

## **Redes de Distribución en Corriente Continua: Estado de su aplicación y modelado**

*Angélica M. GARCÍA, Idi A. ISAAC*

*Facultad IEE; Universidad Pontificia Bolivariana; Cir. 1 #70-01, B11, Medellín, Colombia*  
[am.garcia@live.com](mailto:am.garcia@live.com)

Resumen: Las redes de distribución en corriente continua han surgido como una alternativa para mejorar la calidad de la potencia, la viabilidad y el área de cobertura de las redes de distribución de energía. En este documento se describen los diferentes componentes de este tipo de redes y finalizando con los con el desarrollo de un modelo básico de estas redes de distribución en cc para observar y analizar el comportamiento de la corriente, las tensiones tanto en cc como en ca y conocer el impacto que estas redes pueden presentar en las redes de ca. *Copyright © 2013 UPB.*

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, its state of the art.

Keywords / Palabras clave: Low voltage direct current, power distribution systems, PSCAD/ Baja tensión en corriente continua, sistemas de distribución de potencia, PSCAD/EMTDC.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la calidad de la potencia entregada a través de la red de distribución ha disminuido debido a la gran cantidad de nuevas tecnologías que se conectan a la red eléctrica a diario. Las redes de distribución en corriente continua es una de las posibles herramientas que permitan mejorar esta problemática al permitir la conexión de cargas que funcionen con corriente continua sin necesidad de inyectar gran cantidad de armónicos a la red de corriente alterna e incrementar la calidad de la potencia que es suministrada al usuario final [1] [2].

La evolución e innovación de los componentes de la electrónica de potencia a legado al punto en el que los sistema de distribución en cc pueden ser comparados técnicamente con los sistemas de distribución en ca teniendo como resultado muchas ventajas útiles para mejorar las redes de distribución existentes, como la falta de sincronismo y la alta regulación de tensión [3], pero también tiene desventajas que son materia de estudio como la distorsión armónica inducida al lado de ca y los esquemas de protección aplicables a estas redes [2] [4].

Debido a la alta tendencia de impulsar este nuevo sistema de redes de distribución en cc, muchas compañías alrededor del mundo, como ABB y Siemens con el apoyo de la unión europea, han desarrollado nuevos componentes que permiten mejorar las debilidades que presentan estas redes [5] [6]. Adicionalmente, la

IEC y la IEEE, entre otras entidades normativas, tienen un fuerte interés en desarrollar normativas que sirvan de guías para diseñar y regular el funcionamiento de las redes de distribución en cc [1] [7] [8].

## 2. CONCEPTOS BÁSICOS DE REDES LVdc.

Las redes de distribución en cc están compuestas por una fuente de energía en ca, un rectificador ca/cc, convertidores cc/cc, conductores y cargas.

### 2.1. Niveles de Tensión y Rectificadores.

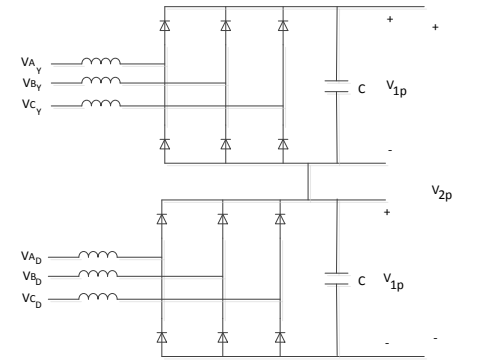
En los sistemas de distribución en cc es posible tener 2 niveles de tensión, el primero es bipolar y el segundo es el monopolar; para poder tener estos dos niveles de tensión es necesario conectar un rectificador ca/cc a la salida de la fuente de energía de ca. Existen muchos tipos de rectificadores pero los más versátiles por su control son los rectificadores trifásicos de 6 pulsos o de 12 pulsos con filtro capacitivo. Al utilizar un rectificador de 6 pulsos se puede tener una tensión monopolar 2 veces el valor rms de la tensión de ca, con este mismo rectificador también se puede tener un nivel de tensión bipolar pero la diferencia con el anterior radica en que el filtro capacitivo tiene un tap central que divide el capacitor en 2 capacitores de igual valor y así tener dos tensiones monopolares de igual valor al rms de la tensión de ca y una tensión bipolar que resulta de la suma de las tensiones

monopolares. Para utilizar el rectificador de 12 pulsos se deben tener ciertas consideraciones como la de la disponibilidad de conexión a un transformador trifásico tridevanado Dyd con relación 1:1 entre el devanado secundario y terciario, al igual que el rectificador de 6 pulsos con tap central, hay la posibilidad de conexión a tensión monopolar o bipolar; sin embargo, la ventaja más característica de estos rectificadores es que ofrece un nivel de tensión bipolar de 4 veces el valor rms de la tensión de ca y una tensión monopolar de 2 veces el valor rms de la tensión ca. [1][3]. Las anteriores topologías son mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de rectificadores ca/cc.

Tipo de rectificador	Circuito esquemático
6 Pulsos Monopolar	
6 Pulsos Bipolar	

12 Pulsos Bipolar



## 2.2. –Componentes Electrónicos

Todos los rectificadores están compuestos por los mismos componentes, ya sean diodos, tiristores o IGBTs. Los diodos son los mas simples de los 3, su apertura y cierre se condicionan al comportamiento de la red y no pueden ser controlados; los tiristores operan mas rápido que los diodos y soportan altas corrientes pero su operación se rige por un control de disparo que puede ser complejo si el sistema es inestable. Por último, los IGBTs son los dispositivos mas rapidos, permiten bidireccional de flujo de corriente y niveles de tensión muy precisos, pero al igual que los tiristores, se necesita de un sistema de control para su apertura y cierre agregando mas complejidad al sistema [9]

### 2.3. Control de Tensión

Para tener un nivel de tensión de cc optimo es necesario complementar el rectificador de ca/cc con un control de disparo para los componentes electrónicos que lo conforman. Existen distintos sistemas de control pero los mas utilizados son los controlados SPWM (*Sinusoidal Pulse Wide Modulation*) usando la transformada de Park-Clark o el controlador PI convencional [10]. La transformada de Park-Clark es también conocida como la transformada dq y es uno de los controles mas confiables pero a su vez es uno de los mas costos [11]. El controlador SPWM basado en constantes PI es mas sencillo de implementar pero es inestable y necesita ser reajustado a menudo [1] [10].

### 2.4. Conversores cc/cc.

Este dispositivo se encarga de aumentar o disminuir el nivel de tensión de cc, para esto se dispone de 2 tipos [9]. El primero es el convertor Buck que es utilizado para reducir el nivel de tensión, ver Fig. 1 [9] [12].

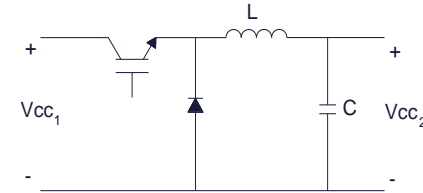


Fig. 1. Convertor Buck

El Segundo convertor es conocido como Boost y se diseña para aumentar el nivel de tensión y su topología se muestra en la Fig. 2 [9] [12].

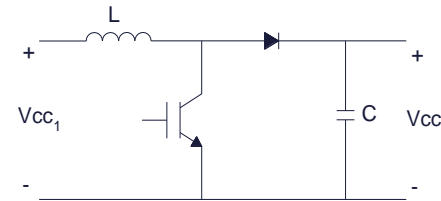


Fig. 2. Convertor Boost

### 2.5. Conductores

Todos los sistemas de distribución necesitan de conductores para transmitir la energía. Los cables o conductores que se utilizan en las redes de cc son los mismos que se utilizan en las redes de ca pero con disposición física y de conexión diferente de acuerdo a la

topología del sistema, que puede ser monopolar o bipolar, para más detalle ver la referencia [2].

### 2.6. *Filtros de armónicos*

Las redes de cc necesitan de filtros de armónicos para mejorar la calidad de la potencia en el lado de ca debido a la alta cantidad de componentes armónicas que se inyectan a la red de ca [13]. Los filtros armónicos pueden ser de carácter activo compuesto por integrados electrónicos o pasivos compuestos por resistencias, inductancias y capacitores [13] [14]. Tomando como base la referencia [11], los filtros pasivos son los filtros mas comunes y mas confiables; sin embargo, nuevas investigaciones como la presentada en [14], proponen nuevas tecnologías para realizar un filtrado mas acertado y flexible que el realizado por los filtros pasivos.

### 2.7. *Equipos de protección*

Debido a que todos los sistemas de distribución de energía son vulnerables a fallas, se necesitan de equipos de protección que por medio de interrupción de corriente permitan despejar estas fallas; las protecciones propuestas para las redes cc no tienen las mismas condiciones operativas que las protecciones de las redes de ca como la condición de cruce por cero de la señal de corriente que permite la apertura de los interruptores sin provocar mayores daños a la red y a sus dispositivos [6]. Las protecciones usadas

para las redes de ca pueden ser igualmente utilizadas en la redes de cc pero con modificaciones especiales. Por otra parte, investigaciones como [15] proponen protecciones especiales para redes de cc.

### 2.8. *Cargas*

No todas las cargas tienen el mismo comportamiento si son alimentadas con ca o con cc, muchas de ellas tienen un mejor desempeño cuando son energizadas con corriente continua; en [1] se modelan los 3 tipos de cargas disponibles en el comercio, se tienen las cargas resistivas como calentadores, las cargas de corriente constante como las lámparas fluorescentes y por ultimo las cargas de potencia constante como los computadores y los monitores.

## 3. PUBLICACIONES Y PATENTES

A medida que el interés en investigar en las redes de distribución en cc aumenta, mas publicaciones y patentes son presentadas a los medios científicos y comerciales.

### 3.1. *Publicaciones Científicas*

La IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) es la organización científica con mas artículos publicados con 62 documentos entre 1995 y 2013, la mayoría de ellos fueron

presentados en conferencias y seminarios [3]. La Universidad Tecnológica de Lappeenranta de Finlandia registra alrededor del 23% de los documentos publicados bajo la supervisión de Tero Kaipia, Jarmo Partanen, Pasi Peltoniemi y Pasi Salonen [3].

### 3.2. Patentes

Los Estados Unidos de Norteamérica y Japón son los dos países con más patentes registradas durante los últimos 16 años de investigaciones, cada uno registra alrededor del 32%; y compañías como General Electric, Sanken Electronics, Hitachi LTD, ABB y Denso Corporation han desarrollado dispositivos para ser utilizados en las redes de cc, estas compañías tienen como mínimo 69 patentes registradas [3] [16].

## 4. MODELADO Y DISEÑO DE REDES DE CC.

El modelado de las redes de distribución en cc es una herramienta que ayuda a entender y analizar el comportamiento y los principales aspectos de estas redes. El modelo presentado en este documento es un sistema basado en un rectificador de 6 pulsos bipolar con niveles de tensión  $200 V_{cc} - 100 V_{cc}$  y un convertidor cc/cc tipo Boost para aumentar el nivel de tensión en  $20 V_{cc}$  monopolares y  $40 V_{cc}$  bipolares. Las cargas utilizadas fueron 2 viviendas, 1 motor de cc de 10 HP hecho por Imperial Electric, 4 lámparas LED compuestas cada una por 14 LEDs XLamp XR-E fabricados por CREE [17] y 1 batería de vehículo

eléctrico hecha por Thunder Sky [18]. La red es alimentada por un transformador trifásico bidevanado de 75 kVA con relación de transformación 13,2/0,220 kV.

### 4.1. Analisis de Carga

Como primer paso para diseñar una red de distribución se realiza un análisis de la carga que va a ser conectada a la red, se calcula la cantidad de potencia y corriente que consumen para luego calcular el rectificador y los convertidores. Las cargas consideradas para el diseño del modelo se encuentran en la Tabla 2.

Tabla 2. Cargas de la red de cc

Nº	Nombre	Componentes	Maxima Corriente
1	Vivienda Estrato 2	Cocina: (Estufa, cafetera, aspiradora, sandwichera)	6,76 A
		Iluminación (3 lámparas fluorescentes, 4 lámparas incandescentes)	
2	House Type 4	Habitación (Lámpara incandescente, computador y monitor)	7,76 A
		Cocina: (Estufa, cafetera, aspiradora, sandwichera,	

hervidor)			
Iluminación			
(3 lamparas fluorescentes, 6 lamparas ahorradoras)			
Habitación			
(Lampara ahorradora, un televisor, computador y monitor)			
3	DC Motor	-	31,1 A
4	LED Lighting	4 Lamparas LED con 14 LEDs cada una.	7,1 A
5	EV Battery	-	3 A
Total load			55,6 A

#### 4.2. Conversor Buck

Debido a que no todas las cargas funcionan con tensión de 120 V<sub>cc</sub> y 240 V<sub>cc</sub> como en el caso de la batería de vehículo eléctrico que según su hoja de datos [18], la tensión máxima de carga es de 4 V<sub>cc</sub>; luego es necesario utilizar un conversor Buck que permita reducir la tensión de 120 V<sub>cc</sub> al voltaje requerido de 4 V<sub>cc</sub>. De acuerdo a [9], la mínima inductancia y capacitancia se calculan a partir de las ecuaciones 1 y 2:

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

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

Tomando los datos de la Tabla 3, la mínima inductancia es de 3,093 mH y la mínima capacitancia es de 62.5 mF.

Tabla 3. Datos de calculo para el conversor Buck

Variable	Valor
V <sub>Source</sub>	120 V
V <sub>Load</sub>	4 V
f <sub>comm</sub>	25 kHz
%ΔV <sub>load</sub>	0,0001%
ΔI <sub>L</sub>	0,05 A
L <sub>min</sub>	3,093333 mH
C <sub>min</sub>	62,5 mF

### 4.3. *Conversor Boost*

Uno de las principales preocupaciones en las redes de distribución es la de mantener el nivel de tensión en un valor determinado y para ello se utiliza un conversor elevador o Boost que permita aumentar el nivel de tensión bipolar de 200 V a 240 V. Utilizando el método de analiziz explicado en [9], las ecuaciones para calcular sus componentes son:

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

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

Tomando los datos de la Tabla 4 se calcula una inductancia minima de 2,67 mH y una capacitancia minima de 193,34 mF; se considera que se tiene un 25% de perdidas, lo que hace que la corriente aumente a 69,6 A

Tabla 4. Datos de calculo para el conversor Boost

Variable	Valor
$V_{\text{Source}}$	200 V
$V_{\text{Load}}$	240 V

$I_{\text{Load}}$	69,6 A
$f_{\text{conm}}$	25 kHz
$\% \Delta V_{\text{load}}$	0,001%
$\Delta I_L$	0,5 A
$L_{\min}$	2,67 mH
$C_{\min}$	193,34 mF

### 4.4. *Rectificador*

El rectificador de ca/cc diseñado para la red presentada en este artículo tiene una salida de 200  $V_{\text{cc}}$ ; este rectificador no tiene una salida de cc a la tensión nominal de 240  $V_{\text{cc}}$  para tener un margen de tolerancia de 40  $V_{\text{cc}}$  en casos de cambio de carga. Al igual que los conversores antes analizados y calculados, los componentes del rectificador se calculan según las ecuaciones 5 y 6 [12] [19]:

$$C_{\min 2p} = \frac{1}{\left(1 - \left(\frac{V_{\text{Load}} - \left(\frac{V_{\text{Load}} * \frac{\% \Delta V_{\text{Load}}}{100}}{207.852}\right)}{207.852}\right)\right) 4 * f_{\text{ac}} * \left(\frac{V_{\text{Load}}}{I_{\text{Load}}}\right)} \quad (5)$$

$$C_{\min 1p} = \frac{C_{\min 2p}}{2} \quad (6)$$



En la siguiente tabla se pueden apreciar los datos utilizados para el diseño del rectificador y el valor mínimo del filtro capacitivo:

Tabla 5. Datos de calculo para el filtro capacitivo

Variable	Valor
$V_{Load}$	200 V
$I_{Load}$	69.6 A
$f_{ac}$	60 Hz
$\% \Delta V_{load}$	0.001%
$C_{min\ 2p}$	38.37 mF
$C_{min\ 1p}$	76.74 mF

#### 4.5. Sistema de Control de Tensión

Para realizar el control de tensión en el rectificador diseñado para la red mostrada en este documento se escogió el control SPWM explicado en [9] para mantener la tensión de cc en 200 V. Este sistema de control PI compara una señal de control sinusoidal con una señal triangular portadora para generar los pulsos usados para activar la apertura o cierre de los IGBTs que componen el rectificador. El esquema de control se muestra en la

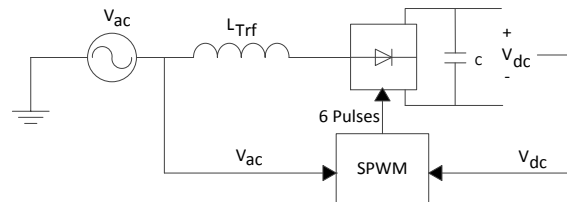


Fig. 3 Diagrama de bloques, control SPWM

Las constantes integral y proporcional del control se calculan para cumplir con las restricciones de las ecuaciones 7 y 8 [9]:

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

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

Los datos utilizados para hallar estas constantes son:

Tabla 6. Datos de calculo para el control SPWM

Variable	Valor
$V_{Load}$	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

Como se explica en [9], el sistema de control es muy inestable y las constantes calculadas ofrecen una rápida respuesta pero el sistema pierde estabilidad después de un periodo corto de funcionamiento. Las constantes de control PI fueron ajustadas con el método de prueba y error obteniéndose una constante proporcional de 7 y una constante integral de 7000 y así tener estabilidad en el sistema. Sistemas de control más complejos serán estudiados en futuras investigaciones.

#### 4.6. Modelo de Red de Distribución cc

Para realizar el modelo de la red de cc presentado en este artículo, se utilizó el programa PSCAD™/EMTDC™ debido a su flexibilidad y precisión [3]; el modelo completo se muestra en la Fig. 5. Una vez todos los componentes son diseñados y el control de tensión es sintonizado para obtener una tensión de cc de 200 V y una salida de tensión del convertor Boost de 238 V<sub>dc</sub>. Los resultados de las simulaciones muestran que esta red de

distribución tiene un fenómeno transitorio durante los primeros 500 ms y obtiene su estabilidad a los 1,5 s, este fenómeno transitorio es debido a los tiempos de carga y descarga de los capacitores e inductores presentes en la red ya sea en las cargas o en los rectificadores y convertidores, en la Fig. 4 se puede apreciar la onda de tensión medida a la salida del convertor Boost.

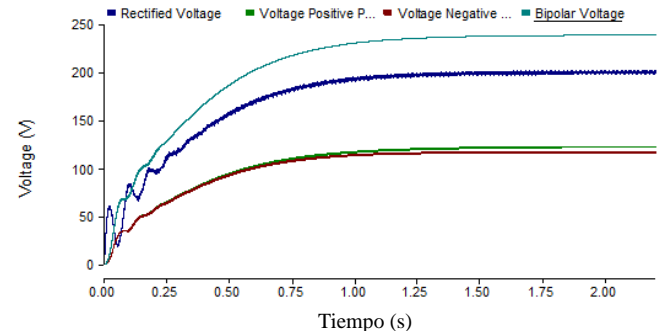


Fig. 4. Ondas de tensión resultantes de la rectificación y conversión

La máxima regulación obtenida es de 2,25% en las terminales del motor de cc conectado a 190 m de la salida del convertor Boost.

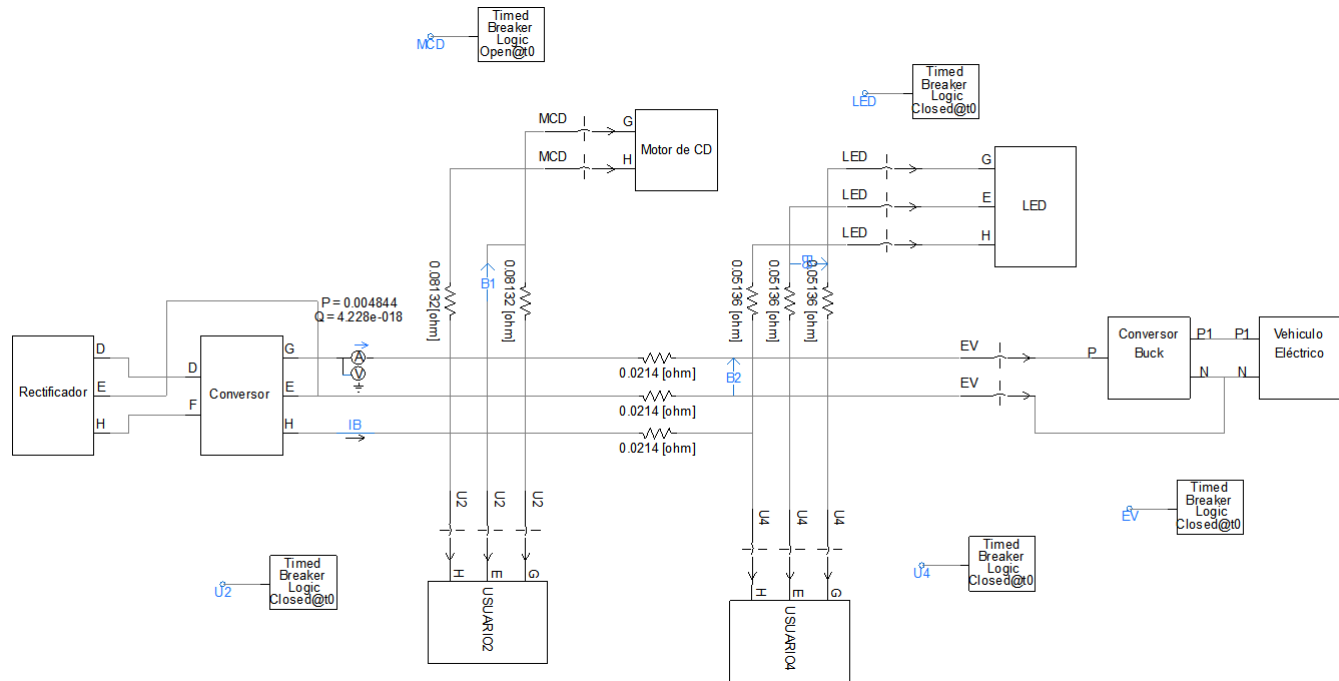


Fig. 5. Red de distribución en cc

La corriente de carga medida bajo condiciones de carga nominal de 64 A y se muestra en la

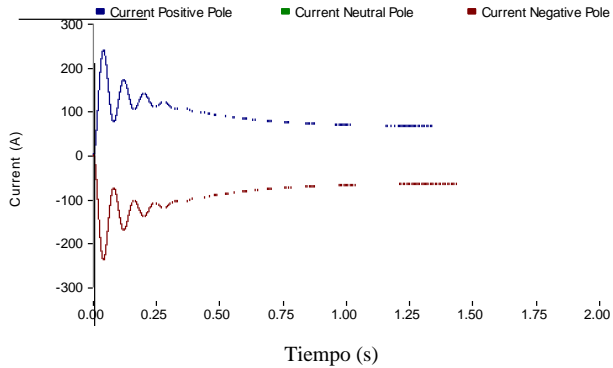


Fig. 6. Ondas de corriente de carga

Por otro lado, los armónicos de corriente inducidos a ca son lo suficientemente grandes para reducir el factor de calidad de la potencia en el sistema de ca convirtiéndose en un problema de estabilidad, ver Fig. 7 para apreciar la distorsión armónica en ca.

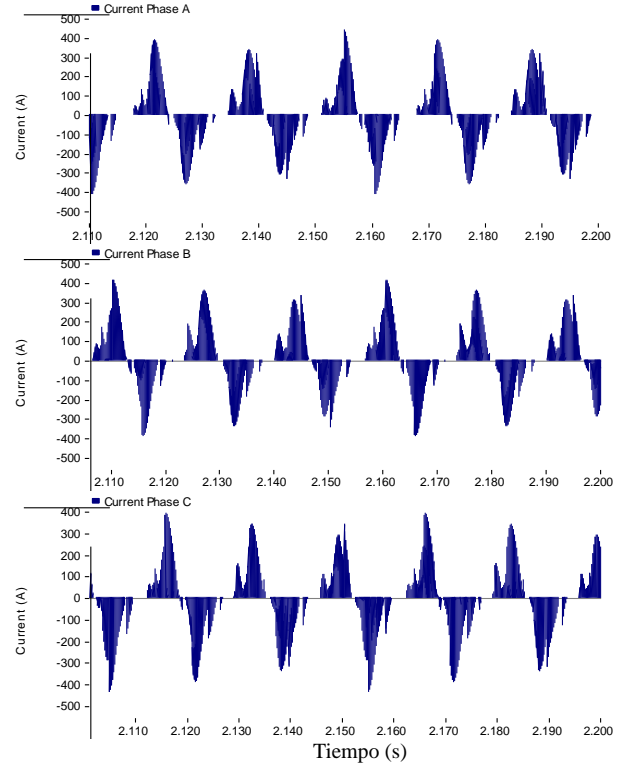


Fig. 7. Ondas de corriente en ca

#### 4.7. Metodología de diseño

Durante el desarrollo del modelo de la Fig. 5, se estructuró una metodología de diseño que es de gran utilidad para realizar paso a paso el diseño de redes de cc. La siguiente grafica muestra la el diagrama de flujos de esta metodología.

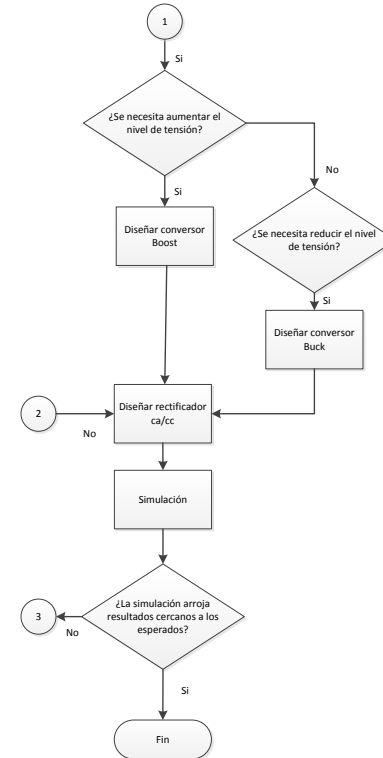
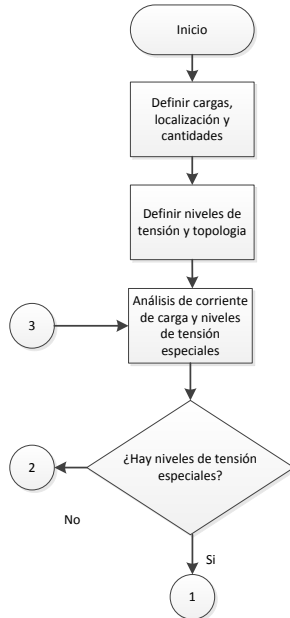


Fig. 8. Metodología de diseño de redes de cc

## 5. CONCLUSIONES

Los sistemas de distribución en cc son una alternativa para transferir cargas de las redes de ca para balancear cargas; también tiene una excelente regulación de voltaje que puede ser de gran utilidad para conectar cargas a largas distancias, a las cuales las redes de ca exceden el límite de regulación máxima.

Una de las grandes ventajas de este tipo de redes es la capacidad de conectar fuentes no convencionales de energía, así como permitir la consolidación de los sistemas de energía con generación distribuida y extender el concepto de redes inteligentes.

A pesar de que se logra estructurar una metodología de diseño de redes de cc, es necesario profundizar cada uno de los pasos de esta metodología para mejorar el diseño de estas redes, ya que no se cuenta con un ítem que especifique el diseño y especificación de las posibles protecciones a utilizar en estas redes.

La estabilidad de los sistemas de distribución en cc está ligada al control de disparo de los IGBTs que componen el rectificador y es necesario mejorar este sistema de control para tener un sistema de control adaptativo y dinámico que modifique sus constantes al mismo tiempo que la carga se modifique. Algunos de los sistemas de control alternativos son los sistemas de lógica difusa o SPWM con transformada dq, las cuales son materia de estudio y serán documentadas en un próximo artículo

En estos momentos no se tiene un modelo desarrollado para las protecciones en redes de cc; por lo tanto no se pudo simular fallar de estas redes, ni tampoco se pudo simular el comportamiento de las protecciones. Por lo tanto, es necesario desarrollar un modelo computacional de protecciones con el cual se pueda estudiar los tipos de fallas que se puedan presentar, su impacto y los criterios de diseño que deben cumplir.

## REFERENCIAS

- [1] Daniel Nilsson, "Dc Distribution Systems," Chalmers University Of Technology, Goteborg, Sweden, 2005.
- [2] Pasi Salonen, Tero Kaipia, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi And Jarmo Partanen, "An LvdC Distribution System Concept," P. 7.
- [3] Diego Rojas, "Estado Del Arte De Las Redes De Distribución De Energía En Corriente Continua," Tesis De Pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [4] 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.

- [5] Diego Alejandro Rojas Bolaños, “Estado Del Arte De Las Redes De Distribución De Energía En Corriente Continua (Cc),” Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, 2013.
- [6] Pasi Salonen, Pasi Nuutinen, Pasi Peltoniemi, And Jarmo Partanen, “LvdC Distribution System Protection-Solutions, Implementation And Measurements.”
- [7] “Nedo:Japan-U.S. Cooperation For Smart Grid International Standardization.” [Online]. Available: [http://www.nedo.go.jp/english/whatsnew\\_20120322\\_index.html](http://www.nedo.go.jp/english/whatsnew_20120322_index.html). [Accessed: 01-Aug-2013].
- [8] “Danish Island Test Smart Grid - Ieee Spectrum.” [Online]. Available: <http://spectrum.ieee.org/podcast/at-work/innovation/danish-island-tests-smart-grid>.
- [9] Daniel W. Hart, *Electrónica De Potencia*. Madrid: Prentice Hall, 2001.
- [10] J. W. Dixon, “Chapter 12 - Three-Phase Controlled Rectifiers,” In *Power Electronics Handbook (Second Edition)*, Muhammad H. Rashid, Ph.D., Fellow Ieee, And P. D. Fellow Ieee2 - Muhammad H. Rashid, Eds. Burlington: Academic Press, 2007, Pp. 201–243.
- [11] 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.
- [12] N. Mohan, T. M. Undeland, And W. P. Robbins, *Power Electronics : Converters, Applications, And Design*. New York [Etc.]: John Wiley & Sons, 2003.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] “Free Patents Online,” 25-Jan-2013. [Online]. Available: <http://www.freepatentsonline.com/>. [Accessed: 25-Jan-2013].
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] *Power Electronics Handbook: Devices, Circuits, And Applications*, 2nd Ed. Burlington, Ma: Academic Press, 2007.

## AUTORES

*Angélica María GARCÍA GUALDRÓN.* Ingeniera Electricista de la Universidad Industrial de Santander de Bucaramanga. Actualmente está realizando la Maestría en Ingeniería con énfasis en Transmisión y Distribución de Energía en la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín. Con experiencia en diseño y remodelación de redes de distribución y transmisión de energía, y diseño de sistemas de control y protección de subestaciones eléctricas de alta y extra alta tensión.

*Idi Amin ISAAC MILLÁN.* Ingeniero Electricista, Especialista y Magíster en Ingeniería Área Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica de la Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín; con estudios doctorales en Ingeniería de la Universidad de Kempten, Alemania. Adscrito al Grupo de Investigación en Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica TyD-UPB. Actualmente sus investigaciones se orientan al desarrollo de micro-redes inteligentes, generación distribuida, almacenamiento de energía, transporte eléctrico y supervisión de dichos sistemas.