

Development of an application for calculating the power flow in bipolar DC networks in the MATLAB application environment.

Desarrollo de una aplicación para el cálculo del flujo de potencia en redes DC bipolares en el entorno de aplicaciones de MATLAB

Oscar Danilo Montoya

PhD in Engineering, Master's degree in Electrical Engineering, electrical engineer. Assistant professor of the Department of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D. C., Colombia.

Email: odmontoyag@udistrital.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6051-4925>

Jhan Carlos Rocha

Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Email: jcrochc@correo.udistrital.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4978-6094>

Daniela Fontecha

Estudiante de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.

Email: dfontechas@correo.udistrital.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3053-4877>

Abstract

Objective: This work proposes the design of a graphical interface to solve the problem of power flow in unbalanced direct current (DC) bipolar networks, through the method of successive approximations. The objective of the graphical interface is to make it easier for the user to calculate the power flow without the need for prior knowledge of programming languages.

Methodology: This work is divided into three stages: the first presents the mathematical model of power flow in unbalanced DC bipolar networks through the method of successive approximations; the second presents the implementation of the graphical interface applying the mathematical model mentioned above; the third stage presents the main characteristics of the DC systems under study, in addition to the solution of the power flow problem through the program and the comparison of the results reported in the specialized literature.

Results: The numerical validations show that the program solves the power flow and finds the same solution found in the specialized literature and has an efficiency of 100%, which confirms the veracity of the program and allows it to be a reliable source of information.

Conclusions: The interface that is designed seeks to be user-friendly so that with this you can easily calculate the power flow of unbalanced DC bipolar networks, this calculation is made through the method of successive approximations. This document shows the step by step of creating the interface, which is tested with 2 types of networks and thus check results in order to corroborate the validity of the program.

Keywords:

application development, power flow, successive approximation method, bipolar DC networks, unbalanced systems.

Resumen

Objetivo: Este trabajo plantea el diseño de una interfaz gráfica para resolver el problema de flujo de potencia en redes bipolares de corriente continua (DC) desbalanceadas, mediante el método de aproximaciones sucesivas. El objetivo de la interfaz gráfica es facilitarle al usuario, realizar el cálculo del flujo de potencia sin la necesidad de tener conocimientos previos en lenguajes de programación.

Metodología: Este trabajo está dividido en tres etapas: la primera presenta el modelo matemático de flujo de potencia en redes bipolares DC desbalanceadas mediante el método de aproximaciones sucesivas; la segunda presenta la implementación de la interfaz gráfica aplicando el modelo matemático mencionado anteriormente; la tercera etapa presenta las principales características de los sistemas DC bajo estudio, además de la solución del problema de flujo de potencia por medio del programa y la comparación de los resultados reportados en la literatura especializada.

Resultados: Las validaciones numéricas demuestran que el programa resuelve el flujo de potencia y encuentra la misma solución que se encuentra en la literatura especializada y tiene una eficiencia del 100%, lo cual confirma la veracidad del programa y permite que sea una fuente confiable de información.

Conclusiones: La interfaz que se diseñó busca ser amigable con el usuario para que con esto pueda calcular el flujo de potencia de redes bipolares DC desbalanceadas de forma fácil, este

cálculo se realiza a través del método aproximaciones sucesivas. En este documento se muestra el paso a paso de la creación de la interfaz, la cual es puesta a prueba con 2 tipos de redes y así comprobar resultados con el fin de corroborar la validez del programa.

Palabras clave: desarrollo de aplicaciones, flujo de potencia, método de aproximaciones sucesivas, redes DC bipolares, sistemas desbalanceados.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de distribución son los sistemas responsables de proveer servicio de electricidad a todos los usuarios residenciales, comerciales e industriales en niveles de media y baja tensión (Ridzuan, Fauzi, Roslan, & Saad, 2020). Estas redes eléctricas son típicamente operadas en corriente alterna (i.e., CA), además, son construidas con estructura radial para simplificar esquemas de coordinación de protecciones y reducir costos de inversión (Lavorato, Franco, Rider, & Romero, 2012). Con el reciente avance de la electrónica de potencia, los sistemas de generación de energía a través de fuentes renovables no convencionales, así como, el desarrollo de tecnologías eficientes de almacenamiento de energía, los sistemas eléctricos de distribución están pasando desde sistemas pasivos a redes activas que interactúan con el usuario de manera inteligente (Siano, Rigatos, & Piccolo, 2012). Por otro lado, debido al desarrollo de los sistemas de conversión de energía, actualmente es posible tener sistemas de distribución operados únicamente en corriente continua (CC) (Garces, Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids, 2017), y esquemas híbridos, que aprovechan lo mejor de las tecnologías de CA y CC (Zhang, y otros, 2016), los cuales tienen mejor desempeño en cuanto a pérdidas de energía y perfiles de tensión (Grisales-Noreña, Montoya, Gil-González, Perea-Moreno, & Perea-

Moreno, 2020); además, al no existir los conceptos de potencia reactiva y frecuencia, sus esquemas de control son más simples de diseñar, ya que la única tarea es la de regulación de tensión en el barraje de corriente continua (Gil-González, Montoya, Restrepo, & Hernández, 2021).

En el caso de las tecnologías de operación en CC, estas redes pueden ser construidas con dos topologías típicas, siendo la primera asociada a redes monopolares, i.e., redes con un polo positivo y un conductor de retorno neutro (Monteiro, y otros, 2021). En segundo lugar, están las redes de CC con topología bipolar, es decir, redes que se componen de un polo positivo y un polo negativo que tienen la misma magnitud del voltaje, y un conductor de retorno neutro (Chew, Xu, & Wu, 2019). La ventaja de la configuración bipolar es que teóricamente tienen la capacidad de transferir dos veces la potencia de la configuración monopolar; además, permiten la conexión de cargas que necesiten nivel de tensión equivalente a dos veces la diferencia de potencia entre el polo positivo o negativo y el neutro (den Broeck, y otros, 2017).

Para analizar las redes de distribución de CC con topologías bipolares o monopolares es necesario recurrir a herramientas de flujo de potencia, ya que estas permiten conocer el estado operativo de la red en condiciones de estado estable (Montoya, Gil-González, & Garcés, 2020). Sin embargo, en la literatura se encuentran muchos reportes sobre flujo de potencia en redes monopolares (Garcés & Montoya, 2019); pero en el caso de redes bipolares, existen pocos reportes y la mayoría de estos están enfocados al análisis de flujo de potencia óptimo (Mackay, y otros, 2018).

Algunos de los trabajos realizados para redes bipolares se presentan a continuación. Los autores de (Chew, Xu, & Wu, 2019) presentan una metodología de optimización

multiobjetivo para el balance de fases en sistemas de distribución DC bipolares; sin embargo, los autores desprecian la presencia de cargas de potencia constante y se concentran únicamente en modelos de impedancia y corriente constante, lo cual simplifica en problema de flujo de potencia y permite obtener modelos de programación lineal entera-mixta. En (Mackay, y otros, 2018), los autores analizan el efecto de las cargas asimétricas en la congestión de la red, con lo cual se propone un flujo de potencia óptimo para obtener los precios marginales por nodo a través de una formulación lineal equivalente. Los autores de (Lee, Kim, & Moon, 2021) presentan un modelo de flujo de potencia óptimo recursivo para redes DC bipolares con múltiples cargas asimétricas. Los resultados del modelo se validan en sistemas de 6 y 33 nodos. La formulación matemática propuesta es desarrollada en función del método de inyección de corriente, y los resultados se comparan con las simulaciones de estas redes en el software PSCAD/EMTDC. Finalmente, los autores de (Kim, Cho, Kim, Cho, & Lee, 2020) presentan una metodología de simulación en el software PSCAD/EMTDC para resolver el problema de flujo de potencia redes bipolares para la cual se emplea un sistema de prueba de 3 nodos. Sin embargo, no presentan ningún análisis de la complejidad del modelo o prueba de convergencia bajo variaciones de carga, solo alteran los terminales de potencia constante para fuentes de corriente controlada y dejan las complicaciones de la solución a una herramienta de análisis del sistema de potencia.

Dada la revisión anterior del estado del arte en temas de flujo de potencia para redes de distribución de CC con topología bipolar, en este artículo se realizan las siguientes contribuciones: (i) se aplica el método de aproximaciones sucesivas para redes bipolares que pueden tener neutro sólidamente aterrizado o neutro flotante con cargas monopolares y bipolares, siendo este una extensión del método presentado por Montoya et al., en (Montoya,

Garrido, Gil-Gonzalez, & Grisales-Norena, 2019); y (ii) presentar el diseño de una interfaz gráfica en el entorno de aplicaciones de MATLAB, que facilite en análisis de redes bipolares con ambas topologías. Es importante mencionar que en la literatura especializada no existe ningún reporte sobre flujo de potencia para redes bipolares a través del método de aproximaciones sucesivas; además, no existe disponibilidad de software de acceso abierto para este tipo de aplicaciones; los cuales estos fueron identificados con oportunidades de investigación en la literatura especializada en los cuales este artículo de investigación pretende aportar de manera significativa.

El resto de este documento está estructurado de la siguiente forma: la sección *formulación del problema de flujo de potencia* presenta el desarrollo matemático del método de aproximaciones sucesivas para aplicaciones de redes bipolares consideran la presencia de cargas monopolares y bipolares considerando la posibilidad de tener el conductor de neutro sólidamente aterrizado en todos los nodos, o neutro flotante. En la sección denominada *Diseño de la interfaz gráfica*, se presentan las principales características de la herramienta de desarrollo de aplicaciones de MATLAB. En esta sección se presentan los principales aspectos de la herramienta de simulación desarrollada. En la sección titulada *Sistema de prueba y características*, se presentan el sistema de prueba de 21 nodos en su configuración bipolar, así como sus datos de consumo de potencia nodal, y parámetros de resistencia en las líneas. En la sección de *Resultados numéricos*, se presenta los resultados obtenidos por el método de aproximaciones sucesivas para redes bipolares a través de su implementación en la interfaz gráfica desarrollada, así como, su respectivo análisis y discusión. Finalmente, en la sección de *Conclusiones y trabajos futuros*, se describen los principales hallazgos de esta investigación, así como, posibles líneas de investigación que se pueden abordar.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE FLUJO DE POTENCIA

A lo largo de esta sección, las matrices se representarán con letras mayúsculas y en letra cursiva, los subíndices representan los nodos y los superíndices las iteraciones.

El problema de flujo de potencia en redes bipolares DC se desarrolla empleando la representación de conductancias de la red (Garces, 2017). Se considera la relación entre voltajes y corrientes usando la matriz de admitancia nodal.

$$\begin{bmatrix} I_{g,pn} \\ -I_{d,pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{gg,pn} & G_{gd,pn} \\ G_{dg,pn} & G_{dd,pn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{g,pn} \\ V_{d,pn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

donde:

$I_{g,pn}$ es el vector que contiene todas las Corrientes inyectadas en los polos positivo y negativo de los nodos slack.

$I_{d,pn}$ es el vector que contiene todas las Corrientes demandadas en los polos positivo y negativo de la red.

G_{pn} es la matriz de conductancia general que relaciona los nodos slack y demanda.

G_{pn} es la matriz de conductancia general que relaciona los nodos slack y demanda.

$G_{gg,pn}$ es la componente de la matriz G_{pn} que relaciona los nodos slack.

$G_{gd,pn}$ es la componente de la matriz G_{pn} que relaciona los nodos slack y demanda.

$G_{dg,pn}$ es la transpuesta de la matriz $G_{gd,pn}$.

$G_{dd,pn}$ es la componente de la matriz G_{pn} que relaciona los nodos de demanda.

$V_{g,pn}$ es el vector que contiene todas las salidas de voltaje de los nodos slack.

$V_{d,pn}$ es el vector que contiene todos los voltajes en los nodos de demanda.

Nótese que en la segunda fila de la ecuación (1) se expresa la relación entre las corrientes de demanda y los vectores de tensión, esto implica que la ecuación no sea lineal (debido a que estas corrientes son una función de los voltajes demandados, así como, de sus potencias), por lo tanto, se requiere de un método iterativo para poder resolver el problema de flujo de potencia (Garces, 2018).

Formulación recursiva de flujo de potencia

Para aplicar el método de aproximaciones sucesivas, se reordena la segunda fila de la ecuación (1) para obtener los voltajes en los nodos de demanda, demostrado en (Herrera-Briñez, Montoya, Alvarado-Barrios, & Chamorro, 2021), como se aprecia en la ecuación (2).

$$V_{d,pn} = -G_{dd,pn}^{-1} [G_{dg,pn} V_{s,pn} + I_{d,pn}] \quad (2)$$

La fórmula general para el análisis del flujo de potencia en redes bipolares de CC con neutro sólidamente aterrizado y cargas desbalanceadas se puede obtener agregando un contador iterativo a el vector de voltajes de demanda, basado en el segundo teorema de Tellegen (Paniagua & Prada, 2015), como el vector de corrientes de demanda está en función del vector de voltajes de demanda, la fórmula para resolver el problema de flujo de potencia es la siguiente (Montoya, Garrido, Gil-Gonzalez, & Grisales-Norena, 2019):

$$V_{d,pn}^{t+1} = -G_{dd,pn}^{-1} [G_{dg,pn} V_{s,pn} + I_{d,pn}^t] \quad (3)$$

Las iteraciones pueden detenerse cuando la diferencia entre las magnitudes de los voltajes de la iteración actual y la anterior es menor al error permitido, como se muestra en la ecuación

(4)

$$\max \left\{ \left| |V_{d,pn}^{t+1}| - |V_{d,pn}^t| \right| \right\} \leq \varepsilon \quad (4)$$

donde ε es el error de tolerancia.

Una de las grandes ventajas de usar la ecuación (3) como fórmula iterativa, es que la inversa de la matriz $G_{dd,pn}$ solo se tiene que calcular una vez en todo el proceso, ya que esta no cambia en todo el procedimiento (Montoya, Gil-González, & Garces, 2020).

Cálculo de las corrientes de demanda

La principal dificultad a la hora de resolver el problema de flujo de potencia corresponde a la relación hiperbólica entre los voltajes y las cargas de potencia constante (Simpson-Porco, Dorfler, & Bullo, 2015). En las ecuaciones (5) y (6) se presenta la corriente de las cargas conectadas entre el polo positivo y el neutro y las cargas conectadas entre el neutro y el polo negativo respectivamente.

$$I_{dk,p}^t = \frac{P_{dk,p}}{V_{dk,p}^t} \quad (5)$$

$$I_{dk,n}^t = \frac{P_{dk,n}}{V_{dk,n}^t} \quad (6)$$

donde:

$I_{dk,p}^t$ es la corriente demandada en el nodo k por el polo positivo.

$I_{dk,n}^t$ es la corriente demandada en el nodo k por el polo negativo.

$P_{dk,p}$ es la potencia consumida en el nodo k por la carga conectada en el polo positivo.

$P_{dk,n}$ es la potencia consumida en el nodo k por la carga conectada en el polo negativo.

$V_{dk,p}^t$ es el nivel de tensión en el nodo k en el polo positivo.

$V_{dk,n}^t$ es el nivel de tensión en el nodo k en el polo negativo.

Ahora, si las cargas están conectadas entre el polo positivo y el polo negativo o viceversa, las corrientes se calcularán de la siguiente manera, respectivamente:

$$I_{dk,p}^t = \frac{P_{dk,pn}}{V_{dk,p}^t - V_{dk,n}^t} \quad (7)$$

$$I_{dk,n}^t = \frac{P_{dk,pn}}{V_{dk,n}^t - V_{dk,p}^t} \quad (8)$$

donde:

$P_{dk,pn}$ es la carga de potencia constante conectada entre los polos.

Extensión para sistemas no conectados sólidamente a tierra

En el diseño de las redes bipolares de CC, especialmente en las redes de baja tensión, existe la posibilidad que el neutro no esté conectado a tierra en todos los nodos de la red, el único nodo que por obligación debe estar conectado a tierra es el nodo de alimentación de la red (Chew, Xu, & Wu, 2019); esto implica que a la formulación anterior se le deba agregar dicho efecto para el conductor de neutro, para esto se agregará a la nomenclatura anterior un nuevo subíndice a la ecuación (3), el cual indica que el cable de neutro no está sólidamente aterrizado, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$V_{d,pon}^{t+1} = -G_{dd,pon}^{-1} [G_{dg,pon} V_{s,pon} + I_{d,pon}^t] \quad (9)$$

donde:

$V_{d,pon}^{t+1}$ es el vector que contiene todos los voltajes en los nodos de demanda en orden (positivo, neutro y negativo).

$I_{d,pon}$ es el vector que contiene todas las Corrientes demandadas en los polos positivo y negativo de la red.

$V_{g,pon}$ es el vector que contiene todas las salidas de voltaje de los generadores en orden (positivo, neutro y negativo).

$G_{dd,pon}$ es la componente de la matriz de conductancia que relaciona los nodos de demanda incluyendo la conductancia del conductor de neutro.

$G_{dg,pn}$ es la componente de la matriz de conductancia que relaciona los nodos slack y demanda incluyendo la conductancia del conductor de neutro.

El efecto más significativo al incluir este fenómeno en el problema de flujo de potencia es el cálculo de las corrientes de demanda, entonces para el caso en el que una carga se encuentre conectada entre un polo y el conductor de neutro las corrientes de demanda se calculan de la siguiente manera:

$$I_{dk,p}^t = \frac{P_{dk,po}}{V_{dk,p}^t - V_{dk,o}^t} \quad (10)$$

$$I_{dk,o}^t = \frac{P_{dk,po}}{V_{dk,o}^t - V_{dk,p}^t} + \frac{P_{dk,no}}{V_{dk,o}^t - V_{dk,n}^t} \quad (11)$$

$$I_{dk,n}^t = \frac{P_{dk,no}}{V_{dk,n}^t - V_{dk,o}^t} \quad (12)$$

donde:

$P_{dk,po}$ es la carga de potencia constante conectada entre el polo positivo y el conductor de neutro.

$P_{dk,no}$ es la carga de potencia constante conectada entre el polo negativo y el conductor de neutro.

$V_{dk,o}^t$ es el voltaje del conductor de neutro en el nodo k en la iteración t.

DISEÑO DE LA INTERFAZ GRÁFICA

En esta sección se presenta la implementación de la interfaz gráfica, mediante la implementación del modelo matemático presentado en la formulación del problema de flujo de potencia (ver sección anterior), empleando el software MATLAB 2021b y la herramienta para el diseño de aplicaciones AppDesigner. En el entorno de MATLAB para ingresar a la herramienta AppDesigner se debe escribir el comando “appdesigner” en la ventana de comandos del programa, como se muestra en la Figura (1)

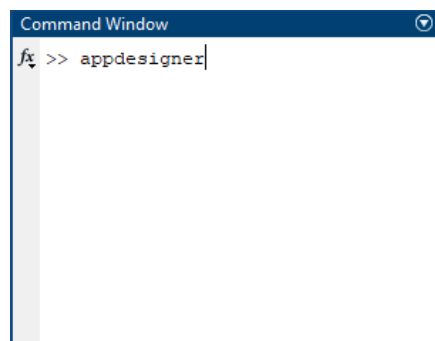


Figura 1. Apertura AppDesigner

Fuente: Autores

A continuación, se selecciona la opción de “Blank app”, seguido a esto se abrirá el espacio de trabajo donde se encuentra el “desing view” y el “code view”, en los cuales se ajustará la interfaz gráfica y el código del programa, respectivamente (Navarrete, 2021).

El “desing view” se dividirá en tres ventanas (Cálculos, gráficas y sistema), en la primera pondrán cuadros de edición de texto donde el usuario en el futuro ingresara los datos, es decir, los datos de entrada del programa, como se puede observar en la Figura 2.

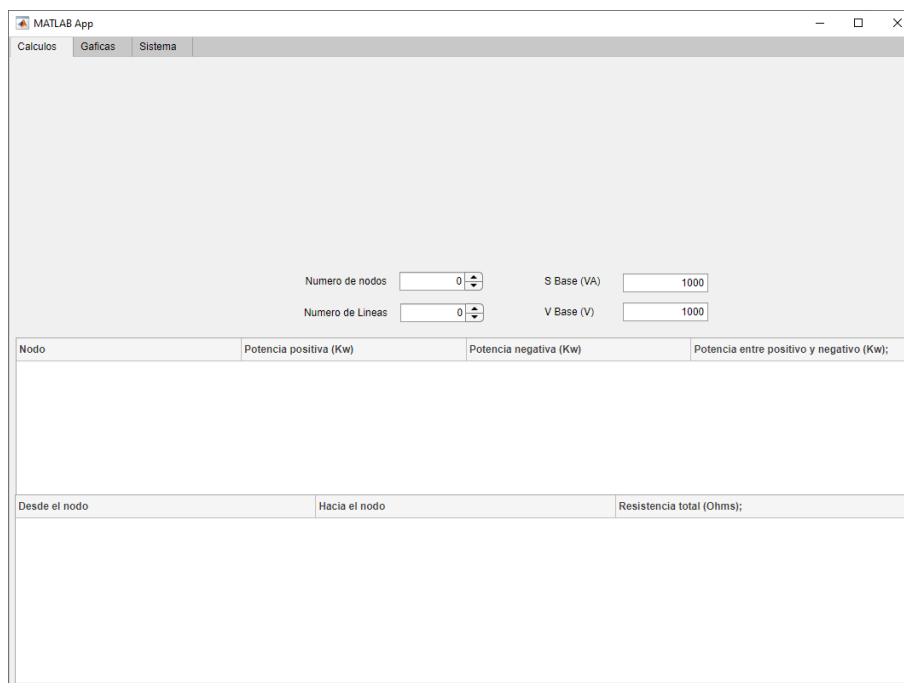


Figura 2. Ventada de cálculos (primera parte)

Fuente: Autores

Para los datos con muchas entradas se sugiere utilizar tablas, ya que es más fácil la captación de los datos y tiene una mejor presentación para el usuario, por eso se optó por implementar dos tablas para ingresar los datos de las cargas y las líneas.

Para facilitar al usuario la entrada de datos al programa, se añade una opción que permite ingresar la información desde un fichero de Excel con extensión “.xlsx”, se agregan dos

imágenes para poner los logos de la universidad, también se agregan dos cuadros de texto, uno para darle título al programa y nombrar a los autores y otro para mostrar los resultados cuando termine la ejecución del mismo, al final se añade un botón, el cual se debe presionar cuando todos los datos de entrada estén listos, en la Figura 3 se puede observar todo lo agregado:

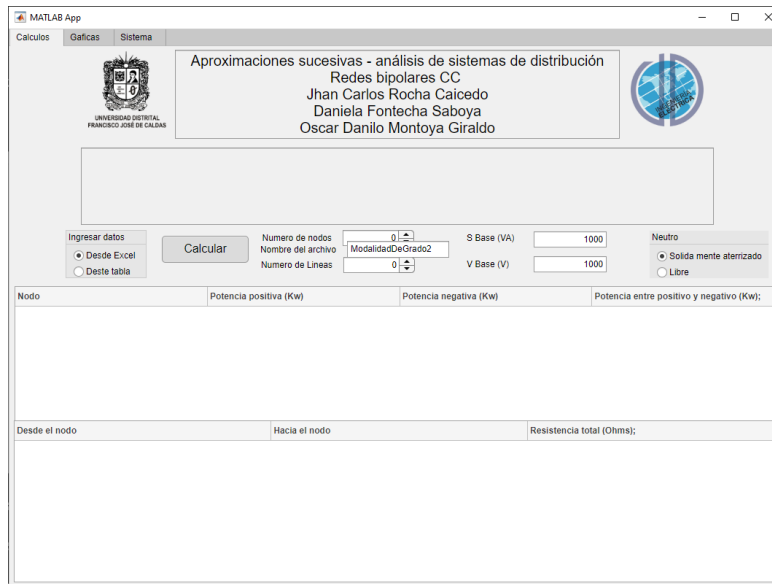


Figura 3. Ventana de cálculos parte 2

Fuente: Autores

En la ventana de “Graficas” se agregará un “Axes” que permite dibujar en el plano cartesiano los datos que se le proporcione, como se puede apreciar en la Figura 4.

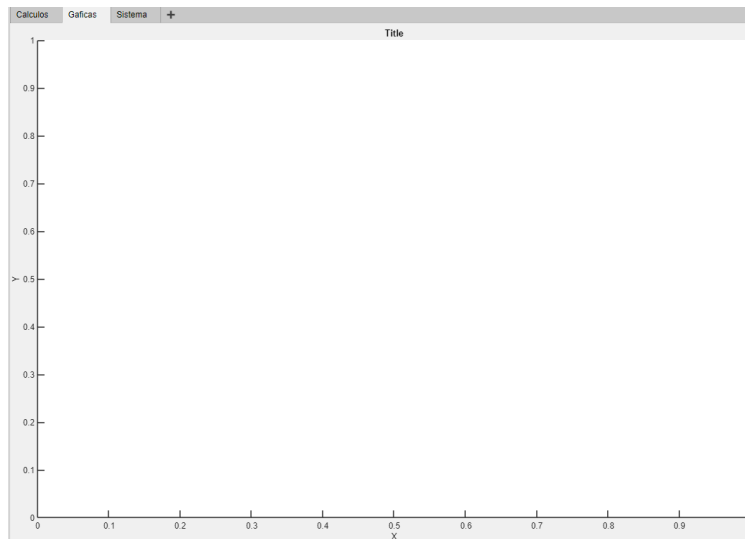


Figura 4. Ventana de graficas

Fuente: Autores

En esta ventana se muestran los perfiles de tensión al final de la ejecución del programa.

Para la tercera ventana “Sistema” también se agregará un “Axes”, pero a diferencia del anterior, este no tendrá regla y su color de fondo será transparente, logrando así que no se vea como un gráfico en el plano cartesiano, en esta ventana se graficará un pequeño acercamiento a la topología del sistema, con ayuda de la teoría de grafos (Murillo-Yarce, Garcés-Ruiz, & Escobar-Mejía, 2018).

En el “code view” es donde realmente se van a captar todos los datos ingresados en la interfaz gráfica, ya que aquí se llamarán a los cuadros y tablas que contienen dichos datos, estos se guardaran en variables globales, para poder ser llamados en cualquier parte del código y en cualquier momento de la ejecución.

Cuando se oprime el botón “Calcular” mencionado anteriormente, inicia la ejecución del código que calcula el flujo de potencia, una vez este termina la ejecución, enviara al área de

texto los resultados obtenidos al igual que a la gráfica donde se muestran los perfiles de tensión.

Después de ajustar la parte funcional del programa, se le añaden detalles de funcionamiento, para que la interfaz sea más amigable con el usuario, por ejemplo, poniendo o quitando cuadros que el usuario pueda necesitar o no, y agregando colores a la interfaz gráfica para que tenga un mejor aspecto, como se puede apreciar en la Figura 5.

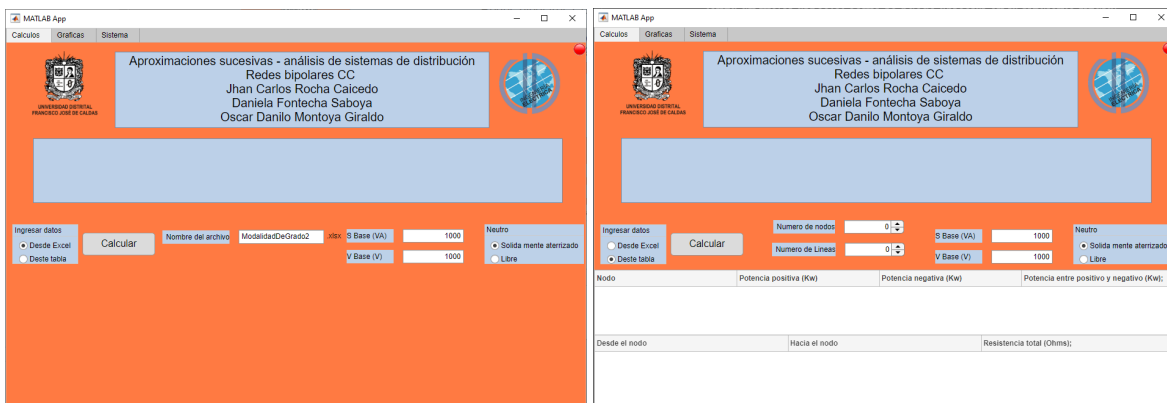


Figura 5. Interfaz gráfica final

Fuente: Autores

SISTEMA DE PRUEBA Y CARACTERÍSTICAS

Para demostrar la efectividad y hacer la validación de datos, se considera una red de distribución CC bipolar asimétrica de media tensión compuesta por: 21 nodos, 22 líneas (sistema mallado) y 21 cargas de potencia constante, que originalmente se usó como una red balanceada presentado en (Garces, 2018), pero para el presente caso de estudio se agregan dos líneas, con la configuración mostrada en la Figura 6.

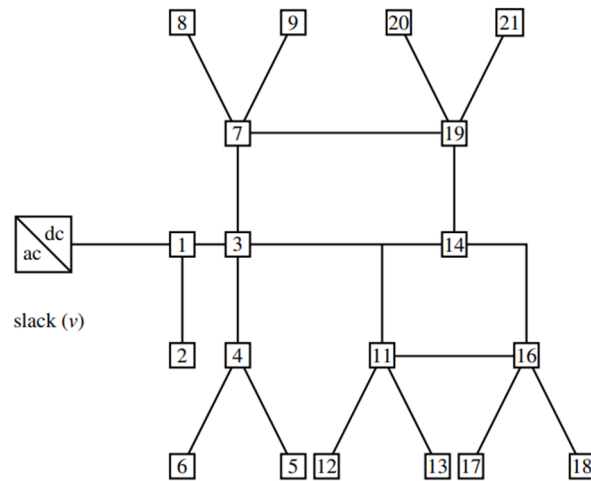


Figura 6. Conexión esquemática entre nodos para el sistema de prueba de 21 nodos

Fuente: Autores

El nodo slack del sistema de prueba de 21 nodos opera a $\pm 1000V$. Los demás parámetros eléctricos se encuentran en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros eléctricos del sistema de prueba de 21 nodos.

$Nodo_i$	$Nodo_j$	$R_{jk} (\Omega)$	$P_{dk,po}(kW)$	$P_{dk,no}(kW)$	$P_{dk,pn}(kW)$
1	2	0,053	70	100	0
1	3	0,054	0	0	0
3	4	0,054	36	40	120
4	5	0,063	4	0	0
4	6	0,051	36	0	0
3	7	0,037	0	0	0
7	8	0,079	32	50	0
7	9	0,072	80	0	100
3	10	0,053	0	10	0
10	11	0,038	45	30	0
11	12	0,079	68	70	0
11	13	0,078	10	0	75
10	14	0,083	0	0	0
14	15	0,065	22	30	0
15	16	0,064	23	10	0
16	17	0,074	43	0	60
16	18	0,081	34	60	0
14	19	0,078	9	15	0

$Nodo_i$	$Nodo_j$	$R_{jk} (\Omega)$	$P_{dk,po}(kW)$	$P_{dk,no}(kW)$	$P_{dk,pn}(kW)$
19	20	0,084	21	10	50
19	21	0,082	21	20	0

Fuente: Autores

Para el caso de estudio se evaluarán dos escenarios, para el primero se considera al neutro sólidamente aterrizado en todos los nodos, para el segundo se considera el neutro flotante.

Al caso de estudio original se le agregan dos líneas, información que se puede encontrar en la Tabla (2), una que va del nodo 7 al nodo 9 y otra del nodo 11 al 16, esto con el fin de no superar una regulación del 5% en todos los nodos ya que no es recomendable que supere este valor y sin estas dos nuevas líneas, no cumpliría esa condición, este hecho se confirmara con la validación computacional.

Tabla 2. Parámetros eléctricos de las líneas extra

$Nodo_i$	$Nodo_j$	$R_{jk} (\Omega)$
11	16	0,0370
7	19	0,0820

Fuente: Autores

RESULTADOS NUMÉRICOS

Teniendo en cuenta el sistema planteado en la sección anterior, se opta por simular el sistema original, cuyos resultados se encuentran en la Tabla (3); de los resultados numéricos se puede observar que en la simulación donde el neutro está conectado a tierra en todos los nodos, hay algunos nodos que superan una regulación del 10% en el polo positivo, específicamente en los nodos 16, 17 y 18. El nodo con menor voltaje es el nodo 17 con una regulación de voltaje del 10,99%. En comparación con su contraparte, el polo negativo presenta su menor voltaje en el nodo 18 con una regulación del 9,14%; esto se debe a que la carga es desbalanceada, la

carga total vista por el polo positivo es de 554kW, mientras que el polo negativo ve 445kW esto genera una diferencia de más de 100kW.

Tabla 3. Tensión para los dos casos de simulación en el sistema original

Nodo	Neutro conectado a tierra			Neutro no conectado a tierra		
	Polo positivo	Neutro	Polo negativo	Polo positivo	Neutro	Polo negativo
1	1000	0	-1000	1000	0	-1000
2	996,2761	0	-994,6716	996,2822	-1,6193	-994,6629
3	960,0684	0	-968,4101	959,5206	9,2158	-968,7363
4	952,3714	0	-962,7830	951,7636	11,3722	-963,1359
5	952,1067	0	-962,7830	951,4955	11,6403	-963,1359
6	950,4397	0	-962,7830	949,8031	13,3328	-963,1359
7	953,7448	0	-964,5412	953,1184	11,7701	-964,8885
8	951,0868	0	-960,4285	950,4291	10,3923	-960,8214
9	943,8619	0	-960,7609	943,1110	17,9963	-961,1074
10	937,4888	0	-948,4699	936,5747	12,4856	-949,0603
11	930,9221	0	-942,8952	929,9260	13,6205	-943,5464
12	925,1152	0	-936,9933	924,0247	13,7095	-937,7342
13	926,9467	0	-939,7613	925,9357	14,4763	-940,4120
14	916,4716	0	-930,2941	915,1628	15,9905	-931,1533
15	905,4445	0	-921,0086	903,9041	18,1140	-922,0181
16	896,1421	0	-913,9506	894,4081	20,6576	-915,0657
17	890,1027	0	-911,4861	888,2594	24,3408	-912,6002
18	893,0583	0	-908,6017	891,2523	18,5787	-909,8310
19	909,9529	0	-924,3558	908,5513	16,7360	-925,2873
20	905,7062	0	-921,1449	904,2616	17,8323	-922,0939
21	908,0565	0	-922,5782	906,6158	16,9277	-923,5435

Fuente: Autores

En la simulación donde el neutro está conectado a tierra solo en el nodo slack se observa que el neutro en los nodos 16 y 17 supera los 20V en magnitud esto puede tener consecuencias negativas en la sensibilidad de algunos dispositivos, también cabe recalcar que la regulación de voltaje disminuye un poco a comparación del caso anterior, pero no es un hecho significativo.

Para demostrar la efectividad de la aplicación que resuelve el flujo de potencia en redes bipolares CC desbalanceadas, se incluye un escenario donde se agregan dos líneas, como se puede ver en la Tabla (2), esto para reducir la regulación de tensión en los nodos críticos y ahora tener una red enmallada y comprobar que funciona para redes radiales y enmalladas.

En la Tabla (4) se muestran los resultados de la nueva simulación de los cuales se puede decir que la cantidad de pérdidas de potencia en el caso donde el neutro esta sólidamente aterrizado es de 75,1832 kW, que es 3,5540 kW menos que en el caso de neutro sin conexión a tierra. Esto se asocia a las corrientes que pasan por el cable de neutro producto de los desequilibrios de carga entre los polos positivo y negativo.

Tabla 4. Tensión para los dos casos de simulación en el sistema modificado

Nodo	Neutro conectado a tierra			Neutro no conectado a tierra		
	Polo positivo	Neutro	Polo negativo	Polo positivo	Neutro	Polo negativo
1	1000	0	1000	1000	0	1000
2	996,2761	0,0000	994,6716	996,2822	-1,6193	994,6629
3	960,5554	0,0000	968,7957	960,1064	8,9492	969,0556
4	952,8622	0,0000	963,1711	952,3551	11,1017	963,4568
5	952,5976	0,0000	963,1711	952,0872	11,3696	963,4568
6	950,9314	0,0000	963,1711	950,3963	13,0605	963,4568
7	950,2970	0,0000	961,2054	949,7234	11,8017	961,5251
8	947,6292	0,0000	957,0782	947,0243	10,4196	957,4439
9	940,3779	0,0000	957,4115	939,6789	18,0515	957,7304
10	944,0865	0,0000	954,5621	943,4321	11,5340	954,9661
11	934,2946	0,0000	946,4192	933,5170	13,3896	946,9066
12	928,5089	0,0000	940,5396	927,6406	13,4729	941,1135
13	930,3339	0,0000	943,2969	929,5420	14,2418	943,7838
14	939,6834	0,0000	950,9273	938,9764	12,3878	951,3641
15	934,6149	0,0000	946,3633	933,8392	13,0128	946,8520
16	931,1309	0,0000	943,8982	930,3101	14,0995	944,4095
17	925,3137	0,0000	941,5199	924,4222	17,6084	942,0307
18	928,1637	0,0000	938,7210	927,3012	11,9995	939,3007
19	941,6278	0,0000	952,9884	940,9537	12,4401	953,3937
20	937,5209	0,0000	949,8788	936,8176	13,4789	950,2965

Nodo	Neutro conectado a tierra			Neutro no conectado a tierra		
	Polo positivo	Neutro	Polo negativo	Polo positivo	Neutro	Polo negativo
21	939,7955	0,0000	951,2644	939,0951	12,5979	951,6930

Fuente: Autores

Por otro lado, la regulación de tensión disminuye significativamente respecto al sistema original, ya que pasa de una regulación de voltaje del 10,99% en la red radial a un 7,47% en la red enmallada, en el polo positivo, el voltaje pasa de 890,1027V a 925,3137V respectivamente, esto se puede deber a que al agregar nuevas líneas la distribución de corrientes es diferente y los nodos más alejados no perciben una diferencia de tensión tan drástica.

En la Figura 7 se puede apreciar los perfiles de tensión del caso de estudio modificado con el neutro sólidamente aterrizado. En la Figura 8 aparecen los perfiles de tensión en el caso de estudio modificado, pero con el neutro flotante.

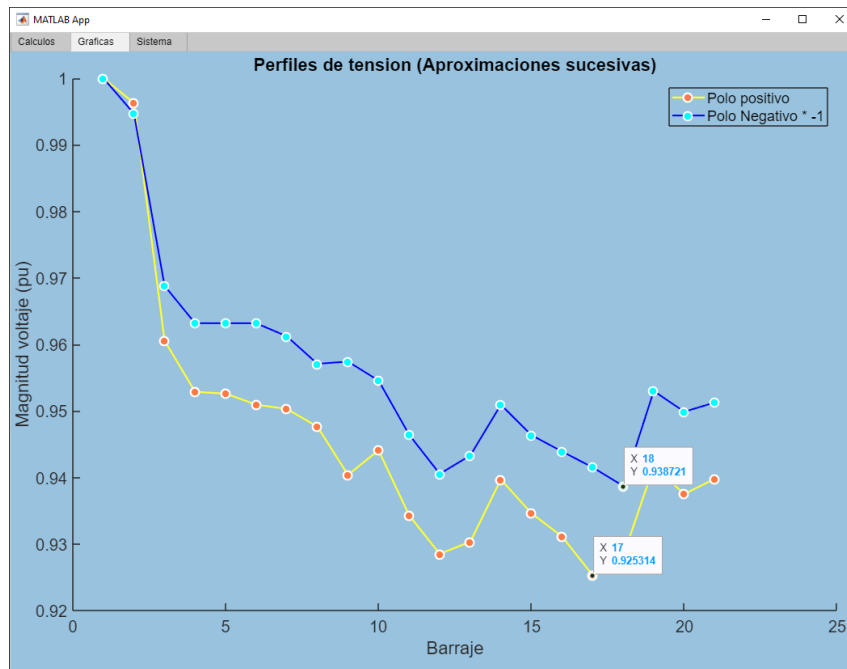


Figura 7. Perfiles de tensión caso de estudio modificado sólidamente aterrizado

Fuente: FPRBCC desarrollada por (Jhan Rocha, Daniela Fontecha, Oscar Montoya)

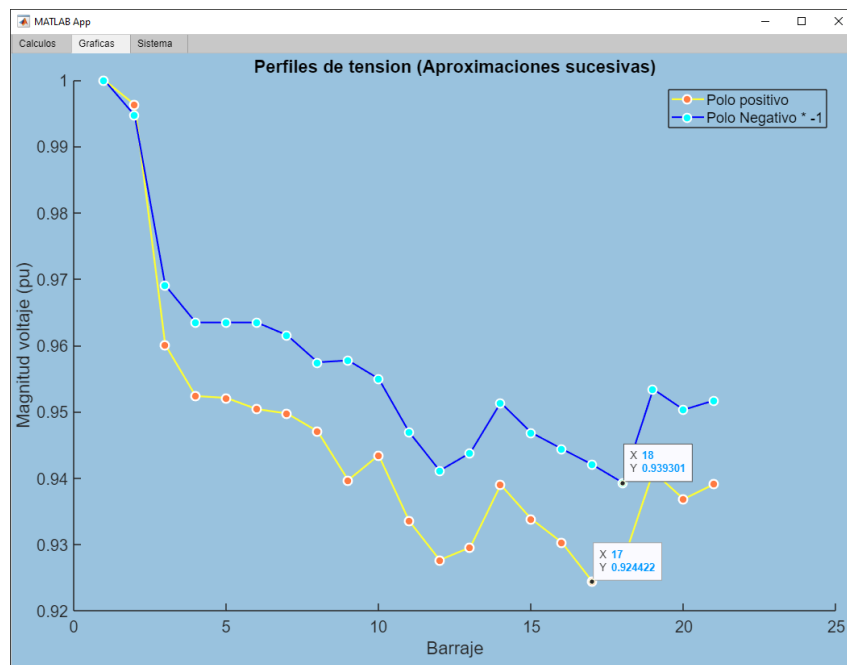


Figura 8. Perfiles de tensión caso de estudio modificado sin neutro sólidamente aterrizado

Fuente: FPRBCC desarrollada por (Jhan Rocha, Daniela Fontecha, Oscar Montoya)

CONCLUSIONES

En este trabajo se trataron redes bipolares de CC sólidamente aterrizadas y no aterrizadas, para las cuales se implementó el mismo método aproximaciones sucesivas, con lo cual se demuestra que el método sirve para ambos casos, además dicho método también puede ser usado en topologías radiales y malladas. Además, la implementación de una interfaz grafica facilita el uso del método, ya que al ser amigable con el usuario puede ser usada por cualquier persona que tenga conocimientos básicos sobre el tema.

El análisis gráfico de perfiles de tensión permite determinar de una forma rápida factores determinantes en la red bipolar CC como, por ejemplo: el centro eléctrico del sistema, el cual es el nodo de menor tensión, también permite determinar en qué nodo o nodos se concentra la mayor cantidad de carga y en algunos casos en adición con la gráfica de la topología del sistema se puede deducir las líneas con mayores pérdidas.

Como posibles trabajos de investigación, se podrían desarrollar los siguientes: (i) implementación de nuevos métodos de flujo de potencia para redes bipolares basados en aproximaciones de Taylor y el método triangular; (ii) estudiar el problema de balance de fases mediante la combinación del método de aproximaciones sucesivas y un algoritmo metaheurístico de naturaleza binaria; y (iii) proponer una reformulación convexa para estudiar el problema de flujo de potencia óptimo en redes bipolares con alta penetración de recursos energéticos distribuidos.

REFERENCIAS

- Chew, B. S., Xu, Y., & Wu, Q. (January de 2019). Voltage Balancing for Bipolar DC Distribution Grids: A Power Flow Based Binary Integer Multi-Objective Optimization Approach. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 28–39. doi:10.1109/tpwrs.2018.2866817
- den Broeck, G. V., Breucker, S. D., Beerten, J., Zwysen, J., Vecchia, M. D., & Driesen, J. (June de 2017). Analysis of three-level converters with voltage balancing capability in bipolar DC distribution networks. *2017 IEEE Second International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*. IEEE. doi:10.1109/icdcm.2017.8001052
- Garces, A. (October de 2017). Uniqueness of the power flow solutions in low voltage direct current grids. *Electric Power Systems Research*, 151, 149–153. doi:10.1016/j.epsr.2017.05.031
- Garces, A. (September de 2018). On the Convergence of Newton Method in Power Flow Studies for DC Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 5770–5777. doi:10.1109/tpwrs.2018.2820430
- Garcés, A., & Montoya, O.-D. (June de 2019). A Potential Function for the Power Flow in DC Microgrids: An Analysis of the Uniqueness and Existence of the Solution and Convergence of the Algorithms. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 30, 794–801. doi:10.1007/s40313-019-00489-4
- Gil-González, W., Montoya, O. D., Restrepo, C., & Hernández, J. C. (September de 2021). Sensorless Adaptive Voltage Control for Classical DC-DC Converters Feeding Unknown Loads: A Generalized PI Passivity-Based Approach. *Sensors*, 21, 6367. doi:10.3390/s21196367
- Grisales-Noreña, L. F., Montoya, O. D., Gil-González, W. J., Perea-Moreno, A.-J., & Perea-Moreno, M.-A. (December de 2020). A Comparative Study on Power Flow Methods for Direct-Current Networks Considering Processing Time and Numerical Convergence Errors. *Electronics*, 9, 2062. doi:10.3390/electronics9122062
- Herrera-Briñez, M. C., Montoya, O. D., Alvarado-Barríos, L., & Chamorro, H. R. (March de 2021). The Equivalence between Successive Approximations and Matricial Load Flow Formulations. *Applied Sciences*, 11, 2905. doi:10.3390/app11072905
- Kim, J., Cho, J., Kim, H., Cho, Y., & Lee, H. (2020). Power Flow Calculation Method of DC Distribution Network for Actual Power System. *KEPCO Journal on Electric Power and Energy*, 6, 419–425. doi:10.18770/KEPCO.2020.06.04.419
- Lavorato, M., Franco, J. F., Rider, M. J., & Romero, R. (February de 2012). Imposing Radiality Constraints in Distribution System Optimization Problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27, 172–180. doi:10.1109/tpwrs.2011.2161349
- Lee, J.-O., Kim, Y.-S., & Moon, S.-I. (May de 2021). Current Injection Power Flow Analysis and Optimal Generation Dispatch for Bipolar DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12, 1918–1928. doi:10.1109/tsg.2020.3046733

- Mackay, L., Guarnotta, R., Dimou, A., Morales-Espana, G., Ramirez-Elizondo, L., & Bauer, P. (2018). Optimal Power Flow for Unbalanced Bipolar DC Distribution Grids. *IEEE Access*, 6, 5199–5207. doi:10.1109/access.2018.2789522
- Monteiro, V., Monteiro, L. F., Franco, F. L., Mandrioli, R., Ricco, M., Grandi, G., & Afonso, J. L. (October de 2021). The Role of Front-End AC/DC Converters in Hybrid AC/DC Smart Homes: Analysis and Experimental Validation. *Electronics*, 10, 2601. doi:10.3390/electronics10212601
- Montoya, O. D., Garrido, V. M., Gil-Gonzalez, W., & Grisales-Norena, L. F. (November de 2019). Power Flow Analysis in DC Grids: Two Alternative Numerical Methods. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 66, 1865–1869. doi:10.1109/tcsii.2019.2891640
- Montoya, O. D., Gil-González, W., & Garcés, A. (December de 2020). Numerical methods for power flow analysis in DC networks: State of the art, methods and challenges. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 123, 106299. doi:10.1016/j.ijepes.2020.106299
- Murillo-Yarce, D., Garcés-Ruiz, A., & Escobar-Mejía, A. (March de 2018). Passivity-Based Control for DC-Microgrids with Constant Power Terminals in Island Mode Operation. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 32–39. doi:10.17533/udea.redin.n86a05
- Navarrete, P. H. (2021). Programación de interfaz gráfica en app designer del matlab para representar la serie de fourier en curso introductorio de telecomunicaciones. *SCIENTIA*, 23, 199-213. doi:10.31381/scientia.v23i23.4592
- Paniagua, L., & Prada, R. B. (November de 2015). Voltage stability assessment using equivalent Thevenin. *2015 IEEE Thirty Fifth Central American and Panama Convention (CONCAPAN XXXV)*. IEEE. doi:10.1109/concapan.2015.7428499
- Ridzuan, M. I., Fauzi, N. F., Roslan, N. N., & Saad, N. M. (January de 2020). Urban and rural medium voltage networks reliability assessment. *SN Applied Sciences*, 2. doi:10.1007/s42452-019-1612-z
- Siano, P., Rigatos, G., & Piccolo, A. (2012). Active Distribution Networks and Smart Grids: Optimal Allocation of Wind Turbines by Using Hybrid GA and Multi-Period OPF. En *Atlantis Computational Intelligence Systems* (págs. 579–599). Atlantis Press. doi:10.2991/978-94-91216-77-0_27
- Simpson-Porco, J. W., Dorfler, F., & Bullo, F. (August de 2015). On Resistive Networks of Constant-Power Devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 62, 811–815. doi:10.1109/tcsii.2015.2433537
- Zhang, L. Z., Tang, W. T., Liang, J. L., Li, G. L., Cai, Y. C., & Yan, T. Y. (2016). A medium voltage hybrid AC/DC distribution network and its economic evaluation. *12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2016)*. Institution of Engineering and Technology. doi:10.1049/cp.2016.0446