



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**INSTALACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES PARA
CORREGIR LA CAIDA DE VOLTAJE EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN APLICANDO LA TÉCNICA DE
BARRIDO PROGRESIVO-REGRESIVO**

TESIS

para obtener el grado de:

MAESTRO EN INGENIERÍA

CON OPCIÓN TERMINAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

JULIO CÉSAR LOBATO PINEDA

Asesor de tesis:

Dr. Eric Morales Aguilar

Puebla, Pue.

Septiembre 2016



"60 Aniversario de la Autonomía Universitaria"

OFICIO SIEP No. 597/ 2016

ING. JULIO CÉSAR LOBATO PINEDA

Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas
Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"Instalación de bancos de capacitores para corregir la caída de voltaje en redes de distribución aplicando la técnica de barrido progresivo-regresivo"**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de Tesis al Dr. Erik Morales Aguilar.
Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

Puebla, Puebla a 05 de febrero de 2016

M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. Dr. Eric Morales Aguilar.- Asesor tema tesis.

C.c.p. Archivo.

GJS/GCC/dsm.



Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M. I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E

El que suscribe, Dr. ERIC MORALES AGUILAR, Asesor del Tema de Tesis denominado: "INSTALACIÓN DE BANCOS DE CAPACITORES PARA CORREGIR LA CAÍDA DE VOLTAJE EN REDES DE DISTRIBUCIÓN APLICANDO LA TÉCNICA DE BARRIDO PROGRESIVO-REGRESIVO", presentado por el ING. JULIO CESAR LOBATO PINEDA, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia y en atención al oficio SIEP No. 597/2016, de fecha 5 de Febrero de 2016, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.**

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales que haya lugar.

ATENTAMENTE

Puebla, Pue., 06 de Septiembre de 2016

Dr. ERIC MORALES AGUILAR
ASESOR

C.c.p. -Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
EMA*jclp



AGRADEZCO A DIOS POR TODO CUANTO ME DIO PARA TERMINAR
ESTA TESIS, POR PONER EN MI CAMINO AL DR. ERIC MORALES
AGUILAR QUIEN HA SIDO UNA PERSONA MUY PACIENTE Y
COMPROMETIDA Y UN MODELO A SEGUIR,
ASI TAMBIÉN A TODOS LOS CATEDRATICOS
DE ESTA MAESTRIA.
ADEMÁS AGRADEZCO A MI FAMILIA Y AMIGOS
POR SU APOYO INCONDICIONAL.



CONTENIDO

Índice de Figuras	III
Índice de Tablas.....	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT.....	VI
Terminología	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivo.....	4
CAPÍTULO 2. REDES DE DISTRIBUCIÓN.....	4
2.1 Topología.....	5
2.2 Niveles de Tensión.....	6
2.3 Caída de voltaje	8
2.4 Dinamismo de las redes de distribución.....	9
CAPÍTULO 3 MODELADO DE ELEMENTOS.....	14
3.1 Impedancia serie de línea.....	14
3.2 Líneas de distribución no transpuesta.....	15
3.3 Ecuaciones modificadas de Carson.....	16
3.4 Matriz de impedancias para líneas aéreas.....	17
3.5 Admitancias en derivación de líneas aéreas.....	20
3.6 Modelado de las líneas en redes de distribución.....	24
3.6 Modelado de cargas de las redes de distribución.....	27
CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO Y APLICACIÓN	31
4.1 Técnica de Barrido Progresivo - Regresivo.....	31
4.2 Localización de los bancos de Capacitores.....	34
4.3 Esquema general del método de solución.....	36
4.4 Ejemplo numérico de regulación de tensión con una red de 8 nodos.....	38
4.5 Ejemplo numérico de regulación de tensión con una red de 34 nodos.....	42
4.6 Comparación de resultados con el programa RDAP.....	56
CONCLUSIONES	58



TRABAJO FUTURO	58
REFERENCIAS.....	59
ANEXOS	60
A. CÓDIGO CONDICIÓN INICIAL 8 NODOS.....	60
B. CÓDIGO CONDICIÓN FINAL 8 NODOS	64
C. CÓDIGO CONDICIÓN INICIAL 34 NODOS.....	69
D. CÓDIGO CONDICIÓN FINAL 34 NODOS.....	84
E. EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS	100



Índice de Figuras

Figura 2.1 Red radial.....	5
Figura 2.2 Configuraciones de alimentadores.....	6
Figura 2.3 Subestación eléctrica de distribución.....	7
Figura 2.4 Cambio de fuente de un alimentador.....	10
Figura 2.5 Falla permanente en un alimentador de distribución.....	11
Figura 2.6 Subestación eléctrica con tres alimentadores.....	12
Figura 2.7 Falla en una subestación eléctrica de distribución.....	13
Figura 3.1 Interacción de flujo magnético entre conductores.....	15
Figura 3.2 Segmento de línea de 4 hilos.....	17
Figura 3.3 Impedancia serie de una línea trifásica.....	19
Figura 3.4 Conductores aéreos y sus imágenes.....	20
Figura 3.5 Segmento de línea trifásico.....	24
Figura 3.6 Banco de capacitores trifásico conectado en estrella.....	28
Figura 3.7 Cargas inyectando corriente al bus.....	29
Figura 3.8 Cargas monofásicas expresadas como potencia compleja constante.....	30
Figura 4.1 Numeración de nodos para una red radial de 57 nodos, [12].....	31
Figura 4.2 Direcciones de referencia para la técnica de barrido.....	33
Figura 4.3 Localización de los bancos de capacitores.....	35
Figura 4.4 Esquema de solución del control de voltaje.....	37
Figura 4.5 Red de distribución de 8 nodos.....	38
Figura 4.6 Perfiles de voltaje con condiciones iniciales.....	40
Figura 4.7 Perfiles de voltaje con condición final red de 8 nodos.....	42
Figura 4.8 Red radial de distribución de 34 nodos.....	43
Figura 4.9 Red de 34 nodos y 19 capas.....	44
Figura 4.10 Estructura ID-500, tipo “T” sencilla de tres fases.....	45
Figura 4.11 Estructura ID-510, tipo “P” punta poste, de una sola fase.....	45
Figura 4.12 Perfiles de voltaje condición inicial red de 34 nodos.....	51
Figura 4.13 Perfiles de voltaje condición final red de 34 nodos.....	53
Figura 4.14 Comparación del voltaje antes y después de aplicar el capacitor.....	54
Figura 4.15 Comparación del voltaje en la fase A.....	55
Figura 4.16 Comparación del voltaje en la fase B.....	55
Figura 4.17 Comparación del voltaje en la fase C.....	56



Índice de Tablas

Tabla 2.1 Niveles de voltaje IEEE 141-1993.	6
Tabla 2.2 Rangos de voltaje de operación.	8
Tabla 4.1 Cargas en nodos de la red de 8 nodos.....	39
Tabla 4.2 Voltajes calculados con condiciones iniciales.	40
Tabla 4.3 Voltajes calculados con banco de capacitores instalado.....	41
Tabla 4.4 Características de la red de 34 nodos.....	46
Tabla 4.5 Cargas de la red de 34 nodos.	48
Tabla 4.6 Voltaje calculado de la red de 34 nodos.....	50
Tabla 4.7 Voltaje calculado de la red de 34 nodos con capacitor instalado.	52
Tabla 4.8 Comparación de resultados en RDAP.....	56



RESUMEN

En este trabajo de tesis se expone una metodología para evitar la caída de voltaje en redes eléctricas de distribución vía instalación de bancos de capacitores. Se utiliza la técnica del barrido progresivo-regresivo para encontrar el estado de la red. La metodología aplicada es la siguiente: a). Se realiza un primer cálculo de los niveles de tensión en la red. b). Se determina si existe una caída de tensión mayor al 10%, límite para considerarse aceptable [1]; c) Si en el sistema existe dicha caída se procede a inyectar potencia reactiva a través de capacitores instalados a lo largo de la red de distribución. d) Se realiza un nuevo cálculo para verificar que los niveles de tensión en la red están dentro de valores aceptables.

En el capítulo 1, se comenta la problemática existente en las redes de distribución que provoca variaciones del perfil de voltaje de la energía eléctrica suministrada a los usuarios y se explica porque se elige la instalación de bancos de capacitores para mantener la calidad del voltaje de acuerdo a los estándares de la Comisión Federal de Electricidad. En el capítulo 2, se explican las características topológicas de las redes de distribución eléctrica, se habla sobre los niveles de tensión usados para dichas redes y se ejemplifica la dinámica de una transferencia de carga. En el capítulo 3, se expone la teoría existente para realizar el modelado de cada uno de los elementos eléctricos empleados para el presente trabajo. En el capítulo 4, se describen las ecuaciones básicas de la técnica de barrido progresivo-regresivo, la forma de modelar las cargas y la forma de incorporar los bancos de capacitores al esquema de solución. Además se muestran dos ejemplos de aplicación de bancos de capacitores a redes de distribución.



ABSTRACT

This thesis presents a methodology to avoid voltage drop in power distribution networks by the installation of capacitor banks. The technique of progressive-regressive scan is used to find the state of the network. The methodology is as follows: a). A first calculation of voltage levels in the network is performed. b). Determines if there is a voltage drop greater than 10%, considered as an acceptable limit [1]; c) Whether there is voltage drop in the system is injected reactive power with capacitors installed along the distribution network. d) A new calculation is performed to verify that the voltage levels in the network are within acceptable values.

In Chapter 1, is discussed the existing problems in distribution networks that changes voltage profile of the electrical energy supplied to users and why is chosen the installation of capacitor banks to maintain voltage quality according to the standards of the Comisión Federal de Electricidad. In chapter 2, the topological characteristics of the electricity distribution networks are explained, it's talked about the levels of voltage used for this networks and is exemplified the dynamics of charge transference. In Chapter 3, the existing theory is exposed for modeling for each of the electrical elements used for this work. In Chapter 4, the basic equations of the progressive-regressive sweep are explained, how to model the loads and how to incorporate the capacitor banks described for solution scheme. In addition, two examples of application of capacitor banks to distribution networks is shown.



Terminología

Alimentador. Es el circuito conectado a una sola estación, que suministra energía eléctrica a subestaciones distribuidoras o directamente a los usuarios.

Calidad. Es la condición de tensión, frecuencia y forma de onda del servicio de energía eléctrica, suministrada a los usuarios de acuerdo con las normas y reglamentos aplicables.

Centro de Distribución. Es el área de CFE constituida para la operación de un grupo definido de subestaciones y circuitos de distribución, en voltajes menores o iguales a de 69 KV.

Centro de Control. Es el área constituida para la operación de una parte del Sistema Eléctrico que se le asigna para ese fin.

Cerrar. Es la operación mecánica, eléctrica o manualmente de un equipo, para conectar una parte o totalidad de un equipo, actuando directamente sobre el mecanismo mediante una palanca, gatos, manivelas u operando un dispositivo de control eléctrico en la estación o desde un centro de telecontrol para permitir el paso de la corriente eléctrica.

Continuidad. Es el suministro ininterrumpido del servicio de energía a los usuarios, de acuerdo a las normas y reglamentos aplicables, abarcando hasta el proceso de restablecimiento.

Disparo. Es la apertura automática de un dispositivo por funcionamiento de la protección para desconectar uno o varios elementos del sistema eléctrico.

Distribución. Es la conducción de energía eléctrica desde los puntos de entrega de la transmisión hasta los puntos de suministro a los usuarios.

Disturbio. Es la alteración de las condiciones normales del sistema eléctrico originada por un caso fortuito o fuerza mayor, generalmente breve y peligrosa, que produce una interrupción en el servicio de energía eléctrica o disminuye la confiabilidad de la operación.



Emergencia. Significa una circunstancia o situación que en la opinión de la CFE pueda poner en peligro la seguridad de las personas, las instalaciones, el servicio a usuarios, el equipo principal o el medio ambiente, y que requiere una acción inmediata por parte de los operadores.

Energizar. Significa permitir que el equipo adquiera potencial eléctrico.

Falla. Es una alteración o un daño permanente o temporal en cualquier parte del equipo, que varía sus condiciones normales de operación y que generalmente causa un disturbio.

Generación. Es la producción de energía eléctrica a partir de fuentes primarias de energía, utilizando los sistemas y equipos correspondientes.

Interrupción. Es la suspensión del suministro de energía eléctrica debido a cualquier motivo.

Interruptor. Es el equipo para cerrar y abrir circuitos eléctricos, con o sin carga o con corriente de falla.

Librar. Es dejar un equipo sin potencial eléctrico, vapor, agua a presión y sin otros fluidos peligrosos para el personal, aislando completamente el resto del equipo mediante interruptores, cuchillas, fusibles, válvulas y otros dispositivos, asegurándose además contra la posibilidad de que accidental o equivocadamente pueda quedar energizado o a presión, valiéndose para ello, de bloqueos y colocación de tarjetas auxiliares.

Libranza. Es la acción de librar.

Maniobra. Se entenderá como lo hecho por un operador, directamente o a control remoto, para accionar algún elemento que pueda o no cambiar el estado y/o el funcionamiento de un sistema, sea eléctrico, neumático, hidráulico o de cualquier otra índole.

Mantenimiento. Es el conjunto de actividades para conservar las obras e instalaciones en adecuado estado de funcionamiento.

Operación. Es la aplicación del conjunto organizado de técnicas y procedimientos destinados al uso y funcionamiento adecuado de elementos para cumplir con un objetivo.



Operador. Es el trabajador cuya función principal es la de operar el equipo o sistema a su cargo y vigilar eficaz y constantemente su funcionamiento.

Ramal. Parte o sección de un circuito conectado a él mismo mediante un equipo de protección.

Suministro. Es el conjunto de actos y trabajos para proporcionar energía eléctrica a cada usuario.

Troncal. Es el conductor principal y de mayor calibre de un circuito que se caracteriza por estar conectado directamente a un interruptor de potencial de una subestación eléctrica.

Usuario. Persona física o moral que hace uso de la energía eléctrica proporcionada por el suministrador, previo contrato celebrado por las partes.



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La calidad de un servicio o producto es un factor de alta importancia para mantenerse en la competencia dentro de cualquier mercado. Tal es el grado por la búsqueda de la excelencia de calidad que existen organizaciones que califican y crean la normatividad de los niveles de calidad de procesos, productos, servicios, etc.

El mercado eléctrico también se rige bajo el concepto de calidad; las empresas que integran dicho mercado tienen que cumplir más de un aspecto referente a la calidad, por lo que se someten a certificaciones de empresas particulares, así como también a la autogestión en cuanto a sus propias normas.

Las redes de distribución de energía eléctrica son las instalaciones a través de las cuales dicha energía es entregada a los usuarios finales de un sistema eléctrico[1], en el cual pueden presentarse deficiencias en el perfil de voltaje con respecto a su valor nominal, las variaciones de voltaje son generadas por distintas causas y durante diferentes lapsos de tiempo; y la corrección de dichas variaciones también se realiza mediante diferentes procedimientos que tienen impacto de forma temporal o permanente.

Para el interés del presente trabajo, mantener la calidad del perfil de voltaje será el centro de atención. Esto debido a que el voltaje es un parámetro muy importante desde el proceso de la generación de energía eléctrica hasta la distribución y comercialización de la misma [1].

1.1 Planteamiento del problema

Las redes de distribución son las instalaciones a través de las cuales la energía es entregada a los usuarios finales de un sistema eléctrico [1], en el cual pueden presentarse deficiencias en el perfil de voltaje por alguna de las 3 condiciones que se comentan a continuación.



El crecimiento no regulado de los asentamientos poblacionales e industriales marcan la pauta del crecimiento de dichas redes de distribución, aunque se lleve a cabo cierta reglamentación para realizar ampliaciones en la red así como los estudios pertinentes para ver la factibilidad de la conexión de los nuevos usuarios; existe siempre la posibilidad que existan deficiencias en la calidad de la energía entregada al usuario.

Una topología radial, dentro de una subestación eléctrica hay como mínimo un transformador de potencia reductor de voltaje, del cual dependen uno o más circuitos de distribución de energía eléctrica, dichos circuitos tienen como punto de inicio un interruptor a partir del cual sale el conductor hacia la calle, teniendo una trayectoria que puede tener derivaciones hasta llegar a un punto contrario a la fuente, el cual presenta la mayor longitud que existe en dicha trayectoria desde la fuente hasta el final del circuito [2], esa longitud puede medir hasta más de una decena de kilómetros, lo que puede repercutir en el voltaje que se suministra a los usuarios conectados en ese lugar del circuito.

Por último, el dinamismo de la red de distribución de energía eléctrica de media tensión, es decir en estas redes con mucha frecuencia se programan trabajos de mantenimiento en los transformadores de potencia [2], lo cual implican transferencias de carga entre subestaciones eléctricas lo que conlleva también a que existan cambios en el flujo de la potencia y alteraciones en el perfil de voltaje de la energía suministrada a los usuarios.

Las condiciones anteriores se presentan en eventos donde ocurre una falla de cortocircuito en el sistema eléctrico, ya sea en las líneas de transmisión, en la red eléctrica de distribución o en una subestación eléctrica [3]. Estas fallas eléctricas ocasionan una condición de contingencia en el sistema eléctrico, ese estado de emergencia también genera la necesidad de realizar modificaciones temporales en la configuración topológica de los circuitos de distribución de energía, lo cual se logra realizando maniobras en los equipos de enlace y seccionamiento del sistema. Posterior al evento inicial de falla y a las maniobras realizadas para restablecer el servicio de suministro de energía [2], suele resultar que existen deficiencias en el perfil del voltaje. Esta problemática que se comenta, es una cadena de situaciones que se van corrigiendo cronológicamente en un centro de control por una persona asignada como operador del sistema, sin embargo una



vez transferida la carga hacia otras fuentes suele pasar que la configuración resultante del circuito queda dispuesta de tal manera que el circuito tiene un aumento significativo en la distancia entre la fuente y los usuarios más lejanos a esta misma.

1.2 Justificación.

La corrección de la caída de voltaje en un circuito de energía eléctrica de media tensión, es una acción muy importante que se puede realizar con el uso de bancos de capacitores operando de forma temporal o permanente; y así también se mejora el nivel de voltaje mediante el uso de autotransformadores de voltaje, estos últimos tienen además la función de reducir el nivel de voltaje a diferencia de los bancos de capacitores que solo pueden elevar el valor del voltaje de la red eléctrica que está delante de su ubicación.

Es necesario remarcar que el mantener el perfil del voltaje lo más exacto posible en su valor estandarizado es de interés tanto para la empresa que se encarga de suministrar la energía eléctrica, así como también para el usuario que compra dicha energía.

La calidad es una característica imprescindible en un producto o servicio, y esto aplica también en la venta de energía eléctrica, y es cada vez más recurrente que las empresas busquen certificarse y cumplir estándares de calidad internacionales para lograr ser líderes, ya que con la apertura de mercados eléctricos no se puede vacilar en este aspecto si se quiere perseverar en el negocio de la venta de la energía eléctrica.

Los usuarios, como es de esperarse requieren que la energía eléctrica que compran cumpla con los estándares de calidad ya que están pagando por ello. Los usuarios con tarifa doméstica o uso habitacional, suelen quejarse de bajo voltaje cuando sus lámparas no están encendidas a su máxima intensidad; sin embargo para el usuario industrial es más notable el impacto, ya que existe maquinaria y herramientas que emplean en sus procesos que requieren perfiles de voltaje óptimos, y funcionan dentro de márgenes muy estrechos por lo que ante caídas de voltaje mínimas se detiene su operación. Además que económicamente repercute demasiado a los usuarios, tanto por los paros operativos de su maquinaria, que se traduce en producción no generada, empleados sin laborar y eso es dinero perdido. Además de que el hecho de suministrar energía con un perfil de bajo



voltaje aumenta el consumo de corriente del usuario, lo cual se reflejara en su facturación. Situación totalmente indeseable.

1.3 Objetivo.

Objetivo general

Corregir las variaciones del perfil de voltaje de la energía eléctrica suministrada a los usuarios instalando bancos de capacitores en redes de distribución de media tensión manteniendo la calidad del voltaje regido en los estándares de la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

Objetivos específicos

- Estudiar la topología y dinámica de una red de distribución eléctrica.
- Determinar el estado de la red de distribución mediante la aplicación del método del barrido progresivo-regresivo.
- Calcular e instalar bancos de capacitores sobre la trayectoria de la red radial de distribución de energía eléctrica en un nivel de media tensión, considerándose como tal los valores de voltaje de 13.8 kV y 34.5 kV.
- Verificar que el estado de la red de distribución cumpla con los lineamientos de calidad de la energía, en cuanto a niveles de tensión se refiere.

CAPÍTULO 2. REDES DE DISTRIBUCIÓN.

La dinámica en la redes de distribución eléctrica es muy diferente a la de las redes de transmisión una parte por su topología característica y en otra por su nivel de tensión.

2.1 Topología.

Los sistemas de distribución, son el medio que permite que se entregue la energía a los centros de consumo una vez que esta es generada por las centrales eléctricas y transmitida por los sistemas de transmisión [2].

A diferencia de una red de transmisión de energía eléctrica que tiene la característica de ser una red mallada, de forma general, una red eléctrica de distribución empieza desde la subestación eléctrica en donde se reduce el voltaje de alta tensión a media tensión y finaliza en las acometidas de los clientes, esta red presenta generalmente una topología radial, es decir que solo existe un camino para el flujo de corriente desde la fuente hasta la carga (Ver Fig. 2.1).

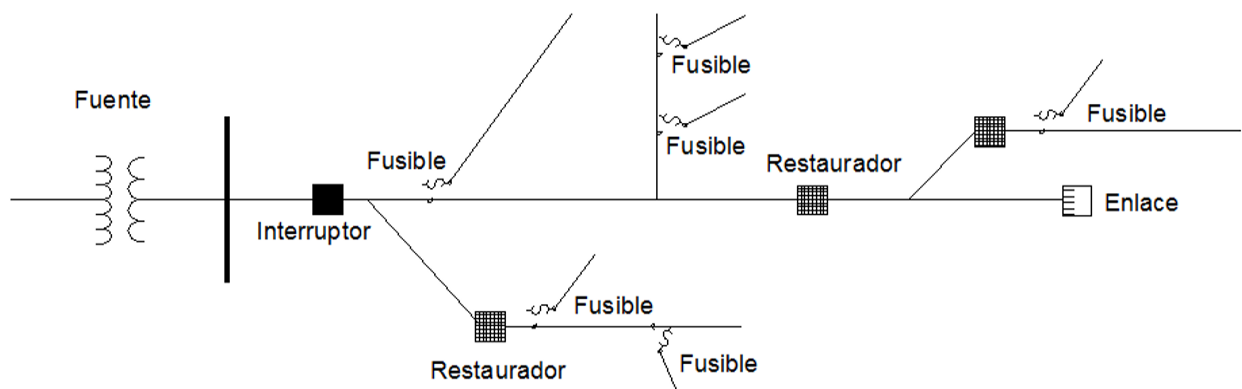


Figura 2.1 Red radial.

Los alimentadores o circuitos eléctricos que salen de dicha subestación recorren trayectorias a través de diversas colonias o poblaciones, por lo cual su configuración es muy variada tanto en forma como en longitud pero generalmente siempre guardan una topología radial. La topología de un alimentador se constituye por una trayectoria principal llamada troncal y trayectorias derivadas de la troncal llamadas ramales, la troncal suele

tener un calibre de conductor mayor al de los ramales, y los ramales inician a partir de un equipo de protección, ya sea un cortacircuito fusible o restaurador conectado a la troncal. En la figura 2.2 se muestran tres configuraciones de alimentador.

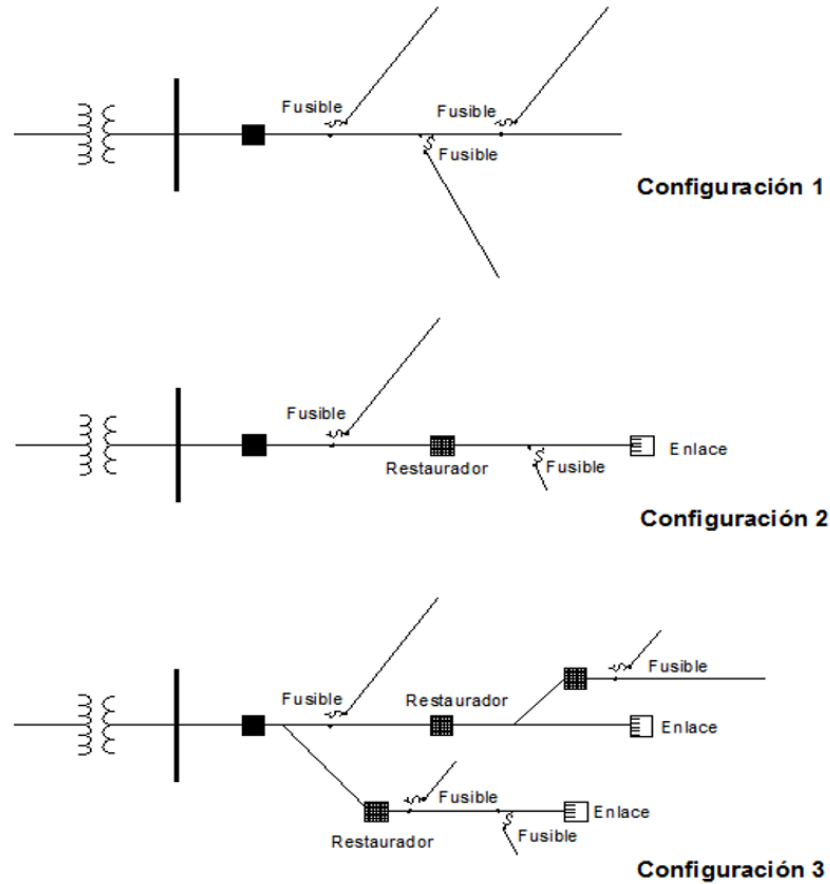


Figura 2.2 Configuraciones de alimentadores.

2.2 Niveles de Tensión.

De acuerdo al estándar IEEE 141-1993 los valores de voltaje se clasifican como se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Niveles de voltaje IEEE 141-1993.



Nivel de voltaje	Rango de valor de voltaje
Baja tensión	Menores a 1000V
Media tensión	Igual y mayores a 1kV pero menores a 100 KV
Alta tensión	Igual y mayores a 100,KV y menores a 230 KV

En México, las redes de distribución de la CFE el rango de media tensión lo establece entre 1 KV y los 34.5 KV, específicamente los valores nominales que se utilizan en las redes de distribución son: 13.8 KV, 23 KV y 34.5 KV [4] [5].

En las subestaciones de distribución se encuentra el transformador de potencia, el cual se considera la fuente de alimentación a la red de distribución. A continuación se ejemplifica a grandes rasgos en la figura 2.3, el diagrama unifilar de una subestación eléctrica de distribución.

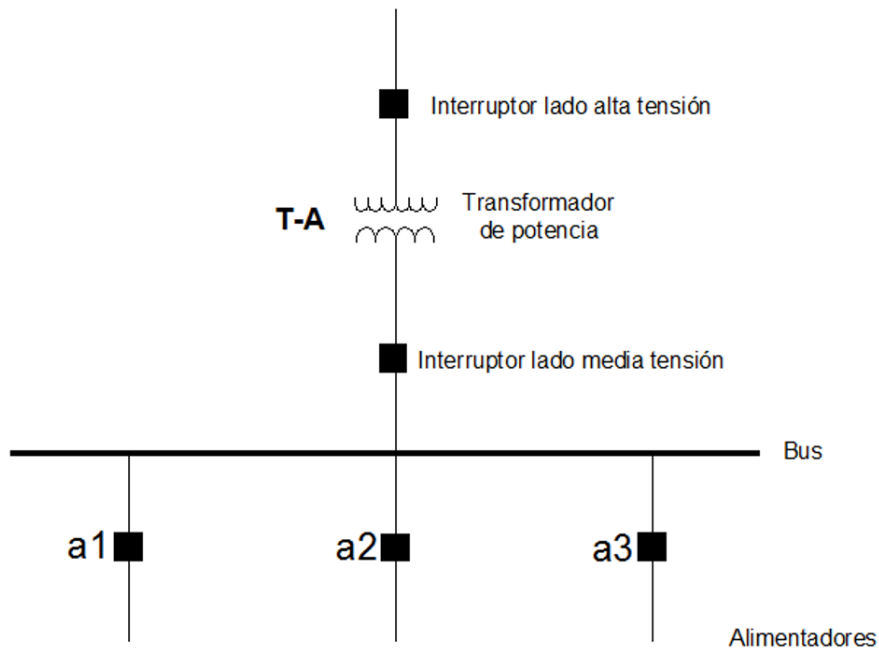


Figura 2.3 Subestación eléctrica de distribución.



2.3 Caída de voltaje

El servicio de energía eléctrica debe cumplir con ciertos valores en sus parámetros eléctricos para sea considerado de calidad y cumpla además con los fines para los cuales se contrata el servicio de suministro eléctrico [6].

Los centros de control de energía se encuentran vigilando permanentemente la continuidad del suministro eléctrico, y además se encargan de vigilar otros parámetros eléctricos, en caso de tener valores fuera de rango ellos se encargan de corregir dicho defecto.

El perfil de voltaje es un parámetro de mucha importancia, el cual se encuentra establecido definitivamente para cada sección del sistema eléctrico, por lo tanto es un parámetro que también se ajusta a valores establecidos por normas. El valor del voltaje en un sistema eléctrico puede incrementar o disminuir como resultado de aumento en la carga o reconfiguraciones temporales por condiciones de emergencia o trabajos programados.

La variación de voltaje se considera en base al valor RMS de la tensión nominal del sistema y cuando esta se mantiene con una duración mayor a un minuto, esto según la norma ANSI C84.1, así tenemos de la misma norma los datos de la Tabla 2.2 con valores límite del voltaje de operación que debe procurarse en el sistema.

Tabla 2.2 Rangos de voltaje de operación.

VALOR NOMINAL (V)	VALOR DESEADO (V)	VALOR ACEPTADO (V)
120	126-114	127-110
240	252-228	254-220
13,800	14,490-13,460	14,520-13,110
34,500	36,230-33,640	36,510-32,780



De acuerdo a lo mencionado con anterioridad, la caída de voltaje se presenta cuando el valor del voltaje del sistema sea menor al valor nominal durante un lapso mayor a un minuto.

2.4 Dinamismo de las redes de distribución.

Algo característico de las redes de distribución es que tienen la cualidad de ser muy dinámicas, es decir, continuamente cambian su topología para poder mantener la continuidad del servicio, dichos cambios se deben principalmente a necesidades de mantenimiento a equipos en la subestación eléctrica y también se deben a fallas eléctricas en las líneas de transmisión que alimentan dicha subestación, fallas en la misma subestación y fallas en los circuitos eléctricos [2] [7].

Un circuito eléctrico de distribución generalmente está conectado a una sola fuente de alimentación, por lo que se dice que está conectado de forma radial. También se debe comentar, que la fuente de un mismo alimentador se puede cambiar si se necesita, esto sin suspender el suministro de energía ni un solo instante. Esto pasa cuando por necesidades de mantenimiento o por condiciones de falla se requiere transferir carga de una subestación eléctrica a otra.

En la figura 2.4, se muestran dos alimentadores en condiciones normales conectados a su propia fuente, un alimentador "a" y el alimentador "b", posteriormente se cierra un equipo de enlace de los circuitos, por lo que durante un corto periodo de tiempo, comúnmente no más de un minuto, ambos circuitos quedan conectados en malla, es decir se forma un solo circuito eléctrico conectado a 2 fuentes; en un tercer paso, se abre el interruptor del alimentador "a" quedando ambos circuitos en una configuración radial pero con distinta topología.

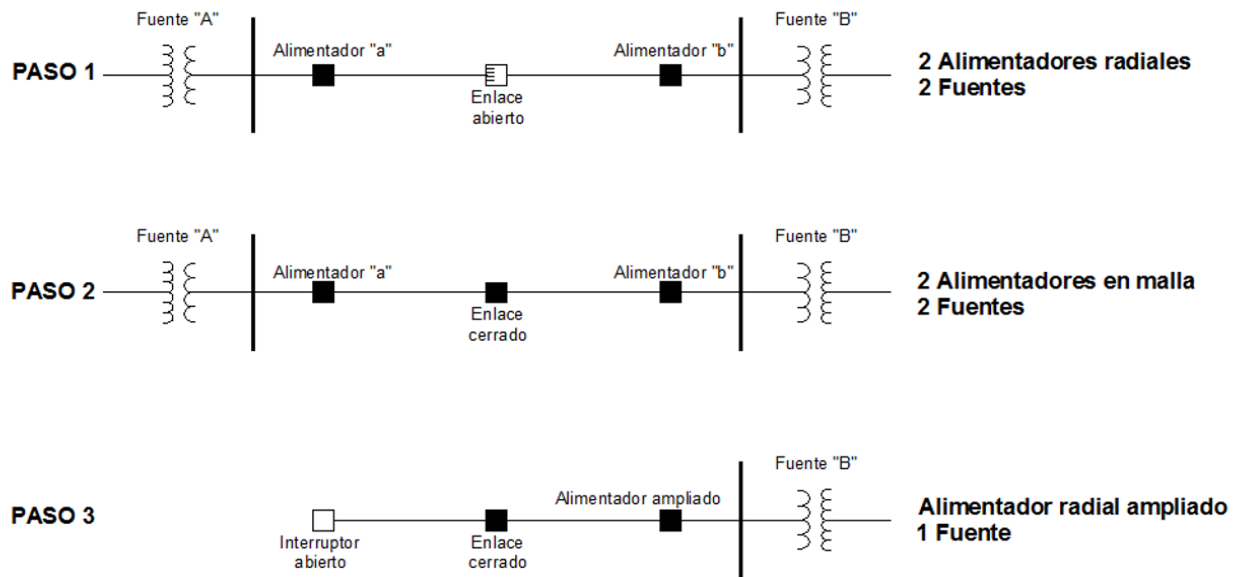


Figura 2.4 Cambio de fuente de un alimentador.

Una red transmisión de energía eléctrica, tiene la característica de que en su mayoría es una red mallada y además está constituida de instalaciones más robustas, también la naturaleza topológica de las redes de transmisión propicia a que sean relativamente más seguras que las redes de distribución, es decir, la red de distribución es mas propensa a fallas debido a que los alimentadores que están en las zonas urbanizadas continuamente tienen fallas por diversas razones como por ejemplo choques a poste, diversos objetos sobre las líneas como lo son anuncios publicitarios, ramas, alambres, cruzamientos con otras instalaciones, tanto de edificios en construcción o de instalaciones de servicios de telefonía.

Cuando dichas fallas son permanentes (sostenidas) [6], es decir, cuando el daño persiste en la red y tiene que ser corregido directamente por personal; se requiere hacer transferencia de carga, o cambio de fuente, solo que a diferencia del ejemplo de la figura 2.4, primero hay que desconectar la sección de la troncal que tiene la falla como se muestra en la figura 2.5.

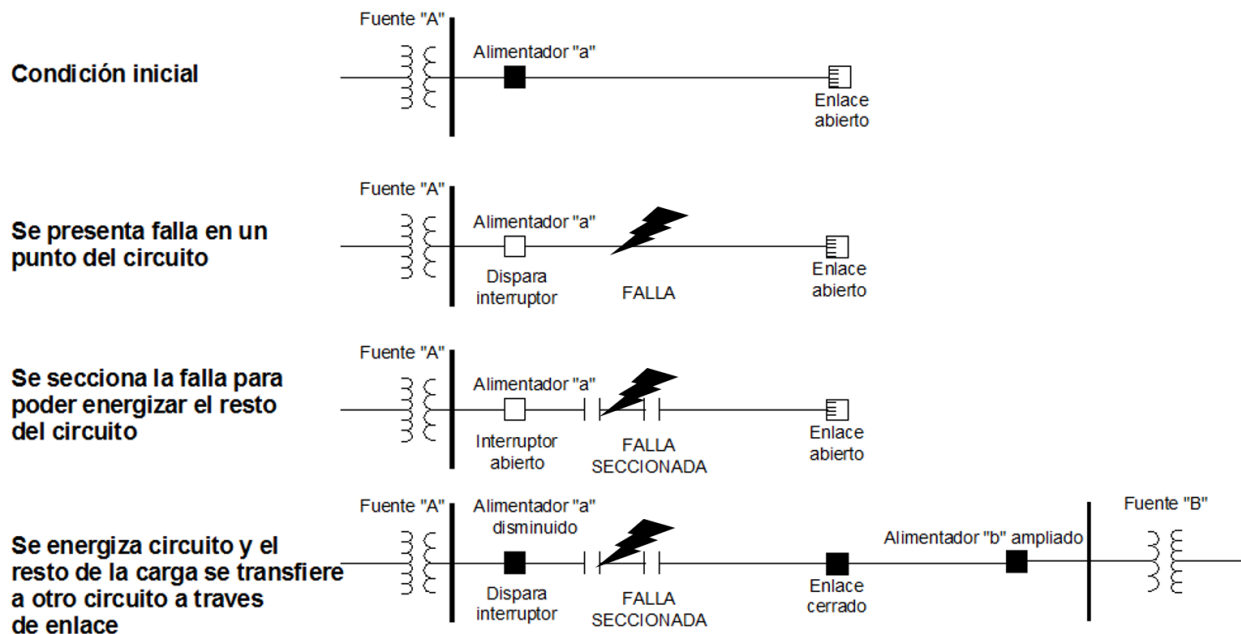


Figura 2.5 Falla permanente en un alimentador de distribución.

En el ejemplo de la figura 2.5, se tiene un alimentador "a" en condiciones normales conectado a una Fuente A, posteriormente se presenta una falla permanente en el mismo alimentador, en ese momento se dispara el interruptor del alimentador "a" y se procede a seccionar la troncal del alimentador, dejando desconectado el tramo donde se encuentra la falla e inmediatamente se procede a energizar el resto del circuito que tiene la falla, esto se realiza cerrando un equipo de enlace de circuitos, en este ejemplo es el equipo que enlaza a los alimentadores "a" y "b", después de cerrarlo queda restablecido el servicio eléctrico y por lo tanto resulta el alimentador "b" ampliado con una topología nueva que es la suma del alimentador "b" que y una parte del alimentador "a".

Hay dos casos en los que la transferencia carga de circuitos es al 100% y no como el caso de la falla en un alimentador donde solo se transfiere una parte de la carga del circuito.

El primer caso es cuando se presenta una falla en las líneas que alimentan el transformador de la subestación, cuando hay falla en el transformador de potencia y cuando hay fallas en los buses, tanto en lado de alta tensión como en el de media tensión.

Como ya se mencionó una subestación eléctrica tiene conectados varios alimentadores en su bus de media tensión, por lo que al presentarse la falla, por obviedad todos los alimentadores tendrán que cambiar su fuente de alimentación, quedando en una condición topológica totalmente diferente y en algunos casos con deficiencia de voltaje por el aumento de la longitud entre la nueva fuente y ciertos puntos de la red; o también por el aumento de carga que debe alimentar la nueva fuente.

Para ejemplificar lo anterior, considere que tiene una subestación con un transformador de potencia denominado T-A [8], el cual tiene conectados en su bus de media tensión tres alimentadores denominados $a1$, $a2$, $a3$; respectivamente tal como se puede ver en la figura 2.6.

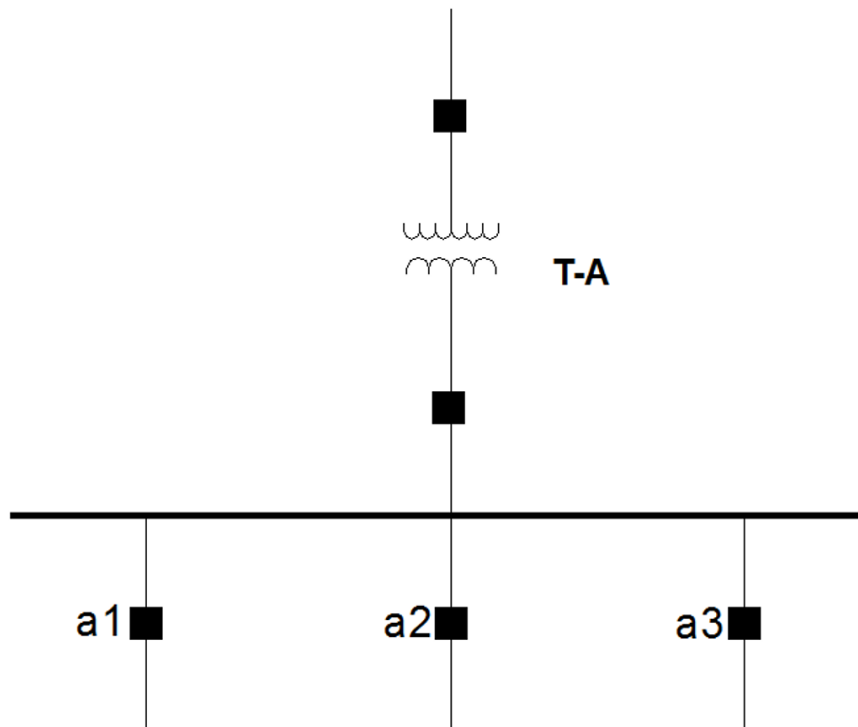


Figura 2.6 Subestación eléctrica con tres alimentadores.

Al presentarse una falla en el transformador T-A, se procede a cambiar la fuente de alimentación. Primero se abren los interruptores de los alimentadores $a1$, $a2$ y $a3$, luego se procede a energizar cada uno de los alimentadores cerrando equipos de enlace con alimentadores de subestaciones aledañas. Para este ejemplo, el alimentador $a3$ se

energiza enlazándolo con un alimentador de otra subestación denominado b3 y así también, el alimentador a2 se energiza a través de un enlace con un alimentador c1; finalmente el alimentador a1, se energiza utilizando el bus propio de media tensión del transformador T-A, esto se realiza cerrando el interruptor del alimentador a3 y del alimentador a1. En la figura 2.7 se muestra la configuración topológica de los alimentadores después de la falla.

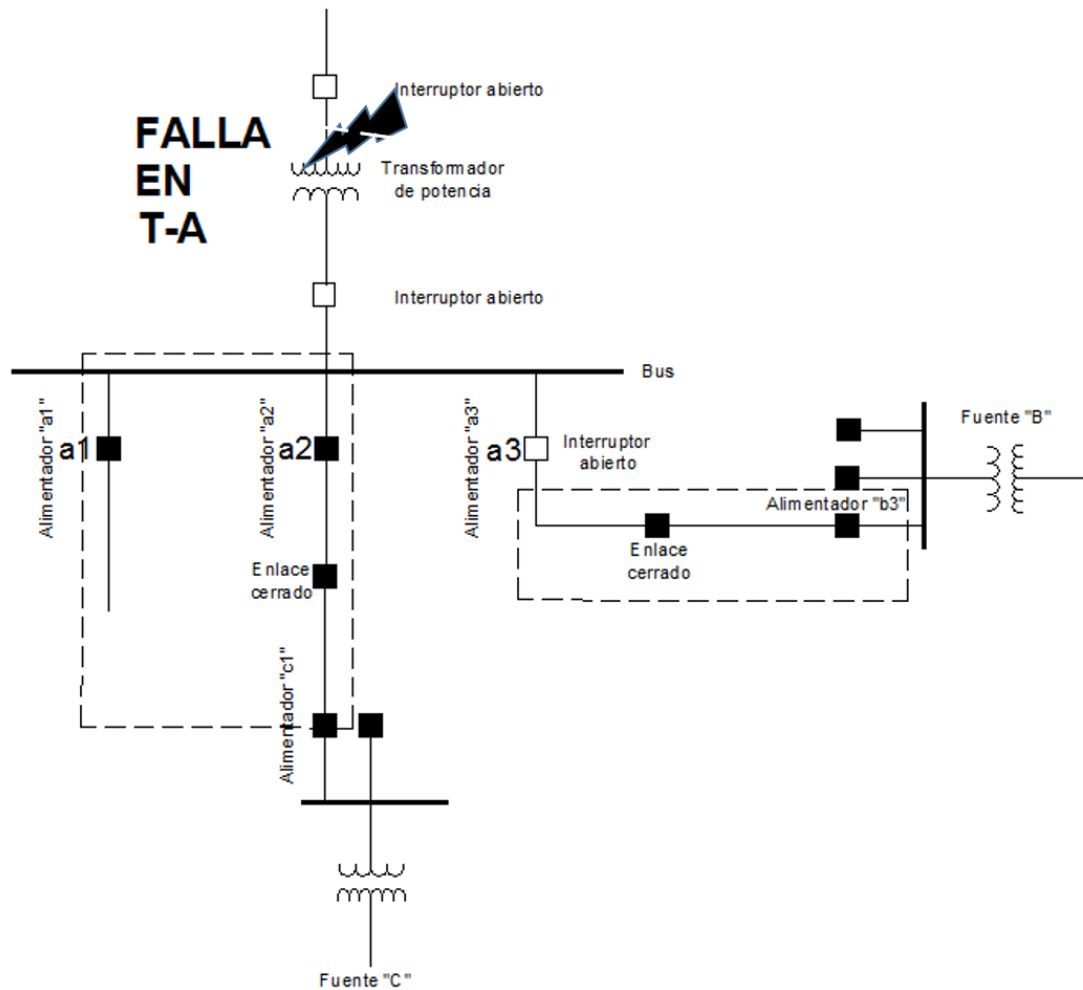


Figura 2.7 Falla en una subestación eléctrica de distribución



CAPÍTULO 3 MODELADO DE ELEMENTOS.

Para poder analizar un sistema eléctrico es necesario conocer cómo se modelan los elementos eléctricos que componen dicha red, tal como lo son los conductores o cargas conectadas a dicho sistema.

3.1 Impedancia serie de línea.

Para realizar el modelado de la red de distribución, se considerará que los conductores de energía eléctrica tienen una parte real (R) que corresponde a la resistencia propia del conductor; y una parte imaginaria (jX) que corresponde a la inductancia mutua que se crea entre un conductor i y el flujo magnético con otros conductores n [9], tal como se describe en la ecuación (3.1)

$$Z = R + jX \quad (3.1)$$

En la figura 3.1 se ejemplifica como interactúa un conductor i y el flujo magnético con respecto a otros conductores n [9].

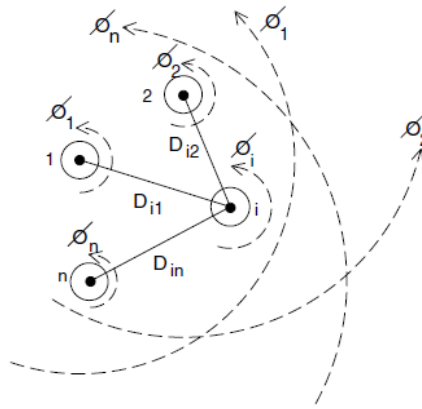


Figura 3.1 Interacción de flujo magnético entre conductores.

3.2 Líneas de distribución no transpuesta.

A diferencia de los sistemas eléctricos de potencia que siempre son trifásicas, las redes de distribución tienen configuraciones diferentes, hay tramos de línea trifásica, bifásica y monofásica que alimentan cargas desbalanceadas, para estos casos también se considera la impedancia propia y mutua del conductor así como el retorno por tierra de las corrientes desbalanceadas [9]. La reactancia inductiva propia se calcula con la ecuación (3.4); y la reactancia inductiva mutua se calcula con la ecuación (3.5),

$$Z_{ii} = r_i + j0.12134 * \ln \frac{1}{GMR_i} \Omega/milla \quad (3.4)$$

$$Z_{ij} = j0.12134 * \ln \frac{1}{D_{ij}} \Omega/milla \quad (3.5)$$

Y se considerará que la frecuencia del sistema es 60 Hertz, que la longitud del conductor es de una milla y los valores de la resistencia serán obtenidos de las tablas de datos de los conductores proporcionadas por los fabricantes.



3.3 Ecuaciones modificadas de Carson.

John Carson propuso un par de ecuaciones para determinar la impedancia propia y mutua de los conductores de los sistemas eléctricos de distribución que se caracterizan por estar desbalanceados, y además proponía para tal caso que la tierra era el camino de retorno de la corriente [9]. Según lo dicho por Carson, la impedancia propia primitiva de la línea se define por la ecuación (3.6)

$$Z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right] \quad (3.6)$$

Por otra parte, la impedancia mutua primitiva está definida por la ecuación (3.7)

$$Z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right] \quad (3.7)$$

Donde:

Z_{ii} = impedancia propia del conductor (Ω /milla)

Z_{ij} = impedancia mutua entre conductores i y j (Ω /milla)

r_i = resistencia del conductor i (Ω /milla)

GMR_i = radio medio geométrico del conductor i (pies)

D_{ij} = distancia entre conductores i y j (pies)

Considerando que la frecuencia del sistema es de 60 Hertz, que la resistividad de la tierra es de 100 Ohms-metro, que se desconoce la resistencia de la tierra, tampoco se conoce el radio medio geométrico de la tierra y que la distancia entre los n conductores y la tierra es desconocida.

3.4 Matriz de impedancias para líneas aéreas.

En la figura 3.2 se muestra un segmento de línea aérea conformador por 4 conductores con un neutro aterrizado, el cual se considera que es multiaterrizado [10],

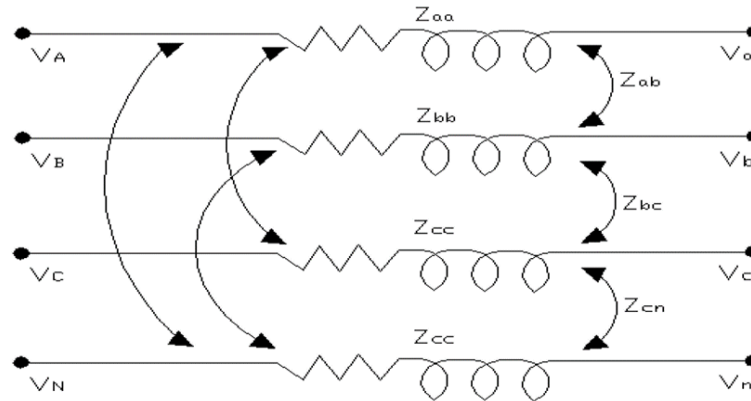


Figura 3.2 Segmento de línea de 4 hilos.

Expresado en forma matricial, se tendrá una matriz de impedancia primitiva de 4X4, si fuera línea subterránea la matriz resultante será de 6X6, Así, la ecuación (3.8) es la matriz de impedancia primitiva para una línea trifásica con m neutros.

$$\left[\hat{Z}_{primitiva} \right] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \cdot & \hat{Z}_{an1} & \hat{Z}_{an2} & \hat{Z}_{an3} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \cdot & \hat{Z}_{bn1} & \hat{Z}_{bn2} & \hat{Z}_{bn3} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \cdot & \hat{Z}_{cn1} & \hat{Z}_{cn2} & \hat{Z}_{cn3} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{Z}_{n1a} & \hat{Z}_{n1b} & \hat{Z}_{n1c} & \cdot & \hat{Z}_{n1n1} & \hat{Z}_{n1n2} & \hat{Z}_{n1nm} \\ \hat{Z}_{n2a} & \hat{Z}_{n2b} & \hat{Z}_{n2c} & \cdot & \hat{Z}_{n2n1} & \hat{Z}_{n2n2} & \hat{Z}_{n2nm} \\ \hat{Z}_{nma} & \hat{Z}_{nmb} & \hat{Z}_{nmc} & \cdot & \hat{Z}_{nmn1} & \hat{Z}_{nmn2} & \hat{Z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Para la mayoría de las aplicaciones es necesario reducir la matriz de impedancias primitiva a una de 3X3, en el marco de referencia de fase, formado por las impedancias propia y mutua equivalentes para las tres fases de la línea [10].

Para reducir la matriz se aplica el método de reducción de Kron [11], el consiste en aplicar la Ley de voltajes de Kirchhoff al circuito, como se muestra con la ecuación (3.9) con respecto a la figura 3.2.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

La ecuación (3.9) expresada en forma particionada queda como la ecuación (3.10).

$$\begin{bmatrix} [V_{abc}] \\ [V_{ng}] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [V'_{abc}] \\ [V'_{ng}] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [\hat{z}_{ij}] & [\hat{z}_{in}] \\ [\hat{z}_{nj}] & [\hat{z}_{nn}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} [I_{abc}] \\ [I_n] \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Los voltajes V_{ng} y V'_{ng} serán iguales a cero debido a que el neutro es aterrizado.

El método de reducción de Kron define que cada elemento de una sección de línea puede ser representada por una matriz Z_{abc} de 3X3 [11], tal como se muestra en la ecuación (3.11).

$$[Z_{abc}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \quad (3.11)$$

Finalmente resulta la matriz de impedancias reducida de la ecuación 3.12

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \Omega/milla \quad (3.12)$$

Una vez aplicada la reducción de Kron, el diagrama equivalente será como el de la figura 3.3.

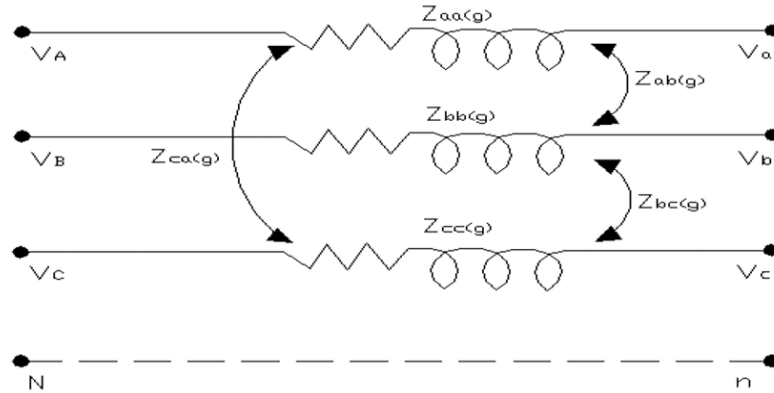


Figura 3.3 Impedancia serie de una línea trifásica.

Las ecuaciones modificadas de John Carson pueden aplicarse a líneas bifásicas y trifásicas con neutro aterrizado, con lo cual tendremos matrices iniciales de impedancia primita de 2X2 y de 3X3 [9]. La matriz de 2X2 de las líneas bifásicas se expandirá a una de 3X3, esto se realiza agregando filas y columnas de ceros de la fase que no existe, tal como se muestra en el ejemplo de la ecuación (3.13) en donde no hay fase *b*.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & Z_{ac} \\ 0 & 0 & 0 \\ Z_{ca} & 0 & Z_{cc} \end{bmatrix} \Omega/milla \quad (3.13)$$

Para el caso de una línea monofásica, donde solo existe la fase *b*, se expresará como indica la ecuación (3.14)

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & Z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega/milla \quad (3.14)$$

3.5 Admitancias en derivación de líneas aéreas.

Para calcular la admitancia en derivación de las líneas aéreas se utiliza el método de los conductores y sus imágenes, véase la figura 3.4.

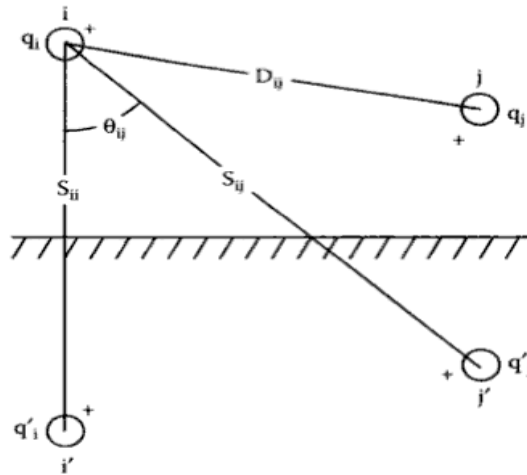


Figura 3.4 Conductores aéreos y sus imágenes.

En donde:

i = conductor i

i' = imagen del conductor i

j = conductor j

j' = imagen del conductor j

S_{ii} = distancia entre el conductor i y su imagen i' (pies)

S_{ij} = distancia entre el conductor i y la imagen del conductor j' (pies)

D_{ij} = distancia entre el conductor i y el conductor j' (pies)

q_i = densidad de carga del conductor i (Coulombs/m)



q'_i = densidad de carga de la imagen del conductor i (Coulombs/m)

q_j = densidad de carga del conductor j (Coulombs/m)

q'_j = densidad de carga de la imagen del conductor j (Coulombs/m)

Se considera que $q_i = -q'_i$ y $q_j = -q'_j$

La capacitancia de una línea es el resultado de la diferencia de potencial entre conductores [10]. Siguiendo dicho método de los conductores y sus imágenes, se tiene que la caída de voltaje entre el conductor i y su respectiva imagen está dada por la ecuación (3.15).

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(2 * q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 2 * q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (3.15)$$

Donde:

ϵ = permitividad del medio

RD_i = radio del conductor i (pies)

La ecuación (3.16) nos dará la caída de voltaje entre el conductor i y la tierra.

$$V_{ig} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + q_j \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (3.16)$$

De forma general la caída de voltaje entre el conductor i y la tierra se expresa como la ecuación (3.17).



$$V_{ig} = \hat{P}_{ii} \cdot q_i + \hat{P}_{ij} \cdot q_j \quad (3.17)$$

Donde:

\hat{P}_{ii} = coeficiente de potencial propio

\hat{P}_{ij} = coeficiente de potencial mutuo

ϵ_{aire} = permitividad relativa del medio (aire) = $1.4240 \times 10^{-2} \mu F [1]$

Tenemos entonces que, los coeficientes de potencial propio y mutuo quedan expresados por las ecuaciones 3.18 y 3.19:

$$\hat{P}_{ii} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} \text{ milla}/\mu F \quad (3.18)$$

$$\hat{P}_{ij} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \text{ milla}/\mu F \quad (3.19)$$

Por tanto, la matriz de coeficientes de potencial queda como lo indica la ecuación (3.20).

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{aa} & \hat{P}_{ab} & \hat{P}_{ac} & \hat{P}_{an} \\ \hat{P}_{ba} & \hat{P}_{bb} & \hat{P}_{bc} & \hat{P}_{bn} \\ \hat{P}_{ca} & \hat{P}_{cb} & \hat{P}_{cc} & \hat{P}_{cn} \\ \hat{P}_{na} & \hat{P}_{nb} & \hat{P}_{nc} & \hat{P}_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

La forma reducida de la matriz de la ecuación (3.20) es la ecuación (3.21)

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{P}_{ij}] & [\hat{P}_{in}] \\ [\hat{P}_{nj}] & [\hat{P}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (3.21)$$



También es necesario mencionar que se puede aplicar la reducción de Kron a la matriz de coeficientes de potencial, tal como lo indica la ecuación (3.22)

$$[\hat{P}_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] * [\hat{P}_{nn}]^{-1} * [\hat{P}_{jn}] \quad (3.22)$$

Ahora se saca la inversa de la matriz de coeficientes de potencial para obtener la matriz de capacitancias $[C_{abc}]$ de n fase X n fase, que corresponde a la ecuación (3.23).

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad (3.23)$$

Por otro lado, la matriz de admitancias en derivación está dada por la ecuación (3.24).

$$[Y_{abc}] = 0 + j * \omega * [C_{abc}] \quad \mu S/milla \quad (3.24)$$

Donde:

$$\omega = 2\pi f = 376.9911 = \text{frecuencia angular del sistema (rad/seg)}$$

Es sabido que la admitancia en derivación de una línea consta de una conductancia y una susceptancia capacitiva, sin embargo la conductancia se ignora debido a que es muy pequeña comparada con la susceptancia capacitiva. Es importante hacer notar que las líneas de distribución típicamente son tan cortas que la admitancia en derivación se puede despreciar. Sin embargo hay casos de líneas aéreas largas y ligeramente cargadas donde se debe incluir esta admitancia en derivación. [10].

3.6 Modelado de las líneas en redes de distribución.

Para iniciar el modelado de las líneas de una red de distribución, vamos a considerar el segmento de línea trifásico de la figura 3.5, la cual expresa las impedancias y admitancias totales de dicho segmento.

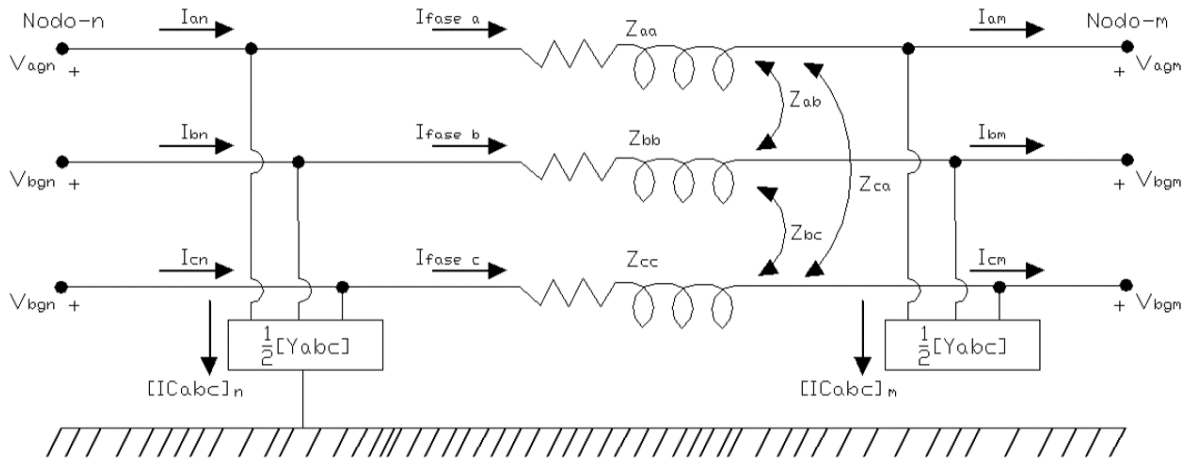


Figura 3.5 Segmento de línea trifásico.

Ahora se aplica la Ley de Kirchhoff, empezaremos con la ecuación (3.25) que representa los voltajes y corrientes que entran a través del nodo n ; y los voltajes y corrientes que salen por el nodo m [10].

$$\begin{bmatrix} I \text{ linea}_a \\ I \text{ linea}_b \\ I \text{ linea}_c \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m \quad (3.25)$$

De forma general, la ecuación (3.25) queda como la ecuación (3.26).

$$[I \text{ linea}_{abc}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [V_{LG}_{abc}]_m \quad (3.26)$$



Aplicando la Ley de Kirchhoff para el segmento de línea de la figura 3.5, se obtiene la ecuación (3.27)

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I \text{ linea}_a \\ I \text{ linea}_b \\ I \text{ linea}_c \end{bmatrix}_m \quad (3.27)$$

De forma general, la ecuación (3.27) queda como la ecuación (3.28).

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}][I \text{ linea}_{abc}]_m \quad (3.28)$$

Se sustituye la ecuación (3.26) en la (3.28) y se obtiene (3.29).

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \left\{ [I_{abc}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}][VLG_{abc}]_m \right\} \quad (3.29)$$

Se agrupan términos:

$$[VLG_{abc}]_n = \left\{ [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}][Y_{abc}] \right\} [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}][I_{abc}]_m \quad (3.30)$$

Donde:

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

De forma general:



$$[VLG_{abc}]_n = [a][VLG_{abc}]_m + [b][I_{abc}]_m \quad (3.32)$$

Donde:

$$[a] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (3.33)$$

$$[b] = [Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (3.34)$$

La corriente que entra a través del nodo n en el segmento de línea de la figura 3.5 está dada por la ecuación (3.35)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} I \text{ linea}_a \\ I \text{ linea}_b \\ I \text{ linea}_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n \quad (3.35)$$

Expresada de manera compacta, queda como la ecuación (3.36)

$$[I_{abc}]_n = [I \text{ linea}_{abc}]_m + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_n \quad (3.36)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.26) y (3.33) en la (3.36) y reduciendo términos se obtiene la ecuación (3.37).

$$[I_{abc}]_n = [c][VLG_{abc}]_m + [d][I_{abc}]_m \quad (3.37)$$



Donde:

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (3.38)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (3.39)$$

Para el caso cuando se emplea el método de barrido progresivo-regresivo, el voltaje se obtendrá en el nodo m en función del voltaje del nodo n y las corrientes del nodo m , tal como lo indica la ecuación [12] (3.40).

$$[VLN_{abc}]_m = [A][VLG_{abc}]_n + [B][I_{abc}]_m \quad (3.40)$$

Donde:

$$[A] = [a]^{-1} \quad (3.41)$$

$$[B] = [a]^{-1}[b] \quad (3.42)$$

3.6 Modelado de cargas de las redes de distribución.

Las cargas conectadas a la red de distribución no solamente son trifásicas, también son bifásicas y monofásicas, lo cual le da la característica de ser sistemas desbalanceados, dichas cargas pueden ser modeladas como:

- Potencia real y reactiva constantes
- Corriente constante
- Impedancia constante
- Como una combinación de las anteriores

Invariablemente el modelado de la carga se empieza considerando la potencia compleja por fase y el voltaje, ya sea de fase a neutro o voltaje entre fases, según la carga esté conectada en estrella o en delta. La potencia compleja se expresa en volts-ampers y volts, o en volts-ampers por unidad y volts por unidad [14].

Las cargas bifásicas y las monofásicas, sin importar su tipo de conexión, se modelan ajustando las corrientes de las fases faltantes a cero.

Los bancos de capacitores se modelan como susceptancia constante conectadas en estrella o delta, para este caso también las corrientes de las fases faltantes se ajustan a cero [10].

Un banco de capacitores conectado en estrella se modela como el de la figura 3.6, Sus unidades son KVAR y KV.

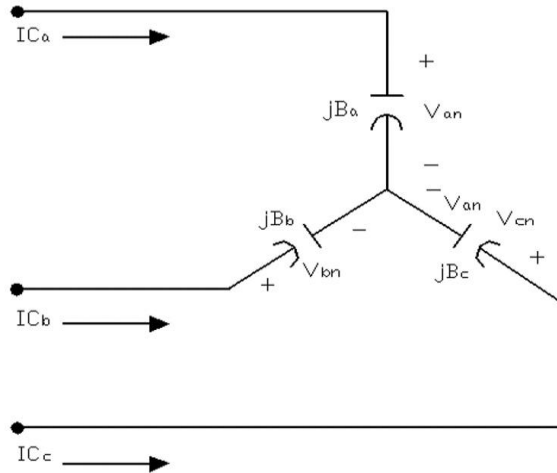


Figura 3.6 Banco de capacitores trifásico conectado en estrella.

La susceptancia constante para cada unidad se expresa en Siemens y se calcula mediante la ecuación (3.43)

$$B_c = \frac{KVAR}{KV_{LN}^2 * 1000} S \quad (3.43)$$

Después de calcular la susceptancia, la corriente de línea del banco de capacitores se calcula con la ecuación (3.44)

$$\begin{aligned}IC_a &= jB_a \cdot V_{an} \\IC_b &= jB_b \cdot V_{bn} \\IC_c &= jB_c \cdot V_{cn}\end{aligned}\tag{3.44}$$

El método Z_{bus} está basado en el principio de superposición aplicado al bus del sistema, es considerado por dos características muy importantes, la fuente de voltaje especificada y las inyecciones de corriente equivalente [10]. En dicho método las cargas se consideran como inyección de corriente al sistema como se muestra en la figura 3.7.

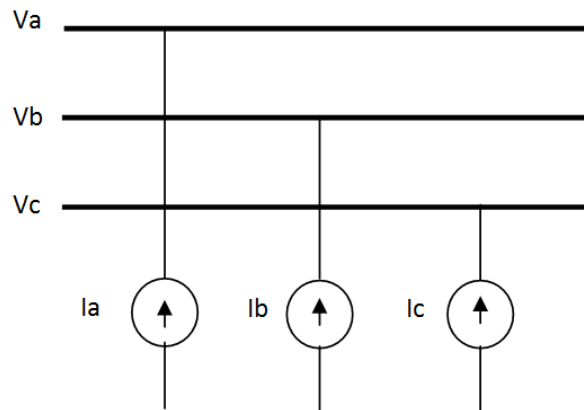


Figura 3.7 Cargas inyectando corriente al bus.

La corriente inyectada al bus se obtiene mediante la ecuación (3.45).

$$I_i = \left(\frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)\tag{3.45}$$

Para un bus i , la potencia compleja S_i se obtiene con la ecuación (3.46)

$$S_i = P_i + jQ_i \quad (3.46)$$

De acuerdo a lo leído con anterioridad, las cargas monofásicas de la figura previa, pueden modelarse como potencia compleja constante, como se muestra en la figura 3.8.

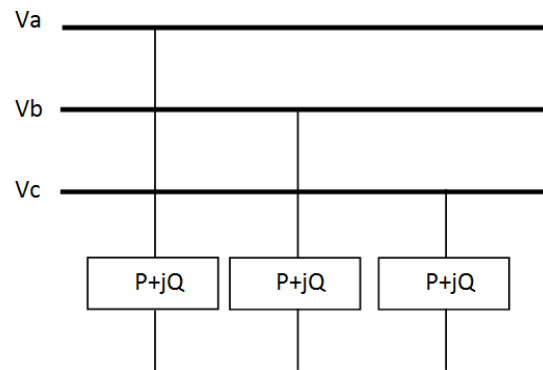


Figura 3.8 Cargas monofásicas expresadas como potencia compleja constante.

CAPÍTULO 4. MARCO TEÓRICO Y APLICACIÓN

En este apartado se describen las ecuaciones básicas de la técnica de barrido progresivo-regresivo, la forma de modelar las cargas y la forma de incorporar los bancos de capacitores al esquema de solución. Además se muestra un ejemplo de aplicación de bancos de capacitores a redes de distribución.

4.1 Técnica de Barrido Progresivo - Regresivo.

El método de barrido progresivo-regresivo enumera cada nodo de la red sin importar si el nodo es una línea monofásica, bifásica o trifásica, los nodos son de preferencia enumerados comenzando en el nodo raíz, luego se ordena la red en capas, siendo la primera capa el nodo raíz y sucesivamente los demás nodos hasta llegar al nodo más alejado [12]. La figura 4.1 muestra la numeración de una red radial de 57 nodos y sus capas.

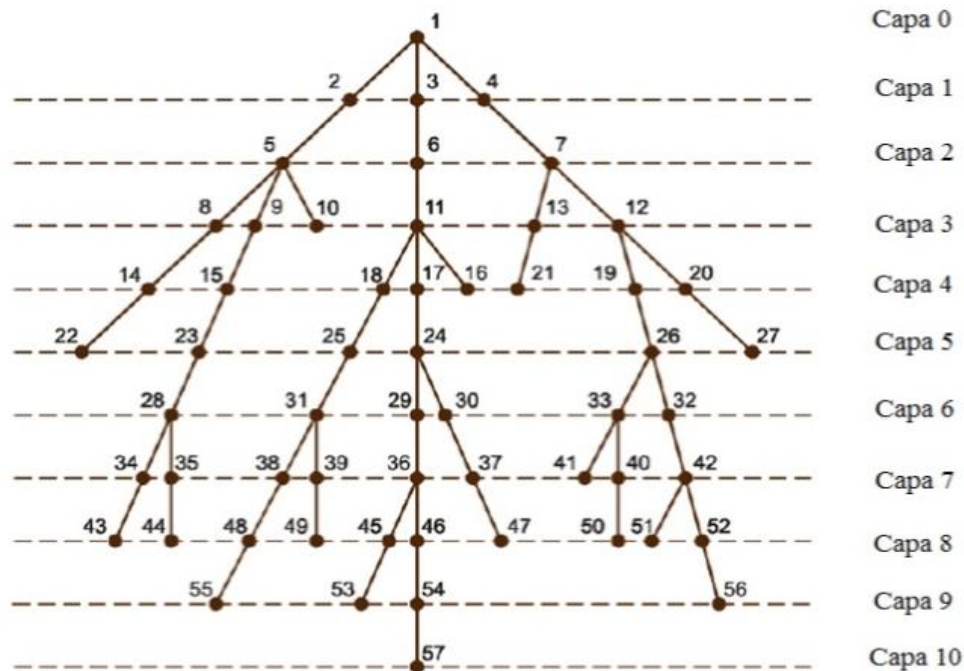


Figura 4.1 Numeración de nodos para una red radial de 57 nodos, [12].



La impedancia de la de línea está dada en una matriz de 3x3 calculada por las ecuaciones modificadas de Carson [9]. Cuando exista conductor de neutro, la matriz de impedancia de fase se reducirá a un tamaño apropiado mediante la reducción por Kron [11]. Si alguna fase de la línea no existe, la correspondiente fila y columna de la matriz de impedancia se llenara con ceros. El nodo raíz será el compensador con las magnitudes de voltajes y ángulos ya conocidos.

Una vez teniendo todos los datos iniciales, el algoritmo iterativo de barrido se divide en dos partes principales: barrido regresivo y barrido progresivo [13].

Barrido regresivo.

Considere dos buses en una capa determinada de una red radial, como se muestra en la figura 4.2, la corriente entrante en el bus desde la izquierda I_m , es calculada a partir de las tensiones y corrientes que salen del bus a la derecha (V_n e I_n) como:

$$\mathbf{I}_m = \mathbf{c}_{mn} \mathbf{V}_n + \mathbf{d}_{mn} \mathbf{I}_n, \quad (4.1)$$

Donde, el coeficiente de matrices \mathbf{c}_{mn} y \mathbf{d}_{mn} implican parámetros de la línea situada entre los buses m y n :

$$\mathbf{c}_{mn} = \mathbf{Y} + \frac{1}{4} \mathbf{Y} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}, \quad (4.2a)$$

$$\mathbf{d}_{mn} = \mathbf{U} + \frac{1}{2} \cdot \mathbf{Z} \cdot \mathbf{Y}, \quad (4.2b)$$

En (4.2) \mathbf{Y} , \mathbf{Z} y \mathbf{U} denotan la admitancia en derivación, impedancia de línea y matriz identidad, respectivamente.

En adición y en concordancia con la Figura 4.2.

$$\mathbf{I}_n = \mathbf{I}_{n,inj} + \sum_{i=1}^q \mathbf{I}_{n,i}, \quad (4.3)$$

Donde, $\mathbf{I}_{n,inj}$ representa la corriente inyectada en bus n , q el número de ramas conectadas al bus n e $\mathbf{I}_{n,i}$ corresponde a corrientes de rama que entran al bus n .

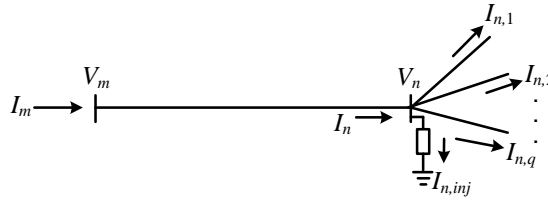


Figura 4.2 Direcciones de referencia para la técnica de barrido.

Barrido progresivo.

Basado en las direcciones de referencia de la figura 4.2, ahora las tensiones se calculan de izquierda a derecha como:

$$\mathbf{V}_n = \mathbf{A}_{mn} \mathbf{V}_m + \mathbf{B}_{mn} \cdot \mathbf{I}_m, \quad (4.4)$$

Donde, el coeficiente de matrices \mathbf{A}_{mn} y \mathbf{B}_{mn} implican parámetros de la línea situada entre los buses m y n :

$$\mathbf{A}_{mn} = (\mathbf{d}_{mn})^{-1}, \quad (4.5a)$$

$$\mathbf{B}_{mn} = (\mathbf{d}_{mn})^{-1} \cdot \mathbf{Z}. \quad (4.5b)$$

Note que las ecuaciones (4.1) a (4.5) son matrices de 3 x 3 representando un modelado trifásico de la red.



Carga en potencia constante real y reactiva.

Este tipo de carga se modela con la siguiente ecuación:

$$\mathbf{I}_{n,carga} = \left(\frac{S_n}{V_n} \right)^* , \quad (4.6)$$

En (4.6), * denota conjugado.

4.2 Localización de los bancos de Capacitores.

Cuando se determina que existe un abatimiento de voltaje mayor al 10% en la red de distribución se procede a inyectar potencia reactiva con el fin de regresarlo a niveles dentro de normas.

En este trabajo de tesis la localización de los bancos capacitores se propone en el nodo intermedio con abatimiento de voltaje del ramal afectado. Para ejemplificar esto considere que en la figura 4.3, los nodos del 19 al 27 tienen problemas de bajo voltaje, entonces el banco de capacitores se incluye en el nodo 23.

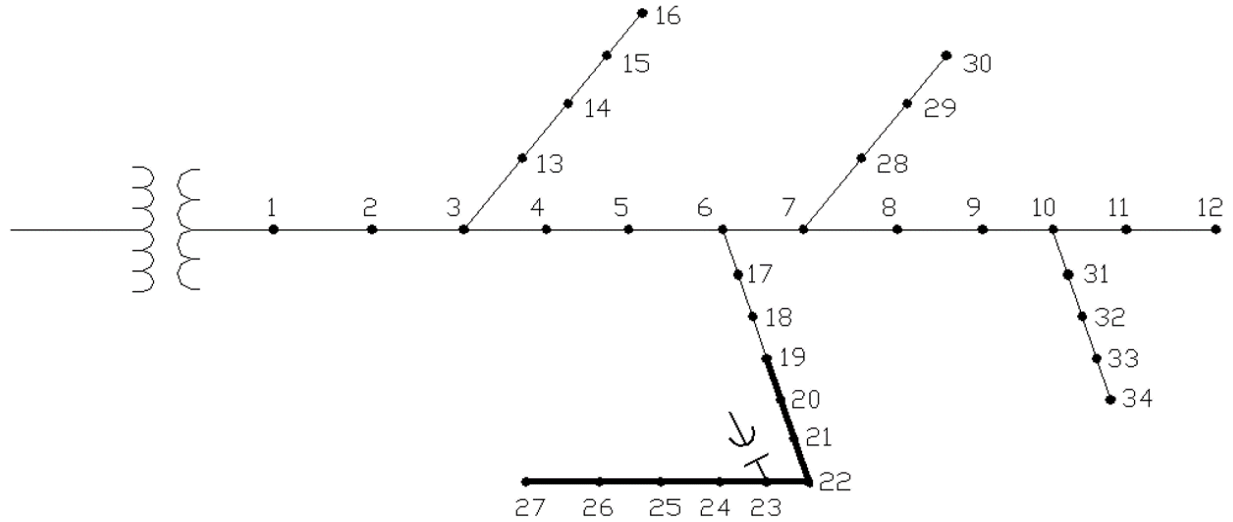


Figura 4.3 Localización de los bancos de capacitores.

Para calcular el tamaño del banco de capacitores (en Faradios) se utiliza:

$$C = \frac{Q_{c,n}}{V^2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (4.7a)$$

Para tomar en consideración a la potencia reactiva aportada por los bancos de capacitores (G_C), se considera que este tipo de generación está compuesta por la componente Q que se puede considerar constante para estudios en estado estable, su corriente se calcula con:

$$\mathbf{I}_{n,G_C} = \left(\frac{Q_{c,n}}{V_n} \right)^* \quad (4.7b)$$

De acuerdo con la convención de signos, esta corriente se resta a la corriente de carga para obtener la corriente $\mathbf{I}_{n,inj}$ total, resultando en:

$$\mathbf{I}_{n,inj} = \mathbf{I}_{n,carga} - \mathbf{I}_{n,G_C} \quad (4.8)$$



La ecuación (4.8) se incluye en la ecuación (4.3) cuando en el nodo estudiado se encuentre un banco de capacitores.

4.3 Esquema general del método de solución.

El control de voltaje en un sistema eléctrico en condiciones normales de operación requiere de una programación dinámica, es decir, adquirir los datos del sistema constantemente (un Δt determinado por el usuario), determinar los voltajes de la red para entonces realizar-recomendar acciones correctivas en caso de ser requeridas; las acciones pueden ser, por ejemplo, la entrada de bancos de capacitores, reconfiguración del sistema, cambio de TAPs en los transformadores e incluso tiro de carga.

En esta tesis se controla del nivel de voltaje mediante la inyección de potencia reactiva a través de la entrada de bancos de capacitores. El esquema de solución se describe con los siguientes puntos y se ilustra mediante el diagrama de flujo de la figura 4.4:

- 1).- Definición del tiempo de espera para realizar un nuevo estudio del sistema " Δt ".
- 2).- Recolección del estado del sistema (cargas PQ, topología del sistema), puede ser mediante sistemas adquisición de datos.
- 3).- Cálculo de voltajes del sistema mediante el método Barrido Progresivo-Regresivo.
- 4).- Si los voltajes del sistema están fuera del rango permitido, calcular potencia reactiva " $Q_{c,n}$ " necesaria a inyectar por bancos de capacitores para elevar el nivel de voltaje, ingresarlo como nuevo dato de entrada al método de Barrido Progresivo Regresivo y calcular nuevamente los voltajes para corroborar su correcto nivel, posteriormente emitir una acción-recomendación de corrección al sistema.
- 5).- Si después del paso 3) ó 4) los voltajes están dentro del rango permitido, esperar Δt y regresar al punto 2).

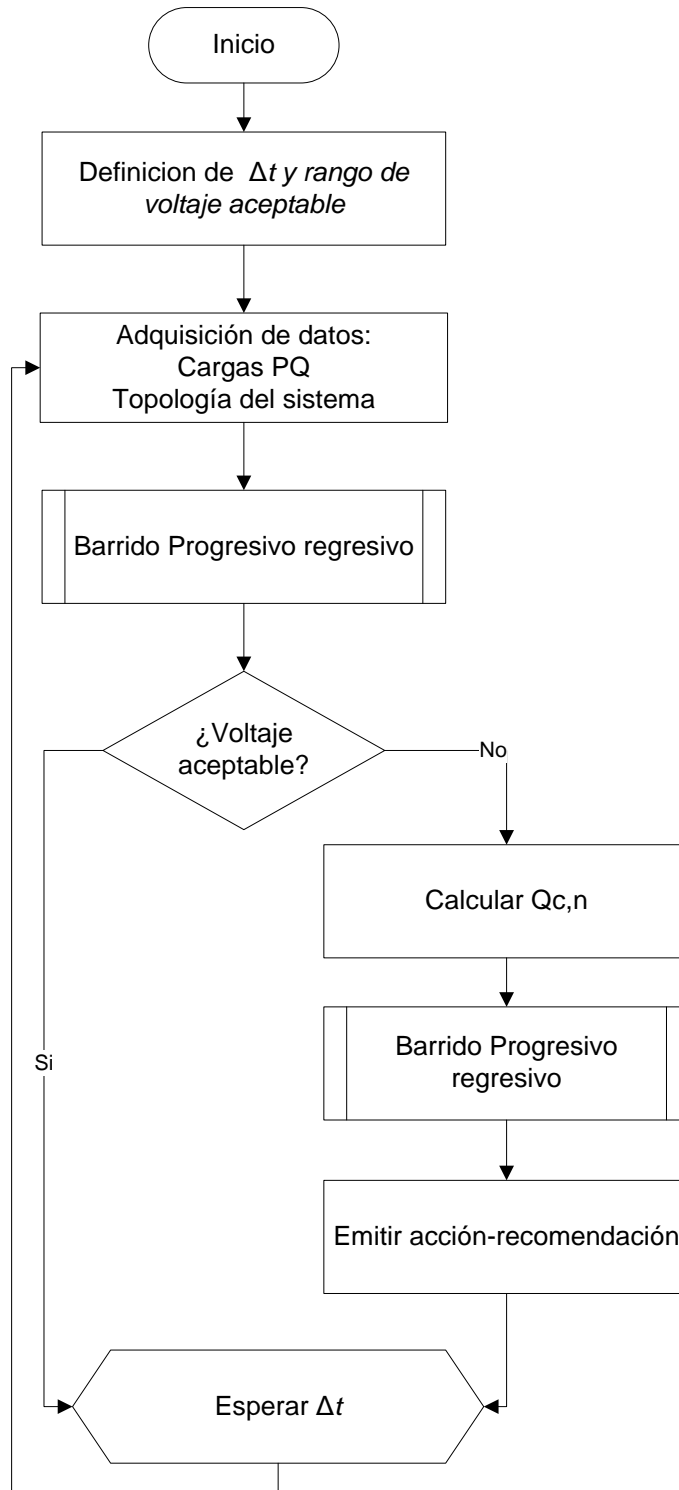


Figura 4.4 Esquema de solución del control de voltaje

4.4 Ejemplo numérico de regulación de tensión con una red de 8 nodos.

Un ejemplo numérico muestra la implantación de capacitores en redes de distribución para la regulación de la tensión a un nivel aceptable. Se considera como condición inicial una red de distribución con bajo nivel de voltaje.

La figura 4.5 muestra una red arbitraria de 8 nodos con una configuración radial, típica de las redes de distribución, la cual será objeto del estudio. El código en Matlab utilizado para este ejemplo se encuentra en los anexos A y B.

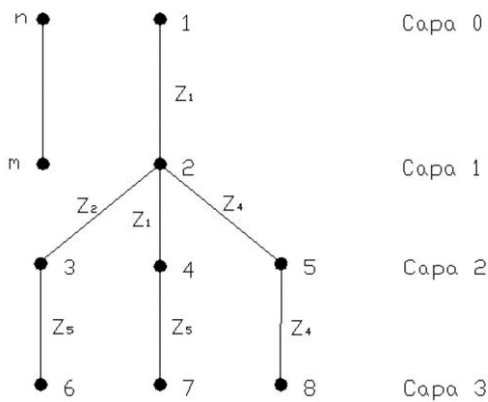


Figura 4.5 Red de distribución de 8 nodos.

Como se muestra en la figura 4.5, los nodos están numerados, las matrices de impedancia Z en las líneas que se consideraran se muestran a continuación:

$$Z1 = \begin{bmatrix} 0.1312 + 0.3856j & 0.0591 + 0.1900j & 0.0598 + 0.1605j \\ 0.0591 + 0.1900j & 0.1278 + 0.3969j & 0.0581 + 0.1458j \\ 0.0598 + 0.1605j & 0.0581 + 0.1458j & 0.1293 + 0.3920j \end{bmatrix}$$

$$Z2 = \begin{bmatrix} 0.0713 + 0.1119j & 0.0150 + 0.0401j & 0.0148 + 0.0475j \\ 0.0150 + 0.0401j & 0.0708 + 0.1135j & 0.0145 + 0.0364j \\ 0.0148 + 0.0475j & 0.0145 + 0.0634j & 0.0704 + 0.1147j \end{bmatrix}$$



$$Z4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0252 + 0.0255j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z5 = \begin{bmatrix} 0.0656 + 0.1928j & 0.0295 + 0.0950j & 0.0299 + 0.0802j \\ 0.0295 + 0.0950j & 0.0639 + 0.1984j & 0.0291 + 0.0729j \\ 0.0299 + 0.0802j & 0.0291 + 0.0729j & 0.0647 + 0.1960j \end{bmatrix}$$

Las cargas en los nodos en potencia constante $P+jQ$ se expresan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1 Cargas en nodos de la red de 8 nodos.

Nodo	"P+jQ" en kW y kVAR, respectivamente		
	Fase a	Fase b	Fase c
2	17+10j	66+38j	117+68j
3	20+10j	15+7j	30+9j
4	8624+ 4928j	8624+ 4928j	8624+ 4928j
5	0	170+125j	0
6	160+110j	120+90j	120+90j
7	1900+950j	950+475j	1900+950j
8	0	230+132j	0

Al calcular los voltajes en el sistema de la figura 4.5, bajo las condiciones de carga expuestas en la Tabla 4.1, se obtienen los voltajes expresados en la Tabla 4.2 Para una mejor visualización los voltajes mostrados en la Tabla 4.2 se grafican en la figura 4.6. En el sistema de prueba el límite de caída de voltaje para considerarse aceptable (10% de



la fuente) equivale a 6,480 V, el cual es representado por una línea continua en la figura 4.5.

Tabla 4.2 Voltajes calculados con condiciones iniciales.

Nodo	IVI fase a	IVI fase b	IVI fase c
1	7,200	7,200	7,200
2	6,842	6,968	6,784
3	6,839	6,966	6,782
4	6,502	6,774	6,382
5	0	6,965	0
6	6,836	6,965	6,779
7	6,477	6,778	6,338
8	0	6,964	0

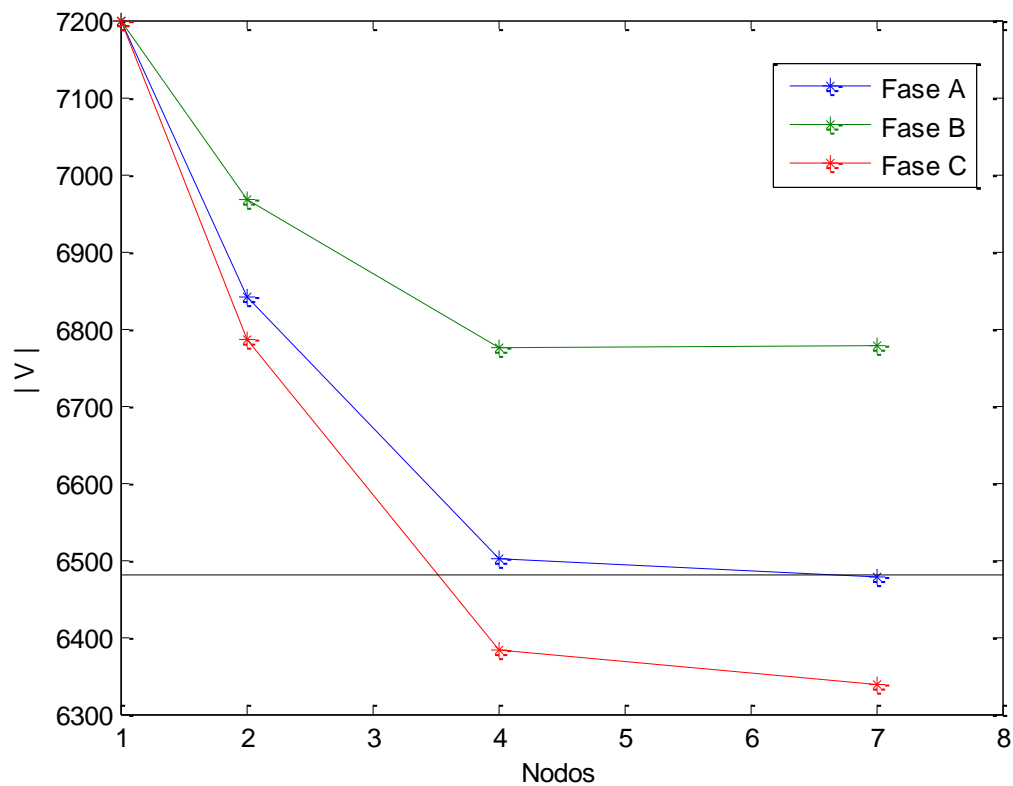


Figura 4.6 Perfiles de voltaje con condiciones iniciales.



El código en Matlab del anexo A utilizado para este ejemplo, realizó 3 iteraciones para obtener el resultado.

En la Tabla 4.2 se puede observar que la fases a y c en varios nodos presentan una caída de voltaje mayor al 10%. Por lo que se requiere elevar el nivel de tensión en dichas fases y nodos, como ya se ha comentado anteriormente la propuesta de esta tesis se basa en elevar este nivel de tensión por medio de la instalación de bancos de capacitores.

Se considera instalado un banco de capacitores en el nodo 4 y se procede a calcular nuevamente los voltajes en el sistema obteniendo resultados expresados en la Tabla 4.3.

Para una mejor visualización los voltajes mostrados en la Tabla 4.3 se grafican en la figura 4.7.

Tabla 4.3 Voltajes calculados con banco de capacitores instalado.

Nodo	IVI fase a	IVI fase b	IVI fase c
1	7.2000	7.2000	7.2000
2	6.9009	7.0913	6.9245
3	6.8982	7.0896	6.9226
4	6.6234	7.0232	6.6635
5	0	7.0890	0
6	6.8951	7.0885	6.9201
7	6.6301	7.0846	6.6835
8	0	7.0877	0

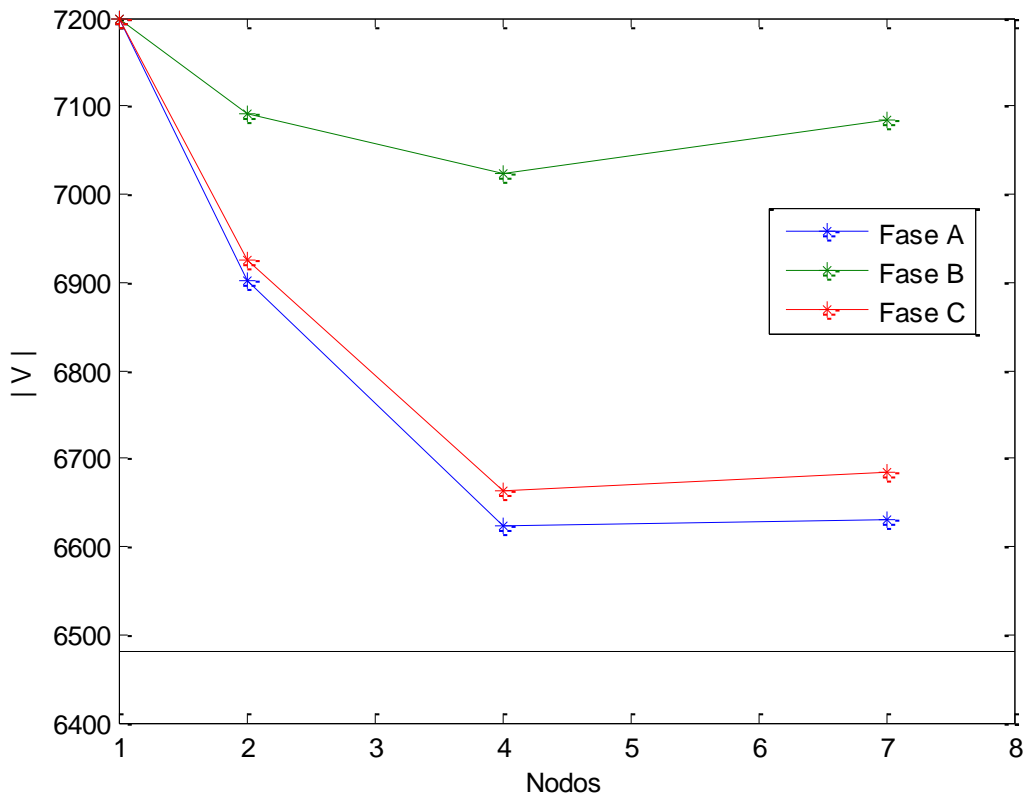


Figura 4.7 Perfiles de voltaje con condición final red de 8 nodos.

El código en Matlab del anexo B utilizado para este ejemplo, realizó 9 iteraciones para obtener el resultado.

De la Tabla 4.3 y la figura 4.7, observamos que las caídas de tensión en los nodos del sistema son menores al 10%, con lo cual se consideran aceptables [1].

4.5 Ejemplo numérico de regulación de tensión con una red de 34 nodos.

Otro ejemplo numérico con mayor nivel de complejidad muestra nuevamente la implantación de capacitores en redes de distribución para la regulación de la tensión. Se considera como condición inicial una red de distribución con bajo nivel de voltaje.

La figura 4.8 es una red radial de distribución de 34 nodos, el cual será el siguiente caso de estudio. El código en Matlab utilizado para este ejemplo se encuentra en los anexos C y D.

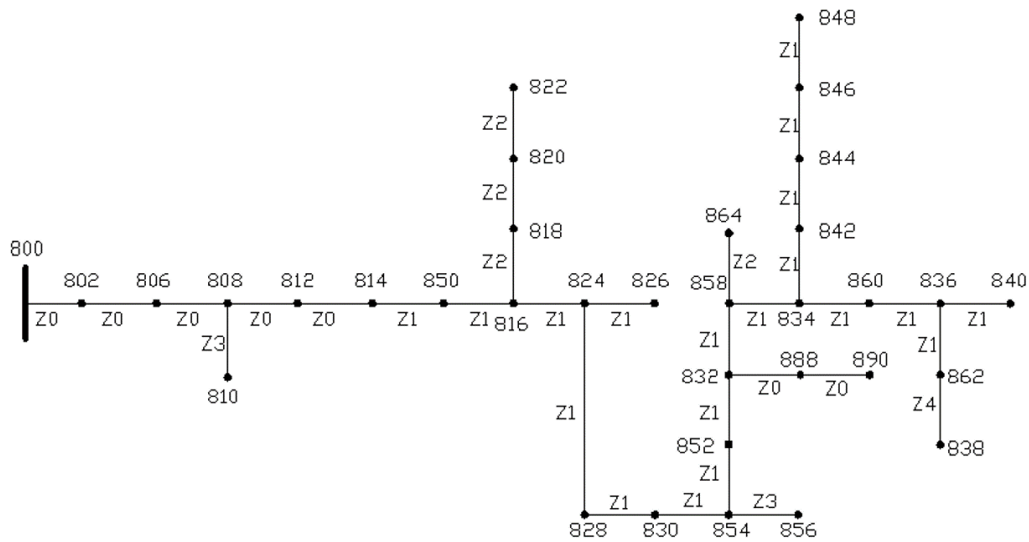


Figura 4.8 Red radial de distribución de 34 nodos.

Como se ha mencionado según el método, primero se enumeran las capas, como se muestra en la figura 4.9 para la red de la figura 4.8 resultan 19 capas.

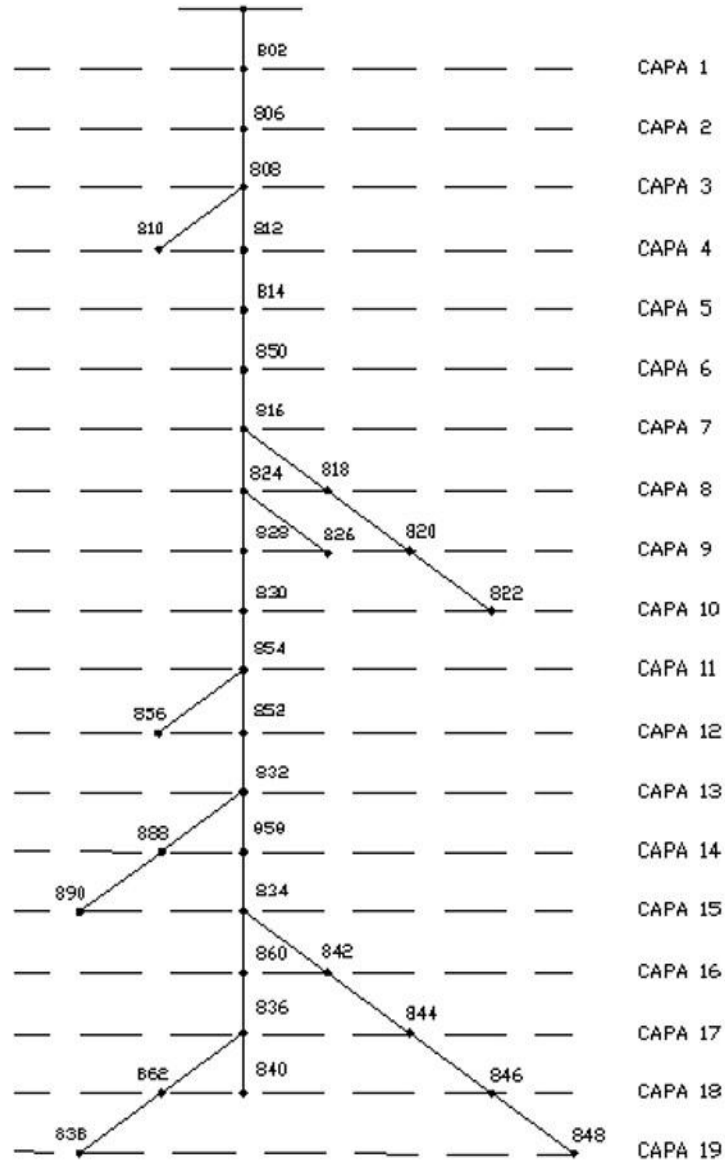


Figura 4.9 Red de 34 nodos y 19 capas.

En la red 34 nodos presentada en la figura 4.9 se consideran dos tipos de estructura:

- ID-500 Estructura tipo “T” sencilla de tres fases, figura 4.10
- ID-510 Estructura tipo “P” punta poste, de una sola fase, figura 4.11

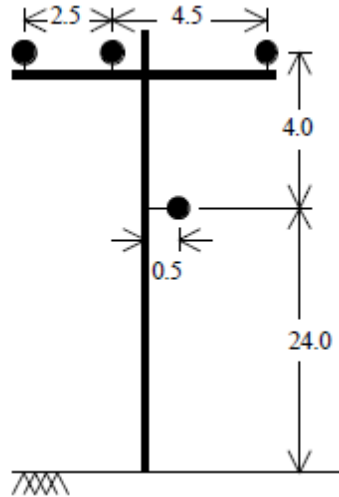


Figura 4.10 Estructura ID-500, tipo “T” sencilla de tres fases.

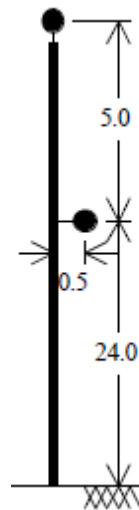


Figura 4.5 Estructura ID-510, tipo “P” punta poste, de una sola fase.

Las características de los conductores de la red y su disposición física se encuentran en la tabla 4.4, en la cual también se indica la distancia entre nodos, las matrices de admitancia y de impedancia. Un ejemplo numérico del cálculo de las matrices de impedancia y admitancia se detalla en el anexo E.



Tabla 4.4 Características de la red de 34 nodos.

Nodo		Longitud (ft)	Conductor ACSR		Fases	Matriz		Tipo de estructura
A	B		Fase	Neutro		Impedancia	Admitancia	
800	802	2580	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
802	806	1730	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
806	808	32230	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
808	810	5804	#4 6/1	#4 6/1	B N	Z3	Y3	510
808	812	37500	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
812	814	29730	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
814	850	10	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
816	818	1710	#4 6/1	#4 6/1	A N	Z2	Y2	510
816	824	10210	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
818	820	48150	#4 6/1	#4 6/1	A N	Z2	Y2	510
820	822	13740	#4 6/1	#4 6/1	A N	Z2	Y2	510
824	826	3030	#4 6/1	#4 6/1	B N	Z3	Y3	510
824	828	840	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
828	830	20440	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
830	854	520	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
832	858	4900	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
832	888	1	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500
834	860	2020	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
834	842	280	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
836	840	860	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
836	862	280	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
842	844	1350	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
844	846	3640	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
846	848	530	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
850	816	310	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
852	832	10	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500



854	856	23330	#4 6/1	#4 6/1	B N	Z3	Y3	510
854	852	36830	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
858	864	1620	#4 6/1	#4 6/1	A N	Z2	Y2	510
858	834	5830	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
860	836	2680	#2 6/1	#2 6/1	A B C N	Z1	Y1	500
862	838	4860	#2 6/1	#2 6/1	B N	Z4	Y4	510
888	890	10560	1/0	1/0	A B C N	Z0	Y0	500

Las impedancias Z de la imagen 4.8 son las siguientes:

$$Z_0 = \begin{bmatrix} 1.3368 + 1.3343j & 0.2101 + 0.5779j & 0.2130 + 0.5015j \\ 0.2101 + 0.5779j & 1.3238 + 1.3569j & 0.2066 + 0.4591j \\ 0.2130 + 0.5015j & 0.2066 + 0.4591j & 1.3294 + 1.3471j \end{bmatrix}$$

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 1.9300 + 1.4115j & 0.2327 + 0.6442j & 0.2359 + 0.5691j \\ 0.2327 + 0.6442j & 1.9157 + 1.4281j & 0.2288 + 0.5238j \\ 0.2359 + 0.5691j & 0.2288 + 0.5238j & 1.9219 + 1.4209j \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 2.7995 + 1.4855j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7995 + 1.4855j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9217 + 1.4212j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Las cargas expresadas en potencia compleja constante son los de la tabla 4.5

Tabla 4.5 Cargas de la red de 34 nodos.

Nodo	"P+jQ" en kW y KVAR, respectivamente		
	Fase a	Fase b	Fase c
802	0	0	0
806	0	15.45+7.725j	12.875+7.21j
808	0	0	0
810	0	8.24+4.12j	0
812	0	0	0
814	0	0	0
850	0	0	0
816	0	0	0
818	0	0	0
820	17.51+8.755j	0	0
822	69.52+36.05j	0	0
824	0	2.575+1.03j	0
826	0	20.6+10.3j	0
828	0	0	2.06+1.03j
830	8.755+4.12j	5.15+2.575j	12.875+5.15j
854	0	0	0
856	0	2.06+1.03j	0
852	0	0	0
832	0	0	0
888	0	0	0



890	77.25+38.625j	77.25+38.625j	77.25+38.625j
858	3.605+1.545j	1.03+0.515j	3.09+1.545j
864	1.03+0.515j	0	0
834	2.06+1.03j	7.725+4.12j	6.695+3.605j
842	0	0	0
844	74.16+56.65j	69.525+54.075j	69.525+54.075j
846	0	12.875+6.180j	10.300+5.665j
848	10.300+8.240j	22.145+13.905j	10.300+8.240j
860	18.54+12.36j	20.60+13.39j	66.950+36.565j
840	13.905+8.240j	15.965+9.270j	4.635+3.605j
836	15.45+7.72j	5.150+3.090j	21.630+11.330j
862	0	0	0
838	0	14.42+7.21j	0

Al calcular los voltajes en el sistema de la figura 4.8, bajo las condiciones de carga expuestas en la Tabla 4.5, se obtienen los voltajes expresados en la Tabla 4.6. Para una mejor visualización los voltajes mostrados en la Tabla 4.6 se grafican en la figura 4.12.

El código en Matlab del anexo C utilizado para este ejemplo, realizó 4 iteraciones para obtener el resultado.

En el sistema de prueba el límite de caída de voltaje para considerarse aceptable (10% de la fuente) equivale a 12,960 V, el cual es representado por una línea continua en la figura 4.12.



Tabla 4.6 Voltaje calculado de la red de 34 nodos.

Nodo	V fase a	V fase b	V fase c
800	14376 \angle 0°	14376 \angle -120.0000°	14376 \angle 120.0000°
802	14358 \angle -0.0144°	14361 \angle -120.0178°	14359 \angle 119.9873°
806	14347 \angle -0.0240°	14351 \angle -120.0297°	14347 \angle 119.9787°
808	14124 \angle -0.2107°	14176 \angle -120.2406°	14135 \angle 119.8436°
810	0	14174 \angle -120.2412°	0
812	13863 \angle -0.4263°	13977 \angle -120.4589°	13882 \angle 119.7010°
814	13652 \angle -0.5881°	13818 \angle -120.6216°	13680 \angle 119.5975°
850	13652 \angle -0.5881°	13818 \angle -120.6216°	13680 \angle 119.5975°
816	13649 \angle -0.5883°	13815 \angle -120.6218°	13677 \angle 119.5981°
818	13642 \angle -0.5912°	0	0
820	13437 \angle -0.6459°	0	0
822	13389 \angle -0.6501°	0	0
824	13582 \angle -0.5589°	13728 \angle -120.6195°	13584 \angle 119.5849°
826	0	13725 \angle -120.6199°	0
828	13576 \angle -0.5572°	13722 \angle -120.6186°	13576 \angle 119.5841°
830	13441 \angle -0.5101°	13564 \angle -120.5939°	13388 \angle 119.5704°
854	13438 \angle -0.5087°	13560 \angle -120.5932°	13383 \angle 119.5702°
856	0	13558 \angle -120.6001°	0
852	13201 \angle -0.3918°	13278 \angle -120.5154°	13056 \angle 119.5706°
832	13201 \angle -0.3917	13278 \angle -120.5153°	13056 \angle 119.5706°
888	13201 \angle -0.3917°	13278 \angle -120.5153°	13056 \angle 119.5706°
890	13183 \angle -0.4031°	13261 \angle -120.5325°	13037 \angle 119.5549°
858	13181 \angle -0.3740°	13251 \angle -120.5004°	13024 \angle 119.5738°
864	13181 \angle -0.3741°	0	0
834	13157 \angle -0.3512°	13219 \angle -120.4822°	12986 \angle 119.5778°
842	13157 \angle -0.3502°	13218 \angle -120.4818°	12985 \angle 119.5783°
844	13153 \angle -0.3454°	13213 \angle -120.4798°	12981 \angle 119.5810°
846	13152 \angle -0.3407°	13209 \angle -120.4803°	12979 \angle 119.5800°
848	13151 \angle -0.3402°	13208 \angle -120.4804°	12979 \angle 119.5801°

860	13155 \angle -0.3506°	13215 \angle -120.4787°	12980 \angle 119.5757°
836	13153 \angle -0.3492°	13213 \angle -120.4795°	12977 \angle 119.5761°
840	13152 \angle -0.3489°	13212 \angle -120.4798°	12977 \angle 119.5765°
862	13153 \angle -0.3491°	13212 \angle -120.4797°	12977 \angle 119.5761°
838	0	13210 \angle -120.4819°	0

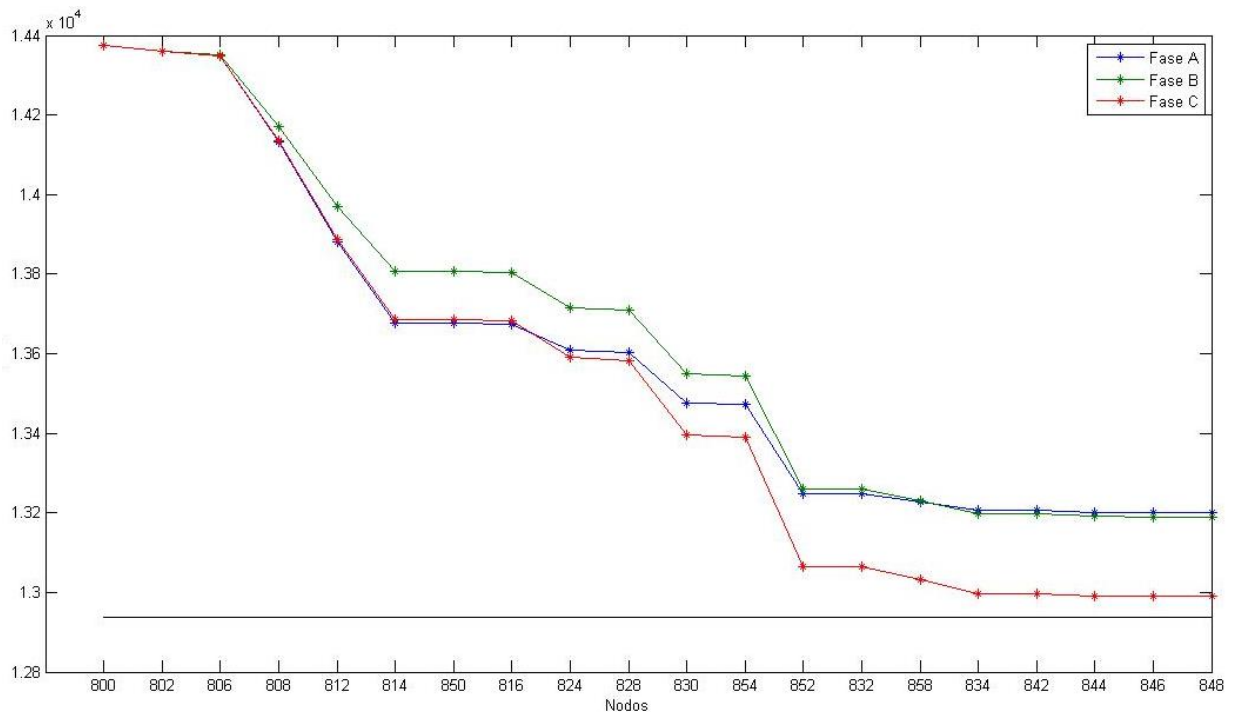


Figura 4.6 Perfiles de voltaje condición inicial red de 34 nodos.

Una práctica usual en los centros de control es no dejar caer el nivel de tensión hasta que rebase el nivel permitido con el objetivo de brindar un mejor servicio al usuario. En la Tabla 4.6 se puede observar que la fase c en varios nodos (852 al 848) se presenta una caída de voltaje cerca del 10%, por lo que se procede a elevar el nivel de tensión.

Para este caso se considera instalar un banco de capacitores en el nodo 834, se procede a calcular nuevamente los voltajes en el sistema obteniendo resultados expresados en la Tabla 4.7.

Para una mejor visualización los voltajes mostrados en la Tabla 4.7 se grafican en la figura 4.13.



Tabla 4.7 Voltaje calculado de la red de 34 nodos con capacitor instalado.

Nodo	IVI fase a	IVI fase b	IVI fase c
800	14376 \angle 0°	14376 \angle -120°	14376 \angle 120°
802	14363 \angle -0.0353°	14365 \angle -120.0365°	14363 \angle 119.9654°
806	14355 \angle -0.059°	14358 \angle -120.061°	14354 \angle 119.9423°
808	14192 \angle -0.5094°	14233 \angle -120.5075°	14198 \angle 119.5317°
810	0	14230 \angle -120.5082°	0
812	14001 \angle -1.0376°	14093 \angle -121.0034°	14012 \angle 119.0621°
814	13847 \angle -1.4517°	13981 \angle -121.3888°	13862 \angle 118.6939°
850	13847 \angle -1.4519°	13981 \angle -121.3889°	13862 \angle 118.6938°
816	13845 \angle -1.4561°	13979 \angle -121.3929°	13859 \angle 118.6902°
818	13838 \angle -1.4591°	0	0
820	13635 \angle -1.5135°	0	0
822	13588 \angle -1.5177°	0	0
824	13798 \angle -1.563°	13909 \angle -121.5143°	13786 \angle 118.5385°
826	0	13906 \angle -121.5147°	0
828	13794 \angle -1.5726°	13904 \angle -121.5237°	13780 \angle 118.5262°
830	13701 \angle -1.8009°	13780 \angle -121.7507°	13630 \angle 118.2302°
854	13699 \angle -1.8066°	13777 \angle -121.7565°	13626 \angle 118.2228°
856	0	13776 \angle -121.7634°	0
852	13537 \angle -2.1966°	13557 \angle -122.1443°	13368 \angle 117.6985°
832	13537 \angle -2.1967°	13557 \angle -122.1444°	13368 \angle 117.6983°
888	13537 \angle -2.1967°	13557 \angle -122.1444°	13368 \angle 117.6983°
890	13519 \angle -2.2075°	13541 \angle -122.161°	13350 \angle 117.6834°
858	13526 \angle -2.2474°	13538 \angle -122.1925°	13345 \angle 117.6303°
864	13526 \angle -2.2474°	0	0
834	13515 \angle -2.3061°	13516 \angle -122.2496°	13319 \angle 117.5491°
842	13514 \angle -2.3052°	13515 \angle -122.2492°	13318 \angle 117.5497°
844	13510 \angle -2.3006°	13510 \angle -122.2474°	13314 \angle 117.5522°
846	13509 \angle -2.2961°	13506 \angle -122.2479°	13312 \angle 117.5513°
848	13509 \angle -2.2957°	13506 \angle -122.2479°	13312 \angle 117.5514°



860	13513 \angle -2.3038°	13512 \angle -122.2464°	13313 \angle 117.5466°
836	13511 \angle -2.3002°	13509 \angle -122.2475°	13311 \angle 117.5461°
840	13511 \angle -2.2999°	13509 \angle -122.2478°	13311 \angle 117.5465°
862	13511 \angle -2.3000°	13509 \angle -122.2476°	13311 \angle 117.5461°
838	0	13506 \angle -122.2497°	0

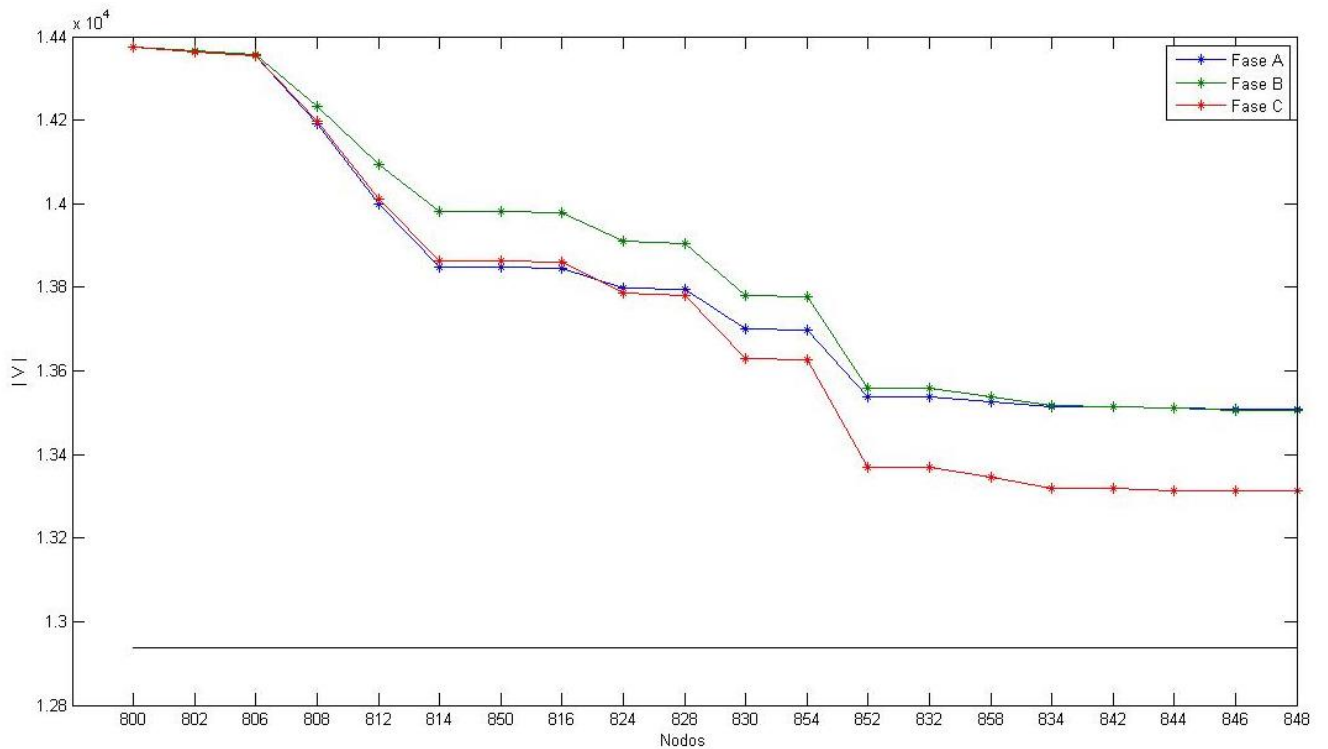


Figura 4.7 Perfiles de voltaje condición final red de 34 nodos.

El código en Matlab del anexo D utilizado para este ejemplo, realizó 4 iteraciones para obtener el resultado.

Para hacer notables las diferencias entre el caso inicial y final de la red de 34 nodos con un capacitor instalado en el nodo 834, se muestran los voltajes respectivos en la figura 4.14.

	VOLTAJE INICIAL (VD) FASE A	VOLTAJE FINAL (VD) FASE A	VOLTAJE INICIAL (VD) FASE B	VOLTAJE FINAL (VD) FASE B	VOLTAJE INICIAL (VD) FASE C	VOLTAJE FINAL (VD) FASE C
	14376	14376	14376	14376	14376	14376
802	14358	14363	14361	14365	14359	14363
806	14347	14355	14351	14358	14347	14354
808	14124	14192	14176	14233	14135	14198
812	13863	14001	13977	14093	13882	14012
814	13652	13847	13818	13981	13680	13862
850	13652	13847	13818	13981	13680	13862
816	13649	13845	13815	13979	13677	13859
824	13582	13798	13728	13909	13584	13786
828	13576	13794	13722	13904	13576	13780
830	13441	13701	13564	13780	13388	13630
854	13438	13699	13560	13777	13383	13626
852	13201	13537	13278	13557	13056	13368
832	13201	13537	13278	13557	13056	13368
858	13181	13526	13251	13538	13024	13345
CAPACITOR → 834	13157	13515	13219	13516	12986	13319
860	13155	13513	13215	13512	13980	13313
836	13153	13511	13213	13509	12977	13311
840	13152	13511	13212	13509	12977	13311

Figura 4.8 Comparación del voltaje antes y después de aplicar el capacitor.

Como se puede ver en la figura 4.14, los voltajes mejoran prácticamente en todos los nodos y esto se nota más en los nodos próximos al 834 que es donde se instaló el capacitor. Ahora en las figuras 4.15, 4.16 y 4.17 se puede ver gráficamente como mejora el voltaje por fase.

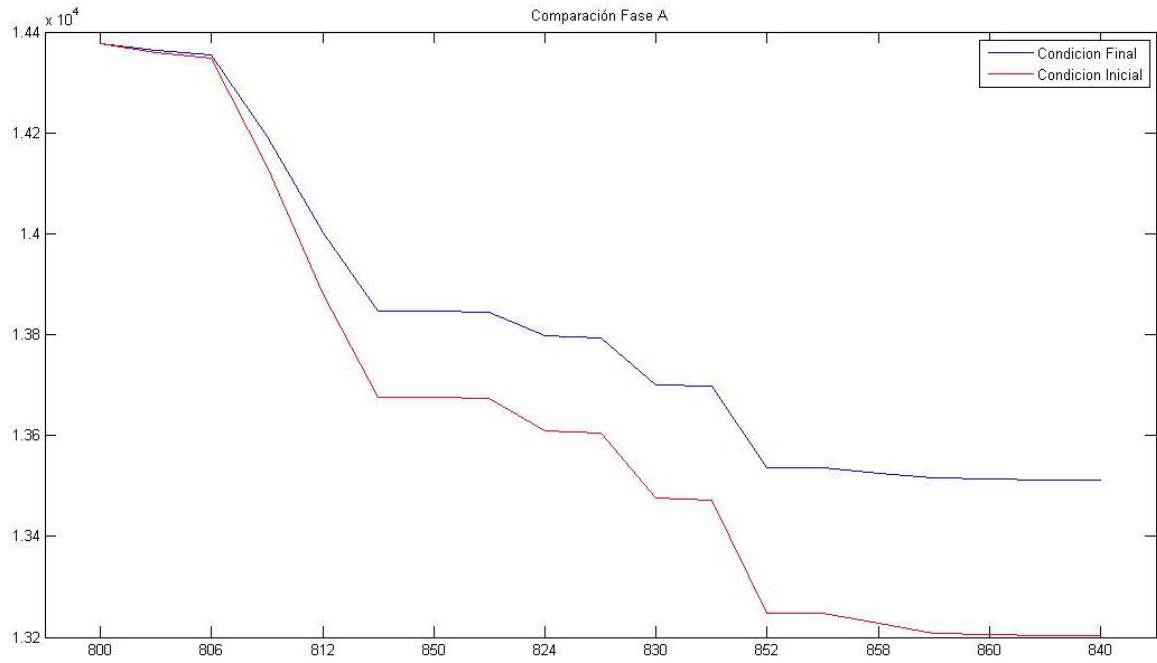


Figura 4.9 Comparación del voltaje en la fase A.

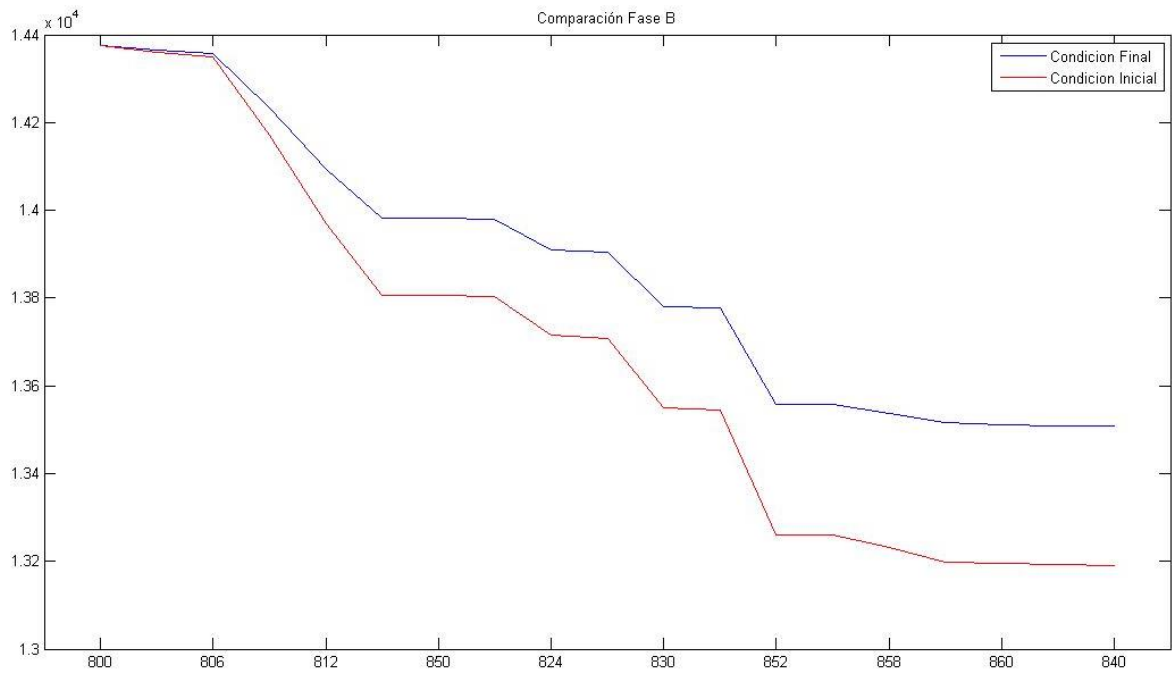


Figura 4.10 Comparación del voltaje en la fase B.

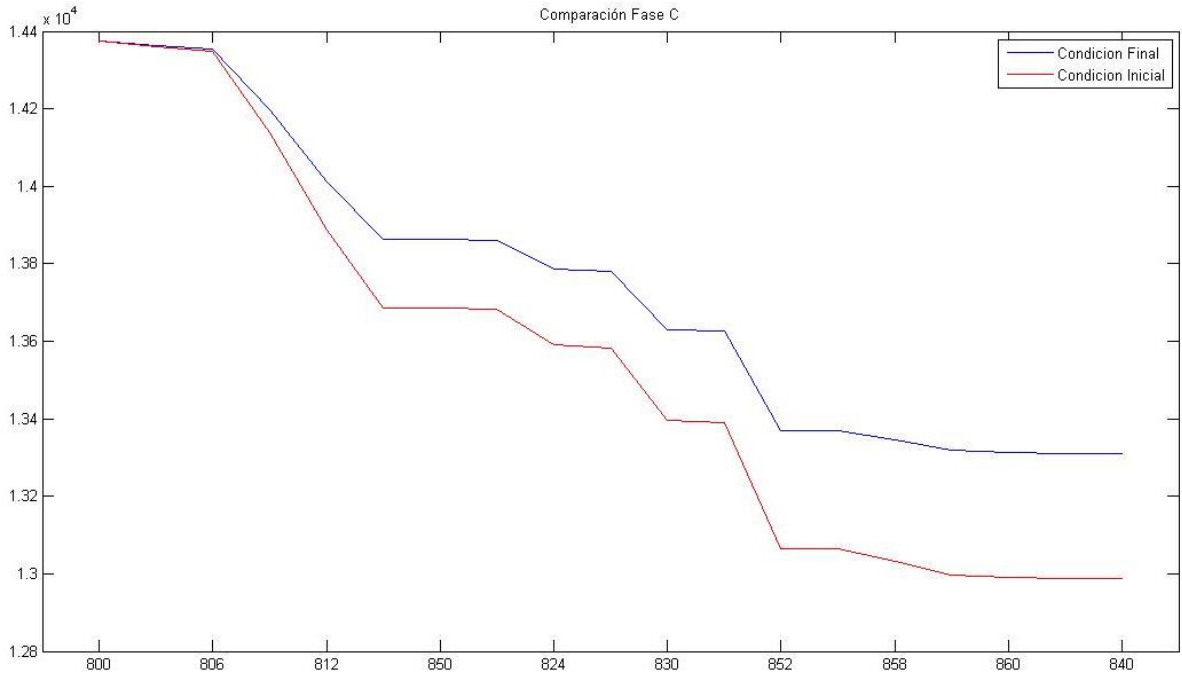


Figura 4.11 Comparación del voltaje en la fase C.

4.6 Comparación de resultados con el programa RDAP.

Mediante el uso del método de barrido progresivo-regresivo se ha propuesto la instalación de capacitores en los ejemplos de las redes de 8 nodos y de 34, logrando satisfactoriamente la mejora del perfil del voltaje. Se procede a realizar la comparación de los resultados con el programa RDAP en la tabla 4.8, en donde se puede ver que la diferencia en los resultados no excede a 2 volts.

Tabla 4.8 Comparación de resultados en RDAP.

Nodo	V fase a		V fase b		V fase c	
	MATLAB	RDAP	MATLAB	RDAP	MATLAB	RDAP
800	14376L 0°	14376L 0°	14376L -120°	14376L -120.00°	14376L 120°	14376L 120.00°
802	14363L -0.0353°	14363L -0.04°	14365L -120.0365°	14365L -120.04	14363L 119.9654°	14363L 119.97
806	14355L -0.059°	14354L -0.06°	14358L -120.061°	14357L -120.06	14354L 119.9423°	14354L 119.94



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

808	14192L -0.5094°	14191L -0.51°	14233L -120.5075°	14232L -120.51	14198L 119.5317°	14197L 119.53
810	0	0	14230L -120.5082°	14230L -120.51	0	0
812	14001L -1.0376°	14001L -1.04°	14093L -121.0034°	14092L -121.00°	14012L 119.0621°	14011L 119.06°
814	13847L -1.4517°	13847L -1.45°	13981L -121.3888°	13980L -121.38°	13862L 118.6939°	13861L 118.7°
850	13847L -1.4519°	13847L -1.45°	13981L -121.3889°	13980L -121.38°	13862L 118.6938°	13861L 118.7°
816	13845L -1.4561°	13845L -1.46°	13979L -121.3929°	13978L -121.39°	13859L 118.6902°	13858L 118.69°
818	13838L -1.4591°	13837L -1.46°	0	0	0	0
820	13635L -1.5135°	13635L -1.51°	0	0	0	0
822	13588L -1.5177°	13588L -1.52°	0	0	0	0
824	13798L -1.563°	13798L -1.56°	13909L -121.5143°	13908L -121.51°	13786L 118.5385°	13785L 118.54°
826	0	0	13906L -121.5147°	13905L -121.51°	0	0
828	13794L -1.5726°	13794L -1.57°	13904L -121.5237°	13903L -121.52°	13780L 118.5262°	13779L 118.53°
830	13701L -1.8009°	13701L -1.8°	13780L -121.7507°	13799L -121.74°	13630L 118.2302°	13628L 118.23°
854	13699L -1.8066°	13698L -1.81°	13777L -121.7565°	13776L -121.75°	13626L 118.2228°	13624L 118.22°
856	0	0	13776L -121.7634°	13774L -121.76°	0	0
852	13537L -2.1966°	13537L -2.19°	13557L -122.1443°	13556L -122.14°	13368L 117.6985°	13367L 117.7°
832	13537L -2.1967°	13537L -2.19°	13557L -122.1444°	13556L -122.14°	13368L 117.6983°	13367L 117.7°
888	13537L -2.1967°	13526L -2.25°	13557L -122.1444°	13537L -122.18°	13368L 117.6983°	13344L 117.63°
890	13519L -2.2075°	13519L -2.21°	13541L -122.161°	13539L -122.15°	13350L 117.6834°	13348L 117.69°
858	13526L -2.2474°	13526L -2.25°	13538L -122.1925°	13537L -122.18°	13345L 117.6303°	13344L 117.63°
864	13526L -2.2474°	13526L -2.25°	0	0	0	0
834	13515L -2.3061°	13515L -2.3°	13516L -122.2496°	13514L -122.24°	13319L 117.5491°	13317L 117.55°
842	13514L -2.3052°	13514L -2.3°	13515L -122.2492°	13513L -122.24°	13318L 117.5497°	13316L 117.55°
844	13510L -2.3006°	13510L -2.3°	13510L -122.2474°	13509L -122.24°	13314L 117.5522°	13312L 117.56°
846	13509L -2.2961°	13509L -2.29°	13506L -122.2479°	13504L -122.24°	13312L 117.5513°	13310L 117.55°
848	13509L -2.2957°	13509L -2.29°	13506L -122.2479°	13504L -122.24°	13312L 117.5514°	13310L 117.55°
860	13513L -2.3038°	13513L -2.3°	13512L -122.2464°	13510L -122.24°	13313L 117.5466°	13311L 117.55°
836	13511L -2.3002°	13511L -2.3°	13509L -122.2475°	13507L -122.24°	13311L 117.5461°	13309L 117.55°
840	13511L -2.2999°	13511L -2.3°	13509L -122.2478°	13507L -122.24°	13311L 117.5465°	13309L 117.55°
862	13511L -2.3000°	13511L -2.3°	13509L -122.2476°	13507L -122.24°	13311L 117.5461°	13309L 117.55°
838	0	0	13506L -122.2497°	13505L -122.24°	0	0



CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis una metodología para incluir bancos de capacitores con el fin de evitar el abatimiento de voltaje en redes de distribución es presentada.

La aplicación del método del barrido progresivo-regresivo fue exitosa, ya que aparte de ser un método sencillo relativamente se obtienen resultados satisfactorios, con el cual con pocas iteraciones se logra la convergencia del resultado, en ambo ejemplos solo 4 iteraciones.

El uso del programa MATLAB mostró ser un acierto y una ventaja para realizar los códigos de las ecuaciones respectivas para el barrido progresivo-regresivo, además que el mismo programa permite graficar los resultados.

Se consideraron redes de distribución de 8 y 34 nodos, con la instalación de bancos de capacitores la caída de voltaje que presentaba fue corregida de manera satisfactoria demostrando ser viable.

Los resultados computacionales de los ejemplos mostrados en esta tesis han sido comparados con el programa RDAP, los cuales mostraron ser similares con una diferencia máxima de 2 amperes entre los resultados de los nodos.

TRABAJO FUTURO

- Se aconseja combinar la técnica de inclusión de bancos de capacitores con otras técnicas para la solución del abatimiento de voltaje como lo es la reconfiguración de redes con la finalidad de alcanzar de una manera más eficiente el nivel de tensión. Por el momento esto queda fuera del alcance de esta tesis.
- Así como también, se considera hacer mejoras al código realizado en MATLAB de tal forma que el código sea multinodal, ya que hasta este punto se generó un código específico para cada red,



REFERENCIAS

- [1]. Diario Oficial de la Federación, “Reglamento de la Ley de Servicio Público de Energía Eléctrica”, México. Diciembre 2011.
- [2]. CFE GOD-3542 “Criterios fundamentales de confiabilidad y seguridad en la operación del sistema eléctrico de distribución”
- [3]. GOD 3532. “Procedimiento de Pruebas a Esquemas de Protección.”CFE, México, 2007.
- [4]. NMX-J-040-ANCE-2014 “Sistemas eléctricos - tensiones eléctricas normalizadas”
- [5]. Guía CFE L0000-02 "Tensiones de sistemas de distribución, subtransmisión y
- [6]. Guía CFE L0000-70 "calidad de la energía: características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica"
- [7]. CFE GOM 1550, “Procedimiento para atender condiciones de emergencia.”
- [8]. Guía CFE 00200-02 "Diagramas unifilares de arreglos para subestaciones"
- [9]. Carson, John R., Wave propagation in overhead wires with ground return, *Bell System Technical Journal*, Vol. 5, New York, 1926.
- [10]. W. H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis vol. 2nd ed., 2006.
- [11]. Kron, G., Tensorial analysis of integrated transmission systems, Part I, the six basic reference frames, *AIEE Trans.*, Vol. 71, 1952.
- [12]. C.S. Cheng and D. Shirmohammadi, “A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 10, no. 2, May 1995.
- [13]. D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G.X. Luo, “A compensation-based power flow method for weakly Meshed distribution and transmission networks”, *IEEE Trans. Power syst.*, vol. 3, no. 2, May 1988.



ANEXOS

A. CÓDIGO CONDICIÓN INICIAL 8 NODOS

Código de programación de la condición inicial en MATLAB

VALORES INICIALES

```
I_nodo2=[0;0;0];  
  
I_nodo3=I_nodo2;  
I_nodo4=I_nodo2;  
I_nodo5=I_nodo2;  
I_nodo6=I_nodo2;  
I_nodo7=I_nodo2;  
I_nodo8=I_nodo2;
```

DATOS

```
S2=[17+10j;    66+38j;    117+68j];  
S3=[20+10j;    15+7j;    30+9j];  
S4=[385+220j;  385+220j;  385+220j]*22.4;  
S5=[0;         170+125j;  0];  
S6=[160+110j;  120+90j;   120+90j];  
S7=[100+50j;   50+25j;   100+50j]*19;  
S8=[ 0;        230+132j;  0];  
  
Z1=[0.1312+0.3856j  0.0591+0.1900j  0.0598+0.1605j;  
    0.0591+0.1900j  0.1278+0.3969j  0.0581+0.1458j;  
    0.0598+0.1605j  0.0581+0.1458j  0.1293+0.3920j];  
  
Z2=[0.0713+0.1119j  0.0150+0.0401j  0.0148+0.0475j;  
    0.0150+0.0401j  0.0708+0.1135j  0.0145+0.0364j;  
    0.0148+0.0475j  0.0145+0.0634j  0.0704+0.1147j];  
  
Z4=[0 0 0;  
    0 0.0252+0.0255j 0;  
    0 0 0];  
  
Z5=[0.0656+0.1928j  0.0295+0.0950j  0.0299+0.0802j;  
    0.0295+0.0950j  0.0639+0.1984j  0.0291+0.0729j;  
    0.0299+0.0802j  0.0291+0.0729j  0.0647+0.1960j];  
  
V1=[7200*(cos(0)+sin(0)*1i);  
    7200*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180))*1i);  
    7200*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180))*1i)];
```



```
A=[1 0 0;  
    0 1 0;  
    0 0 1];
```

```
A_Z4=[0 0 0;  
       0 1 0;  
       0 0 0];
```

```
C=zeros(3,3);
```

```
d_Z4=A_Z4;
```

```
d=A;
```

```
a=A;
```

```
b1=Z1;
```

MAIN

```
clc
```

```
clear all
```

```
datos_8n
```

```
valores_iniciales
```

```
iter_max=100;
```

```
tol=0.000001;
```

```
Error=1;
```

```
iter=0;
```

```
while Error>tol && iter_max>iter
```

```
    % Barrido Progresivo
```

```
    V2=A*V1-Z1*I_nodo2;
```

```
    V3=A*V2-Z2*I_nodo3;
```

```
    V4=A*V2-Z1*I_nodo4;
```

```
    V5=A_Z4*V2-Z4*I_nodo5;
```

```
    V6=A*V3-Z5*I_nodo6;
```

```
    V7=A*V4-Z5*I_nodo7;
```

```
    V8=A_Z4*V5-Z4*I_nodo8;
```

```
    %Barrido Regresivo
```

```
    % capa 3
```

```
    I_carga8=zeros(3,1);
```

```
    I_carga8(2,1)=conj((S8(2,1)*1000)/V8(2,1));
```

```
    I_nodo8=I_carga8;
```

```
    I_carga7=zeros(3,1);
```



```
I_carga7(1,1)=conj((S7(1,1)*1000)/V7(1,1));
I_carga7(2,1)=conj((S7(2,1)*1000)/V7(2,1));
I_carga7(3,1)=conj((S7(3,1)*1000)/V7(3,1));
I_nodo7=I_carga7;

I_carga6=zeros(3,1);
I_carga6(1,1)=conj((S6(1,1)*1000)/V6(1,1));
I_carga6(2,1)=conj((S6(2,1)*1000)/V6(2,1));
I_carga6(3,1)=conj((S6(3,1)*1000)/V6(3,1));
I_nodo6=I_carga6;

% capa 2
I_rama5=C*V8+d_Z4*I_nodo8;
I_carga5=zeros(3,1);
I_carga5(2,1)=conj((S5(2,1)*1000)/V5(2,1));
I_nodo5=I_carga5+I_rama5;

I_rama4=C*V7+d*I_nodo7;
I_carga4=zeros(3,1);
I_carga4(1,1)=conj((S4(1,1)*1000)/V4(1,1));
I_carga4(2,1)=conj((S4(2,1)*1000)/V4(2,1));
I_carga4(3,1)=conj((S4(3,1)*1000)/V4(3,1));
I_nodo4=I_carga4+I_rama4;

I_rama3=C*V6+d*I_nodo6;
I_carga3=zeros(3,1);
I_carga3(1,1)=conj((S3(1,1)*1000)/V3(1,1));
I_carga3(2,1)=conj((S3(2,1)*1000)/V3(2,1));
I_carga3(3,1)=conj((S3(3,1)*1000)/V3(3,1));
I_nodo3=I_carga3+I_rama3;

% capa 1
I_rama52=C*V5+d*I_nodo5;
I_rama42=C*V4+d*I_nodo4;
I_rama32=C*V3+d*I_nodo3;
I_carga2=zeros(3,1);
I_carga2(1,1)=conj((S2(1,1)*1000)/V2(1,1));
I_carga2(2,1)=conj((S2(2,1)*1000)/V2(2,1));
I_carga2(3,1)=conj((S2(3,1)*1000)/V2(3,1));
I_nodo2=I_carga2+I_rama52+I_rama42+I_rama32;

% capa 0
I_rama1=C*V2+d*I_nodo2;
I_nodo1=I_rama1;

V1_comp=a*V2+b1*I_nodo2;

Error=norm(abs(V1-V1_comp)/7200);

% fin 1 iteracion
iter=iter+1;
```

end



```
iter;

magnitudes_normal=[ abs (V1) abs (V2) abs (V3) abs (V4) abs (V5) abs (V6) abs (V7)
abs (V8) ];

save ('normal.mat','magnitudes_normal')

voltajes_caso_2=[V1 V2 V3 V4 V5 V6 V7 V8];

save ('voltajes_caso_2_save.mat','voltajes_caso_2')

%esta seccion es para crear la gráfica de voltajes
clear all

load normal.mat

magnitudes_normal;

% grafica rama b
voltajes_normal_a=magnitudes_normal(1,1:end);
voltajes_normal_b=magnitudes_normal(2,1:end);
voltajes_normal_c=magnitudes_normal(3,1:end);

linea_negra=[1:8];
V_tolerancia=[6480 6480 6480 6480 6480 6480 6480 6480];

nodos_rama_b_normal=[1 2 4 7];

voltajes_normal_ramab_fasea=voltajes_normal_a(1,nodos_rama_b_normal);
voltajes_normal_ramab_faseb=voltajes_normal_b(1,nodos_rama_b_normal);
voltajes_normal_ramab_fasec=voltajes_normal_c(1,nodos_rama_b_normal);

figure (1)
plot(nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_fasea,'-*',...
nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_faseb,'-*',...
nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_fasec,'-*',...
linea_negra,V_tolerancia,'-k')
legend('Fase A','Fase B','Fase C')
title('GRAFICA CASO 2')
ylabel('| V |')
xlabel('Nodos')
```



B. CÓDIGO CONDICIÓN FINAL 8 NODOS

Código de programación de la condición final en MATLAB

VALORES INICIALES

```
I_nodo2=[0;0;0];  
  
I_nodo3=I_nodo2;  
I_nodo4=I_nodo2;  
I_nodo5=I_nodo2;  
I_nodo6=I_nodo2;  
I_nodo7=I_nodo2;  
I_nodo8=I_nodo2;
```

DATOS

```
S2=[17+10j; 66+38j; 117+68j];  
S3=[20+10j; 15+7j; 30+9j];  
S4=[385+220j; 385+220j; 385+220j]*22.4;  
S5=[0; 170+125j; 0];  
S6=[160+110j; 120+90j; 120+90j];  
S7=[100+50j; 50+25j; 100+50j]*19;  
S8=[ 0; 230+132j; 0];  
  
Z1=[0.1312+0.3856j 0.0591+0.1900j 0.0598+0.1605j;  
0.0591+0.1900j 0.1278+0.3969j 0.0581+0.1458j;  
0.0598+0.1605j 0.0581+0.1458j 0.1293+0.3920j];  
  
Z2=[0.0713+0.1119j 0.0150+0.0401j 0.0148+0.0475j;  
0.0150+0.0401j 0.0708+0.1135j 0.0145+0.0364j;  
0.0148+0.0475j 0.0145+0.0634j 0.0704+0.1147j];  
  
Z4=[0 0 0;  
0 0.0252+0.0255j 0;  
0 0 0];  
  
Z5=[0.0656+0.1928j 0.0295+0.0950j 0.0299+0.0802j;  
0.0295+0.0950j 0.0639+0.1984j 0.0291+0.0729j;  
0.0299+0.0802j 0.0291+0.0729j 0.0647+0.1960j];  
  
V1=[7200*(cos(0)+sin(0)*1i);  
7200*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180))*1i);  
7200*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180))*1i)];
```



```
A=[1 0 0;
    0 1 0;
    0 0 1];

A_Z4=[0 0 0;
      0 1 0;
      0 0 0];

C=zeros(3,3);

d_Z4=A_Z4;

d=A;

a=A;

b1=Z1;
```

CORRIENTE DEL CAPACITOR

```
clc
clear all
load voltajes_caso_2_save.mat
voltajes_caso_2;
datos_8n
V4=voltajes_caso_2(:,4);
V7c=[6500*(cos(0)+sin(0)*1i);
     6500*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180))*1i);
     6500*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180))*1i)];
abs(V7c); % saca magnitud para voltajes
angle(V7c)*(180/pi); %saca angulo en grados

% V7=A*V4-Z5*I_nodo7;
I_nodo7c=inv(Z5)*(-(V7c)+A*V4)

B=zeros(3,1);
B(1,1)=(I_nodo7c(1,1))/((V7c(1,1)*j));
B(2,1)=(I_nodo7c(2,1))/((V7c(2,1)*j));
B(3,1)=(I_nodo7c(3,1))/((V7c(3,1)*j));
B;
imagB=imag(B)
V7c_m=abs(V7c);
VARs(1,1)=(imagB(1,1)*(V7c_m(1,1))^2*1000);
VARs(2,1)=(imagB(2,1)*(V7c_m(2,1))^2*1000);
VARs(3,1)=(imagB(3,1)*(V7c_m(3,1))^2*1000);

save('B_VARs_save.mat','imagB','VARs')
```



MAIN

```
clc
clear all

datos_8n
load B_VARS_save
valores_iniciales

iter_max=100;
tol=0.000001;
Error=1;
iter=0;

while Error>tol && iter_max>iter

    % Barrido Progresivo
    V2=A*V1-Z1*I_nodo2;
    V3=A*V2-Z2*I_nodo3;
    V4=A*V2-Z1*I_nodo4;
    V5=A_Z4*V2-Z4*I_nodo5;
    V6=A*V3-Z5*I_nodo6;
    V7=A*V4-Z5*I_nodo7;
    V8=A_Z4*V5-Z4*I_nodo8;

    %Barrido Regresivo
    % capa 3
    I_carga8=zeros(3,1);
    I_carga8(2,1)=conj((S8(2,1)*1000)/V8(2,1));
    I_nodo8=I_carga8;

    I_carga7=zeros(3,1);
    I_carga7(1,1)=conj((S7(1,1)*1000)/V7(1,1));
    I_carga7(2,1)=conj((S7(2,1)*1000)/V7(2,1));
    I_carga7(3,1)=conj((S7(3,1)*1000)/V7(3,1));
    I_carga7c=zeros(3,1);
    I_carga7c(1,1)=j*(imagB(1,1)*0.1)*V7(1,1);
    I_carga7c(2,1)=j*(imagB(2,1)*0.1)*V7(2,1);
    I_carga7c(3,1)=j*(imagB(3,1)*0.1)*V7(3,1);

    I_nodo7=I_carga7+I_carga7c;

    I_carga6=zeros(3,1);
    I_carga6(1,1)=conj((S6(1,1)*1000)/V6(1,1));
    I_carga6(2,1)=conj((S6(2,1)*1000)/V6(2,1));
    I_carga6(3,1)=conj((S6(3,1)*1000)/V6(3,1));
    I_nodo6=I_carga6;

    % capa 2
    I_rama5=C*V8+d_Z4*I_nodo8;
```



```
I_carga5=zeros(3,1);
I_carga5(2,1)=conj((S5(2,1)*1000)/V5(2,1));
I_nodo5=I_carga5+I_rama5;

I_rama4=C*V7+d*I_nodo7;
I_carga4=zeros(3,1);
I_carga4(1,1)=conj((S4(1,1)*1000)/V4(1,1));
I_carga4(2,1)=conj((S4(2,1)*1000)/V4(2,1));
I_carga4(3,1)=conj((S4(3,1)*1000)/V4(3,1));
I_nodo4=I_carga4+I_rama4;

I_rama3=C*V6+d*I_nodo6;
I_carga3=zeros(3,1);
I_carga3(1,1)=conj((S3(1,1)*1000)/V3(1,1));
I_carga3(2,1)=conj((S3(2,1)*1000)/V3(2,1));
I_carga3(3,1)=conj((S3(3,1)*1000)/V3(3,1));
I_nodo3=I_carga3+I_rama3;

% capa 1
I_rama52=C*V5+d*I_nodo5;
I_rama42=C*V4+d*I_nodo4;
I_rama32=C*V3+d*I_nodo3;
I_carga2=zeros(3,1);
I_carga2(1,1)=conj((S2(1,1)*1000)/V2(1,1));
I_carga2(2,1)=conj((S2(2,1)*1000)/V2(2,1));
I_carga2(3,1)=conj((S2(3,1)*1000)/V2(3,1));
I_nodo2=I_carga2+I_rama52+I_rama42+I_rama32;

% capa 0
I_rama1=C*V2+d*I_nodo2;
I_nodo1=I_rama1;

V1_comp=a*V2+b1*I_nodo2;

Error=norm(abs(V1-V1_comp)/7200);

% fin 1 iteracion
iter=iter+1;

end

iter
abs(V4) % saca magnitud para voltajes
angle(V4)*(180/pi) %saca angulo en grados
abs(V7) % saca magnitud para voltajes
angle(V7)*(180/pi) %saca angulo en grados

magnitudes_normal=[ abs(V1) abs(V2) abs(V3) abs(V4) abs(V5) abs(V6) abs(V7)
abs(V8) ];

save ('normal.mat','magnitudes_normal')
```



```
%esta seccion es para crear la gráfica de voltajes
clear all

load normal.mat

magnitudes_normal

% grafica rama b
voltajes_normal_a=magnitudes_normal(1,1:end);
voltajes_normal_b=magnitudes_normal(2,1:end);
voltajes_normal_c=magnitudes_normal(3,1:end);

linea_negra=[1:8];
V_tolerancia=[6480 6480 6480 6480 6480 6480 6480 6480];

nodos_rama_b_normal=[1 2 4 7];

voltajes_normal_ramab_fasea=voltajes_normal_a(1,nodos_rama_b_normal);
voltajes_normal_ramab_faseb=voltajes_normal_b(1,nodos_rama_b_normal);
voltajes_normal_ramab_fasec=voltajes_normal_c(1,nodos_rama_b_normal);

figure (1)
plot(nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_fasea,'-*',...
     nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_faseb,'-*',...
     nodos_rama_b_normal,voltajes_normal_ramab_fasec,'-*',...
     linea_negra,V_tolerancia,'-k')
legend('Fase A','Fase B','Fase C')
title('GRAFICA CASO 2')
ylabel('| V |')
xlabel('Nodos')
```



C. CÓDIGO CONDICIÓN INICIAL 34 NODOS

Código de programación de la condición inicial en MATLAB

VALORES INICIALES

```
I_nodo802=[0; 0; 0];
```

```
I_nodo806=I_nodo802;
```

```
I_nodo804=I_nodo802;
```

```
I_nodo808=I_nodo802;
```

```
I_nodo810=I_nodo802;
```

```
I_nodo812=I_nodo802;
```

```
I_nodo814=I_nodo802;
```

```
I_nodo850=I_nodo802;
```

```
I_nodo816=I_nodo802;
```

```
I_nodo818=I_nodo802;
```

```
I_nodo820=I_nodo802;
```

```
I_nodo822=I_nodo802;
```

```
I_nodo824=I_nodo802;
```

```
I_nodo826=I_nodo802;
```

```
I_nodo828=I_nodo802;
```

```
I_nodo830=I_nodo802;
```

```
I_nodo854=I_nodo802;
```

```
I_nodo856=I_nodo802;
```

```
I_nodo852=I_nodo802;
```

```
I_nodo832=I_nodo802;
```

```
I_nodo888=I_nodo802;
```

```
I_nodo890=I_nodo802;
```

```
I_nodo858=I_nodo802;
```

```
I_nodo864=I_nodo802;
```

```
I_nodo834=I_nodo802;
```

```
I_nodo842=I_nodo802;
```

```
I_nodo844=I_nodo802;
```

```
I_nodo846=I_nodo802;
```

```
I_nodo848=I_nodo802;
```

```
I_nodo860=I_nodo802;
```

```
I_nodo836=I_nodo802;
```

```
I_nodo840=I_nodo802;
```

```
I_nodo862=I_nodo802;
```

```
I_nodo838=I_nodo802;
```

```
I_carga838=zeros(3,1);
```

```
I_carga840=zeros(3,1);
```

```
I_carga862=zeros(3,1);
```

```
I_carga836=zeros(3,1);
```

```
I_carga860=zeros(3,1);
```

```
I_carga834=zeros(3,1);
```

```
I_carga842=zeros(3,1);
```

```
I_carga844=zeros(3,1);
```

```
I_carga846=zeros(3,1);
```

```
I_carga848=zeros(3,1);
```

```
I_carga864=zeros(3,1);
```

```
I_carga858=zeros(3,1);
```



```
I_carga890=zeros(3,1);
I_carga888=zeros(3,1);
I_carga832=zeros(3,1);
I_carga852=zeros(3,1);
I_carga856=zeros(3,1);
I_carga854=zeros(3,1);
I_carga830=zeros(3,1);
I_carga828=zeros(3,1);
I_carga826=zeros(3,1);
I_carga824=zeros(3,1);
I_carga816=zeros(3,1);
I_carga818=zeros(3,1);
I_carga820=zeros(3,1);
I_carga822=zeros(3,1);
I_carga850=zeros(3,1);
I_carga814=zeros(3,1);
I_carga812=zeros(3,1);
I_carga810=zeros(3,1);
I_carga808=zeros(3,1);
I_carga806=zeros(3,1);
I_carga802=zeros(3,1);
```

DATOS 34 NODOS

```
%      A              B              C
S802=[ 0;           0;           0   ];
S806=[ 0;          15.45+7.72j;    12.87+7.21j];
S808=[ 0;           0;           0   ];
S810=[ 0;           8.24+4.12j;    0   ];
S812=[ 0;           0;           0   ];
S814=[ 0;           0;           0   ];
S850=[ 0;           0;           0   ];
S816=[ 0;           0;           0   ];
S818=[ 0;           0;           0   ];
S820=[17.51+8.75j;   0;           0   ];
S822=[69.52+36.05j; 0;           0   ];
S824=[ 0;           2.57+1.03j;    0   ];
S826=[ 0;           20.6+10.3j;   0   ];
S828=[ 0;           0;           2.06+1.03j];
S830=[8.75+4.12j;   5.15+2.57j;   12.87+5.15j];
S854=[ 0;           0;           0   ];
S856=[ 0;           2.06+1.03j;    0   ];
S852=[ 0;           0;           0   ];
S832=[ 0;           0;           0   ];
S888=[ 0;           0;           0   ];
S890=[77.25+38.62j; 77.25+38.62j;  77.25+38.62j];
S858=[ 3.6+1.54j;   1.03+.51j;    3.09+1.54j];
S864=[ 1.03+0.51j;  0;           0   ];
S834=[ 2.06+1.03j;  7.72+4.12j;   6.69+3.6j];
S842=[ 0;           0;           0   ];
S844=[74.16+56.65j; 69.52+54.07j;  69.52+54.07j];
S846=[ 0;           12.87+6.18j;   10.3+5.66j];
S848=[10.3+8.24j;   22.14+13.9j;   10.3+8.24j];
S860=[18.54+12.36j; 20.6+13.39j;   66.95+36.56j];
```



```
S840=[13.9+8.24j;    15.96+9.27j;    4.63+3.6j];
S836=[5.15+7.72j;    5.15+3.09j;    21.63+11.33j];
S862=[ 0;            0;            0    ];
S838=[ 0;            14.42+7.21j;    0    ];
```

```
OLC300=[1.3368+1.3343j 0.2101+0.5779j 0.2130+0.5015j;
         0.2101+0.5779j 1.3238+1.3569j 0.2066+0.4591j;
         0.2130+0.5015j 0.2066+0.4591j 1.3294+1.3471j];
```

```
OLC301=[1.9300+1.4115j 0.2327+0.6442j 0.2359+0.5691j;
         0.2327+0.6442j 1.9157+1.4281j 0.2288+0.5238j;
         0.2359+0.5691j 0.2288+0.5238j 1.9219+1.4209j];
```

```
OLC302=[2.7995+1.4855j    0            0;
         0                0            0;
         0                0            0];
```

```
OLC303=[ 0+0j            0+0j            0+0j;
         0+0j            2.7995+1.4855j    0+0j;
         0+0j            0+0j            0+0j    ];
```

```
OLC304=[ 0+0j            0+0j            0+0j;
         0+0j            1.9217+1.4212j    0+0j;
         0+0j            0+0j            0+0j    ];
```

```
V800=[14376*(cos(0)+sin(0)*1i);
      14376*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180)))*1i);
      14376*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180)))*1i)];
```

```
A300=[1 0 0;
      0 1 0;
      0 0 1];
```

```
A301=[1 0 0;
      0 1 0;
      0 0 1];
```

```
A302=[1 0 0;
      0 0 0;
      0 0 0];
```

```
A303=[0 0 0;
      0 1 0;
      0 0 0];
```

```
A304=[0 0 0;
      0 1 0;
      0 0 0];
```



C300=[0+5.3383j 0-1.5273j 0-0.9902j;
0-1.5273j 0+5.1028j 0-0.6166j;
0-0.9902j 0-0.6166j 0+4.8934j]*0.000001;

C301=[5.1240j -1.4325j -0.9362j;
-1.4325j 4.9102j -0.5905j;
-0.9362j -0.5905j 4.7207j]*0.000001;

C302=[0+4.2338j 0 0;
0 0 0;
0 0 0]*0.000001;

C303=[0 0 0;
0 0+4.2338j 0;
0 0 0]*0.000001;

C304=[0 0 0;
0 0+4.3727j 0;
0 0 0]*0.000001;

d300=A300;
d301=A301;
d302=A302;
d303=A303;
d304=A304;

FT=(1/5278.97);

Z802=2580*FT*OLC300;
Z806=1730*FT*OLC300;
Z808=32230*FT*OLC300;
Z810=5804*FT*OLC303;
Z812=37500*FT*OLC300;
Z814=29730*FT*OLC300;
Z850=10*FT*OLC301;
Z816=310*FT*OLC301;
Z818=1710*FT*OLC302;
Z820=48150*FT*OLC302;
Z822=13740*FT*OLC302;
Z824=10210*FT*OLC301;
Z826=3030*FT*OLC303;
Z828=840*FT*OLC301;
Z830=20440*FT*OLC301;
Z854=520*FT*OLC301;
Z856=23330*FT*OLC303;
Z852=36830*FT*OLC301;
Z832=10*FT*OLC301;
Z888=1*FT*OLC300;
Z890=10560*FT*OLC300;
Z858=4900*FT*OLC301;
Z864=1620*FT*OLC302;
Z834=5830*FT*OLC301;
Z842=280*FT*OLC301;



Z844=1350*FT*OLC301;
Z846=3640*FT*OLC301;
Z848=530*FT*OLC301;
Z860=2020*FT*OLC301;
Z836=2680*FT*OLC301;
Z840=860*FT*OLC301;
Z862=280*FT*OLC301;
Z838=4860*FT*OLC304;

% CALCULANDO LA ADMITANCIA EN DERIVACIÓN DE $C=Y+1/4*Y*Z*Y$ EC 6.17 LIBRO
% KERSTING

Y800=2580*FT*C300;
Y802=1730*FT*C300;
Y806=32230*FT*C300;
Y808_810=5804*FT*C303;
Y808_812=37500*FT*C300;
Y812=29730*FT*C300;
Y814=10*FT*C301;
Y850=310*FT*C301;
Y816_824=10210*FT*C301;
Y816_818=1710*FT*C302;
Y824_828=840*FT*C301;
Y824_826=3030*FT*C303;
Y818=48150*FT*C302;
Y820=13740*FT*C302;
Y828=20440*FT*C301;
Y830=520*FT*C301;
Y854_852=36830*FT*C301;
Y854_856=23330*FT*C303;
Y852=10*FT*C301;
Y832_858=4900*FT*C301;
Y832_888=1*FT*C300;
Y858_864=1620*FT*C302;
Y858_834=5830*FT*C301;
Y888=10560*FT*C300;
Y834_842=280*FT*C301;
Y834_860=2020*FT*C301;
Y842=1350*FT*C301;
Y844=3640*FT*C301;
Y846=530*FT*C301;
Y860=2680*FT*C301;
Y836_862=280*FT*C301;
Y836_840=860*FT*C301;
Y862=4860*FT*C304;

C800=Y800+(1/4)*Y800*Z802*Y800;
C802=Y802+(1/4)*Y802*Z806*Y802;
C806=Y806+(1/4)*Y806*Z808*Y806;
C808_810=Y808_810+(1/4)*Y808_810*Z810*Y808_810;
C808_812=Y808_812+(1/4)*Y808_812*Z812*Y808_812;
C812=Y812+(1/4)*Y812*Z814*Y812;
C814=Y814+(1/4)*Y814*Z850*Y814;
C850=Y850+(1/4)*Y850*Z816*Y850;



```
C816_824=Y816_824+(1/4)*Y816_824*Z824*Y816_824;  
C816_818=Y816_818+(1/4)*Y816_818*Z818*Y816_818;  
C824_828=Y824_828+(1/4)*Y824_828*Z828*Y824_828;  
C824_826=Y824_826+(1/4)*Y824_826*Z826*Y824_826;  
C818=Y818+(1/4)*Y818*Z820*Y818;  
C820=Y820+(1/4)*Y820*Z822*Y820;  
C828=Y828+(1/4)*Y828*Z830*Y828;  
C830=Y830+(1/4)*Y830*Z854*Y830;  
C854_852=Y854_852+(1/4)*Y854_852*Z852*Y854_852;  
C854_856=Y854_856+(1/4)*Y854_856*Z856*Y854_856;  
C852=Y852+(1/4)*Y852*Z832*Y852;  
C832_858=Y832_858+(1/4)*Y832_858*Z858*Y832_858;  
C832_888=Y832_888+(1/4)*Y832_888*Z888*Y832_888;  
C858_864=Y858_864+(1/4)*Y858_864*Z864*Y858_864;  
C858_834=Y858_834+(1/4)*Y858_834*Z834*Y858_834;  
C888=Y888+(1/4)*Y888*Z890*Y888;  
C834_842=Y834_842+(1/4)*Y834_842*Z842*Y834_842;  
C834_860=Y834_860+(1/4)*Y834_860*Z860*Y834_860;  
C842=Y842+(1/4)*Y842*Z844*Y842;  
C844=Y844+(1/4)*Y844*Z846*Y844;  
C846=Y846+(1/4)*Y846*Z848*Y846;  
C860=Y860+(1/4)*Y860*Z836*Y860;  
C836_862=Y836_862+(1/4)*Y836_862*Z862*Y836_862;  
C836_840=Y836_840+(1/4)*Y836_840*Z840*Y836_840;  
C862=Y862+(1/4)*Y862*Z838*Y862;
```

```
%CALCULANDO LA MATRIZ [ d ]
```

```
%[d]= [U]+(1/2)*[Zabc]*[Yabc]
```

```
d800=A300+(1/2)*Z802*Y800;  
d802=A300+(1/2)*Z806*Y802;  
d806=A300+(1/2)*Z808*Y806;  
d808_810=A303+(1/2)*Z810*Y808_810;  
d808_812=A300+(1/2)*Z812*Y808_812;  
d812=A300+(1/2)*Z814*Y812;  
d814=A301+(1/2)*Z850*Y814;  
d850=A301+(1/2)*Z816*Y850;  
d816_818=A302+(1/2)*Z818*Y816_818;  
d818=A302+(1/2)*Z820*Y818;  
d820=A302+(1/2)*Z822*Y820;  
d816_824=A301+(1/2)*Z824*Y816_824;  
d824_826=A303+(1/2)*Z826*Y824_826;  
d824_828=A301+(1/2)*Z828*Y824_828;  
d828=A301+(1/2)*Z830*Y828;  
d830=A301+(1/2)*Z854*Y830;  
d854_856=A303+(1/2)*Z856*Y854_856;  
d854_852=A301+(1/2)*Z852*Y854_852;  
d852=A301+(1/2)*Z832*Y852;  
d832_888=A300+(1/2)*Z888*Y832_888;  
d890_888=A300+(1/2)*Z890*Y888;  
d832_858=A301+(1/2)*Z858*Y832_858;  
d858_864=A302+(1/2)*Z864*Y858_864;  
d858_834=A301+(1/2)*Z834*Y858_834;  
d834_842=A301+(1/2)*Z842*Y834_842;
```



```
d842=A301+(1/2)*Z844*Y842;  
d844=A301+(1/2)*Z846*Y844;  
d846=A301+(1/2)*Z848*Y846;  
d834_860=A301+(1/2)*Z860*Y834_860;  
d860=A301+(1/2)*Z836*Y860;  
d836_840=A301+(1/2)*Z840*Y836_840;  
d836_862=A301+(1/2)*Z862*Y836_862;  
d838_862=A304+(1/2)*Z838*Y862;
```

```
a800=d800;  
a802=d802;  
a806=d806;  
a808_810=d808_810;  
a808_812=d808_812;  
a812=d812;  
a814=d814;  
a850=d850;  
a816_818=d816_818;  
a818=d818;  
a820=d820;  
a816_824=d816_824;  
a824_826=d824_826;  
a824_828=d824_828;  
a828=d828;  
a830=d830;  
a854_856=d854_856;  
a854_852=d854_852;  
a852=d852;  
a832_888=d832_888;  
a890_888=d890_888;  
a832_858=d832_858;  
a858_864=d858_864;  
a858_834=d858_834;  
a834_842=d834_842;  
a842=d842;  
a844=d844;  
a846=d846;  
a834_860=d834_860;  
a860=d860;  
a836_840=d836_840;  
a836_862=d836_862;  
a838_862=d838_862;
```

```
%Se calcula la inversa de la matriz de identidad [a]
```

```
A800=inv(a800);  
A802=inv(a802);  
A806=inv(a806);  
A808_812=inv(a808_812);  
A812=inv(a812);  
A814=inv(a814);  
A850=inv(a850);  
A816_824=inv(a816_824);  
A824_828=inv(a824_828);
```



```
A828=inv(a828);
A830=inv(a830);
A854_852=inv(a854_852);
A852=inv(a852);
A832_888=inv(a832_888);
A890_888=inv(a890_888);
A832_858=inv(a832_858);
A858_834=inv(a858_834);
A834_842=inv(a834_842);
A842=inv(a842);
A844=inv(a844);
A846=inv(a846);
A834_860=inv(a834_860);
A860=inv(a860);
A836_840=inv(a836_840);
A836_862=inv(a836_862);

% Se calcula la inversa de la matriz solo con la fase a

A816_818=zeros(3,3);
A816_818(1,1)=inv(a816_818(1,1));

A818=zeros(3,3);
A818(1,1)=inv(a818(1,1));

A820=zeros(3,3);
A820(1,1)=inv(a820(1,1));

A858_864=zeros(3,3);
A858_864(1,1)=inv(a858_864(1,1));

% Se calcula la inversa de la matriz solo con la fase b

A808_810=zeros(3,3);
A808_810(2,2)=inv(a808_810(2,2));

A824_826=zeros(3,3);
A824_826(2,2)=inv(a824_826(2,2));

A854_856=zeros(3,3);
A854_856(2,2)=inv(a854_856(2,2));

A838_862=zeros(3,3);
A838_862(2,2)=inv(a838_862(2,2));

%[B]=[a]-1*[b] dado que A = a-1, se utiliza A para simplificar
% [B]=[A]*[b]

B800=A800*Z802;
B802=A802*Z806;
B806=A806*Z808;
```



```
B808_812=A808_812*Z812;  
B812=A812*Z814;  
B814=A814*Z850;  
B850=A850*Z816;  
B816_824=A816_824*Z824;  
B824_828=A824_828*Z828;  
B828=A828*Z830;  
B830=A830*Z854;  
B854_852=A854_852*Z852;  
B852=A852*Z832;  
B832_888=A832_888*Z888;  
B890_888=A890_888*Z890;  
B832_858=A832_858*Z858;  
B858_834=A858_834*Z834;  
B834_842=A834_842*Z842;  
B842=A842*Z844;  
B844=A844*Z846;  
B846=A846*Z848;  
B834_860=A834_860*Z860;  
B860=A860*Z836;  
B836_840=A836_840*Z840;  
B836_862=A836_862*Z862;  
B808_810=A808_810*Z810;  
B824_826=A824_826*Z826;  
B854_856=A854_856*Z856;  
B838_862=A838_862*Z838;  
B816_818=A816_818*Z818;  
B818=A818*Z820;  
B820=A820*Z822;  
B858_864=A858_864*Z864;
```

MAIN

```
clc  
clear all  
  
datos_34n  
valores_iniciales  
  
iter_max=100;  
tol=0.00001;  
Error=1;  
iter=0;  
  
while Error>tol && iter_max>iter  
  
    % Barrido Progresivo  
    V802=A800*V800-B800*I_nodo802;  
    V806=A802*V802-B802*I_nodo806;  
    V808=A806*V806-B806*I_nodo808;  
    V810=A808_810*V808-B808_810*I_nodo810;  
    V812=A808_812*V808-B808_812*I_nodo812;
```



```
V814=A812*V812-B812*I_nodo814;
V850=A814*V814-B814*I_nodo850;
V816=A850*V850-B850*I_nodo816;
V818=A816_818*V816-B816_818*I_nodo818;
V820=A818*V818-B818*I_nodo820;
V822=A820*V820-B820*I_nodo822;
V824=A816_824*V816-B816_824*I_nodo824;
V826=A824_826*V824-B824_826*I_nodo826;
V828=A824_828*V824-B824_828*I_nodo828;
V830=A828*V828-B828*I_nodo830;
V854=A830*V830-B830*I_nodo854;
V856=A854_856*V854-B854_856*I_nodo856;
V852=A854_852*V854-B854_852*I_nodo852;
V832=A852*V852-B852*I_nodo832;
V888=A832_888*V832-B832_888*I_nodo888;
V890=A890_888*V888-B890_888*I_nodo890;
V858=A832_858*V832-B832_858*I_nodo858;
V864=A858_864*V858-B858_864*I_nodo864;
V834=A858_834*V858-B858_834*I_nodo834;
V842=A834_842*V834-B834_842*I_nodo842;
V844=A842*V842-B842*I_nodo844;
V846=A844*V844-B844*I_nodo846;
V848=A846*V846-B846*I_nodo848;
V860=A834_860*V834-B834_860*I_nodo860;
V836=A860*V860-B860*I_nodo836;
V862=A836_862*V836-B836_862*I_nodo862;
V838=A838_862*V862-B838_862*I_nodo838;
V840=A836_840*V836-B836_840*I_nodo840;
```

%Barrido Regresivo

% capa 19

```
I_carga838(2,1)=conj((S838(2,1)*1000)/V838(2,1));
I_nodo838=I_carga838;
```

```
I_carga848(1,1)=conj((S848(1,1)*1000)/V848(1,1));
I_carga848(2,1)=conj((S848(2,1)*1000)/V848(2,1));
I_carga848(3,1)=conj((S848(3,1)*1000)/V848(3,1));
I_nodo848=I_carga848;
```

% Capa 18

```
I_rama862=C862*V838+d838_862*I_nodo838;
I_nodo862=I_carga862+I_rama862;
```

```
I_rama846=C846*V848+d846*I_nodo848;
I_carga846(1,1)=conj((S846(1,1)*1000)/V846(1,1));
I_carga846(2,1)=conj((S846(2,1)*1000)/V846(2,1));
I_carga846(3,1)=conj((S846(3,1)*1000)/V846(3,1));
I_nodo846=I_carga846+I_rama846;
```

```
I_carga840(1,1)=conj((S840(1,1)*1000)/V840(1,1));
I_carga840(2,1)=conj((S840(2,1)*1000)/V840(2,1));
I_carga840(3,1)=conj((S840(3,1)*1000)/V840(3,1));
I_nodo840=I_carga840;
```



%Capa 17

```
I_rama836_862=C836_862*V862+d836_862*I_nodo862;  
I_rama836_840=C836_840*V840+d836_840*I_nodo840;  
I_carga836=zeros(3,1);  
I_carga836(1,1)=conj((S836(1,1)*1000)/V836(1,1));  
I_carga836(2,1)=conj((S836(2,1)*1000)/V836(2,1));  
I_carga836(3,1)=conj((S836(3,1)*1000)/V836(3,1));  
I_nodo836=I_carga836+I_rama836_862+I_rama836_840;
```

```
I_rama844=C844*V846+d844*I_nodo846;  
I_carga844(1,1)=conj((S844(1,1)*1000)/V844(1,1));  
I_carga844(2,1)=conj((S844(2,1)*1000)/V844(2,1));  
I_carga844(3,1)=conj((S844(3,1)*1000)/V844(3,1));  
I_nodo844=I_carga844+I_rama844;
```

%capa16

```
I_rama860=C860*V836+d860*I_nodo836;  
I_carga860(1,1)=conj((S860(1,1)*1000)/V860(1,1));  
I_carga860(2,1)=conj((S860(2,1)*1000)/V860(2,1));  
I_carga860(3,1)=conj((S860(3,1)*1000)/V860(3,1));  
I_nodo860=I_carga860+I_rama860;
```

```
I_rama842=C842*V844+d842*I_nodo844;  
I_nodo842=I_carga842+I_rama842;
```

%capa 15

```
I_rama834_842=C834_842*V842+d834_842*I_nodo842;  
I_rama834_860=C834_860*V860+d834_860*I_nodo860;  
I_carga834(1,1)=conj((S834(1,1)*1000)/V834(1,1));  
I_carga834(2,1)=conj((S834(2,1)*1000)/V834(2,1));  
I_carga834(3,1)=conj((S834(3,1)*1000)/V834(3,1));  
I_nodo834=I_rama834_842+I_rama834_860+I_carga834
```

```
I_carga864=zeros(3,1);
```

```
I_carga864(1,1)=conj((S864(1,1)*1000)/V864(1,1));  
I_nodo864=I_carga864;  
I_carga890(1,1)=conj((S890(1,1)*1000)/V890(1,1));  
I_carga890(2,1)=conj((S890(2,1)*1000)/V890(2,1));  
I_carga890(3,1)=conj((S890(3,1)*1000)/V890(3,1));  
I_nodo890=I_carga890;
```

%capa 14

```
I_rama888=C888*V890+d890_888*I_nodo890;  
I_nodo888=I_carga888+I_rama888;
```

```
I_rama858_864=C858_864*V864+d858_864*I_nodo864;  
I_rama858_834=C858_834*V834+d858_834*I_nodo834;
```



```
I_carga858(1,1)=conj((S858(1,1)*1000)/V858(1,1));  
I_carga858(2,1)=conj((S858(2,1)*1000)/V858(2,1));  
I_carga858(3,1)=conj((S858(3,1)*1000)/V858(3,1));  
I_nodo858=I_rama858_864+I_rama858_834+I_carga858;
```

%capa 13

```
I_rama832_858=C832_858*V858+d832_858*I_nodo858;  
I_rama832_888=C832_888*V888+d832_888*I_nodo888;  
I_nodo832=I_rama832_858+I_rama832_888+I_carga832;
```

%capa 12

```
I_rama852=C852*V832+d852*I_nodo832;  
I_carga852(1,1)=conj((S852(1,1)*1000)/V852(1,1));  
I_carga852(2,1)=conj((S852(2,1)*1000)/V852(2,1));  
I_carga852(3,1)=conj((S852(3,1)*1000)/V852(3,1));  
I_nodo852=I_carga852+I_rama852;
```

```
I_carga856=zeros(3,1);  
I_carga856(2,1)=conj((S856(2,1)*1000)/V856(2,1));  
I_nodo856=I_carga856;
```

%capa 11

```
I_rama854_852=C854_852*V852+d854_852*I_nodo852;  
I_rama854_856=C854_856*V856+d854_856*I_nodo856;  
I_nodo854=I_carga854+I_rama854_852+I_rama854_856;
```

%CAPA 10

```
I_rama830=C830*V854+d830*I_nodo854;  
I_carga830(1,1)=conj((S830(1,1)*1000)/V830(1,1));  
I_carga830(2,1)=conj((S830(2,1)*1000)/V830(2,1));  
I_carga830(3,1)=conj((S830(3,1)*1000)/V830(3,1));  
I_nodo830=I_carga830+I_rama830;
```

```
I_carga822=zeros(3,1);  
I_carga822(1,1)=conj((S822(1,1)*1000)/V822(1,1));  
I_nodo822=I_carga822;
```

%CAPA 9

```
I_rama828=C828*V830+d828*I_nodo830;  
I_carga828(1,1)=conj((S828(1,1)*1000)/V828(1,1));  
I_carga828(2,1)=conj((S828(2,1)*1000)/V828(2,1));  
I_carga828(3,1)=conj((S828(3,1)*1000)/V828(3,1));  
I_nodo828=I_carga828+I_rama828;
```

```
I_rama820=C820*V822+d820*I_nodo822;  
I_carga820(1,1)=conj((S820(1,1)*1000)/V820(1,1));  
I_nodo820=I_carga820+I_rama820;
```

```
I_carga826=zeros(3,1);  
I_carga826(2,1)=conj((S826(2,1)*1000)/V826(2,1));  
I_nodo826=I_carga826;
```



%CAPA 8

```
I_rama818=C818*V820+d818*I_nodo820;  
I_nodo818=I_carga818+I_rama818;  
  
I_rama824_826=C824_826*V826+d824_826*I_nodo826;  
I_rama824_828=C824_828*V828+d824_828*I_nodo828;  
I_carga824(1,1)=conj((S824(1,1)*1000)/V824(1,1));  
I_carga824(2,1)=conj((S824(2,1)*1000)/V824(2,1));  
I_carga824(3,1)=conj((S824(3,1)*1000)/V824(3,1));  
I_nodo824=I_carga824+I_rama824_826+I_rama824_828;
```

%CAPA 7

```
I_rama816_818=C816_818*V818+d816_818*I_nodo818;  
I_rama816_824=C816_824*V824+d816_824*I_nodo824;  
I_nodo816=I_carga816+I_rama816_818+I_rama816_824;
```

% CAPA 6

```
I_rama850=C850*V816+d850*I_nodo816;  
I_nodo850=I_carga850+I_rama850;
```

% CAPA 5

```
I_rama814=C814*V850+d814*I_nodo850;  
I_nodo814=I_carga814+I_rama814;
```

%CAPA 4

```
I_rama812=C812*V814+d812*I_nodo814;  
I_nodo812=I_carga812+I_rama812;  
  
I_carga810=zeros(3,1);  
I_carga810(2,1)=conj((S810(2,1)*1000)/V810(2,1));  
I_nodo810=I_carga810;
```

%CAPA 3

```
I_rama808_812=C808_812*V812+d808_812*I_nodo812;  
I_rama808_810=C808_810*V810+d808_810*I_nodo810;  
I_nodo808=I_carga808+I_rama808_812+I_rama808_810;
```

%CAPA 2

```
I_rama806=C806*V808+d806*I_nodo808;  
I_carga806(1,1)=conj((S806(1,1)*1000)/V806(1,1));  
I_carga806(2,1)=conj((S806(2,1)*1000)/V806(2,1));  
I_carga806(3,1)=conj((S806(3,1)*1000)/V806(3,1));  
I_nodo806=I_carga806+I_rama806;
```

%CAPA 1



```
I_rama802=C802*V806+d802*I_nodo806;
I_nodo802=I_carga802+I_rama802;

%   % capa 0
I_rama800=C800*V802+d800*I_nodo802;
I_nodo800=I_rama800;

V800_comp=a800*V802+z802*I_nodo800;

Error=norm(abs(V800-V800_comp)/14376);

iter=iter+1;

V_error(iter)=Error;

end

iter;
Error;
V_error;

magnitudes_normal_ramal_1=[ abs(V800) abs(V802) abs(V806) abs(V808) ...
                             abs(V812) abs(V814) abs(V850) abs(V816) ...
                             abs(V824) abs(V828) abs(V830) abs(V854) ...
                             abs(V852) abs(V832) abs(V858) abs(V834) ...
                             abs(V842) abs(V844) abs(V846) abs(V848)];

save ('normal_ramal_1.mat','magnitudes_normal_ramal_1')

voltajes_caso_2=[V800 V802 V806 V808...
                 V812 V814 V850 V816...
                 V824 V828 V830 V854...
                 V852 V832 V858 V834...
                 V860 V836 V862 V838];

save ('voltajes_caso_2_save.mat','voltajes_caso_2')

clear all

%   ESTA SECCION ES PARA GRAFICA RAMAL 1 NORMAL

load normal_ramal_1.mat

magnitudes_normal_ramal_1;
```



```
% grafica ramal 1
voltajes_normal_ramal_1_a=magnitudes_normal_ramal_1(1,1:end);
voltajes_normal_ramal_1_b=magnitudes_normal_ramal_1(2,1:end);
voltajes_normal_ramal_1_c=magnitudes_normal_ramal_1(3,1:end);

nodos_normal_ramal_1=[1:20];

voltajes_normal_ramal_1_fase_a=voltajes_normal_ramal_1_a(1,nodos_normal_ramal_1);
voltajes_normal_ramal_1_fase_b=voltajes_normal_ramal_1_b(1,nodos_normal_ramal_1);
voltajes_normal_ramal_1_fase_c=voltajes_normal_ramal_1_c(1,nodos_normal_ramal_1);

linea_negra=[1:20];
V_tolerancia=[12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938, ...
              12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938];

figure (1)
plot(nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_a, '-*', ...
     nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_b, '-*', ...
     nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_c, '-*', ...
     linea_negra,V_tolerancia, '-k');

legend('Fase A', 'Fase B', 'Fase C')
% title('Fases abc, Ramal 1')
ylabel('| V |')
xlabel('Nodos')
```



D. CÓDIGO CONDICIÓN FINAL 34 NODOS

Código de programación de la condición final en MATLAB

VALORES INICIALES

```
I_nodo802=[0; 0; 0];
I_nodo806=I_nodo802;
I_nodo804=I_nodo802;
I_nodo808=I_nodo802;
I_nodo810=I_nodo802;
I_nodo812=I_nodo802;
I_nodo814=I_nodo802;
I_nodo850=I_nodo802;
I_nodo816=I_nodo802;
I_nodo818=I_nodo802;
I_nodo820=I_nodo802;
I_nodo822=I_nodo802;
I_nodo824=I_nodo802;
I_nodo826=I_nodo802;
I_nodo828=I_nodo802;
I_nodo830=I_nodo802;
I_nodo854=I_nodo802;
I_nodo856=I_nodo802;
I_nodo852=I_nodo802;
I_nodo832=I_nodo802;
I_nodo888=I_nodo802;
I_nodo890=I_nodo802;
I_nodo858=I_nodo802;
I_nodo864=I_nodo802;
I_nodo834=I_nodo802;
I_nodo842=I_nodo802;
I_nodo844=I_nodo802;
I_nodo846=I_nodo802;
I_nodo848=I_nodo802;
I_nodo860=I_nodo802;
I_nodo836=I_nodo802;
I_nodo840=I_nodo802;
I_nodo862=I_nodo802;
I_nodo838=I_nodo802;

I_carga838=zeros(3,1);
I_carga840=zeros(3,1);
I_carga862=zeros(3,1);
I_carga836=zeros(3,1);
I_carga860=zeros(3,1);
I_carga834=zeros(3,1);
I_carga842=zeros(3,1);
I_carga844=zeros(3,1);
I_carga846=zeros(3,1);
I_carga848=zeros(3,1);
I_carga864=zeros(3,1);
```



```
I_carga858=zeros(3,1);
I_carga890=zeros(3,1);
I_carga888=zeros(3,1);
I_carga832=zeros(3,1);
I_carga852=zeros(3,1);
I_carga856=zeros(3,1);
I_carga854=zeros(3,1);
I_carga830=zeros(3,1);
I_carga828=zeros(3,1);
I_carga826=zeros(3,1);
I_carga824=zeros(3,1);
I_carga816=zeros(3,1);
I_carga818=zeros(3,1);
I_carga820=zeros(3,1);
I_carga822=zeros(3,1);
I_carga850=zeros(3,1);
I_carga814=zeros(3,1);
I_carga812=zeros(3,1);
I_carga810=zeros(3,1);
I_carga808=zeros(3,1);
I_carga806=zeros(3,1);
I_carga802=zeros(3,1);
```

DATOS 34 NODOS

```
%      A              B              C
S802=[ 0;              0;              0 ];
S806=[ 0;              15.45+7.72j;    12.87+7.21j];
S808=[ 0;              0;              0 ];
S810=[ 0;              8.24+4.12j;    0 ];
S812=[ 0;              0;              0 ];
S814=[ 0;              0;              0 ];
S850=[ 0;              0;              0 ];
S816=[ 0;              0;              0 ];
S818=[ 0;              0;              0 ];
S820=[17.51+8.75j;    0;              0 ];
S822=[69.52+36.05j;  0;              0 ];
S824=[ 0;              2.57+1.03j;    0 ];
S826=[ 0;              20.6+10.3j;    0 ];
S828=[ 0;              0;              2.06+1.03j];
S830=[8.75+4.12j;    5.15+2.57j;    12.87+5.15j];
S854=[ 0;              0;              0 ];
S856=[ 0;              2.06+1.03j;    0 ];
S852=[ 0;              0;              0 ];
S832=[ 0;              0;              0 ];
S888=[ 0;              0;              0 ];
S890=[77.25+38.62j;  77.25+38.62j;  77.25+38.62j];
S858=[ 3.6+1.54j;    1.03+.51j;    3.09+1.54j];
S864=[ 1.03+0.51j;    0;              0 ];
S834=[ 2.06+1.03j;    7.72+4.12j;    6.69+3.6j];
S842=[ 0;              0;              0 ];
S844=[74.16+56.65j;  69.52+54.07j;  69.52+54.07j];
S846=[ 0;              12.87+6.18j;    10.3+5.66j];
S848=[10.3+8.24j;    22.14+13.9j;    10.3+8.24j];
```



```
S860=[18.54+12.36j; 20.6+13.39j; 66.95+36.56j];
S840=[13.9+8.24j; 15.96+9.27j; 4.63+3.6j];
S836=[5.15+7.72j; 5.15+3.09j; 21.63+11.33j];
S862=[ 0; 0; 0 ];
S838=[ 0; 14.42+7.21j; 0 ];
```

```
OLC300=[1.3368+1.3343j 0.2101+0.5779j 0.2130+0.5015j;
0.2101+0.5779j 1.3238+1.3569j 0.2066+0.4591j;
0.2130+0.5015j 0.2066+0.4591j 1.3294+1.3471j];
```

```
OLC301=[1.9300+1.4115j 0.2327+0.6442j 0.2359+0.5691j;
0.2327+0.6442j 1.9157+1.4281j 0.2288+0.5238j;
0.2359+0.5691j 0.2288+0.5238j 1.9219+1.4209j];
```

```
OLC302=[2.7995+1.4855j 0 0;
0 0 0;
0 0 0];
```

```
OLC303=[ 0+0j 0+0j 0+0j;
0+0j 2.7995+1.4855j 0+0j;
0+0j 0+0j 0+0j ];
```

```
OLC304=[ 0+0j 0+0j 0+0j;
0+0j 1.9217+1.4212j 0+0j;
0+0j 0+0j 0+0j ];
```

```
V800=[14376*(cos(0)+sin(0)*1i);
14376*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180)))*1i);
14376*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180)))*1i)];
```

```
A300=[1 0 0;
0 1 0;
0 0 1];
```

```
A301=[1 0 0;
0 1 0;
0 0 1];
```

```
A302=[1 0 0;
0 0 0;
0 0 0];
```

```
A303=[0 0 0;
0 1 0;
0 0 0];
```

```
A304=[0 0 0;
0 1 0;
0 0 0];
```



C300=[0+5.3383j 0-1.5273j 0-0.9902j;
0-1.5273j 0+5.1028j 0-0.6166j;
0-0.9902j 0-0.6166j 0+4.8934j]*0.000001;

C301=[5.1240j -1.4325j -0.9362j;
-1.4325j 4.9102j -0.5905j;
-0.9362j -0.5905j 4.7207j]*0.000001;

C302=[0+4.2338j 0 0;
0 0 0;
0 0 0]*0.000001;

C303=[0 0 0;
0 0+4.2338j 0;
0 0 0]*0.000001;

C304=[0 0 0;
0 0+4.3727j 0;
0 0 0]*0.000001;

d300=A300;
d301=A301;
d302=A302;
d303=A303;
d304=A304;

FT=(1/5278.97) ;

Z802=2580*FT*OLC300;
Z806=1730*FT*OLC300;
Z808=32230*FT*OLC300;
Z810=5804*FT*OLC303;
Z812=37500*FT*OLC300;
Z814=29730*FT*OLC300;
Z850=10*FT*OLC301;
Z816=310*FT*OLC301;
Z818=1710*FT*OLC302;
Z820=48150*FT*OLC302;
Z822=13740*FT*OLC302;
Z824=10210*FT*OLC301;
Z826=3030*FT*OLC303;
Z828=840*FT*OLC301;
Z830=20440*FT*OLC301;
Z854=520*FT*OLC301;
Z856=23330*FT*OLC303;
Z852=36830*FT*OLC301;
Z832=10*FT*OLC301;
Z888=1*FT*OLC300;
Z890=10560*FT*OLC300;
Z858=4900*FT*OLC301;
Z864=1620*FT*OLC302;
Z834=5830*FT*OLC301;
Z842=280*FT*OLC301;



Z844=1350*FT*OLC301;
Z846=3640*FT*OLC301;
Z848=530*FT*OLC301;
Z860=2020*FT*OLC301;
Z836=2680*FT*OLC301;
Z840=860*FT*OLC301;
Z862=280*FT*OLC301;
Z838=4860*FT*OLC304;

% CALCULANDO LA ADMITANCIA EN DERIVACIÓN DE $C=Y+1/4*Y*Z*Y$ EC 6.17 LIBRO
% KERSTING

Y800=2580*FT*C300;
Y802=1730*FT*C300;
Y806=32230*FT*C300;
Y808_810=5804*FT*C303;
Y808_812=37500*FT*C300;
Y812=29730*FT*C300;
Y814=10*FT*C301;
Y850=310*FT*C301;
Y816_824=10210*FT*C301;
Y816_818=1710*FT*C302;
Y824_828=840*FT*C301;
Y824_826=3030*FT*C303;
Y818=48150*FT*C302;
Y820=13740*FT*C302;
Y828=20440*FT*C301;
Y830=520*FT*C301;
Y854_852=36830*FT*C301;
Y854_856=23330*FT*C303;
Y852=10*FT*C301;
Y832_858=4900*FT*C301;
Y832_888=1*FT*C300;
Y858_864=1620*FT*C302;
Y858_834=5830*FT*C301;
Y888=10560*FT*C300;
Y834_842=280*FT*C301;
Y834_860=2020*FT*C301;
Y842=1350*FT*C301;
Y844=3640*FT*C301;
Y846=530*FT*C301;
Y860=2680*FT*C301;
Y836_862=280*FT*C301;
Y836_840=860*FT*C301;
Y862=4860*FT*C304;

C800=Y800+(1/4)*Y800*Z802*Y800;
C802=Y802+(1/4)*Y802*Z806*Y802;
C806=Y806+(1/4)*Y806*Z808*Y806;
C808_810=Y808_810+(1/4)*Y808_810*Z810*Y808_810;
C808_812=Y808_812+(1/4)*Y808_812*Z812*Y808_812;
C812=Y812+(1/4)*Y812*Z814*Y812;
C814=Y814+(1/4)*Y814*Z850*Y814;
C850=Y850+(1/4)*Y850*Z816*Y850;



```
C816_824=Y816_824+(1/4)*Y816_824*Z824*Y816_824;  
C816_818=Y816_818+(1/4)*Y816_818*Z818*Y816_818;  
C824_828=Y824_828+(1/4)*Y824_828*Z828*Y824_828;  
C824_826=Y824_826+(1/4)*Y824_826*Z826*Y824_826;  
C818=Y818+(1/4)*Y818*Z820*Y818;  
C820=Y820+(1/4)*Y820*Z822*Y820;  
C828=Y828+(1/4)*Y828*Z830*Y828;  
C830=Y830+(1/4)*Y830*Z854*Y830;  
C854_852=Y854_852+(1/4)*Y854_852*Z852*Y854_852;  
C854_856=Y854_856+(1/4)*Y854_856*Z856*Y854_856;  
C852=Y852+(1/4)*Y852*Z832*Y852;  
C832_858=Y832_858+(1/4)*Y832_858*Z858*Y832_858;  
C832_888=Y832_888+(1/4)*Y832_888*Z888*Y832_888;  
C858_864=Y858_864+(1/4)*Y858_864*Z864*Y858_864;  
C858_834=Y858_834+(1/4)*Y858_834*Z834*Y858_834;  
C888=Y888+(1/4)*Y888*Z890*Y888;  
C834_842=Y834_842+(1/4)*Y834_842*Z842*Y834_842;  
C834_860=Y834_860+(1/4)*Y834_860*Z860*Y834_860;  
C842=Y842+(1/4)*Y842*Z844*Y842;  
C844=Y844+(1/4)*Y844*Z846*Y844;  
C846=Y846+(1/4)*Y846*Z848*Y846;  
C860=Y860+(1/4)*Y860*Z836*Y860;  
C836_862=Y836_862+(1/4)*Y836_862*Z862*Y836_862;  
C836_840=Y836_840+(1/4)*Y836_840*Z840*Y836_840;  
C862=Y862+(1/4)*Y862*Z838*Y862;
```

```
%CALCULANDO LA MATRIZ [ d ]
```

```
%[d]= [U]+(1/2)*[Zabc]*[Yabc]
```

```
d800=A300+(1/2)*Z802*Y800;  
d802=A300+(1/2)*Z806*Y802;  
d806=A300+(1/2)*Z808*Y806;  
d808_810=A303+(1/2)*Z810*Y808_810;  
d808_812=A300+(1/2)*Z812*Y808_812;  
d812=A300+(1/2)*Z814*Y812;  
d814=A301+(1/2)*Z850*Y814;  
d850=A301+(1/2)*Z816*Y850;  
d816_818=A302+(1/2)*Z818*Y816_818;  
d818=A302+(1/2)*Z820*Y818;  
d820=A302+(1/2)*Z822*Y820;  
d816_824=A301+(1/2)*Z824*Y816_824;  
d824_826=A303+(1/2)*Z826*Y824_826;  
d824_828=A301+(1/2)*Z828*Y824_828;  
d828=A301+(1/2)*Z830*Y828;  
d830=A301+(1/2)*Z854*Y830;  
d854_856=A303+(1/2)*Z856*Y854_856;  
d854_852=A301+(1/2)*Z852*Y854_852;  
d852=A301+(1/2)*Z832*Y852;  
d832_888=A300+(1/2)*Z888*Y832_888;  
d890_888=A300+(1/2)*Z890*Y888;  
d832_858=A301+(1/2)*Z858*Y832_858;  
d858_864=A302+(1/2)*Z864*Y858_864;  
d858_834=A301+(1/2)*Z834*Y858_834;  
d834_842=A301+(1/2)*Z842*Y834_842;
```



```
d842=A301+(1/2)*Z844*Y842;  
d844=A301+(1/2)*Z846*Y844;  
d846=A301+(1/2)*Z848*Y846;  
d834_860=A301+(1/2)*Z860*Y834_860;  
d860=A301+(1/2)*Z836*Y860;  
d836_840=A301+(1/2)*Z840*Y836_840;  
d836_862=A301+(1/2)*Z862*Y836_862;  
d838_862=A304+(1/2)*Z838*Y862;
```

```
a800=d800;  
a802=d802;  
a806=d806;  
a808_810=d808_810;  
a808_812=d808_812;  
a812=d812;  
a814=d814;  
a850=d850;  
a816_818=d816_818;  
a818=d818;  
a820=d820;  
a816_824=d816_824;  
a824_826=d824_826;  
a824_828=d824_828;  
a828=d828;  
a830=d830;  
a854_856=d854_856;  
a854_852=d854_852;  
a852=d852;  
a832_888=d832_888;  
a890_888=d890_888;  
a832_858=d832_858;  
a858_864=d858_864;  
a858_834=d858_834;  
a834_842=d834_842;  
a842=d842;  
a844=d844;  
a846=d846;  
a834_860=d834_860;  
a860=d860;  
a836_840=d836_840;  
a836_862=d836_862;  
a838_862=d838_862;
```

```
%Se calcula la inversa de la matriz de identidad [a]
```

```
A800=inv(a800);  
A802=inv(a802);  
A806=inv(a806);  
A808_812=inv(a808_812);  
A812=inv(a812);  
A814=inv(a814);  
A850=inv(a850);  
A816_824=inv(a816_824);  
A824_828=inv(a824_828);
```



```
A828=inv(a828);
A830=inv(a830);
A854_852=inv(a854_852);
A852=inv(a852);
A832_888=inv(a832_888);
A890_888=inv(a890_888);
A832_858=inv(a832_858);
A858_834=inv(a858_834);
A834_842=inv(a834_842);
A842=inv(a842);
A844=inv(a844);
A846=inv(a846);
A834_860=inv(a834_860);
A860=inv(a860);
A836_840=inv(a836_840);
A836_862=inv(a836_862);

% Se calcula la inversa de la matriz solo con la fase a

A816_818=zeros(3,3);
A816_818(1,1)=inv(a816_818(1,1));

A818=zeros(3,3);
A818(1,1)=inv(a818(1,1));

A820=zeros(3,3);
A820(1,1)=inv(a820(1,1));

A858_864=zeros(3,3);
A858_864(1,1)=inv(a858_864(1,1));

% se calcula la inversa de la matriz solo con la fase b

A808_810=zeros(3,3);
A808_810(2,2)=inv(a808_810(2,2));

A824_826=zeros(3,3);
A824_826(2,2)=inv(a824_826(2,2));

A854_856=zeros(3,3);
A854_856(2,2)=inv(a854_856(2,2));

A838_862=zeros(3,3);
A838_862(2,2)=inv(a838_862(2,2));

%[B]=[a]-1*[b] dado que A = a-1, se utiliza A para simplificar
% [B]=[A]*[b]

B800=A800*Z802;
B802=A802*Z806;
B806=A806*Z808;
```



```
B808_812=A808_812*Z812;  
B812=A812*Z814;  
B814=A814*Z850;  
B850=A850*Z816;  
B816_824=A816_824*Z824;  
B824_828=A824_828*Z828;  
B828=A828*Z830;  
B830=A830*Z854;  
B854_852=A854_852*Z852;  
B852=A852*Z832;  
B832_888=A832_888*Z888;  
B890_888=A890_888*Z890;  
B832_858=A832_858*Z858;  
B858_834=A858_834*Z834;  
B834_842=A834_842*Z842;  
B842=A842*Z844;  
B844=A844*Z846;  
B846=A846*Z848;  
B834_860=A834_860*Z860;  
B860=A860*Z836;  
B836_840=A836_840*Z840;  
B836_862=A836_862*Z862;  
B808_810=A808_810*Z810;  
B824_826=A824_826*Z826;  
B854_856=A854_856*Z856;  
B838_862=A838_862*Z838;  
B816_818=A816_818*Z818;  
B818=A818*Z820;  
B820=A820*Z822;  
B858_864=A858_864*Z864;
```

CORRIENTE DEL CAPACITOR

```
clc  
clear all  
load voltajes_caso_2_save.mat  
voltajes_caso_2;  
datos_34n  
  
V858=voltajes_caso_2(:,4)  
V834c=[14376*(cos(0)+sin(0)*1i);  
14376*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180)))*1i);  
14376*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180)))*1i)];  
abs(V834c); % saca magnitud para voltajes  
angle(V834c)*(180/pi); %saca angulo en grados  
  
I_nodo834c=inv(B858_834)*(-(V834c)+(A858_834*V858))  
  
B=zeros(3,1);  
B(1,1)=(I_nodo834c(1,1))/((V834c(1,1)*1j));
```



```
B(2,1)=(I_nodo834c(2,1))/((V834c(2,1)*1j));
B(3,1)=(I_nodo834c(3,1))/((V834c(3,1)*1j));
B
imagB=imag(B);

V834c_m=abs(V834c);
VARs(1,1)=(imagB(1,1)*((V834c_m(1,1))^2)*1000)
VARs(2,1)=(imagB(2,1)*((V834c_m(2,1))^2)*1000)
VARs(3,1)=(imagB(3,1)*((V834c_m(3,1))^2)*1000)

save('B_VARS_save.mat','imagB','VARs')
```

MAIN

```
clc
clear all

datos_34n
I_capacitor
valores_iniciales

iter_max=100;
tol=0.00001;
Error=1;
iter=0;

while Error>tol && iter_max>iter

    % Barrido Progresivo
    V802=A800*V800-B800*I_nodo802;
    V806=A802*V802-B802*I_nodo806;
    V808=A806*V806-B806*I_nodo808;
    V810=A808_810*V808-B808_810*I_nodo810;
    V812=A808_812*V808-B808_812*I_nodo812;
    V814=A812*V812-B812*I_nodo814;
    V850=A814*V814-B814*I_nodo850;
    V816=A850*V850-B850*I_nodo816;
    V818=A816_818*V816-B816_818*I_nodo818;
    V820=A818*V818-B818*I_nodo820;
    V822=A820*V820-B820*I_nodo822;
    V824=A816_824*V816-B816_824*I_nodo824;
    V826=A824_826*V824-B824_826*I_nodo826;
    V828=A824_828*V824-B824_828*I_nodo828;
    V830=A828*V828-B828*I_nodo830;
    V854=A830*V830-B830*I_nodo854;
    V856=A854_856*V854-B854_856*I_nodo856;
    V852=A854_852*V854-B854_852*I_nodo852;
    V832=A852*V852-B852*I_nodo832;
    V888=A832_888*V832-B832_888*I_nodo888;
    V890=A890_888*V888-B890_888*I_nodo890;
    V858=A832_858*V832-B832_858*I_nodo858;
```



```
V864=A858_864*V858-B858_864*I_nodo864;  
V834=A858_834*V858-B858_834*I_nodo834;  
V842=A834_842*V834-B834_842*I_nodo842;  
V844=A842*V842-B842*I_nodo844;  
V846=A844*V844-B844*I_nodo846;  
V848=A846*V846-B846*I_nodo848;  
V860=A834_860*V834-B834_860*I_nodo860;  
V836=A860*V860-B860*I_nodo836;  
V862=A836_862*V836-B836_862*I_nodo862;  
V838=A838_862*V862-B838_862*I_nodo838;  
V840=A836_840*V836-B836_840*I_nodo840;
```

```
%Barrido Regresivo
```

```
% capa 19
```

```
I_carga838(2,1)=conj((S838(2,1)*1000)/V838(2,1));  
I_nodo838=I_carga838;
```

```
I_carga848(1,1)=conj((S848(1,1)*1000)/V848(1,1));  
I_carga848(2,1)=conj((S848(2,1)*1000)/V848(2,1));  
I_carga848(3,1)=conj((S848(3,1)*1000)/V848(3,1));  
I_nodo848=I_carga848;
```

```
% Capa 18
```

```
I_rama862=C862*V838+d838_862*I_nodo838;  
I_nodo862=I_carga862+I_rama862;
```

```
I_rama846=C846*V848+d846*I_nodo848;  
I_carga846(1,1)=conj((S846(1,1)*1000)/V846(1,1));  
I_carga846(2,1)=conj((S846(2,1)*1000)/V846(2,1));  
I_carga846(3,1)=conj((S846(3,1)*1000)/V846(3,1));
```

```
I_nodo846=I_carga846+I_rama846;
```

```
I_carga840(1,1)=conj((S840(1,1)*1000)/V840(1,1));  
I_carga840(2,1)=conj((S840(2,1)*1000)/V840(2,1));  
I_carga840(3,1)=conj((S840(3,1)*1000)/V840(3,1));  
I_nodo840=I_carga840;
```

```
%Capa 17
```

```
I_rama836_862=C836_862*V862+d836_862*I_nodo862;  
I_rama836_840=C836_840*V840+d836_840*I_nodo840;  
I_carga836=zeros(3,1);  
I_carga836(1,1)=conj((S836(1,1)*1000)/V836(1,1));  
I_carga836(2,1)=conj((S836(2,1)*1000)/V836(2,1));  
I_carga836(3,1)=conj((S836(3,1)*1000)/V836(3,1));  
I_nodo836=I_carga836+I_rama836_862+I_rama836_840;
```

```
I_rama844=C844*V846+d844*I_nodo846;  
I_carga844(1,1)=conj((S844(1,1)*1000)/V844(1,1));  
I_carga844(2,1)=conj((S844(2,1)*1000)/V844(2,1));  
I_carga844(3,1)=conj((S844(3,1)*1000)/V844(3,1));  
I_nodo844=I_carga844+I_rama844;
```



%capa16

```
I_rama860=C860*V836+d860*I_nodo836;  
I_carga860(1,1)=conj((S860(1,1)*1000)/V860(1,1));  
I_carga860(2,1)=conj((S860(2,1)*1000)/V860(2,1));  
I_carga860(3,1)=conj((S860(3,1)*1000)/V860(3,1));  
I_nodo860=I_carga860+I_rama860;
```

```
I_rama842=C842*V844+d842*I_nodo844;  
I_nodo842=I_carga842+I_rama842;
```

%capa 15

```
I_rama834_842=C834_842*V842+d834_842*I_nodo842;  
I_rama834_860=C834_860*V860+d834_860*I_nodo860;  
I_carga834(1,1)=conj((S834(1,1)*1000)/V834(1,1));  
I_carga834(2,1)=conj((S834(2,1)*1000)/V834(2,1));  
I_carga834(3,1)=conj((S834(3,1)*1000)/V834(3,1));  
I_nodo834c(1,1)=1j*(imagB(1,1)*0.1)*V834(1,1);  
I_nodo834c(2,1)=1j*(imagB(2,1)*0.1)*V834(2,1);  
I_nodo834c(3,1)=1j*(imagB(3,1)*0.1)*V834(3,1);
```

```
I_nodo834=I_rama834_842+I_rama834_860+I_carga834+I_nodo834c;
```

```
I_carga864=zeros(3,1);  
I_carga864(1,1)=conj((S864(1,1)*1000)/V864(1,1));  
I_nodo864=I_carga864;
```

```
I_carga890(1,1)=conj((S890(1,1)*1000)/V890(1,1));  
I_carga890(2,1)=conj((S890(2,1)*1000)/V890(2,1));  
I_carga890(3,1)=conj((S890(3,1)*1000)/V890(3,1));  
I_nodo890=I_carga890;
```

%capa 14

```
I_rama888=C888*V890+d890_888*I_nodo890;  
I_nodo888=I_carga888+I_rama888;
```

```
I_rama858_864=C858_864*V864+d858_864*I_nodo864;  
I_rama858_834=C858_834*V834+d858_834*I_nodo834;  
I_carga858(1,1)=conj((S858(1,1)*1000)/V858(1,1));  
I_carga858(2,1)=conj((S858(2,1)*1000)/V858(2,1));  
I_carga858(3,1)=conj((S858(3,1)*1000)/V858(3,1));  
I_nodo858=I_rama858_864+I_rama858_834+I_carga858;
```

%capa 13

```
I_rama832_858=C832_858*V858+d832_858*I_nodo858;  
I_rama832_888=C832_888*V888+d832_888*I_nodo888;  
I_nodo832=I_rama832_858+I_rama832_888+I_carga832;
```

%capa 12



```
I_rama852=C852*V832+d852*I_nodo832;
I_carga852(1,1)=conj((S852(1,1)*1000)/V852(1,1));
I_carga852(2,1)=conj((S852(2,1)*1000)/V852(2,1));
I_carga852(3,1)=conj((S852(3,1)*1000)/V852(3,1));
I_nodo852=I_carga852+I_rama852;

I_carga856=zeros(3,1);
I_carga856(2,1)=conj((S856(2,1)*1000)/V856(2,1));
I_nodo856=I_carga856;

%capa 11
I_rama854_852=C854_852*V852+d854_852*I_nodo852;
I_rama854_856=C854_856*V856+d854_856*I_nodo856;
I_nodo854=I_carga854+I_rama854_852+I_rama854_856;

%CAPA 10

I_rama830=C830*V854+d830*I_nodo854;
I_carga830(1,1)=conj((S830(1,1)*1000)/V830(1,1));
I_carga830(2,1)=conj((S830(2,1)*1000)/V830(2,1));
I_carga830(3,1)=conj((S830(3,1)*1000)/V830(3,1));
I_nodo830=I_carga830+I_rama830;

I_carga822=zeros(3,1);
I_carga822(1,1)=conj((S822(1,1)*1000)/V822(1,1));
I_nodo822=I_carga822;

%CAPA 9
I_rama828=C828*V830+d828*I_nodo830;
I_carga828(1,1)=conj((S828(1,1)*1000)/V828(1,1));
I_carga828(2,1)=conj((S828(2,1)*1000)/V828(2,1));
I_carga828(3,1)=conj((S828(3,1)*1000)/V828(3,1));
I_nodo828=I_carga828+I_rama828;

I_rama820=C820*V822+d820*I_nodo822;
I_carga820(1,1)=conj((S820(1,1)*1000)/V820(1,1));
I_nodo820=I_carga820+I_rama820;

I_carga826=zeros(3,1);
I_carga826(2,1)=conj((S826(2,1)*1000)/V826(2,1));
I_nodo826=I_carga826;

%CAPA 8
I_rama818=C818*V820+d818*I_nodo820;
I_nodo818=I_carga818+I_rama818;

I_rama824_826=C824_826*V826+d824_826*I_nodo826;
I_rama824_828=C824_828*V828+d824_828*I_nodo828;
I_carga824(1,1)=conj((S824(1,1)*1000)/V824(1,1));
I_carga824(2,1)=conj((S824(2,1)*1000)/V824(2,1));
I_carga824(3,1)=conj((S824(3,1)*1000)/V824(3,1));
I_nodo824=I_carga824+I_rama824_826+I_rama824_828;
```



```
%CAPA 7
```

```
I_rama816_818=C816_818*V818+d816_818*I_nodo818;  
I_rama816_824=C816_824*V824+d816_824*I_nodo824;  
I_nodo816=I_carga816+I_rama816_818+I_rama816_824;
```

```
% CAPA 6
```

```
I_rama850=C850*V816+d850*I_nodo816;  
I_nodo850=I_carga850+I_rama850;
```

```
% CAPA 5
```

```
I_rama814=C814*V850+d814*I_nodo850;  
I_nodo814=I_carga814+I_rama814;
```

```
%CAPA 4
```

```
I_rama812=C812*V814+d812*I_nodo814;  
I_nodo812=I_carga812+I_rama812;
```

```
I_carga810=zeros(3,1);  
I_carga810(2,1)=conj((S810(2,1)*1000)/V810(2,1));  
I_nodo810=I_carga810;
```

```
%CAPA 3
```

```
I_rama808_812=C808_812*V812+d808_812*I_nodo812;  
I_rama808_810=C808_810*V810+d808_810*I_nodo810;  
I_nodo808=I_carga808+I_rama808_812+I_rama808_810;
```

```
%CAPA 2
```

```
I_rama806=C806*V808+d806*I_nodo808;  
% I_carga806=zeros(3,1);  
I_carga806(1,1)=conj((S806(1,1)*1000)/V806(1,1));  
I_carga806(2,1)=conj((S806(2,1)*1000)/V806(2,1));  
I_carga806(3,1)=conj((S806(3,1)*1000)/V806(3,1));  
I_nodo806=I_carga806+I_rama806;
```

```
%CAPA 1
```

```
I_rama802=C802*V806+d802*I_nodo806;  
I_nodo802=I_carga802+I_rama802;
```

```
% % capa 0
```

```
I_rama800=C800*V802+d800*I_nodo802;  
I_nodo800=I_rama800;
```

```
V800_comp=a800*V802+z802*I_nodo800;
```



```
Error=norm(abs(V800-V800_comp)/14376);

iter=iter+1;

V_error(iter)=Error;

end

iter;
Error;
V_error;

magnitudes_normal_ramal_1=[ abs(V800) abs(V802) abs(V806) abs(V808) ...
                             abs(V812) abs(V814) abs(V850) abs(V816) ...
                             abs(V824) abs(V828) abs(V830) abs(V854) ...
                             abs(V852) abs(V832) abs(V858) abs(V834) ...
                             abs(V842) abs(V844) abs(V846) abs(V848)];

save('normal_ramal_1.mat','magnitudes_normal_ramal_1')

clear all

% ESTA SECCION ES PARA GRAFICA RAMAL 1 NORMAL

load normal_ramal_1.mat

magnitudes_normal_ramal_1;

% grafica ramal 1
voltajes_normal_ramal_1_a=magnitudes_normal_ramal_1(1,1:end);
voltajes_normal_ramal_1_b=magnitudes_normal_ramal_1(2,1:end);
voltajes_normal_ramal_1_c=magnitudes_normal_ramal_1(3,1:end);

nodos_normal_ramal_1=[1:20];

voltajes_normal_ramal_1_fase_a=voltajes_normal_ramal_1_a(1,nodos_normal_ramal_1);
voltajes_normal_ramal_1_fase_b=voltajes_normal_ramal_1_b(1,nodos_normal_ramal_1);
voltajes_normal_ramal_1_fase_c=voltajes_normal_ramal_1_c(1,nodos_normal_ramal_1);

linea_negra=[1:20];
V_tolerancia=[12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938, ...
              12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938 12938];
```



```
figure (1)
plot(nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_a,'-*',...
     nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_b,'-*',...
     nodos_normal_ramal_1,voltajes_normal_ramal_1_fase_c,'-*',...
     linea_negra,V_tolerancia,'-k');

legend('Fase A','Fase B','Fase C')
% title('Fases abc, Ramal 1')
ylabel('| V |')
xlabel('Nodos')
```

E. EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LA MATRIZ DE IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS

Cálculo de la matriz de impedancias y admitancias del conductor en el segmento de línea entre el nodo 800 y 801 de la red de 34 nodos.

Las características del conductor son:

Fase: 1/0 ACSR

Neutro: 1/0 ACSR

De la tabla de conductores se tiene que para 1/0 ACSR:

GMR=0.00446

R=1.12Ω/milla

La configuración de los conductores se muestra en la figura 5.1

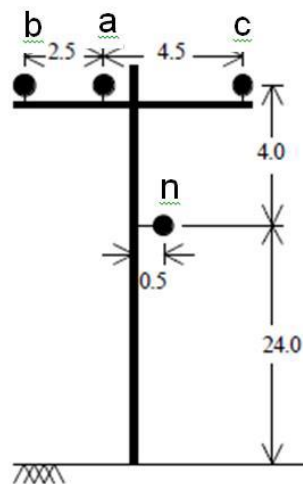


Figura 5.1 Configuración de conductores.

Las distancias entre conductores están dadas por:

$D_{ab}=2.5\text{ft}$ $D_{bc}=7\text{ft}$ $D_{ca}=4.5\text{ft}$

$D_{an}=4.272\text{ft}$ $D_{bn}=5.6569\text{ft}$ $D_{cn}=5.0\text{ft}$

Aplicando las ecuaciones modificadas de Carson.



$$Z_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right]$$

$$Z_{ij} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right]$$

$$\hat{z}_{aa} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right] = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{z}_{ab} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{2.5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.8515i$$

$$\hat{z}_{ac} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{4.5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7802i$$

$$\hat{z}_{ba} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{4.5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.8515i$$

$$\hat{z}_{bb} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right] = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{z}_{bc} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{7} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7266i$$

$$\hat{z}_{ca} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{4.5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7802i$$

$$\hat{z}_{cb} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{7} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7266i$$

$$\hat{z}_{cc} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right] = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{z}_{an} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{4.272} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7865i$$

$$\hat{z}_{bn} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{5.6569} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7524i$$

$$\hat{z}_{cn} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7674i$$

$$\hat{z}_{nn} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right] = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{z}_{na} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{4.272} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7865i$$

$$\hat{z}_{nb} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{5.6569} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7524i$$

$$\hat{z}_{nc} = 0.09530 + j0.12134 * \left[\ln \frac{1}{5} + 7.93402 \right] = 0.0953 + 0.7674i$$



Ahora se forma la matriz de impedancias primitiva.

$$\mathbf{z}_{primitiva} = \begin{bmatrix} 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.8515i & 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7865i \\ 0.0953 + 0.8515i & 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.7266i & 0.0953 + 0.7524i \\ 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7266i & 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.7674i \\ 0.0953 + 0.7865i & 0.0953 + 0.7524i & 0.0953 + 0.7674i & 1.2153 + 1.6195i \end{bmatrix} \Omega/milla$$

La matriz de impedancias primitiva se puede expresar como:

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.8515i & 0.0953 + 0.7802i \\ 0.0953 + 0.8515i & 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.7266i \\ 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7266i & 1.2153 + 1.6195i \end{bmatrix} \Omega/milla$$

$$[Z_{in}] = \begin{bmatrix} 0.0953 + 0.7865i \\ 0.0953 + 0.7524i \\ 0.0953 + 0.7674i \end{bmatrix} \Omega/milla$$

$$[Z_{nn}] = [1.2153 + 1.6195i] \Omega/milla$$

$$[Z_{nj}] = [0.0953 + 0.7865i \quad 0.0953 + 0.7524i \quad 0.0953 + 0.7674i] \Omega/milla$$

Se realiza la reducción de Kron para obtener la matriz de impedancias de fase:

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} 1.3368 + 1.3343i & 0.2101 + 0.5779i & 0.2130 + 0.5015i \\ 0.2101 + 0.5779i & 1.3238 + 1.3569i & 0.2066 + 0.4591i \\ 0.2130 + 0.5015i & 0.2066 + 0.4591i & 1.3294 + 1.3471i \end{bmatrix} \Omega/milla$$

A continuación se realiza el cálculo de la matriz de admitancias, considerando las siguientes características del conductor:

Fase: 1/0 ACSR

Neutro: 1/0 ACSR

De la tabla de conductores, tenemos que un conductor de 1/0 ACSR tiene un diámetro de 0.398 pulgadas lo cual equivale 0.01658 pies. Se toma la misma configuración de los conductores que se muestra en la figura 5.1

Ahora se calcula la matriz de distancias entre los conductores y sus imágenes. La matriz de distancias es:



$$S = \begin{bmatrix} 56 & 56.0557 & 56.1805 & 52.0216 \\ 56.0557 & 56 & 56.4358 & 52.1536 \\ 56.1805 & 56.4358 & 56 & 52.0864 \\ 52.0216 & 52.1536 & 52.0864 & 48 \end{bmatrix}$$

Se calcula la matriz primitiva de coeficientes de potencial.

$$\hat{P}_{ii} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{ij} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ii}}{D_{ij}} \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{aa} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56}{0.01658} \right) = 90.8112 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{ab} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.0557}{2.5} \right) = 34.7607 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{ac} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.1806}{4.5} \right) = 28.2160 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{ba} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.0557}{2.5} \right) = 34.7607 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{bb} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56}{0.01658} \right) = 90.8112 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{bc} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.4358}{7} \right) = 23.3283 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{ca} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.1806}{4.5} \right) = 28.2160 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{cb} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56.4358}{7} \right) = 23.3283 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{cc} = 11.17689 * \ln \left(\frac{56}{0.01658} \right) = 90.8112 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{an} = 11.17689 * \ln \left(\frac{52.0216}{4.272} \right) = 27.9375 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{bn} = 11.17689 * \ln \left(\frac{52.1536}{5.6568} \right) = 24.8276 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{cn} = 11.17689 * \ln \left(\frac{52.0864}{5} \right) = 26.1927 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{nn} = 11.17689 * \ln \left(\frac{48}{0.01658} \right) = 89.0883 \text{ milla}/\mu F$$



$$\hat{P}_{na} = 11.17689 * \ln\left(\frac{52.0216}{4.272}\right) = 27.9375 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{nb} = 11.17689 * \ln\left(\frac{52.1536}{5.6568}\right) = 24.8276 \text{ milla}/\mu F$$

$$\hat{P}_{nc} = 11.17689 * \ln\left(\frac{52.0864}{5}\right) = 26.1927 \text{ milla}/\mu F$$

La matriz primitiva de coeficientes de potencial es:

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 90.8112 & 34.7607 & 28.2160 & 27.9375 \\ 34.7607 & 90.8112 & 23.3283 & 24.8276 \\ 28.2160 & 23.3283 & 90.8112 & 26.1927 \\ 27.9375 & 24.8276 & 26.1927 & 89.0883 \end{bmatrix} \text{ milla}/\mu F$$

Se realiza la reducción de Kron a la matriz de coeficientes de potencial de fase.

$$[P_{abc}] = \begin{bmatrix} 82.0502 & 26.9750 & 20.0021 \\ 26.9750 & 83.8921 & 16.0288 \\ 20.0021 & 16.0288 & 83.1104 \end{bmatrix}$$

Ahora se obtiene la matriz de capacitancias en derivación, esto invirtiendo la matriz primitiva de coeficientes de potencial.

$$[C_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.0142 & -0.0041 & -0.0026 \\ -0.0041 & 0.0135 & -0.0016 \\ -0.0026 & -0.0016 & 0.0130 \end{bmatrix}$$

Finalmente, la matriz de admitancia en derivación trifásica es:

$$Y_{abc} = i * (376.991) * [C_{abc}] = \begin{bmatrix} 5.3381i & -1.5273i & -0.9902i \\ -1.5273i & 5.1026i & -0.6165i \\ -0.9902i & -0.6165i & 4.8932i \end{bmatrix} \mu S / \text{milla}$$