Imperial Electric, 4 LED lamps each of them within 14 XLamp XR-E LED lights made by CREE [43] and 1 Battery charger for an Electrical Vehicle made by Thunder Sky [30]. The grid is energized by a three-phase transformer of 75 kVA at 13.2/0.220 kV.

Load Analysis

As a first step to design a distribution grid is to make a load analysis in order to calculate the power or current consumed by them and to calculate the capacity of the ac/dc rectifier and the dc/dc converter. The loads considers in this paper are listed in Table II.

TABLE II. LVDC LOADS

Nº	Load Name	Components	Max. Current
1	House Type 2	Kitchen (Stove, Coffee maker, Vacuum cleaner, Sandwich maker)	6,76 A
		Lights (3 fluorescent lamps, 4 incandescent lamps)	
		Bedroom (Incandescent lamp, computer and monitor)	
2	House Type 4	Kitchen (Stove, Coffee maker, Vacuum cleaner, Sandwich maker, Kettle)	7,76 A
		Lights (6 Energy saver lamps, 3 fluorescent lamps)	
		Bedroom (Energy saver lamp, computer, monitor, TV)	
3	DC Motor	-	31,1 A
4	LED Lighting	4 LED lamps with 14 LEDs each or them.	7,1 A
5	EV Battery	-	3 A
Total load			55,6 A

Buck Converter

Not all loads work with voltage levels between 120 V_{dc} and 240 V_{dc}, they usually work with lower voltage levels as the EV Battery which data sheet states that its charging voltage is 4 V_{dc} max [30]. These load's criteria need to be fulfill by a buck converter that reduces the voltage level from 120 V_{dc} to 4 V_{dc}.

According to [60] the minimum inductance and minimum capacitance are calculated with Equation 1 and Equation 2:

$$L_{\min} = \frac{(V_{\text{Load}} - V_{\text{Source}}) \left(\frac{V_{\text{Load}}}{V_{\text{Source}}} \right)}{f_{\text{conm}} * \Delta I_L} \quad (1)$$

$$C_{\min} = \frac{\left(1 - \frac{V_{\text{Load}}}{V_{\text{Source}}} \right)}{8 * L_{\min} * \left(\frac{\% \Delta V_{\text{Load}}}{100} \right) * f_{\text{conm}}^2} \quad (2)$$

Taking in account the data listed in Table III the minimum inductance is 3.093 mH and the minimum capacitance is 62.5 mF

TABLE III. BUCK CONVERTER DATA

Components	Value
V _{Source}	120 V
V _{Load}	4 V
f _{conm}	25 kHz
%ΔV _{load}	0.0001%
ΔI _L	0.05 A
L _{min}	3,093333 mH
C _{min}	62,5 mF

Boost Converter

One of the principle concerns of the dc grids is to keep the voltage level; the buck converter designed for this grid rise this level from 200 V to 240 V in the bipolar mode, i.e. 120 V in monopolar mode and 240 V at the bipolar mode. Using the analysis method explained in [60] the equations to calculate the minimum inductance and the minimum capacitance are:

$$L_{\min} = \frac{\left(1 - \left(\frac{V_{\text{Source}}}{V_{\text{Load}}} \right) \right) (V_{\text{Source}})}{f_{\text{conm}} * \Delta I_L} \quad (3)$$

$$C_{\min} = \frac{\left(1 - \frac{V_{\text{Load}}}{V_{\text{Source}}} \right)}{\left(\frac{V_{\text{Load}}}{I_{\text{Load}}} \right) \left(\frac{\% \Delta V_{\text{Load}}}{100} \right) f_{\text{conm}}^2} \quad (4)$$

The specification data used to calculate the components are listed in Table IV; a 25% of current losses is consider to calculate inductance and capacitance, i.e. 69.6 A of load current.

TABLE IV. BOOST CONVERTER DATA

Components	Value
V _{Source}	200 V
V _{Load}	240 V
I _{Load}	69.6 A
f _{conm}	25 kHz

$\% \Delta V_{load}$	0.001%
ΔI_L	0.5 A
L_{min}	2.67 mH
C_{min}	193.34 mF

ac/dc Rectifier

The ac/dc rectifier used in this grid is designed to have dc rectified voltage of 200 V_{dc}, this is rectifier is not designed to have a full ac voltage rectification value of 240 V_{ac} in order to have a tolerance level of 40 V to be used under any load changes. As the buck and boost converter, the ac/dc rectifier has an analysis associated to its performance and the Equations 5 and 6 help to calculate the capacitance of this device [64] [61].

$$C_{min2p} = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{V_{Load} - \left(V_{Load} * \frac{\% \Delta V_{Load}}{100}\right)}{207.852}\right)\right)^2 * f_{ac} * \left(\frac{V_{Load}}{I_{Load}}\right)} \quad (5)$$

$$C_{min1p} = \frac{C_{min2p}}{2} \quad (6)$$

The data used to calculate the capacitor are listed in Table V.

TABLE V. BOOST CONVERTER DATA

Components	Value
V _{Load}	200 V
I _{Load}	69.6 A
f _{ac}	60 Hz
%ΔV _{load}	0.001%
C _{min 2p}	38.37 mF
C _{min 1p}	76.74 mF

Switching Control

Regarding the control scheme explained in [18], the SPWM control technique is used to control the rectified voltage at 200 V; these PI control scheme compares a sinusoidal control signal with a triangular carrier signal in order to generate the

pulses used to open and close de IGBTs of the rectifier. The control scheme is shown in Fig. 4.

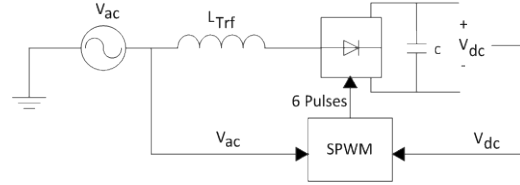


Fig. 4. ac/dc rectifier control scheme.

The PI constants are calculated to comply with the restrictions stated on Equations 7 and 8 [18]:

$$I_{Source} \leq \frac{C * V_{Load}}{3 * K_p * L_{Source}} \quad (7)$$

$$I_{Source} \leq \frac{K_p * V_{Load} * f_p}{L_{Source} * K_i} \quad (8)$$

The data used to find the maximum K_p and K_i are:

TABLE VI. SPWM DATA

Components	Value
V _{Load}	220 V
I _{Load}	69.6 A
f _p	1
C _{2p}	38.37 mF
L _{Source}	14.2132 mH
Max K _p	2586,067
Max K _i	318949870,98

As is explained in [18], the system itself is very unstable and the calculated constants gives a very fast answer but its unstable after a short period of time. The new control constants were adjusted multiple times during multiple runs having a final K_p of 7 and a final K_i of 7000 to have an stable output. Although, more efficient control systems can be implemented and will be subject of study in future papers.

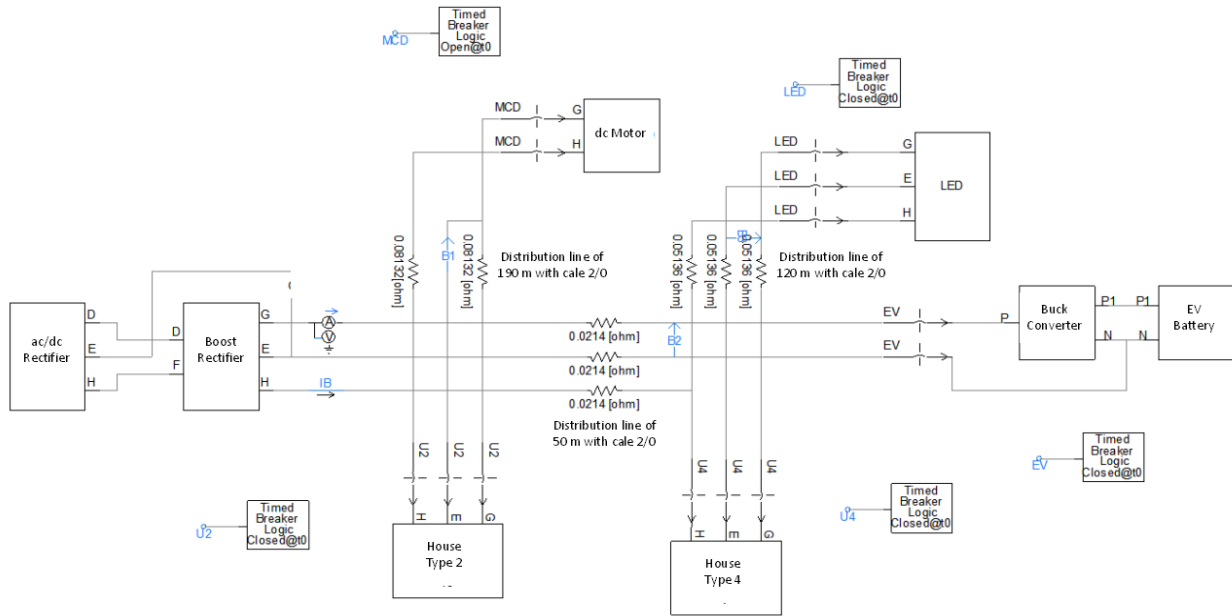


Fig. 5. LVdc Distribution System.

LVdc Grid Model.

The software PSCAD was selected to build the model of the LVdc grid regarding the flexibility and the accurate models it has [2]; the complete model is shown on Fig. 5. After all components are designed and the control system is tuned to have a rectified voltage of $200 V_{dc}$ and an output voltage of the Boost converter of $238 V_{dc}$, see Fig. 6, the grid is finished. The results of the simulations shows that this grid has a transient phenomenon during the first 500 ms and gets its nominal voltage at 1.50 s, these transients are cause by the charging and discharging of the capacitors and inductances presented in the model that they could be either at the loads or at the rectifiers and converters.

Once the passive components are fully charge the system is stable and the maximum voltage of $238 V_{dc}$ appears at the Boost converter terminals.

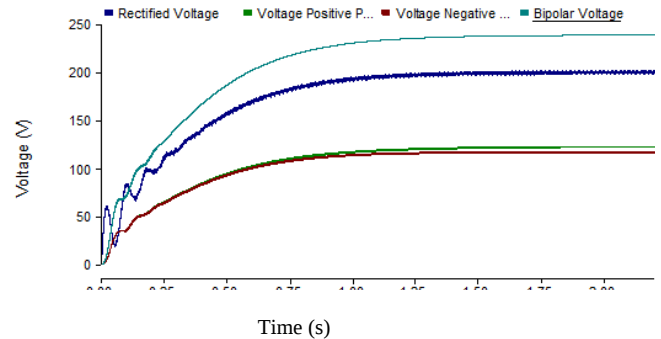


Fig. 6. Voltage signals of the LVdc Grid.

The maximum voltage regulation is 2.25% at the dc motor connected at 190 m from the boost converter.

The total load current is 64 A and is shown on Fig. 7.

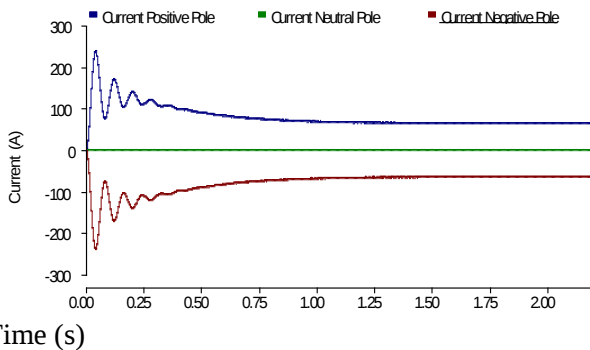


Fig. 7. Load current signals of the LVdc Grid.

On the other hand, the harmonic currents induced from the dc side to the ac system are big enough to minimize the power quality at the ac system becoming a threat for the stability of the ac system, See Fig. 8 for distortion of ac currents.

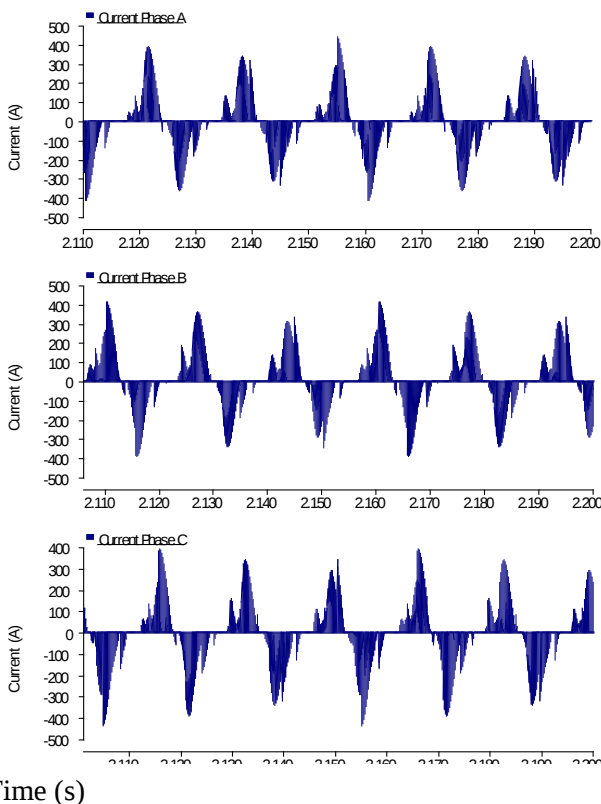


Fig. 8. Current signals at the ac side.

Conclusions

The LVdc systems are an alternative to transfer loads from the ac grid and balance them, those loads can be voltage sensitive loads or current

sensitive loads; it also has a great voltage regulation with proper conductor selection that can be used to feed loads at a long distance, distance that the ac systems cannot meet the maximum regulation stated at the international standards.

The advantage of these grids to incorporate unconventional power generation or distributed power generation to the power system gives a new opportunity to define an extended concept of microgrids.

Even though the passive elements of the LVdc grid were calculated according to the power electronics theory and they comply with the performance, it is necessary to design an LVdc design and analysis method.

The voltage stability of the dc systems is attached to the control system designed to trigger the IGBTs at the rectifier and is necessary to improve this control system in a further work in order to have a better answer to load changes; some other control systems, even more complex than the SPWM and fuzzy logic controls, are being studied to be incorporated to improve the controlled dc voltage, also they will be documented in a further paper.

At this moment, the dc system does not have any model of protections system as a circuit breaker; so, no faults could be simulated or studied. It is very important to model and develop a protection device to have a more complete model. Hence, at this moment some investigations are being developed to study the types of faults, its impact and the criteria that the protection device has to meet.

Acknowledgment

The authors give special thanks to Diego Rojas and Esteban Restrepo, which previous works allow to keep investigating in LVdc grids.

References

- [1] "AC vs. DC: The Struggle for Power," 05-Sep-2012. [Online]. Available: http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/AC_vs._DC. [Accessed: 05-Sep-2012].
- [2] Diego Rojas, "Estado del Arte de las Redes de Distribución de Energía en Corriente Continua," Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.

-
- [3] Diego A. Restrepo Munera, "Análisis y simulación del sistema clásico de transmisión en corriente directa," Medellín, 2004.
- [4] Peter Fairley, "DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 10, no. 6, pp. 104–103, Nov. 2012.
- [5] "Danish Island Test Smart Grid - IEEE Spectrum." [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/podcast-at-work/innovation/danish-island-tests-smart-grid>.
- [6] "NEDO:Japan-U.S. Cooperation for Smart Grid International Standardization." [Online]. Available: http://www.nedo.go.jp/english/whatsnew_20120322_index.html. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [7] "EUR-Lex - 32006L0095 - ES." [Online]. Available: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32006L0095:ES:HTML>. [Accessed: 01-Aug-2013].
- [8] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "An LVDC Distribution System Concept," *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [9] Pasi Peltoniemi, "PHASE VOLTAGE CONTROL AND FILTERING IN A CONVERTER-FED SINGLE-PHASE CUSTOMER-END SYSTEM OF THE LVDC DISTRIBUTION NETWORK," Tesis de doctorado, Lappeenranta University of Technology, Finland, 2010.
- [10] Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Pasi Peltoniemi, and Pertti Silventoinen, "Customer-End Inverter in an LVDC Distribution Network," p. 6, Jun. 2008.
- [11] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of load inverter topologies in a bipolar LVDC-distribution," 2010, p. 6.
- [12] Jenni Rekola and Heikki Tuusa, "Comparison of Line and Load Converter Topologies in a Bipolar LVDC Distribution," p. 10.
- [13] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power electronics: converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [14] Daniel W. Hart, *Electrónica de potencia*. Madrid: Prentice Hall, 2001.
- [15] Daniel Nilsson, "DC Distribution Systems," Thesis for the degree of licentiate og engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [16] Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, "Low-Voltage DC Distribution System for Commercial Power Systems With Sensitive Electronic Loads," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1620–1627, Jul. 2007.
- [17] Morris Brenna, George C. Lazaroiu, and Enrico Tironi, "High power quality and DG integrated low voltage dc distribution system," 2006, p. 6 pp.
- [18] J. W. Dixon, "Chapter 12 - Three-Phase controlled rectifiers," in *Power Electronics Handbook (Second Edition)*, Muhammad H. Rashid, Ph.D., Fellow IEE, and P. D. Fellow IEEEA2 - Muhammad H. Rashid, Eds. Burlington: Academic Press, 2007, pp. 201–243.
- [19] M. H. Rashid and V. González Pozo, *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. México [etc.]: Prentice Hall Hispanoamericana, 2004.
- [20] G. Byeon, H. Lee, T. Yoon, G. Jang, W. Chae, and J. Kim, "A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system," 2011, pp. 543–550.
- [21] C. O. Gecan and R. Bindiu, "Power Capability in Low Voltage DC Distribution Systems," *Sci. Bull. Petru Maior Univ. Tirgu Mures*, vol. 6, p. 6, 2009.
- [22] Pasi Peltoniemi, Pasi Nuutinen, Pasi Salonen, Markku Niemela, and Juha Pyrhonen, "Output filtering of the customer-end inverter in a low-voltage DC distribution network," 2008, pp. 1763–1770.
- [23] Universidad Politecnica Salesiana, "Universidad Politecnica Salesiana - Capitulo III." [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/145/4/CAPITULO%20III.pdf>.
- [24] Wajiha Shireen and Li Tao, "A DSP-based active power filter for low voltage distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, pp. 1561–1567, Mar. 2008.
- [25] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "Protection scheme for an lvdc distribution system," presented at the 20th International Conference on Electricity Distribution, Prague, 2009, p. 4.
- [26] Peter M. McEwan and Sarath B. Tennakoon, "A two-stage DC thyristor circuit breaker," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [27] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, "LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements." .
- [28] Clive W. Kimblin and R. William Long, "Low-voltage power circuit breakers and molded case circuit breakers-a comparison of test requirements," p. 7.
- [29] Daniel Nilsson and Ambra Sannino, "Load modelling for steady-state and transient analysis of low-voltage dc systems," 2004, vol. 2, pp. 774–780.
- [30] A. Gölle, P. Görbe, and A. Magyar, "Modeling and optimization of electrical vehicle batteries in complex clean energy systems," *J. Clean. Prod.*, vol. 34, pp. 138–145, Oct. 2012.
- [31] Tero Kaipia, Pasi Salonen, Jukka Lassila, and Jarmo Partanen, "APPLICATION OF LOW VOLTAGE DC-DISTRIBUTION SYSTEM - A TECHNO-ECONOMICAL STUDY," presented at the 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, 2007, p. 4.
- [32] Gilsung Byeon, Hwa-Min Lee, T. Yoon, Gilsoo Jang, Woogyu Chae, and Jong-Ahn Kim, "A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system," 2011, pp. 543–550.
- [33] Hiroaki Kakigano, Yushi Miura, and Toshifumi Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super
-

- High Quality Distribution,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3066–3075, Dec. 2010.
- [34] Ambra Sannino, Giovanna Postiglione, and Math H.J. Bollen, “Feasibility of a DC network for commercial facilities,” 2013, vol. 3, pp. 1710–1717.
- [35] Micaela Caserza Magro, A. Mariscotti, and Paolo Pinceti, “Definition of Power Quality Indices for DC Low Voltage Distribution Networks,” 2006, pp. 1885–1888.
- [36] Daniel Salomonsson and Ambra Sannino, “Centralized ac/dc Power Conversion for Electronic Loads in a Low-Voltage dc Power System,” 2012, pp. 1–7.
- [37] Alexey Khramov, “CONVERTER SUPPLY TRANSFORMER FOR LVDC DISTRIBUTION SYSTEM,” Lappeenranta University of Technology, Finland, 2009.
- [38] Andrey Lana, Tero Kaipia, and Jarmo Partanen, “INVESTIGATION INTO HARMONICS OF LVDC POWER DISTRIBUTION NETWORK USING EMTDC/PSCAD DOWARE,” presented at the International Conference on Renewable Energies and Power Quality, España, 2010, p. 6.
- [39] Ministerio de Minas y Energía, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas RETIE.” ICONTEC, 30-Aug-2013.
- [40] ICONTEC, “Codigo Eléctrico Colombiano NTC 2050.” ICONTEC, 25-Nov-1998.
- [41] Esteban Restrepo, “MODELADO Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA EN BAJA TENSIÓN (<1500V) EN CORRIENTE CONTINUA,” Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [42] EPM S.A. E.S.P., *RA8-009 SELECCIÓN DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUCIÓN EN REDES DE EPM MEDIANTE CURVAS DE DEMANDA DIVERSIFICADA*. 2012, p. 7.
- [43] S. Y. R. Hui, H. Chen, and X. Tao, “An Extended Photoelectrothermal Theory for LED Systems: A Tutorial From Device Characteristic to System Design for General Lighting,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4571–4583, Nov. 2012.
- [44] K. Ogata, S. Dormido Canto, R. Dormido Canto, and S. Dormido Bencomo, *Ingeniería de control moderna*. Madrid; México: Prentice Hall, 2003.
- [45] M. P. Kazmierkowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Eds., *Control in power electronics: selected problems*. Amsterdam ; New York: Academic Press, 2002.
- [46] J. W., Riedel, Susan A Nilsson and Vuelapluma, *Circuitos eléctricos*. Madrid: Prentice Hall, Pearson, 2005.
- [47] R. C. Dorf, *Introduction to electric circuits*, 8th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [48] EPM S.A. E.S.P., “NORMAS DE REDES SECUNDARIAS (BAJA TENSION) NORMA FUNDAMENTAL RA4 - 000.” EPM S.A. E.S.P.
- [49] ESSA S.A E.S.P., *Normas para Calculo y Diseño de Redes de Distribución*. 2005.
- [50] “PSCAD.” [Online]. Available: <https://pscad.com/products/pscad>. [Accessed: 20-Sep-2012].
- [51] D. Nilsson and A. Sannino, “Efficiency analysis of low- and medium- voltage DC distribution systems,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2004. IEEE*, 2004, pp. 2315 –2321 Vol.2.
- [52] “Korea Smart Grid Institute.” [Online]. Available: <http://www.smartgrid.or.kr/10eng4-1.php>. [Accessed: 22-Aug-2012].
- [53] P. Salonen, T. Kaipia, P. Nuut, P. Peltoniemi, and J. Partanen, “An LVDC Distribution System Concept,” presented at the Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics 2008, Finland, p. 7.
- [54] T. Vornanen, A. Mäkinen, P. Järventausta, A. Lana, T. Kaipia, and P. Nuutinen, “PSCAD modeling and simulation of LVDC distribution networks,” 15-Apr-2011. [Online]. Available: <http://dspace.cc.tut.fi/dpub/handle/123456789/19945>. [Accessed: 20-Aug-2012].
- [55] T. K. Jarmo Partanen, “POSSIBILITIES OF THE LOW VOLTAGE DC DISTRIBUTION SYSTEMS,” Aug. 2006.
- [56] “Colombia un país con redes inteligentes de energía.” [Online]. Available: <http://www.rutanmedellin.org/rutadeencuentros/Paginas/colombia-un-pais-con-redes-inteligentes-de-energia-smart-grid-251011.aspx>. [Accessed: 04-Sep-2012].
- [57] Daniel Nilsson, “DC Distribution Systems,” Thesis for the degree of licentiate og engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2005.
- [58] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, “An LVDC Distribution System Concept,” *Nord. Workshop Power Ind. Electron.*, p. 7, Jun. 2008.
- [59] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, and Jarmo Partanen, “LVDC Distribution System Protection-Solutions, Implementation and Measurements.”.
- [60] D. W. Hart, *Power electronics*. New York: McGraw-Hill, 2011.
- [61] Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins, *Power electronics : converters, applications, and design*. New York [etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [62] P. M. McEwan and S. B. Tennakoon, “A two-stage DC thyristor circuit breaker,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 12, no. 4, pp. 597–607, Jul. 1997.
- [63] “Free Patents Online,” 25-Jan-2013. [Online]. Available: <HTTP://WWW.FREEPATENTSONLINE.COM/>. [Accessed: 25-Jan-2013].
- [64] *Power electronics handbook: devices, circuits, and applications*, 2nd ed. Burlington, MA: Academic Press, 2007.

ANEXO 3

VIGILANCIA TECNOLÓGICA:

En las siguientes graficas se puede observar la dinámica de publicaciones durante los últimos 17 años:

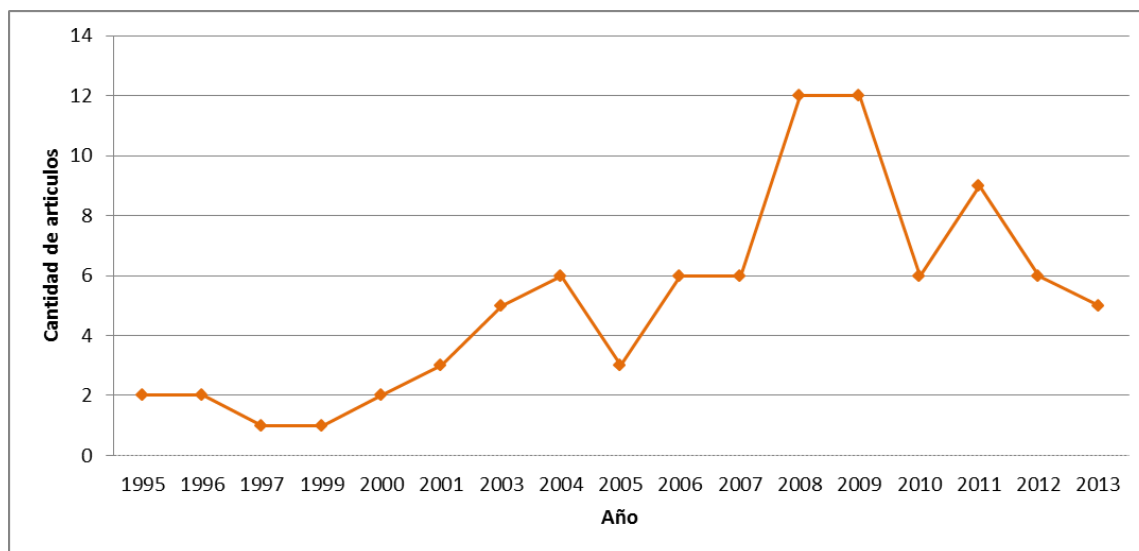


Figura 49 Cantidad de publicaciones vs Año de publicación.

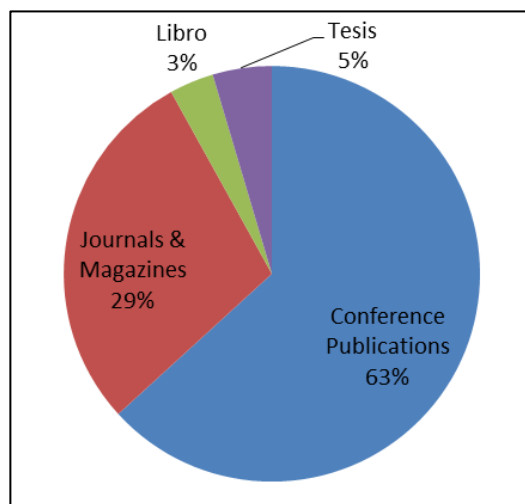


Figura 50 Porcentaje de publicaciones según el tipo.

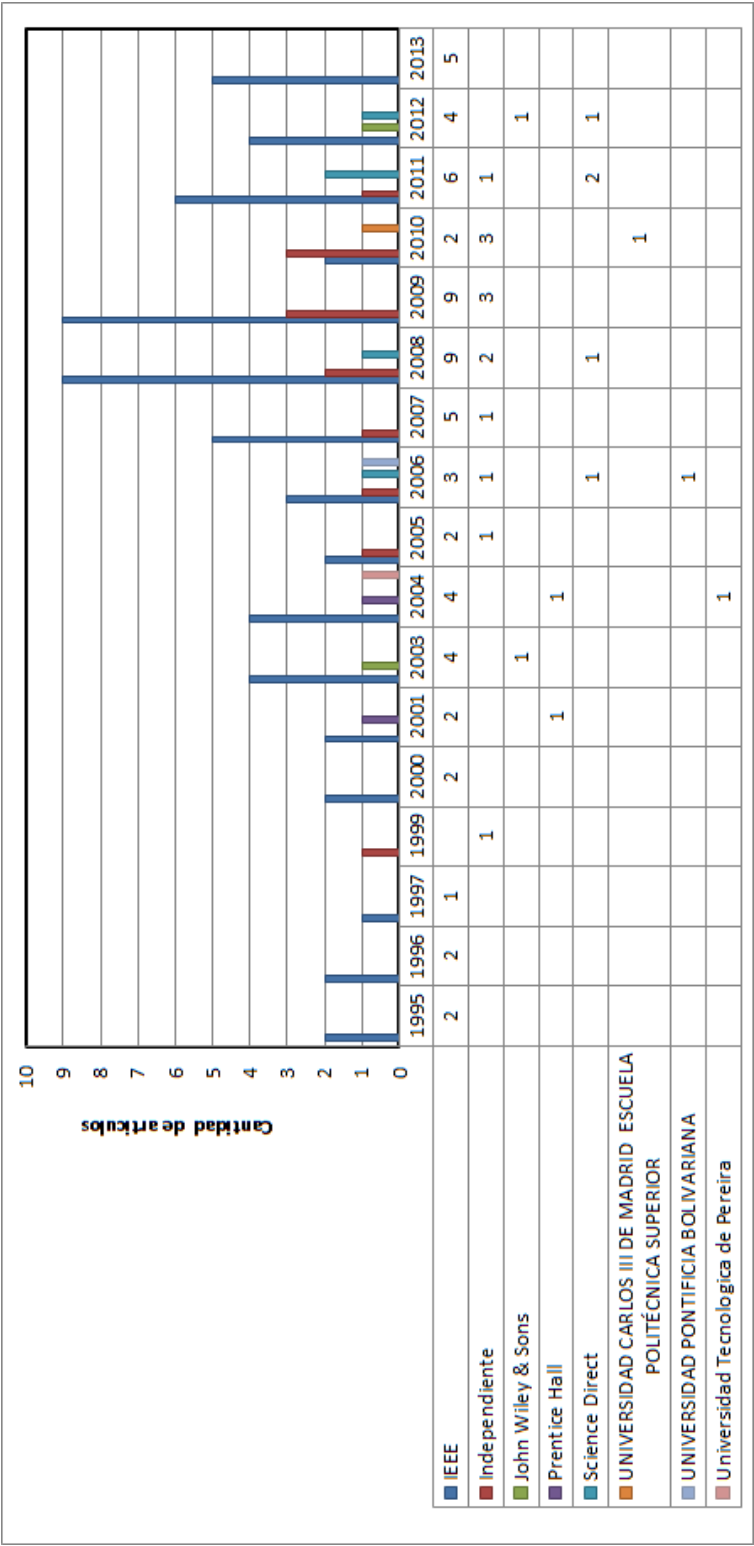


Figura 51 Dinámica de cantidad de publicaciones anuales clasificadas por fuente.

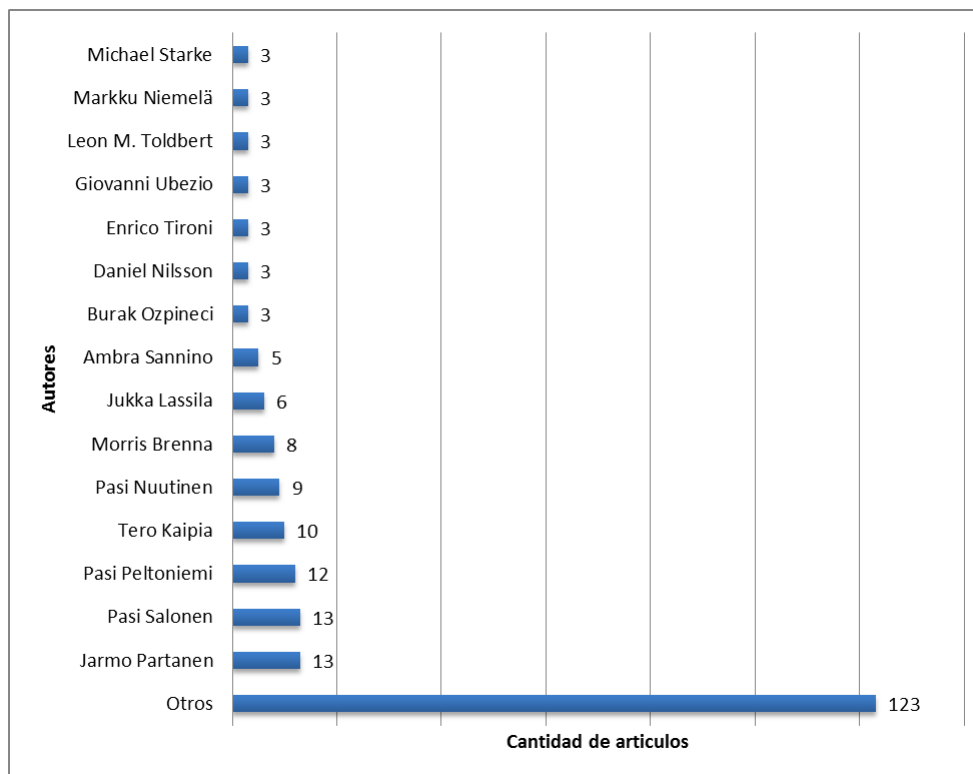


Figura 52 Cantidad de publicaciones por autor.

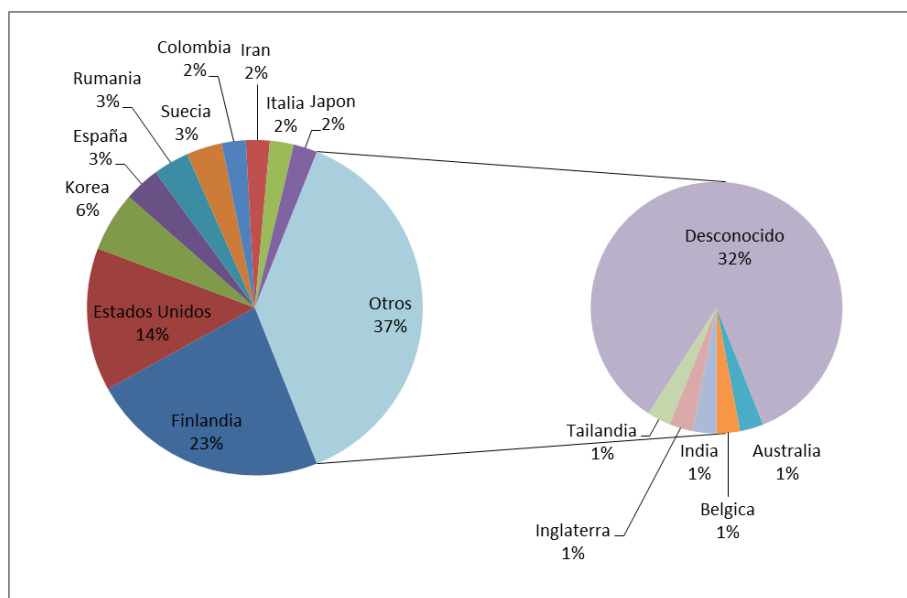


Figura 53 Porcentaje de participación en investigaciones según su país de origen.

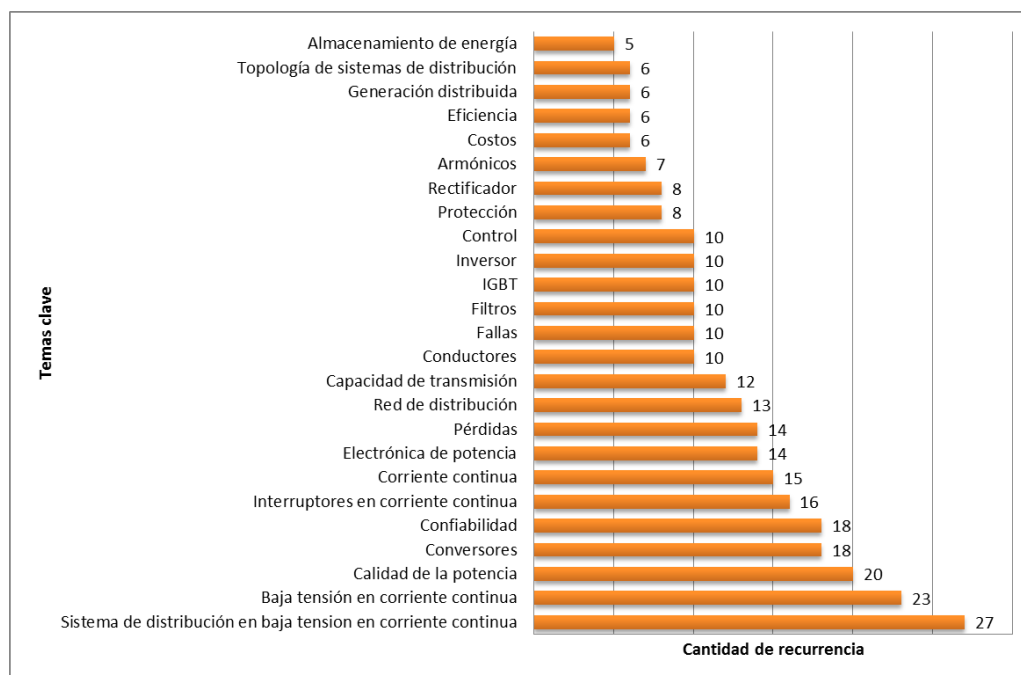


Figura 54 Recurrencia de las palabras claves en la búsqueda de artículos.

En las siguientes graficas se puede observar la dinámica de registro de patentes durante los últimos 17 años:

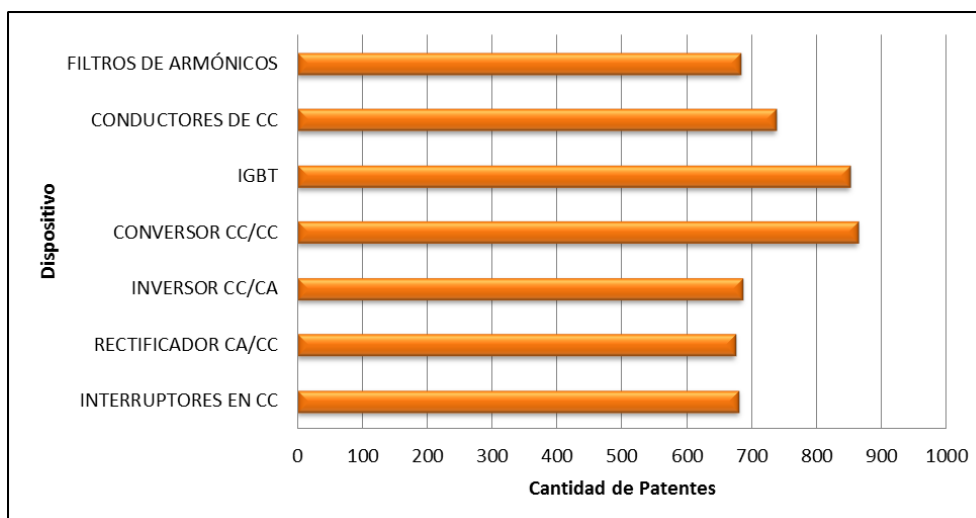


Figura 55 Cantidad de patentes por dispositivo.

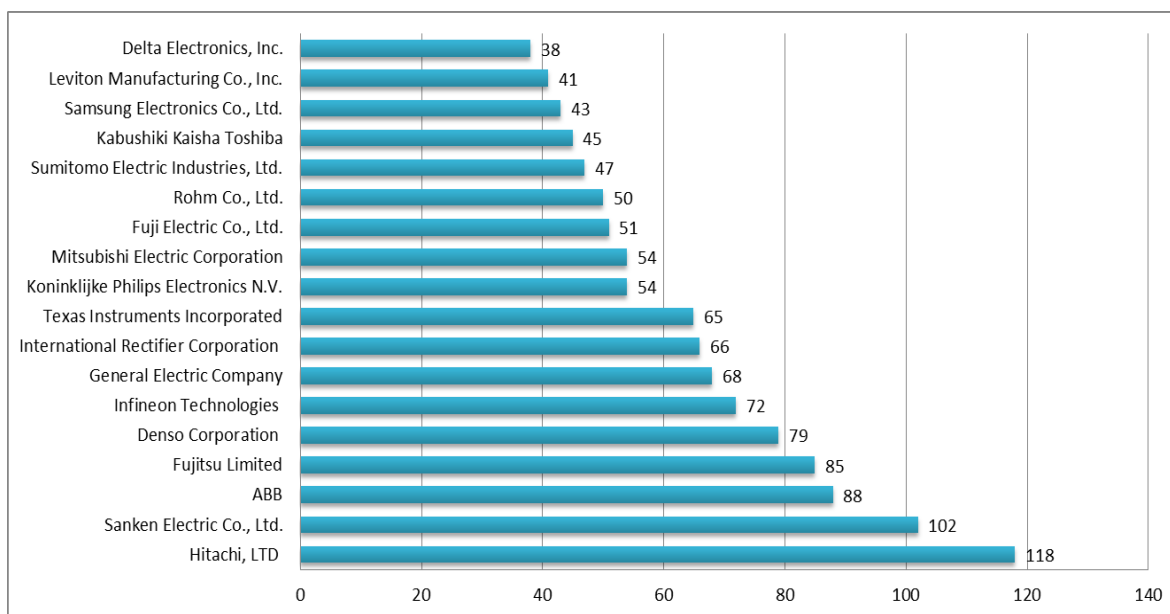


Figura 56 Cantidad de patentes registradas por fabricante.

ANEXO 4

Especificaciones Técnicas De Los Dispositivos Utilizados En El Modelo.

1. TRANSFORMADOR DE TENSIÓN TRIFÁSICO.

Fotografía de la placa de datos del transformador utilizado en el modelo del presente proyecto. Cortesía CHEC S.A. E.S.P.



Figura 57 Datos de placa del transformador de tensión trifásico.

2. DATOS DE FABRICANTE DE LAS LUMINARIAS LED.



CHARACTERISTICS

Characteristics	Unit	Minimum	Typical	Maximum
Thermal Resistance, junction to solder point	°C/W		8	
Viewing Angle (FWHM) - white	degrees		90	
Viewing Angle (FWHM) - royal blue, blue, green	degrees		100	
Temperature Coefficient of Voltage - white, royal blue, blue, green	mV/°C		-4.0	
ESD Classification (HBM per Mil-Std-883D)			Class 2	
DC Forward Current - white ≥ 5000 K, royal blue, blue	mA			1000
DC Forward Current - white < 5000 K, green	mA			700
DC Pulse Current (@ 1 kHz, 10% duty cycle)	A			1.8
Reverse Voltage	V			5
Forward Voltage (@ 350 mA)	V		3.3	3.9
Forward Voltage (@ 700 mA)	V		3.5	
Forward Voltage (@ 1000 mA) - white ≥ 5000 K, royal blue, blue	V		3.7	
LED Junction Temperature	°C			150

Fuente: <http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XRE>

3. ESPECIFICACIONES DEL MOTOR EN CC.

El motor utilizado en el desarrollo de esta tesis es fabricado por Imperial Electric para uso de ascensores de personas; las especificaciones del motor se señalan en el recuadro rojo de la siguiente tabla.



IMPERIAL

ELECTRIC

The Driving Force In Motion

DC Elevator Hoist Motor Standard Ratings

240 Volt DC Armature, Shunt Wound, Ball Bearings, Elevator End Play, 50°C Rise
60 Minute Duty, Open Construction

HP	RPM	Frame	Amps (A)		Resistance (Ω)		Hot Field Volts (V)		
			Full Load Armature	Hot Field	Cold Field 25°C	Hot Field 75°C	Level Max	Run & Hold Max	Hold Prefer
10	1150	284AT	37.7	1.00	138.0	166.0	240	166	141
	850	286AT	37	1.76	85.0	102.0	240	180	153
12.5	1150	286AT	46.5	1.12	126.0	151.0	240	170	144
	850	324AT	46	1.85	81.6	96.9	240	179	152
15	1150	324AT	53	2.18	70.5	84.6	240	183	155
	850	326AT	54	2.23	68.5	82.2	240	183	148
20	1150	326AT	71	2.20	65.0	78.0	240	172	148
	850	366AT	73	2.25	63.4	76.0	240	171	146
25	1150	366AT	90	2.33	63.4	76.0	240	177	150
	850	367AT	90	2.67	56.6	68.0	240	180	153
30	1150	367AT	105	2.68	56.6	68.0	240	182	155
	850	368AT	106	3.00	47.0	56.4	240	169	143
40	1150	368AT	140	3.00	47.0	56.4	240	170	145
	850	368AT	138	4.40	31.6	40.5	240	180	145
50	1150	368AT	175	4.14	31.6	39.2	240	162	138
	850	407AT	175	4.94	28.8	36.0	240	178	150
60	1150	407AT	208	4.92	26.8	33.1	240	163	138
	850	S409AT	208	6.30	23.6	29.8	240	188	160
75	1150	S409AT	257	5.75	23.6	29.5	240	170	145
	850	409AT	264	7.60	17.4	22.1	240	168	126
100*	1150	409AT	273.0	7.15	19.2	24.8	240	178	150

* 100 HP Armature Amps at 300V DC Armature Voltage

* 100 HP Armature Amps at 300V DC Armature Voltage

Tabla 8 Datos de fabricante del motor cc.

4. CARGAS UTILIZADAS EN EL MODELO.

Residencia estrato 2:

Esta carga se encuentra compuesta por un circuito de habitación, uno de cocina y otro de iluminación, los cuales se explican a continuación.

- Habitación: Este circuito está compuesto por una lámpara incandescente, un computador y un monitor conectados en paralelo como se muestra en la siguiente figura.

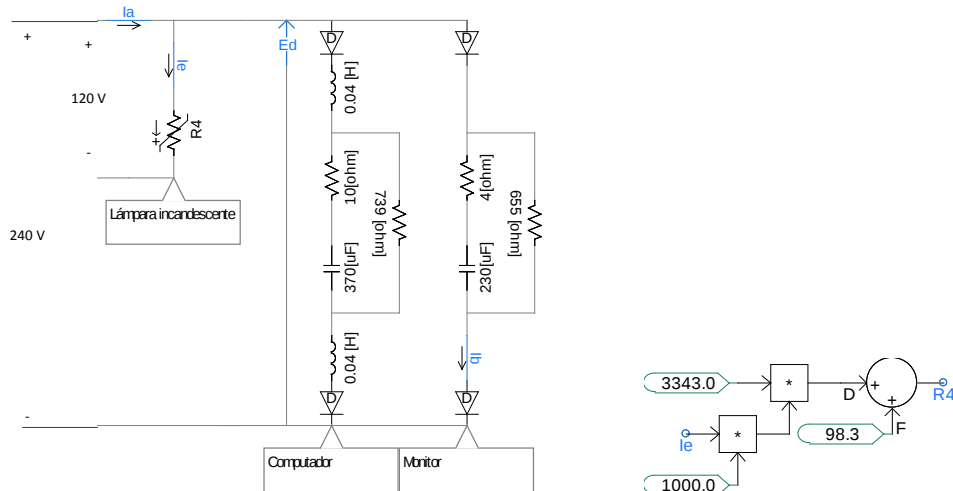


Figura 58 Circuito de las cargas de la habitación, vivienda estrato 2.

- Cocina: La vivienda estrato 2 cuenta con un circuito de cocina compuesto por una estufa, una cafetera, una sanduchera y una aspiradora.

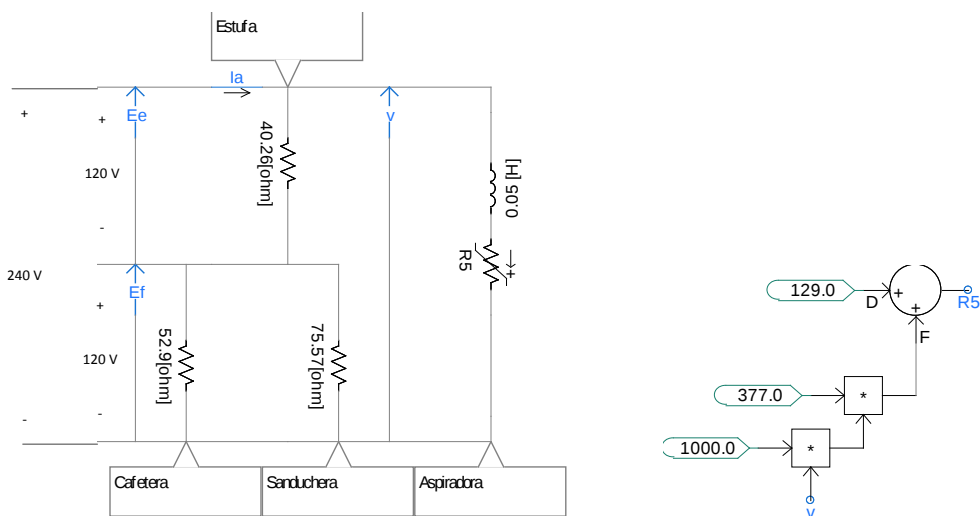


Figura 59 Circuito de las cargas de la cocina, vivienda estrato 2.

- Iluminación: Este circuito lo componen 4 lámparas incandescentes y 3 lámparas ahorradoras de energía conectadas como se muestra en la Figura 60.

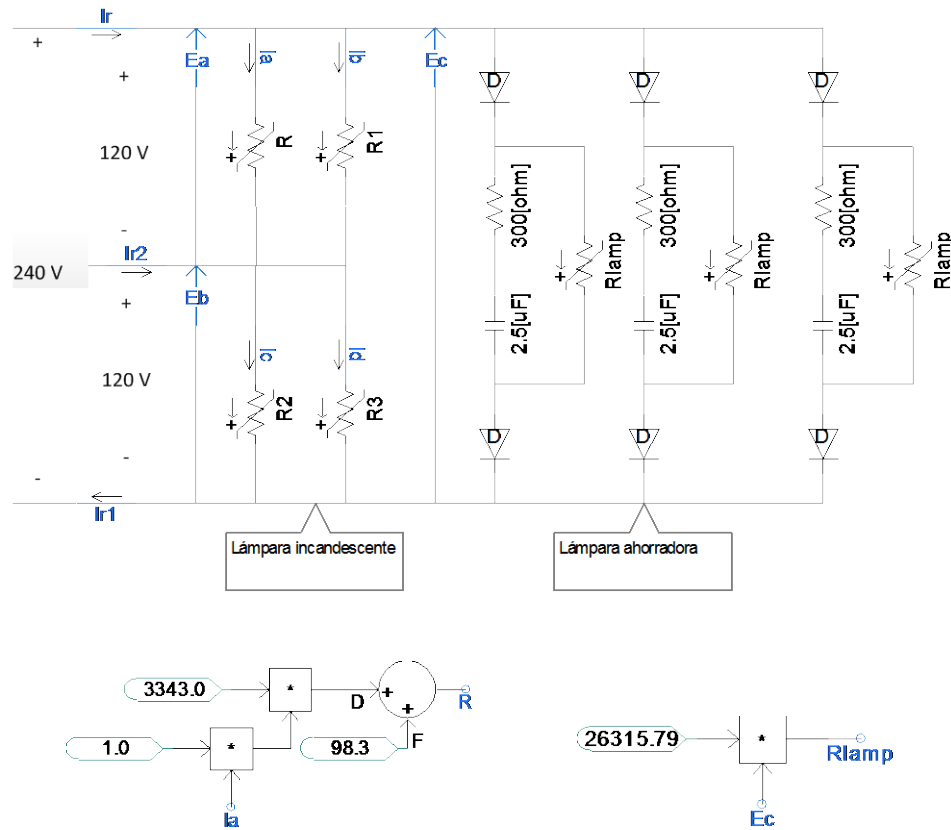


Figura 60 Circuito de iluminación de la vivienda estrato 2.

Vivienda estrato 4

Al igual que la vivienda estrato 3; esta carga se compone de tres circuitos, uno de ellos está destinado a la cocina, el segundo a la habitación y el tercero a la iluminación de la vivienda como se describe continuación:

- Habitación: Este circuito se compone de una lámpara ahorradora de energía, un computador, un monitor y un televisor, todas estas cargas están energizadas a 240 V_{cc}.

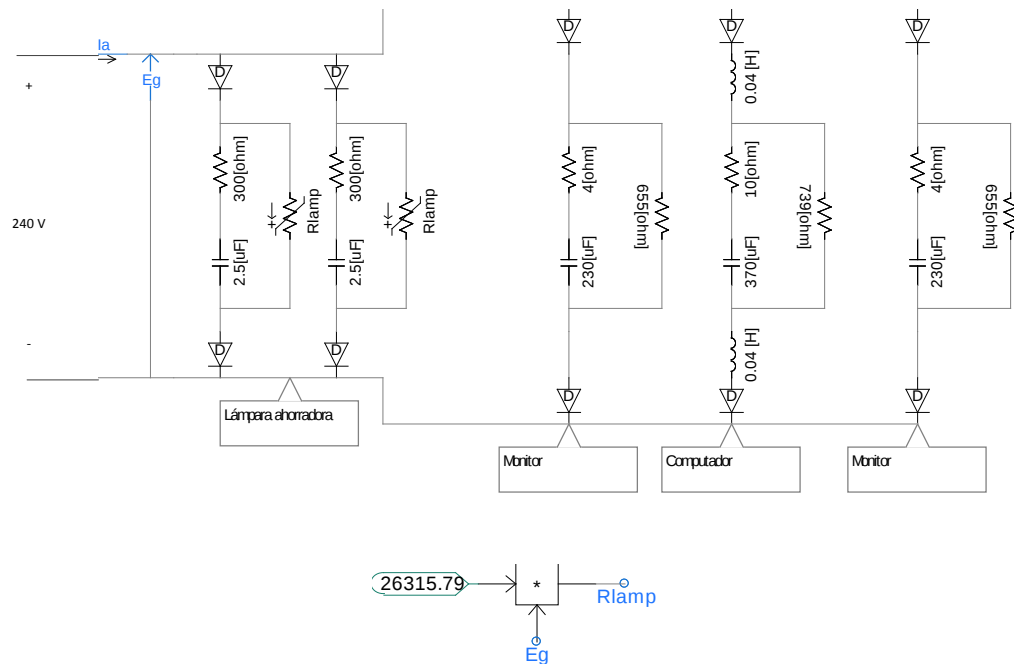


Figura 61 Composición del circuito de la habitación, vivienda estrato 4.

- Cocina: la vivienda estrato 4 tiene en su circuito de cocina una cafetera, una estufa eléctrica, una sanduchera, un hervidor eléctrico y una aspiradora, tal como se puede ver en la Figura 62.

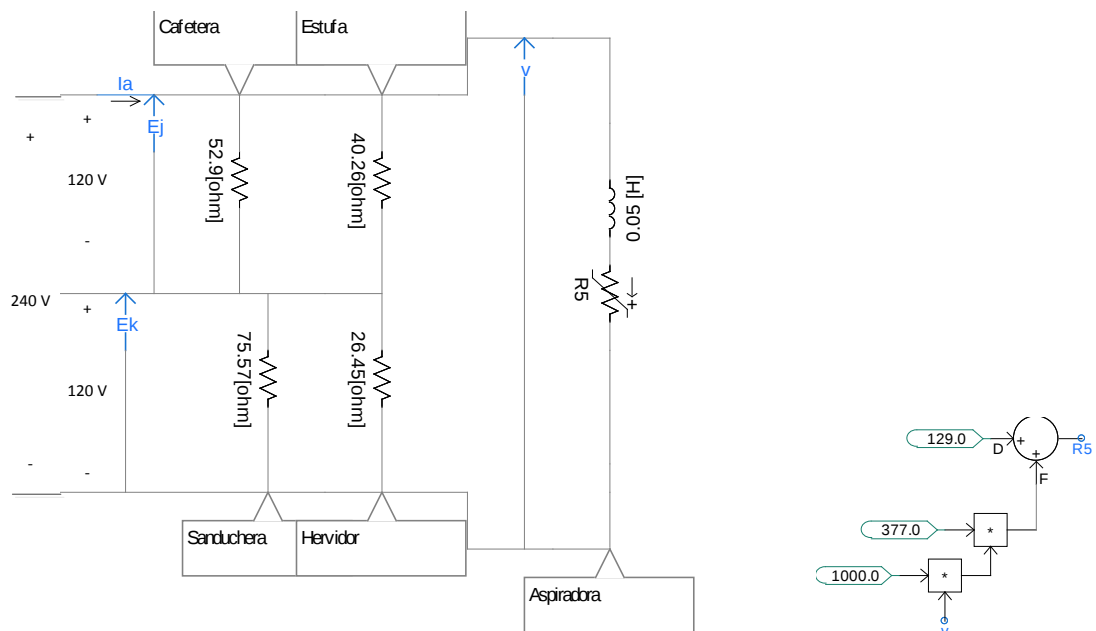


Figura 62 Circuito de cocina, vivienda estrato 4.

- Iluminación: En la vivienda estrato 4 se cuenta con un circuito de iluminación de 6 lámparas ahorradoras de energía y 3 lámparas fluorescentes en paralelo como se puede observar en la Figura 63

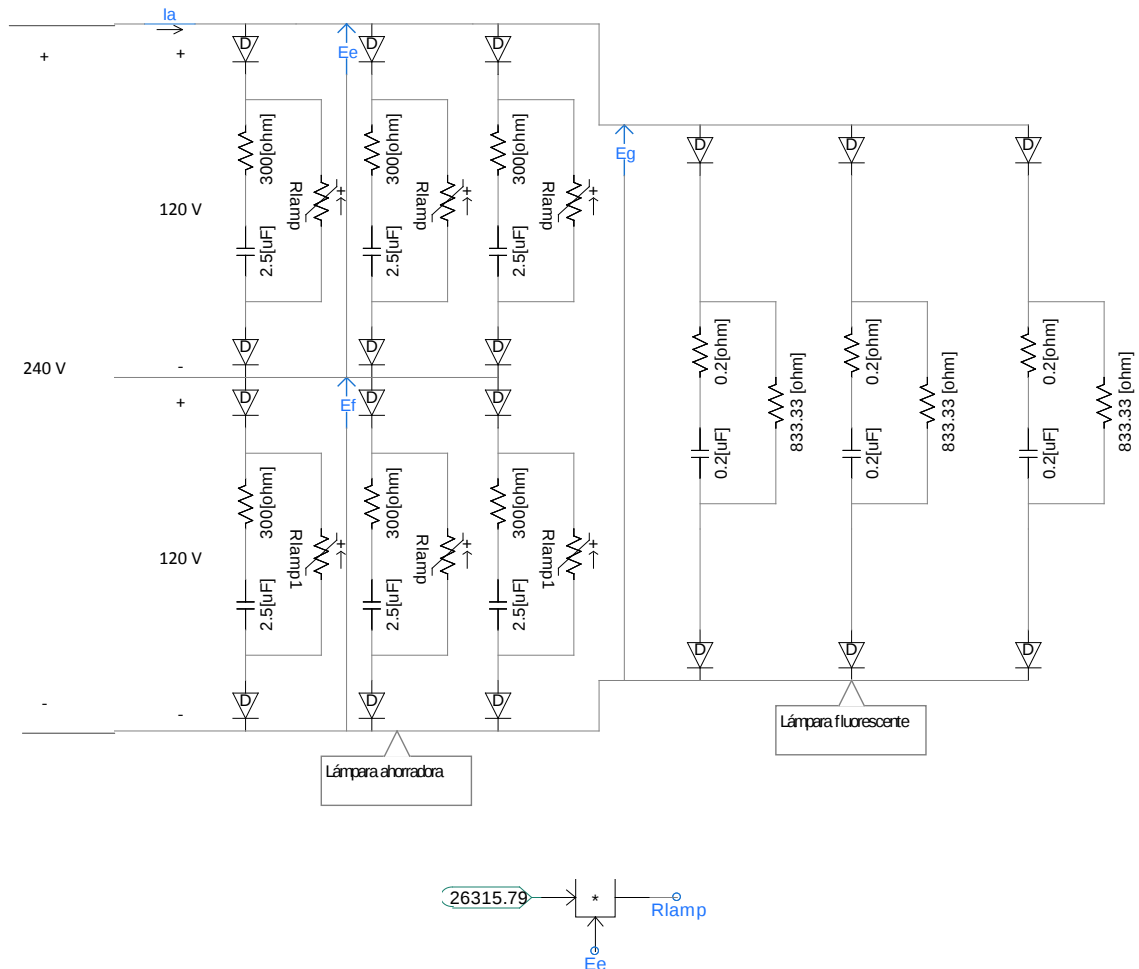


Figura 63 Circuito de iluminación de la vivienda estrato 4.