



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

**"ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE EN  
REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN".**

**TESIS**

Que para obtener el grado de  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**  
CON OPCIÓN TERMINAL EN  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

**ING. OMAR MACUILT RAMÍREZ**

Asesor de tesis:

**DR. ERIC MORALES AGUILAR**

Puebla, Pue.

Mayo 2016



# Oficio de autorización de tesis.



"60 Aniversario de la Autonomía Universitaria"

Oficio D/0585/2016

**C. Omar Macuilt Ramírez**  
Alumno de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en  
Sistemas Eléctricos de Potencia

Presente:

En respuesta a su solicitud con fecha 4 de febrero del año en curso, le comunico que se le autoriza el cambio del título de su tema de tesis: "Análisis de flujos en redes de distribución", por el tema denominado: **"Análisis de flujo de corriente en redes eléctricas de distribución"**.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

Atentamente

**"Pensar bien, para vivir mejor"**

H. Puebla de 2 a 04 de febrero de 2016

M.I. Edgar Isaac Villagrán Arroyo  
Director

C.c.p M.I. Genaro Campos Castillo/Coordinador de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia  
C.c.p Archivo  
M.I.EIVA/abs

Facultad  
de Ingeniería

Bvld. Valsequillo y Av. San Claudio  
s/n, edif. 108 C, Col. San Manuel,  
Ciudad Universitaria,  
Puebla, Pue. C.P. 72570  
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

# Acta resolutive de impresión de tesis.

Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

**M. I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO**  
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE  
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA  
P R E S E N T E

El suscrito, **Dr. ERIC MORALES AGUILAR**, Asesor del Tema de Tesis denominado: **"ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE EN REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN"**, presentado por el **C. OMAR MACUILT RAMÍREZ**, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia y en atención al oficio D/0585/2016, de fecha 4 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, contándome como participante, 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., 18 de Febrero de 2016



**Dr. ERIC MORALES AGUILAR**  
ASESOR

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

**Primero que todo darle las gracias a Dios por ser mi guía, gracias a mi asesor el Doctor Eric Morales por su paciencia y valioso apoyo para concluir este trabajo, a mi familia que están siempre conmigo, a mis amigos por su valiosa amistad y a todos los docentes que han formado parte de mi formación académica.**

*“Que no se te ocurra pensar: “He alcanzado esta prosperidad gracias a mi esfuerzo y mis propios medios”. Recuerda que ha sido el Señor tu Dios quien te ha dado las fuerzas para obtener esta prosperidad; así ha confirmado hoy la alianza que juró a tus antepasados.”*

*Deuteronomio 8, 17-18*

# Contenido

Índice de figuras.....	III
Índice de tablas.....	IV
Glosario de términos.....	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT.....	VI
CAPÍTULO I. Introducción.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Justificación.....	2
1.4 Estado del arte.....	2
1.5 Estructura del trabajo de tesis.....	3
CAPÍTULO II. Redes eléctricas de distribución y sus componentes.....	5
2.1 Introducción a las redes eléctricas de distribución.....	5
2.2 Subestaciones de distribución.....	5
2.3 Alimentadores de distribución.....	6
2.4 Conductores para líneas aéreas de distribución.....	9
2.5 Impedancias de conductores de líneas de distribución.....	10
2.5.1 Líneas de distribución no transpuestas.....	11
2.5.2 Ecuaciones modificadas de Carson.....	12
2.5.3 Matriz de impedancias de fase para líneas aéreas.....	14
2.6 Admitancia en derivación de líneas.....	16
2.7 Voltajes y corrientes en redes de distribución.....	19
2.8 Modelado de cargas.....	22
CAPÍTULO III. Barrido progresivo-regresivo.....	24
3.1 Introducción.....	24

3.2 Técnica de Barrido.....	24
3.3 Barrido regresivo.....	26
3.4 Barrido progresivo.....	27
CAPÍTULO IV. Aplicación y ejemplos de Barrido progresivo-regresivo. ....	29
4.1 Red monofásica de 3 nodos. ....	29
4.2 Aplicación en Red de 8 nodos.....	32
4.3 Aplicación en red de 32 nodos. ....	37
CONCLUSIONES. ....	53
TRABAJO PUBLICADO.....	53
TRABAJO FUTURO.....	54
BIBLIOGRAFIA. ....	54
Apéndice A. ....	56
Apéndice B. ....	61
Apéndice C. ....	65

# Índice de figuras.

## Capítulo II

Figura 2.1	Subestación de distribución.	6
Figura 2.2	Trayectoria de alimentador de distribución.	7
Figura 2.3	Trayectoria de alimentador con sus elementos	8
Figura 2.4	Topología radial.	9
Figura 2.5	Topología mallada.	9
Figura 2.6	Conductor ACSR.	10
Figura 2.7	Campos magnéticos.	11
Figura 2.8	Conductores e imágenes.	13
Figura 2.9	Segmento de línea de cuatro hilos en estrella aterrizada.	14
Figura 2.10	Impedancia serie de un conductor de tres fases.	16
Figura 2.11	Segmento de línea trifásico.	19
Figura 2.12	Inyección de corriente por fase en un bus i.	22
Figura 2.13	Carga trifásica.	23

## Capítulo III

Figura 3.1	Numeración de nodos para una red radial de 57 nodos.	25
Figura 3.2	Diagrama de flujo de barrido progresivo-regresivo.	26
Figura 3.3	Direcciones de referencia para la técnica de barrido.	27

## Capítulo IV

Figura 4.1	Red monofásica de 3 nodos.	29
Figura 4.2	Sistema de distribución de 8 nodos.	32
Figura 4.3	Voltajes calculados a lo largo de la red de la figura 4.2.	34
Figura 4.4	Voltajes y corrientes en red de 8 nodos.	36
Figura 4.5	Sistema de distribución de 34 nodos.	37
Figura 4.6	Estructura ID-500.	37
Figura 4.7	Estructura ID-510.	38
Figura 4.8	Sistema de distribución de 34 nodos dividido en capas.	41

Figura 4.9	Voltajes calculados a lo largo de la red de la figura 4.5.	45
Figura 4.10	Voltajes en la fase a de la red de 34 nodos.	46
Figura 4.11	Voltajes en la fase b de la red de 34 nodos.	47
Figura 4.12	Voltajes en la fase c de la red de 34 nodos.	48
Figura 4.13	Corrientes de la fase a de la red de 34 nodos.	50
Figura 4.14	Corrientes de la fase b de la red de 34 nodos.	51
Figura 4.15	Corrientes de la fase c de la red de 34 nodos.	52

#### Apéndice A

Figura A.1	Configuración de conductores.	56
------------	-------------------------------	----

## Índice de tablas.

Tabla 4.1	Resultados calculados en la red de 3 nodos.	31
Tabla 4.2	Cargas en nodos de la red de la figura 4.2.	33
Tabla 4.3	Voltajes calculados en red de 8 nodos.	33
Tabla 4.4	Corrientes calculadas en segmentos de línea de red de 8 nodos.	36
Tabla 4.5	Corrientes calculadas en nodos de la red de 8 nodos.	35
Tabla 4.6	Características de la red de 34 nodos.	40
Tabla 4.7	Cargas en nodos de la red de la figura 4.5.	42
Tabla 4.8	Voltajes calculados en la red de 34 nodos.	44
Tabla 4.9	Corrientes calculadas en red de 34 nodos.	49

## Glosario de términos.

$kV$ : Kilovoltios.

$R$ : Restaurador.

$L$ : Inductancia.

$Ft$ : Pies

$\hat{Z}_{ii}$  Impedancia propia del conductor. ( $\Omega/milla$ )

$\hat{Z}_{ij}$  Impedancia mutua entre conductores  $i$  y  $j$ . ( $\Omega/milla$ )

$r_i$  Resistencia del conductor  $i$ . ( $\Omega/milla$ )

$\omega = 2\pi f$  Frecuencia angular del sistema. (rad / seg.)

$G = 0.1609347 \times 10^{-3} \Omega/milla$

$RD_i$  Radio del conductor  $i$ . (ft)

$GMR_i$  Radio medio geométrico del conductor  $i$ . (ft)

$f$  Frecuencia del sistema. (Hz)

$\rho$  Resistividad de la tierra ( $\Omega - m$ )

$D_{ij}$  Resistencia entre los conductores  $i$  y  $j$ . (ft)

$S_{ij}$  Distancia entre el conductor  $i$  y la imagen  $j$ . (ft)

$\theta_{ij}$  Ángulo entre el par de líneas dibujadas del conductor  $i$  a su propia imagen y a la imagen del conductor  $j$ .

## **RESUMEN**

En este trabajo de tesis se expone la técnica de Barrido Progresivo - Regresivo (BPR) para encontrar el estado de la red. Primeramente se estudia y comprende la función, interacción, e importancia de todos los elementos en una red de distribución eléctrica. Después se estudia la técnica de BPR para ser empleada en la solución de flujos de corriente en redes de distribución. Por último se obtienen resultados numéricos de la aplicación de la técnica de BPR en tres redes de distribución de 3, 8 y 34 nodos.

## **ABSTRACT**

In this thesis work is shown the backward-forward sweep (BFS) technique to find the network state. First it is studied and understood the function, interaction and importance of all elements in a electric distribution network. After it is studied the BFS technique for be used in the flows solution of current in distribution networks. Finally it is obtained numerical results of the application of the BFS technique in three distribution networks of 3, 8 and 34 nodes.

# **CAPÍTULO I. Introducción.**

El estudio de flujos de potencia en redes eléctricas de distribución nos permite conocer los voltajes y ángulos de fase en distintos nodos.

Los análisis de flujos de potencia se han realizado en gran parte para sistemas de transmisión con métodos iterativos, con el uso de la programación se han desarrollado métodos iterativos para la solución de flujos de potencia en redes eléctricas de distribución.

Estos estudios en redes eléctricas de distribución facilitan la planeación y crecimiento de redes eléctricas, una mejor operación y toma de decisiones acertadas cuando se presentan contingencias, así como tomar decisiones sobre reconfiguraciones en redes para mantener niveles de voltaje permitidos.

## **1.1 Objetivo general.**

Realizar el análisis de flujos de potencia en redes eléctricas de distribución aplicando el método de barrido progresivo-regresivo para la obtención de los voltajes y ángulos de fase en cada uno de los nodos, en un ambiente de programación MATLAB [1]. Se presenta en un esquema de solución trifásica.

## **1.2 Objetivos específicos.**

- Estudiar y comprender la función, interacción, e importancia de todos los elementos en una red de distribución eléctrica.
- Estudiar la técnica de barrido progresivo – regresivo empleada en la solución de flujos de corriente en redes de distribución.
- Obtener resultados numéricos de la aplicación de la técnica de barrido progresivo regresivo en redes de distribución.

- Realizar las conclusiones obtenidas de la realización de este trabajo de tesis.

### **1.3 Justificación.**

El interés de las compañías suministradoras de energía eléctrica por realizar estudios del sistema eléctrico para vigilar que se cumpla con los niveles adecuados de voltaje en los diferentes nodos de las redes de distribución permite que se realicen estudios de flujos de potencia.

Los estudios de flujos de potencia son importantes para la operación y la planificación del crecimiento de las redes de distribución. En cuanto a la operación se hace referencia a que en caso de que la configuración de la red de distribución cambie por mantenimiento de elementos de la red, los niveles de voltaje deben permanecer en valores aceptables en los diferentes nodos, esto para poder suministrar energía a los usuarios sin que tengan problemas en el funcionamiento de sus equipos, electrodomésticos, maquinaria, iluminación, etc.

Los estudios también permiten determinar si se tienen niveles de voltaje aceptables en los diferentes nodos de las redes de distribución ante el crecimiento de las redes de distribución y las crecientes demandas de energía.

Debido a la naturaleza que se tiene en los sistemas de distribución, los programas convencionales que se emplean para la solución de flujos de potencia en sistemas de transmisión no son los adecuados para redes de distribución. El uso de métodos iterativos y los beneficios de la programación han permitido que se realicen estudios de flujos de potencia con soluciones eficientes.

### **1.4 Estado del arte.**

Los métodos para estudios de flujos de potencia en redes de distribución son diferentes a los empleados en transmisión. La implementación del barrido progresivo regresivo permite conocer los voltajes, ángulos de fase y las corrientes de carga y rama en los diferentes nodos de una red de distribución.

El barrido progresivo – regresivo está basado en las leyes de corriente y voltaje de Kirchhoff, con este método se determinan los voltajes en los nodos y las corrientes en las ramas, con estos valores se realiza la solución de flujos de potencia de las redes de distribución

En el año de 1988 se presenta un artículo en el cual se muestra un algoritmo llamado de barrido para la solución de flujos en redes radiales y débilmente malladas, este artículo fue presentado por Shirmohammadi [2].

Las redes de distribución presentan una topología radial, para el barrido progresivo regresivo se requiere modelar las impedancias y admitancias de los conductores de la red, las cargas, transformadores, reguladores etc. Éste método realiza barridos hacia adelante para determinar voltajes y barridos hacia atrás para determinar corrientes.

## **1.5 Estructura del trabajo de tesis.**

En esta sección se describe de manera breve cada uno de los capítulos presentados en este trabajo.

Capítulo 1: Se muestra la introducción sobre la importancia de estudios de flujos de potencia, se mencionan el objetivo general y objetivos específicos, la justificación del trabajo de tesis, el estado del arte y una descripción de desarrollo del trabajo de tesis.

Capítulo 2: Se describe de forma breve el funcionamiento de las redes de distribución, el procedimiento y modelado para la obtención de la matriz de impedancias y admitancias, modelado de cargas.

Capítulo 3: Se describe la metodología para la aplicación del barrido progresivo-regresivo.

Capítulo 4: Se muestran el procedimiento de barrido progresivo regresivo para las redes de 3 nodos, 8 nodos y 34 nodos, así como los resultados obtenidos de la solución de flujos de potencia.

# **CAPÍTULO II. Redes eléctricas de distribución y sus componentes.**

En este capítulo se expone la importancia de las redes de distribución en el proceso de suministrar energía eléctrica desde los puntos de generación hasta los lugares de consumo.

## **2.1 Introducción a las redes eléctricas de distribución.**

La función principal de las redes eléctricas de distribución es suministrar energía a los usuarios que no requieren servicios de energía eléctrica con valores de voltaje iguales a los de transmisión o sub transmisión, generalmente son las grandes empresas las que requieren voltajes altos, los usuarios domésticos, medianas y pequeñas empresas requieren suministro de energía con valores de voltaje de redes de distribución. Existen diversos niveles de tensión en las redes eléctricas de distribución, las tensiones normalizadas son: 4160 V, 13800 V, 23000 V y 34500 V [3].

## **2.2 Subestaciones de distribución.**

Las redes eléctricas de distribución inician con una subestación eléctrica energizada por una o más líneas de transmisión o sub transmisión. Estas líneas energizan a un bus que a su vez energiza el lado primario del transformador para poder reducir los niveles de voltaje en el lado secundario. El lado secundario del transformador energiza otro bus el cual a su vez energiza a uno o más alimentadores, el alimentador inicia con el interruptor conectado al bus del lado secundario del transformador. Otros componentes de la subestación son las protecciones que tienen como función principal aislar los daños tanto como se pueda para evitar interrupciones en el suministro de energía eléctrica, por ejemplo si se afectan las líneas de subtransmisión que energizan a una subestación de

distribución también se afectarían a los alimentadores y a diversos usuarios dependiendo de las demandas de cada uno de los alimentadores. En la figura 2.1 se muestra el diagrama unifilar de una subestación de distribución energizada por dos líneas de distribución. La subestación cuenta con interruptores del lado alta y media tensión del transformador así como con tres alimentadores.

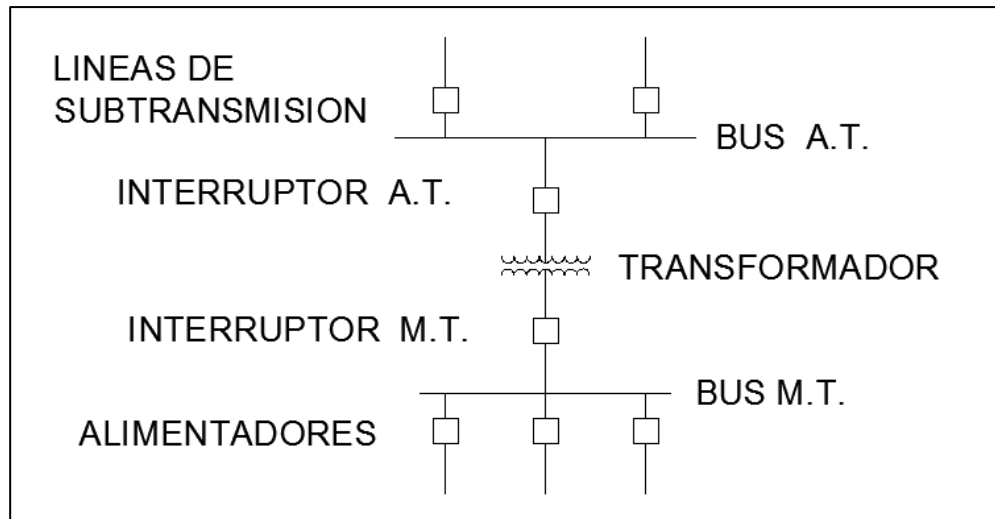


Figura 2.1.- Subestación de distribución.

### 2.3 Alimentadores de distribución.

Los alimentadores tienen una trayectoria por medio de cables a lo largo de las ciudades a través de un lugar (las calles de las ciudades, pueblos, carreteras, veredas, etc.) Las redes eléctricas de distribución empiezan en la subestación con tres fases, sin embargo conforme a las necesidades las trayectorias en algunas partes pueden ser de dos fases o una fase.

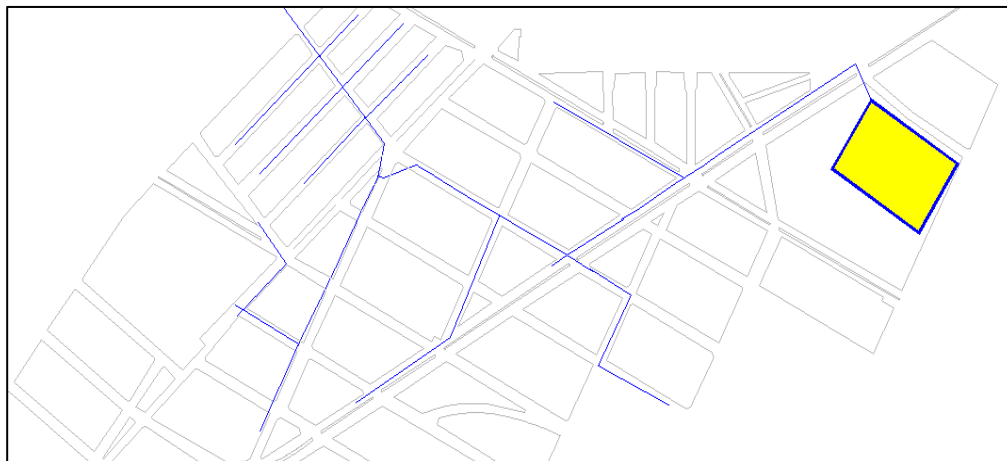


Figura 2.2.- Trayectoria de alimentador de distribución.

En la figura 2.2 se muestra la trayectoria de un alimentador de distribución, el cuadro amarillo es la subestación eléctrica, y la línea en color azul representan a los conductores a través de las calles de una ciudad, el número de fases varía de acuerdo a las necesidades de los usuarios.

A través de la trayectoria del alimentador se tienen diferentes tipos de elementos como: estructuras, postes, aislamiento, transformadores, bancos de capacitores, reguladores de voltaje, calibres de conductores dependiendo de la demanda de energía, protecciones como fusibles, restauradores, etc. Cada alimentador también tiene su propio interruptor, este en conjunto con los esquemas de protecciones permite que en caso de un daño en elementos de la red como apartarrayos, conductores, aislamientos, etc. el alimentador se desenergice para no causar operación en el interruptor lado de media tensión del transformador y se provoque una interrupción de energía en otros alimentadores.

En la figura 2.3 se presentan elementos que componen las redes eléctricas de distribución.

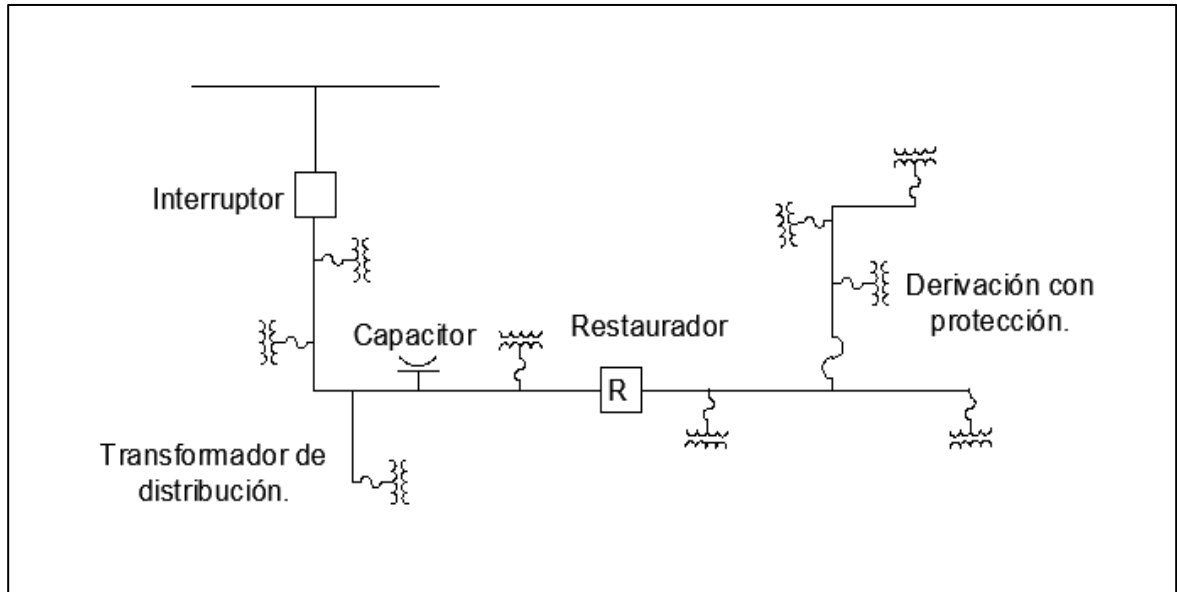


Figura 2.3.- Trayectoria de alimentador con sus elementos.

La topología de la red de distribución dependerá del diseño, esta se puede clasificar por radial o en anillo.

La topología radial se caracteriza porque sólo cuenta con una trayectoria desde la fuente, en este caso la subestación, hasta la carga o usuarios. Comparando con la red de transmisión, en la red de distribución se presentan mayores interrupciones debido a fallas transitorias o permanentes, esto debido a que la mayoría de los alimentadores son de topología radial.

Actualmente se trabaja para evitar tiempos de interrupción de energía prolongados, se toman acciones como la instalación de cuchillas de enlace o interruptores telecontrolados que pueden ser manipulados desde los centros de control cuando una falla se ha seccionado lo mayor posible en una red de distribución.

La causa por la cual se prefiere el sistema radial se debe a que es más económico, simple de operar, diseñar y planear. En la figura 2.4 se muestra una red radial.

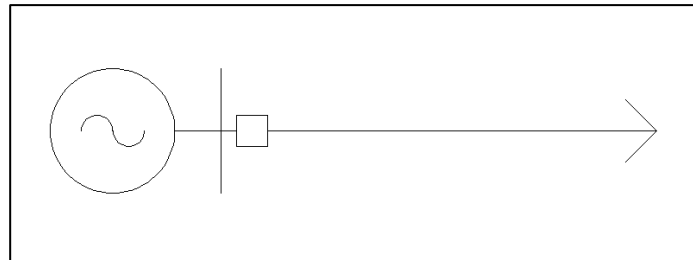


Figura 2.4.- Topología radial.

La topología anillada cuenta con dos fuentes, por lo tanto tiene dos trayectorias entre la subestación y la carga, la mayor desventaja del sistema en anillo son los altos costos. En la figura 2.5 se muestra la topología mallada.

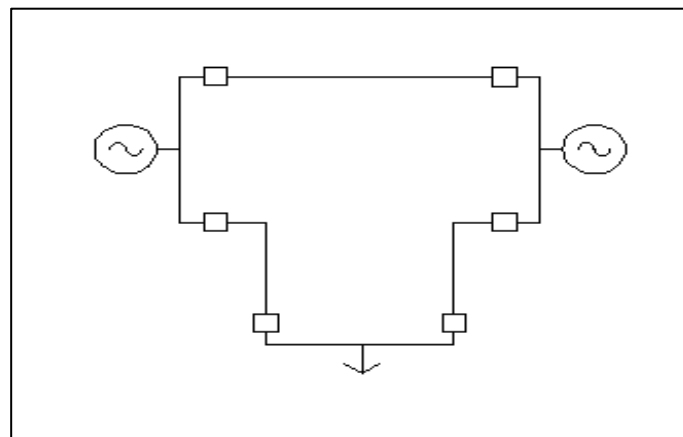


Figura 2.5.- Topología mallada.

## 2.4 Conductores para líneas aéreas de distribución.

Los conductores más usados en los sistemas de distribución son el cobre y el aluminio [4]. Las nomenclaturas con las cuales se identifican los diferentes tipos de conductores de aluminio son las siguientes:

ACAR conductores de aluminio con alma de aleación.

AAC todos los conductores de aluminio.

AAAC todos los conductores de aleación de aluminio.

ACSR conductores de aluminio con alma de acero.

El conductor ACSR tiene una parte central de hilos de acero rodeada por hilos de aluminio. En la figura 2.6 se muestra un conductor ACSR con 7 hilos de acero que forma el núcleo y 24 hilos de aluminio en dos capas externas.

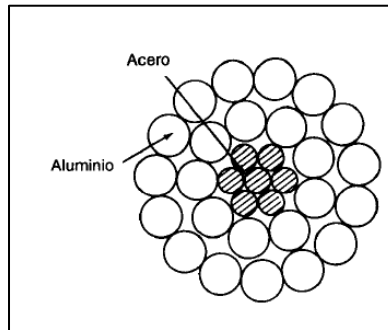


Figura 2.6.- Conductor ACSR [5].

## 2.5 Impedancias de conductores de líneas de distribución.

La impedancia de los conductores está formada por una parte real y una parte imaginaria como se muestra en la ecuación 2.1.

$$Z = R + jX \quad (2.1)$$

La parte real corresponde a la resistencia propia del conductor  $i$ , la cual es tomada de la tabla de datos de conductores y la parte imaginaria corresponde a la inductancia mutua entre el conductor  $i$  y los otros conductores [6]. En la figura 2.7 se muestra el conductor  $i$  y los flujos magnéticos en cada uno de los conductores  $n$ .

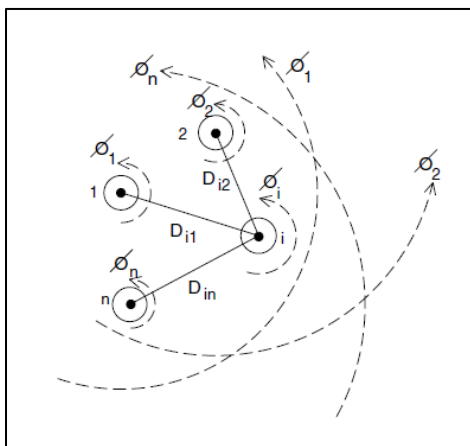


Figura 2.7.- Campos Magnéticos [6].

Por definición:

Inductancia propia:

$$L_{ii} = \frac{\lambda_{ii}}{I_i} = 2 * 10^{-7} * Ln \frac{1}{GMR_i} \text{ H/m} \quad (2.2)$$

Inductancia mutua:

$$L_{in} = \frac{\lambda_{in}}{I_n} = 2 * 10^{-7} * Ln \frac{1}{D_{in}} \text{ H/m} \quad (2.3)$$

Las líneas de flujo magnético forman lazos cerrados que enlazan el circuito, la variación de la corriente en los conductores produce un cambio en el número de líneas del flujo magnético que enlazan al circuito.

### 2.5.1 Líneas de distribución no transpuestas.

La resistencia de conductores de líneas de distribución es obtenida de forma directa en una tabla de datos de conductores ya establecida. Las ecuaciones 2.2 y 2.3 son empleadas para calcular las reactancias inductivas propias y mutuas de los conductores. Se considera la reactancia inductiva a una frecuencia de 60 Hz y una longitud del conductor de una milla. Considerando lo anterior, las impedancias propias y mutuas están dadas por las ecuaciones 2.4 y 2.5:

$$\bar{Z}_{ii} = r_i + j0.12134 * \ln \frac{1}{GMR_i} \Omega/\text{milla} \quad (2.4)$$

$$\bar{Z}_{ij} = j0.12134 * \ln \frac{1}{D_{ij}} \Omega/\text{milla} \quad (2.5)$$

### 2.5.2 Ecuaciones modificadas de Carson.

En el año de 1926, Jhon Carson publicó un artículo [7] en el cual explica el desarrollo de un conjunto de ecuaciones para calcular las impedancias propias y mutuas de líneas, tomando en cuenta el camino de retorno de la corriente a través de la tierra. La impedancia propia primitiva está dada por la ecuación 2.6:

$$\hat{Z}_{ii} = r_d + r_i + j0.12134 * \left[ \ln \frac{1}{GMR_i} + \ln \frac{D_{id} * D_{dj}}{GMR_d} \right] \quad (2.6)$$

La impedancia mutua primitiva está dada por:

$$\hat{Z}_{ij} = r_d + j0.12134 * \left[ \ln \frac{1}{D_{ij}} + \ln \frac{D_{dj} * D_{id}}{GMR_d} \right] \quad (2.7)$$

Existen tres factores que impiden el uso de las ecuaciones 2.6 y 2.7:

1. No se conocen los valores de la resistencia de tierra ( $r_d$ ).
2. No se conoce el radio medio geométrico de tierra ( $GMR_d$ ).
3. No se conocen las distancias de los conductores a tierra ( $D_{nd}, D_{dn}, D_{md}, D_{dm}$ ).

Jhon Carson da una solución a los factores anteriores en el artículo publicado en 1926. Carson explica la implementación de una técnica con la cual se puede determinar las impedancias propia y mutua para un número arbitrario de conductores aéreos.

En el artículo Carson se asume que la tierra es infinita, sólida uniforme, con una superficie superior uniforme plana y una resistividad constante. Carson uso las imágenes de los conductores; eso es, cada conductor en una distancia dada sobre la tierra tiene un conductor imagen en la misma distancia debajo de la tierra, lo anterior se muestra en la figura 2.8 [6].

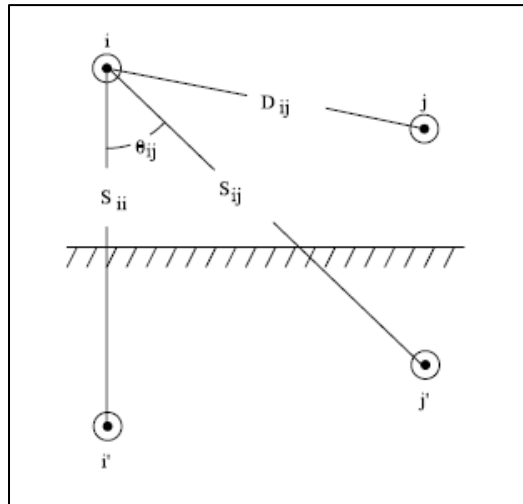


Figura 2.8.- Conductores e imágenes.

Las ecuaciones originales de Carson, referidas a la figura anterior, están dadas por:

Impedancia propia:

$$\hat{Z}_{ii} = r_{ii} + 4\omega P_{ii}G + j \left( X_i + 2\omega G * \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right) \Omega/milla \quad (2.8)$$

Impedancia mutua:

$$\hat{Z}_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left( 2\omega G * \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right) \Omega/milla \quad (2.9)$$

En donde:

$\hat{Z}_{ii}$  es la impedancia propia del conductor. ( $\Omega/milla$ )

$\hat{Z}_{ij}$  es la impedancia mutua entre conductores i y j. ( $\Omega/milla$ )

$r_i$  es la resistencia del conductor i. ( $\Omega/milla$ )

$\omega = 2\pi f$  es la frecuencia angular del sistema. (rad / seg.)

$$G = 0.1609347 \times 10^{-3} \Omega/\text{milla}$$

$RD_i$  es el radio del conductor i. (ft)

$GMR_i$  es el radio medio geométrico del conductor i. (ft)

$f$  es la frecuencia del sistema. (Hz)

$\rho$  es la resistividad de la tierra ( $\Omega - m$ )

$D_{ij}$  es la resistencia entre los conductores i y j. (ft)

$S_{ij}$  es la distancia entre el conductor i y la imagen j. (ft)

$\theta_{ij}$  es el ángulo entre el par de líneas dibujadas del conductor i a su propia imagen y a la imagen del conductor j.

Usando las aproximaciones y consideraciones, las ecuaciones modificadas de Carson son:

$$\hat{Z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right) (\Omega/\text{milla}) \quad (2.10)$$

$$\hat{Z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) (\Omega/\text{milla}) \quad (2.11)$$

Las ecuaciones modificadas de Carson se emplearan para calcular las impedancias primitivas propias y mutuas de líneas aéreas y subterráneas.

### 2.5.3 Matriz de impedancias de fase para líneas aéreas.

Un segmento de línea de distribución de cuatro hilos en estrella aterrizada, como se muestra en la figura 2.9, resultara en una matriz de 4 x 4.

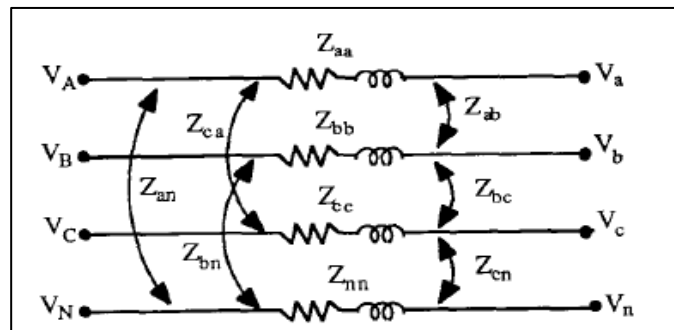


Figura 2.9.- Segmento de línea de cuatro hilos en estrella aterrizada [8].

Como ya se mencionó, el modelo de la figura anterior es expresado por una matriz de impedancias primitiva de 4 x 4, como se muestra en la ecuación 2.12, en donde la impedancia propia  $Z_{ii}$  y la impedancia mutua  $Z_{ij}$  son determinadas por la aplicación del método clásico de Carson [9].

$$[\hat{Z}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{Z}_{aa} & \hat{Z}_{ab} & \hat{Z}_{ac} & \hat{Z}_{an} \\ \hat{Z}_{ba} & \hat{Z}_{bb} & \hat{Z}_{bc} & \hat{Z}_{bn} \\ \hat{Z}_{ca} & \hat{Z}_{cb} & \hat{Z}_{cc} & \hat{Z}_{cn} \\ \hat{Z}_{na} & \hat{Z}_{nb} & \hat{Z}_{nc} & \hat{Z}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

La forma particionada de la ecuación 2.12 es 2.13:

$$[Z_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{Z}_{ij}] & [\hat{Z}_{in}] \\ [\hat{Z}_{nj}] & [\hat{Z}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Para mayores aplicaciones, la matriz de impedancias primitiva necesita ser reducida a una matriz de 3 x 3 que consista de las impedancias equivalentes propias y mutuas para las tres fases.

Un método estándar de reducción es la reducción de Kron. Después de la aplicación de la reducción de Kron a la matriz de impedancia primitiva, cada sección de línea puede ser representada por una matriz  $[Z_{abc}]$  de 3 x 3. En donde cada elemento es determinado por la ecuación 2.14.

$$[Z_{abc}] = [\hat{Z}_{ij}] - [\hat{Z}_{in}] * [\hat{Z}_{nn}]^{-1} * [\hat{Z}_{nj}] \quad (2.14)$$

La matriz de impedancia final  $[Z_{abc}]$  esta dada por la ecuación 2.15.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (\Omega/\text{milla}) \quad (2.15)$$

Después de aplicada la reducción de Kron, la representación equivalente se muestra en la figura 2.10.

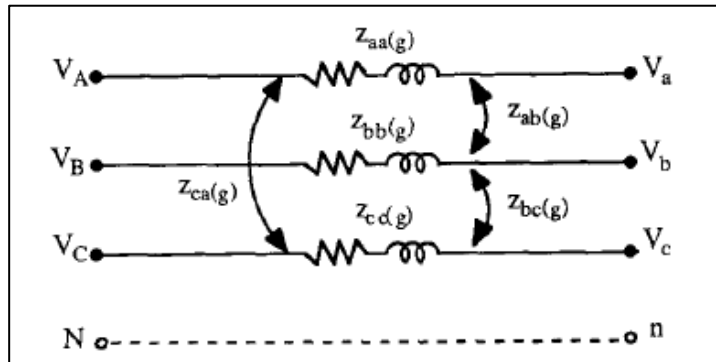


Figura 2.10.- Impedancia serie de un conductor de tres fases [5].

Para líneas de dos fases y tres fases de sistemas en estrella aterrizada, las ecuaciones modificadas de Carson pueden ser aplicadas para estos casos, lo cual conducirá a matrices iniciales de impedancias primitivas de 2 x 2 y 3 x 3. Por ejemplo, para una rama en donde se tienen dos fases, la matriz primitiva será de 2 x 2, esta matriz puede expandirse a una matriz de 3 x 3 sumando columnas y filas con valores de cero en las fases no existentes. En la ecuación 2.16 se da un ejemplo de la matriz de impedancias  $[Z_{abc}]$  en donde existen las fases a y c.

$$[Z_{abc}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & 0 & Z_{ac} \\ 0 & 0 & 0 \\ Z_{ca} & 0 & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (\Omega/\text{milla}) \quad (2.16)$$

## 2.6 Admitancia en derivación de líneas.

La admitancia en derivación de una línea consiste de una conductancia y una susceptancia capacitiva. La conductancia toma en cuenta las corrientes de fuga en los aisladores de las líneas aéreas y a través de los aislamientos de los cables. Generalmente, no se considera la conductancia entre conductores de una línea aérea porque la fuga en los aisladores llega a ser despreciable [5]. El efecto de la

conductancia en la admitancia es despreciable. La capacitancia en una línea es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores.

El método de conductores y sus imágenes se usa para el cálculo de la admitancia en derivación de líneas aéreas. Tomando consideraciones y aplicando ecuaciones a la figura 2.8 obtenemos la ecuación 2.17 que nos proporciona la caída de voltaje total entre el conductor i y su imagen.

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left( 2 * q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 2 * q_i \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right) \quad (2.17)$$

En donde:

$S_{ii}$  es la distancia del conductor i a la imagen i' (ft)

$S_{ij}$  es la distancia del conductor i a la imagen del conductor j (ft)

$D_{ij}$  es la distancia del conductor i al conductor j (ft)

$RD_i$  es el radio del conductor i en ft.

La caída de voltaje entre el conductor i y la tierra será la mitad de lo dado en la ecuación 2.17 y se muestra en la ecuación 2.18.

$$V_{ig} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left[ q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + q_i \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \right] \quad (2.18)$$

La ecuación 2.18 puede ser escrita en forma general como la ecuación 2.19:

$$V_{ig} = P_{ii} * q_i + P_{ij} * q_j \quad (2.19)$$

En donde  $P_{ii}$  y  $P_{ij}$  son los coeficientes de potencial propio y mutuo. Usando valores de permitividad [6], los coeficientes de potencial propio y mutuo son definidos por:

$$\hat{P}_{ii} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} \text{ Milla}/\mu\text{F} \quad (2.20)$$

$$\hat{P}_{ij} = 11.17689 * \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \text{ Milla}/\mu\text{F} \quad (2.20)$$

La matriz primitiva de coeficientes de potencial está definida por la ecuación 2.21.

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{aa} & \hat{P}_{ab} & \hat{P}_{ac} & \hat{P}_{an} \\ \hat{P}_{ba} & \hat{P}_{bb} & \hat{P}_{bc} & \hat{P}_{bn} \\ \hat{P}_{ca} & \hat{P}_{cb} & \hat{P}_{cc} & \hat{P}_{cn} \\ \hat{P}_{na} & \hat{P}_{nb} & \hat{P}_{nc} & \hat{P}_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

La forma reducida de 2.21 se muestra en 2.22.

$$[P_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{P}_{ij}] & [\hat{P}_{in}] \\ [\hat{P}_{nj}] & [\hat{P}_{nn}] \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

La matriz puede ser reducida usando el método de reducción de Kron a una matriz de coeficientes de potencial n fases x n fases, la matriz  $[P_{abc}]$  esta dada por 2.23:

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] * [\hat{P}_{nn}]^{-1} * [\hat{P}_{jn}] \quad (2.23)$$

La inversa de la matriz de coeficientes de potencial nos proporcionará la matriz de capacitancias  $[C_{abc}]$  de n fase x n fase.

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad (2.24)$$

La matriz de admitancias shunt está dada por la ecuación 2.25:

$$[Y_{abc}] = 0 + j * \omega * [C_{abc}] \mu\text{S}/\text{milla} \quad (2.25)$$

En donde:

$$\omega = 2 * \pi * f = 376.9911 \quad (2.26)$$

## 2.7 Voltajes y corrientes en redes de distribución.

Anteriormente se describió la obtención de la matriz de impedancias de fase y admitancias de fase, éstas serán importantes para poder modelar segmentos de líneas de distribución. Para este modelado es importante considerar el número de fases y las distancias entre conductores.

Para poder realizar el modelado de la línea de distribución nos apoyaremos de la figura 2.11 que muestra un modelo de línea trifásica aérea o subterránea con la representación de impedancias y admitancias totales.

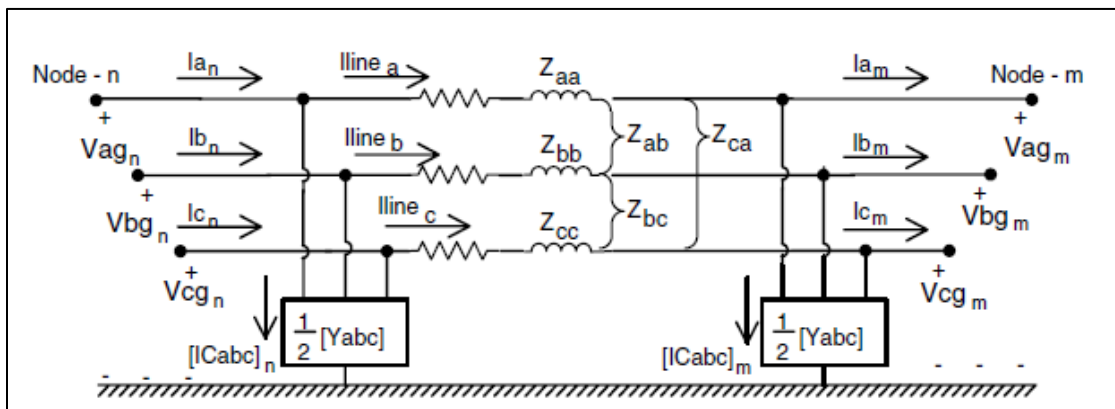


Figura 2.11.- Segmento de línea trifásico [6].

Cuando se aplica la ley de corrientes de Kirchoff para la figura 2.11 en el nodo m, se tiene la ecuación 2.27:

$$\begin{bmatrix} I_{line a} \\ I_{line b} \\ I_{line c} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m \quad (2.27)$$

La forma reducida de 2.27 es 2.28:

$$[Ilinea_{abc}]_n = [I_{abc}]_m + \frac{1}{2}[Y_{abc}][VLG_{abc}]_m \quad (2.28)$$

Cuando se aplica la ley de voltajes de Kirchhoff para la figura 2.11 en el modo m, se tienen la ecuación 2.29:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m + \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ilinea_a \\ Ilinea_b \\ Ilinea_c \end{bmatrix}_m \quad (2.29)$$

La forma reducida de 2.29 está dada por la ecuación 2.30:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}][Ilinea_{abc}]_m \quad (2.30)$$

Sustituyendo la ecuación 2.28 en 2.30 se obtiene la ecuación 2.31:

$$[VLG_{abc}]_n = [a][VLG_{abc}]_m + [b][I_{abc}]_m \quad (2.31)$$

En donde:

$$[a] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad (2.32)$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad (2.33)$$

$$[U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

La corriente de entrada en el nodo n para el segmento de línea en la figura 2.11 está dada por la expresión:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} I_{linea_a} \\ I_{linea_b} \\ I_{linea_c} \end{bmatrix}_m + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n \quad (2.35)$$

La forma reducida de la ecuación 2.36 es:

$$[I_{abc}]_n = [I_{linea_{abc}}]_m + \frac{1}{2} [Y_{abc}] [VLG_{abc}]_n \quad (2.36)$$

Sustituyendo la ecuación (2.28) y (2.31) en (2.36) y reduciendo términos se obtiene la ecuación (2.37):

$$[I_{abc}]_n = [c] [VLG_{abc}]_m + [d] [I_{abc}]_m \quad (2.37)$$

En donde:

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4} [Y_{abc}] [Z_{abc}] [Y_{abc}] \quad (2.38)$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2} [Z_{abc}] [Y_{abc}] \quad (2.39)$$

Para el método de barrido progresivo regresivo se obtendrán los valores de voltaje en el nodo m en función de los voltajes en el nodo n y las corrientes en el nodo m. La ecuación que emplearemos será:

$$[VLN_{abc}]_m = [A] [VLG_{abc}]_n - [B] [I_{abc}]_m \quad (2.40)$$

En donde:

$$[A] = [a]^{-1} \quad (2.41)$$

$$[B] = [a]^{-1}[b] \quad (2.42)$$

## 2.8 Modelado de cargas.

En las redes de distribución las cargas pueden ser trifásicas, bifásicas y monofásicas debido a lo anterior los voltajes y las corrientes son desbalanceados.

Las cargas pueden ser modeladas como conexión en Delta o conexión en Estrella. También pueden clasificarse en tres categorías dependiendo de las características de la carga: potencia constante, impedancia constante y corriente constante [10].

El método de  $Z_{bus}$  está basado en el principio de superposición aplicado a los voltajes en los buses del sistema, es considerado de dos diferentes contribuciones: la fuente de voltaje especificada y las inyecciones de corriente equivalente [11].

En la figura 2.12 se muestra la carga como inyección de corriente a una red de distribución [9].

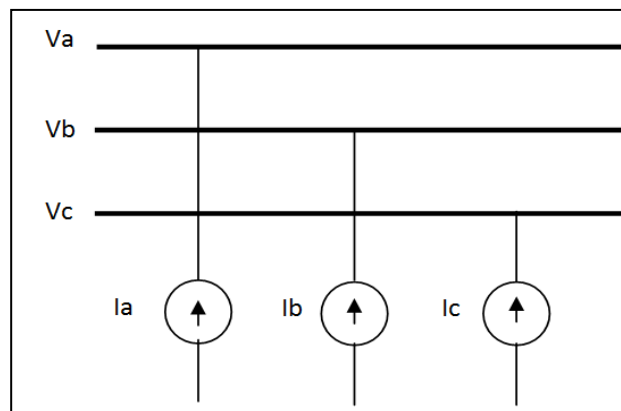


Figura 2.12.- Inyección de corriente por fase en un bus i.

La corriente de inyección en el bus está dada por 2.43:

$$I_i = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad (2.43)$$

En un bus  $i$  la potencia compleja  $S_i$  esta especificada por la ecuación 2.44 en donde  $P_i$  y  $Q_i$  es la potencia real y reactiva respectivamente.

$$S_i = (P_i + jQ_i) \quad (2.44)$$

La figura 2.13 muestra tres cargas monofásicas conectadas a una línea trifásica, modeladas como potencia constante.

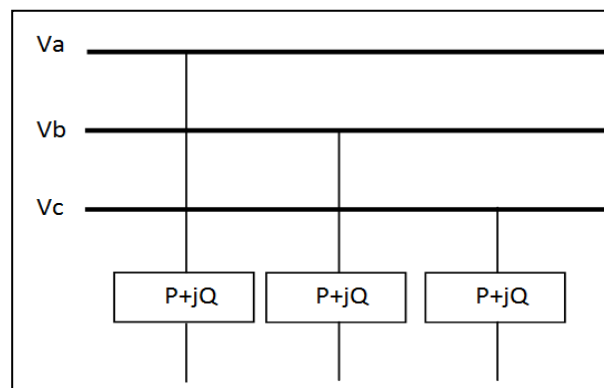


Figura 2.13.- Carga trifásica.

## **CAPÍTULO III. Barrido progresivo-regresivo.**

### **3.1 Introducción.**

Un alimentador en redes de distribución es usualmente desbalanceado debido a la existencia de diferentes tipos de cargas. Debido a la naturaleza de los sistemas de distribución, los programas convencionales de flujos de potencia usados en sistemas de transmisión no son los adecuados. Métodos como el de Newton Rapshon tiene que invertir la matriz Jacobiana la cual es muy dispersa en redes de distribución debido a su topología radial, y la solución de flujos de potencia por el método desacoplado rápido no se podría aplicar a redes de distribución por la alta relación  $R/X$  por otro lado el método de Gauss-Seidel ha demostrado ser ineficiente en soluciones de sistemas de potencia largos [2].

En 1988 Shirmohammadi presenta un artículo en el cual se muestra un algoritmo llamado de barrido para la solución de flujos en redes radiales y débilmente malladas [2]. El propósito es tener una red radial, esta red es solucionada con la aplicación directa de las leyes de voltaje y corriente de Kirchhoff. La solución de la red está basada en la inyección de corrientes en los nodos de la red radial [9]. Requiere pocas iteraciones para la solución de redes de distribución radiales.

### **3.2 Técnica de Barrido.**

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 [2]. La Fig. 3.1 muestra la numeración de una red radial de 57 nodos y sus capas.

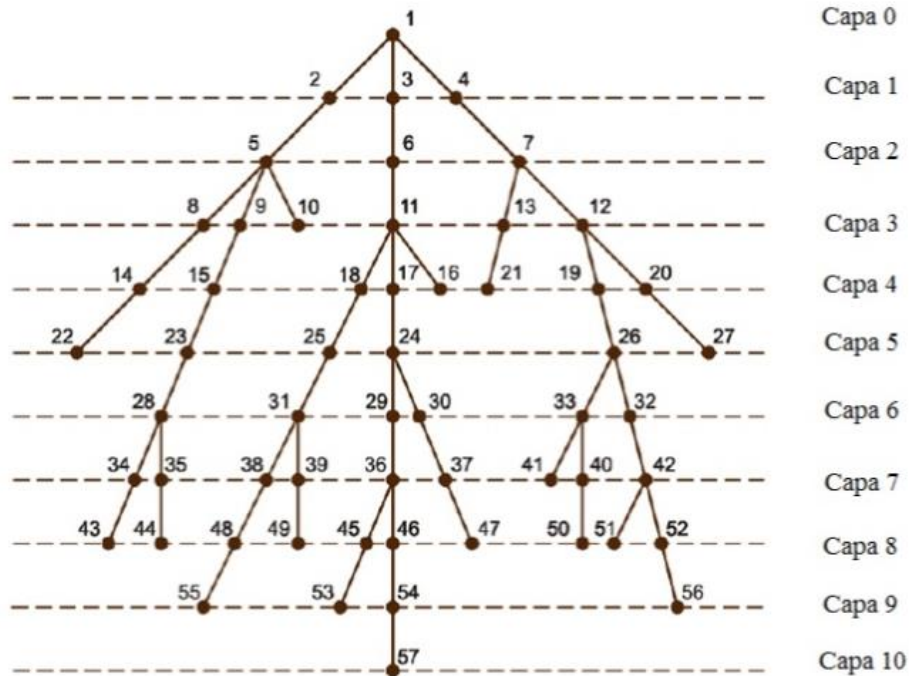


Fig. 3.1.- Numeración de nodos para una red radial de 57 nodos [2].

El nodo raíz será el compensador (barra bus infinito) con las magnitudes de voltajes y ángulos conocidos.

Una vez teniendo todos los datos iniciales, el algoritmo iterativo de barrido se divide en dos partes principales: barrido regresivo y barrido progresivo [2].

**Barrido progresivo:** El barrido progresivo se emplea para calcular los voltajes en los nodos, se empieza de la capa más cercana al nodo fuente hacia la capa más alejada del nodo fuente.

**Barrido regresivo:** El barrido regresivo se emplea para calcular las corrientes en las ramas, se empieza en la capa más alejada de la fuente hacia las ramas conectadas al nodo principal.

La convergencia será de terminada por la ecuación 3.1

$$\frac{|V_n| - |V_{n-1}|}{V_{nominal}} \leq \text{Tolerancia especificada} \quad (3.1)$$

La figura 3.2 muestra un diagrama de flujo sencillo que describe de forma breve la aplicación del barrido progresivo regresivo.

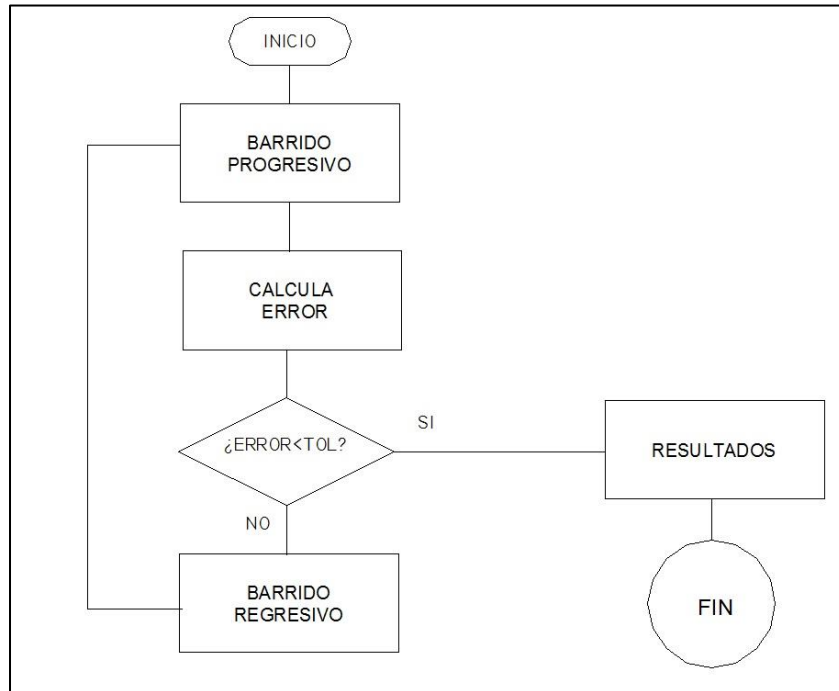


Figura 3.2.- Diagrama de flujo de barrido progresivo regresivo.

### 3.3 Barrido regresivo.

Considere dos buses en una capa determinada de una red radial, como se muestra en la figura 3.3, la corriente entrante en del bus en la izquierda  $I_m$ , es calculada a partir de las tensiones y corrientes desde el bus a la derecha ( $V_n$  e  $I_n$ ) como:

$$I_m = c_{mn}V_n + d_{mn}I_n \quad (3.2)$$

En donde:

$[c_{mn}]$  Representa una matriz 3x3, formada por  $Y+(1/4) \cdot Y \cdot Z \cdot Y$ , en la que Z y Y representan la impedancia serie y la admitancia en derivación de una línea de longitud media.

- [ $V_n$ ] Representa el voltaje en el nodo  $n$ .
- [ $d_{mn}$ ] Representa una matriz formada por  $U+(1/2) \cdot Z \cdot Y$ , en la que  $U$  representa una matriz identidad dada con respecto a las fases presentes en la línea.
- [ $I_m$ ] Representa la corriente entrante al nodo  $m$ , calculada con la siguiente ecuación

$$[I_{total}] = [I_{abc\ carga}] + \Sigma [I_{abc\ rama}] \quad (3.3)$$

En dónde:

- [ $I_{abc\ carga}$ ] Representa la corriente de carga en el nodo.
- $\Sigma [I_{abc\ rama}]$  Representa la sumatoria de corrientes de rama que entran al nodo.

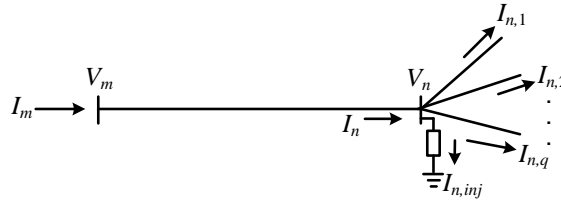


Figura 3.3.- Direcciones de referencia para la técnica de barrido.

### 3.4 Barrido progresivo

Basado en las direcciones de referencia de la figura 3.3, ahora las tensiones se calculan de izquierda a derecha como:

$$V_n = A_{mn} * V_m - B_{mn} * I_n \quad (3.4)$$

En donde:

- [ $A_{mn}$ ] es una matriz dada por  $[d_{mn}]^{-1}$ .
- [ $V_m$ ] representa el voltaje en el nodo  $m$ .
- [ $B_{mn}$ ] es una matriz dada por  $[d_{mn}]^{-1} \cdot Z_{mn}$ .
- [ $I_n$ ] representa la corriente en el nodo  $n$ .

Note que las ecuaciones (3.2) a (3.4) son matrices de  $3 \times 3$  representando un modelado trifásico de la red.

# CAPÍTULO IV. Aplicación y ejemplos de Barrido progresivo-regresivo.

## 4.1 Red monofásica de 3 nodos.

La red de 3 nodos de la figura 4.1 se considera monofásica.

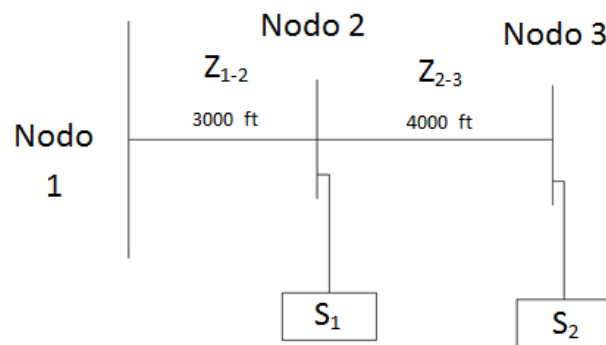


Figura 4.1.- Red monofásica de 3 nodos.

La impedancia de la línea es:

$$z = 0.3 + j0.6 \Omega/\text{milla.}$$

Como podemos ver en la figura 4.1 las distancias entre los nodos están dadas en pies, a continuación se obtienen las impedancias  $Z_{1-2}$  y  $Z_{2-3}$ .

$$Z_{1-2} = (0.3 + j0.6) * \frac{3000}{5280} = 0.1705 + j0.3409 \Omega$$

$$Z_{2-3} = (0.3 + j0.6) * \frac{4000}{5280} = 0.2273 + j0.4545 \Omega$$

Las cargas están dadas por:

$$S_1 = 1500 + j750(kW + jkvar)$$

$$S_2 = 900 + j500(kW + jkvar)$$

El voltaje de la fuente en el nodo 1 es 7600 V. Se aplicará el barrido progresivo regresivo, considerando una tolerancia de 0.0001

Las condiciones iniciales son:

$$I_{1-2} = I_{2-3} = 0 \quad V_{old} = 0$$

Se realiza el primer barrido progresivo para calcular los voltajes en los nodos 2 y 3:

$$V_2 = V_1 - (Z_{1-2} * I_{1-2}) = 7200/0^\circ$$

$$V_3 = V_2 - (Z_{2-3} * I_{2-3}) = 7200/0^\circ$$

Se calcula el error para continuar con el barrido o concluir el barrido, en este caso se continúa con el barrido.

$$Error = \frac{||V_3| - |V_{old}||}{7200} = 1 \text{ Por tanto error} > \text{tolerancia}$$

Se realiza el primer barrido regresivo, para obtener las corrientes:

$$I_3 = \left[ \frac{(900 + j500) * 1000}{7200 / 0^\circ} \right]^* = 143.0 \underline{-29.0} \text{ A}$$

La corriente que fluye en el segmento 2-3 es:

$$I_{2-3} = I_3 = 143.0 \underline{-29.0} \text{ A}$$

La corriente de carga en el nodo 2 es:

$$I_2 = \left[ \frac{(1500 + j750) * 1000}{7200 / 0^\circ} \right]^* = 232.9 \underline{-27.5} \text{ A}$$

La corriente en el segmento de línea 1-2 es:

$$I_{1-2} = I_{2-3} + I_2 = 375.8 \underline{-27.5} \text{ A}$$

Se realiza el segundo barrido progresivo:

$$V_2 = V_1 - (Z_{1-2} * I_{1-2}) = 7084.5 \underline{-0.7^\circ}$$

$$V_3 = V_2 - (Z_{2-3} * I_{2-3}) = 7025.1 \underline{-1.0^\circ}$$

Se calcula el error:

$$Error = \frac{||V_3| - |V_{old}||}{7200} = \frac{7084.5 - 7200}{7200} = 0.0160 \text{ Por tanto error} > \text{tolerancia}$$

Se continúa con el barrido, la convergencia se alcanza en el cuarto barrido. En la tabla 4.1 se muestran los resultados de los barridos hasta llegar a la convergencia.

Tabla 4.1.- Resultados calculados en la red de 3 nodos.

Iteración	Barrido progresivo		Barrido regresivo		Error
	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	I <sub>2-3</sub>	I <sub>1-2</sub>	
1	7200 <u>/0°</u>	7200 <u>/0°</u>	142.99 <u>/-29.05°</u>	375.83 <u>/-27.51°</u>	1
2	7084.5 <u>/-0.67°</u>	7025.1 <u>/-1.02°</u>	146.55 <u>/-30.07°</u>	383.16 <u>/-28.32°</u>	0.0160
3	7081 <u>/-0.67°</u>	7019.4 <u>/-1.01°</u>	146.67 <u>/-30.07°</u>	383.40 <u>/-28.32°</u>	0.0004
4	7080.9 <u>/-0.68°</u>	7019.3 <u>/-1.02°</u>	146.67 <u>/-30.07°</u>	383.40 <u>/-28.32°</u>	0.00001

## 4.2 Aplicación en Red de 8 nodos.

La figura 4.2 muestra una red de 8 nodos con una configuración radial, típica de las redes de distribución, la cual será objeto del estudio.

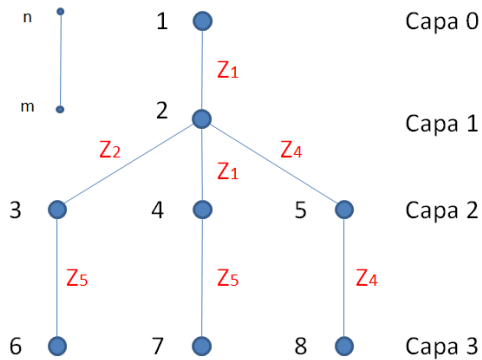


Figura 4.2.- Sistema de distribución de 8 nodos.

Como se muestra en la figura 4.2 los nodos están numerados y se tienen 3 capas. Las matrices de impedancia  $Z$  en las líneas se muestran a continuación:

$$Z_1 = \begin{bmatrix} 0.1312 + 0.3856j & 0.0591 + 0.1900j & 0.0598 + 0.1605j \\ 0.0591 + 0.1900j & 0.1278 + 0.3969j & 0.0581 + 0.1458j \\ 0.0598 + 0.1605j & 0.0581 + 0.1458j & 0.1293 + 0.3920j \end{bmatrix}$$

$$Z_2 = \begin{bmatrix} 0.0713 + 0.1119j & 0.0150 + 0.0401j & 0.0148 + 0.0475j \\ 0.0150 + 0.0401j & 0.0708 + 0.1135j & 0.0145 + 0.0364j \\ 0.0148 + 0.0475j & 0.0145 + 0.0364j & 0.0704 + 0.1147j \end{bmatrix}$$

$$Z_4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0252 + 0.0255j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z_5 = \begin{bmatrix} 0.0656 + 0.1928j & 0.0295 + 0.0950j & 0.0299 + 0.0802j \\ 0.0295 + 0.0950j & 0.0639 + 0.1984j & 0.0291 + 0.0729j \\ 0.0299 + 0.0802j & 0.0291 + 0.0729j & 0.0647 + 0.1960j \end{bmatrix}$$

Note que la matriz de impedancia  $Z_4$  en las fases  $a$  y  $c$  sus columnas y filas son cero, esto significa que solo se cuenta con la fase  $b$  en los segmentos de línea donde se ocupa, es decir de los nodos 2 a 5 y 5 a 8 con referencia a la figura 4.2.

Las cargas en los nodos en potencia constante  $P+jQ$  se expresan en la tabla 4.2., note el desbalance entre fases.

Tabla 4.2.- Cargas en nodos de la red de la figura 4.2

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	385+220j	385+220j	385+220j
5	---	170+125j	---
6	160+110j	120+90j	120+90j
7	100+50j	50+25j	100+50j
8	---	230+132j	----

Para calcular los voltajes se empleó el método de barrido progresivo-regresivo, ocupando 3 iteraciones en el ambiente de programación MATLAB®. Al calcular los voltajes en el sistema de la figura 4.2, bajo las condiciones de carga expuestas en la tabla 4.2 se obtienen los resultados expresados en la tabla 4.3.

Tabla 4.3.- Voltajes calculados en red de 8 nodos.

Nodo	V fase a	V fase b	V fase c
1	7,200.0 $\angle 0^\circ$	7,200.0 $\angle -120.000^\circ$	7,200.0 $\angle 120.000^\circ$
2	7,179.0 $\angle -0.028^\circ$	7,164.3 $\angle -120.268^\circ$	7,183.9 $\angle 119.800^\circ$
3	7,176.4 $\angle -0.036^\circ$	7,162.5 $\angle -120.274^\circ$	7,182.0 $\angle 119.796^\circ$
4	7,164.9 $\angle -0.124^\circ$	7,155.8 $\angle -120.365^\circ$	7,168.1 $\angle 119.699^\circ$
5	---	7,162.0 $\angle -120.273^\circ$	---
6	7,173.4 $\angle -0.052^\circ$	7,161.4 $\angle -120.289^\circ$	7,179.7 $\angle 119.789^\circ$
7	7,163.7 $\angle -0.139^\circ$	7,155.9 $\angle -120.367^\circ$	7,166.1 $\angle 119.690^\circ$
8	----	7,160.7 $\angle -120.275^\circ$	---

La carga y los voltajes en las fases a y c de los nodos 5 y 8 no son registrados debido a que no se cuentan con estas fases esto se puede observar en la figura 2.4 y la matriz Z4.

Para una mejor visualización de los resultados mostrados en la tabla 4.3, la caída de tensión a lo largo del ramal formado por los nodos 1, 2, 4 y 7 se grafican en la figura 4.3, esta caída tiene un comportamiento típico de una red radial.

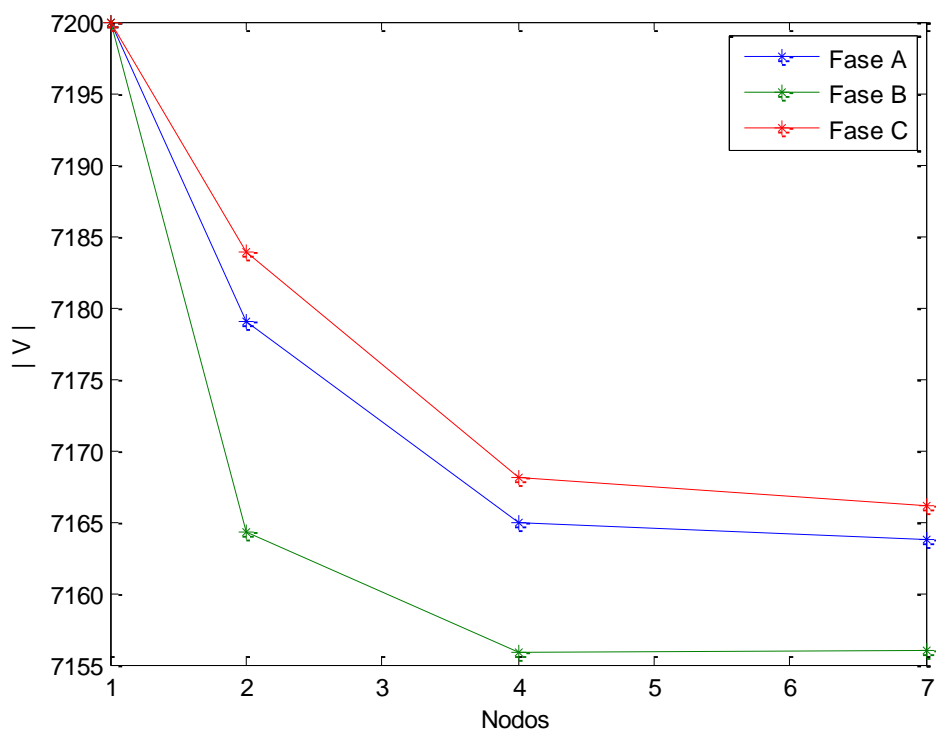


Figura 4.3.- Voltajes calculados a lo largo de la red de la figura 4.2.

También se realizó el cálculo de corrientes en la red de 8 nodos. En la tabla 4.4 se muestran las corrientes que circulan en los segmentos de línea entre los nodos que conforman la red.

Tabla 4.4.- Corrientes calculadas en segmentos de línea de red de 8 nodos.

sección	Fase a		Fase b		Fase c	
	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
$I_{1-2}$	110.352	-30.4959°	169.8773	-151.8981°	121.26	89.85718°
$I_{2-3}$	30.1941	-33.7418°	23.2121	-155.9856°	25.0309	86.3644°
$I_{2-4}$	77.4776	-29.2316°	69.7684	-149.7542°	77.4434	90.5926°
$I_{2-5}$	0	0	66.3913	-152.9946°	0	0
$I_{3-6}$	27.1051	-34.5605°	20.9456	-157.1589°	20.8922	82.9191°
$I_{4-7}$	15.6082	-26.7041°	7.812	-146.9321°	15.6017	93.1249°
$I_{5-8}$	0	0	37.0336	-150.1271°	0	0

En la tabla 4.5 se muestran las corrientes en cada uno de los nodos que componen la red de 8 nodos, el valor de corriente estará en función de la carga de cada nodo. Para obtener las corrientes en cada uno de los nodos se empleó la ecuación 2.43

Tabla 4.5.- Corrientes calculadas en nodos de la red de 8 nodos.

Nodo	I de carga fase a		I de carga fase b		I de carga fase c	
	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo	Magnitud	Ángulo
2	2.7473	-30.4935°	10.6302	-150.1995°	18.8373	89.635°
3	3.1159	-26.6011°	2.3111	-145.2909°	4.361	103.0968°
4	61.8884	-29.8689°	61.9671	-150.1099°	61.8608	89.9541°
5	0	0	29.4624	-156.5998°	0	0
6	27.1051	-34.5605°	20.9456	-157.1589°	20.8922	82.9191°
7	15.6082	-26.7041°	7.812	-146.9321°	15.6017	93.1249°
8	0	0	37.0336	-150.1271°	0	0

En la figura 4.4 se pueden visualizar los voltajes en cada uno de los nodos y corrientes en los segmentos de línea de la red de la figura 4.2.

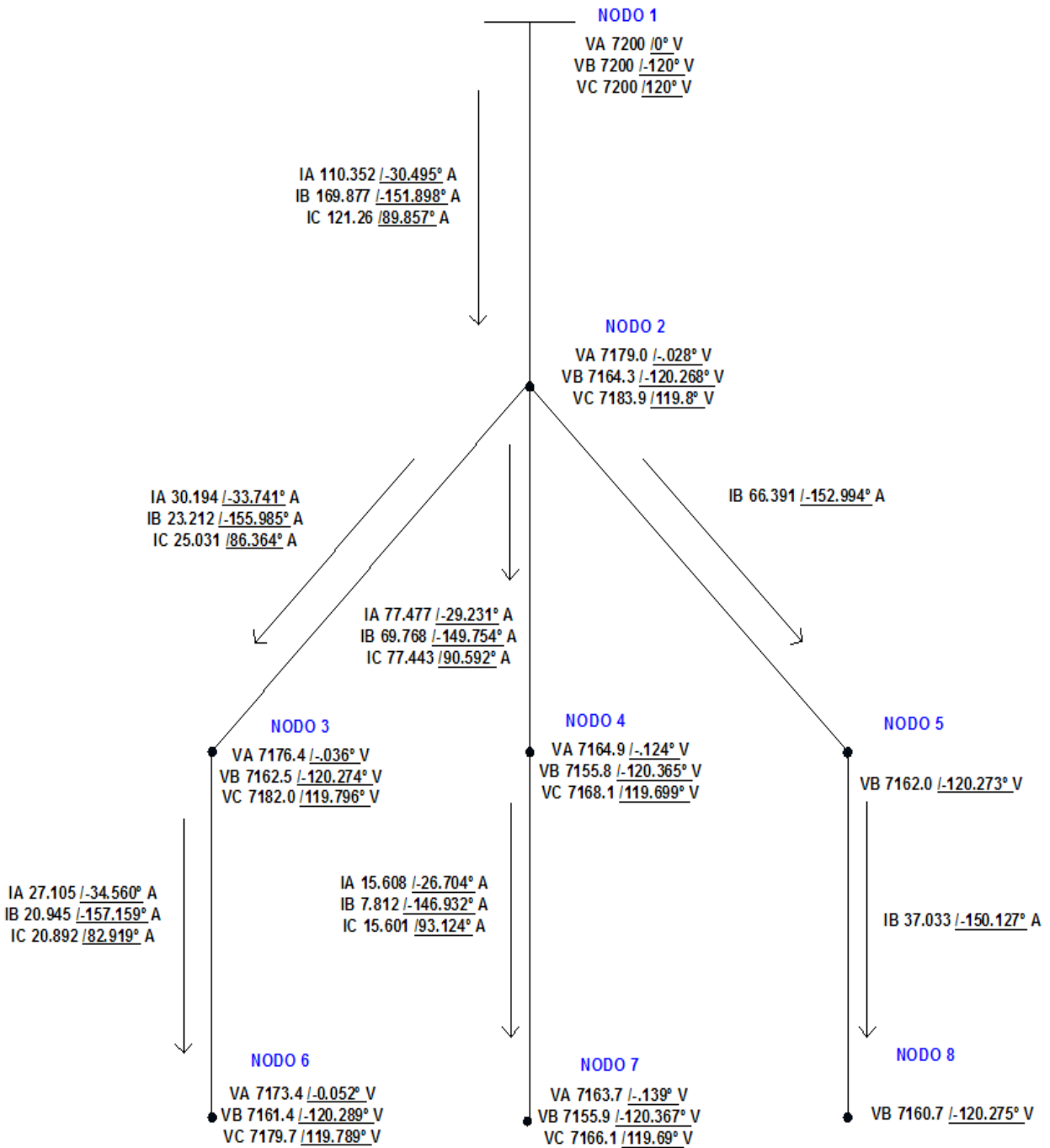


Figura 4.4.- Voltajes y corrientes en red de 8 nodos.

### 4.3 Aplicación en red de 32 nodos.

La figura 4.5 muestra una red de 34 nodos con una configuración radial, la cual también será objeto de estudio.

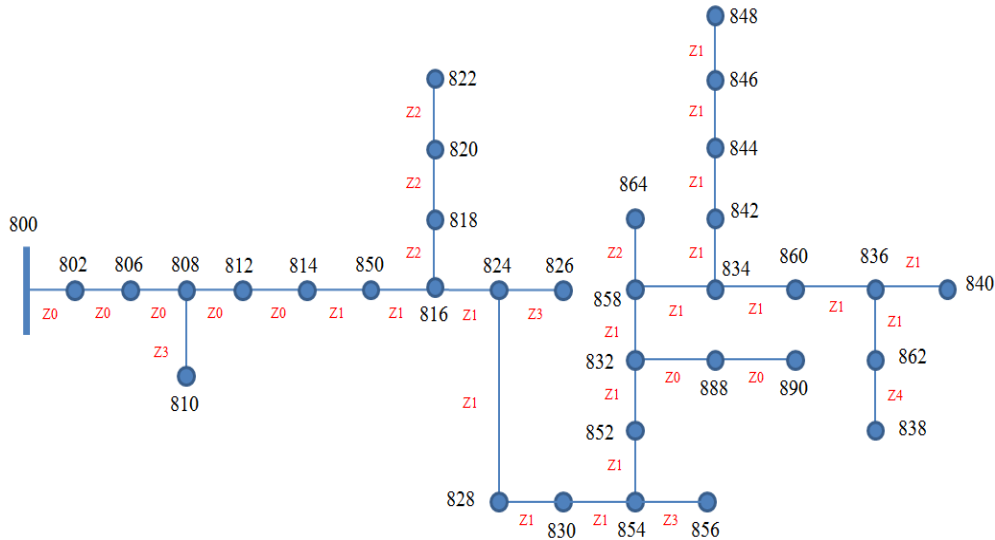


Figura 4.5.- Sistema de distribución de 34 nodos.

La red de 34 nodos de la figura 4.5 emplea dos tipos de estructuras diferentes, la primera es la estructura ID-500 en la que se cuenta con tres fases y se muestra en la figura 4.6 y la segunda es la estructura ID-510 que cuenta con una sola fase y se muestra en la figura 4.7.

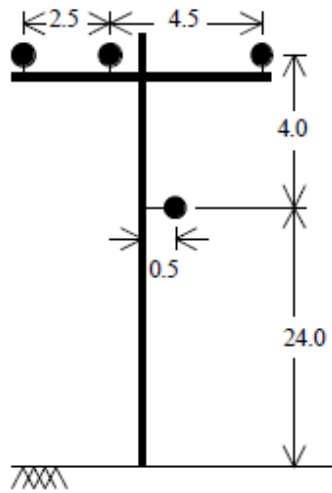


Figura 4.6.- Estructura ID-500.

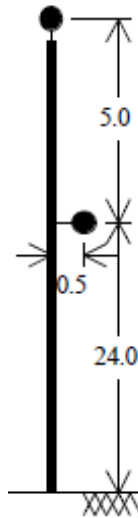


Figura 4.7.- Estructura ID-510.

Cuando se tienen las características de los conductores y la ubicación de estos en las estructuras, se aplican las ecuaciones modificadas de Carson y la reducción de Kron para obtener las matrices de impedancias y admitancias.

Cabe notar que en la figura 4.5 los nodos y las matrices de impedancia  $Z$  en las líneas están numerados. Las impedancias  $Z$  están dadas en ohms por milla y se muestran a continuación:

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

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

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

$$Z3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.7995 + 1.4855j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Z4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.9217 + 1.4212j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Las matrices de admitancia obtenidas están dadas en micro Siemens por milla y se muestran a continuación:

$$Y0 = \begin{bmatrix} 5.3383j & -1.5273j & -0.9902j \\ -1.5273j & 5.1028j & -0.6166j \\ -0.9902j & -0.6166j & 4.8934j \end{bmatrix}$$

$$Y1 = \begin{bmatrix} 5.1240j & -1.4325j & -0.9362j \\ -1.4325j & 4.9102j & -0.5905j \\ -0.9362j & -0.5905j & 4.7207j \end{bmatrix}$$

$$Y2 = \begin{bmatrix} 4.2338j & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.2338j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.3727j & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

En la tabla 4.6 se muestran las distancias entre los nodos, el tipo de conductores de los diversos segmentos de líneas, las matrices de impedancias y admitancias y las estructuras en los diferentes nodos.

Tabla 4.6.- Características de la red de 34 nodos.

Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Conductor de fase ACSR	Conductor de neutro ACSR	Fases	Matriz de impedancia	Matriz de admitancia	Estructura
800	802	2580	1/0	1/0	B A C N	Z0	Y0	500
802	806	1730	1/0	1/0	B A C N	Z0	Y0	500
806	808	32230	1/0	1/0	B A 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	B A C N	Z0	Y0	500
812	814	29730	1/0	1/0	B A C N	Z0	Y0	500
814	850	10	#2 6/1	#2 6/1	B A 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	B A 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	B A C N	Z1	Y1	500
828	830	20440	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
830	854	520	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
832	858	4900	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
832	888	1	1/0	1/0	B A C N	Z0	Y0	500
834	860	2020	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
834	842	280	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
836	840	860	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
836	862	280	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
842	844	1350	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
844	846	3640	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
846	848	530	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
850	816	310	#2 6/1	#2 6/1	B A C N	Z1	Y1	500
852	832	10	#2 6/1	#2 6/1	B A 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	B A 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	B A C N	Z1	Y1	500
860	836	2680	#2 6/1	#2 6/1	B A 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	B A C N	Z0	Y0	500

Para facilitar el análisis de la red de 34 nodos, primero se enumera la red en capas, de lo cual obtenemos 19 capas como se muestra en la figura 4.8. Posteriormente se emplea el barrido progresivo-regresivo aplicando las ecuaciones 3.2 y 3.4.

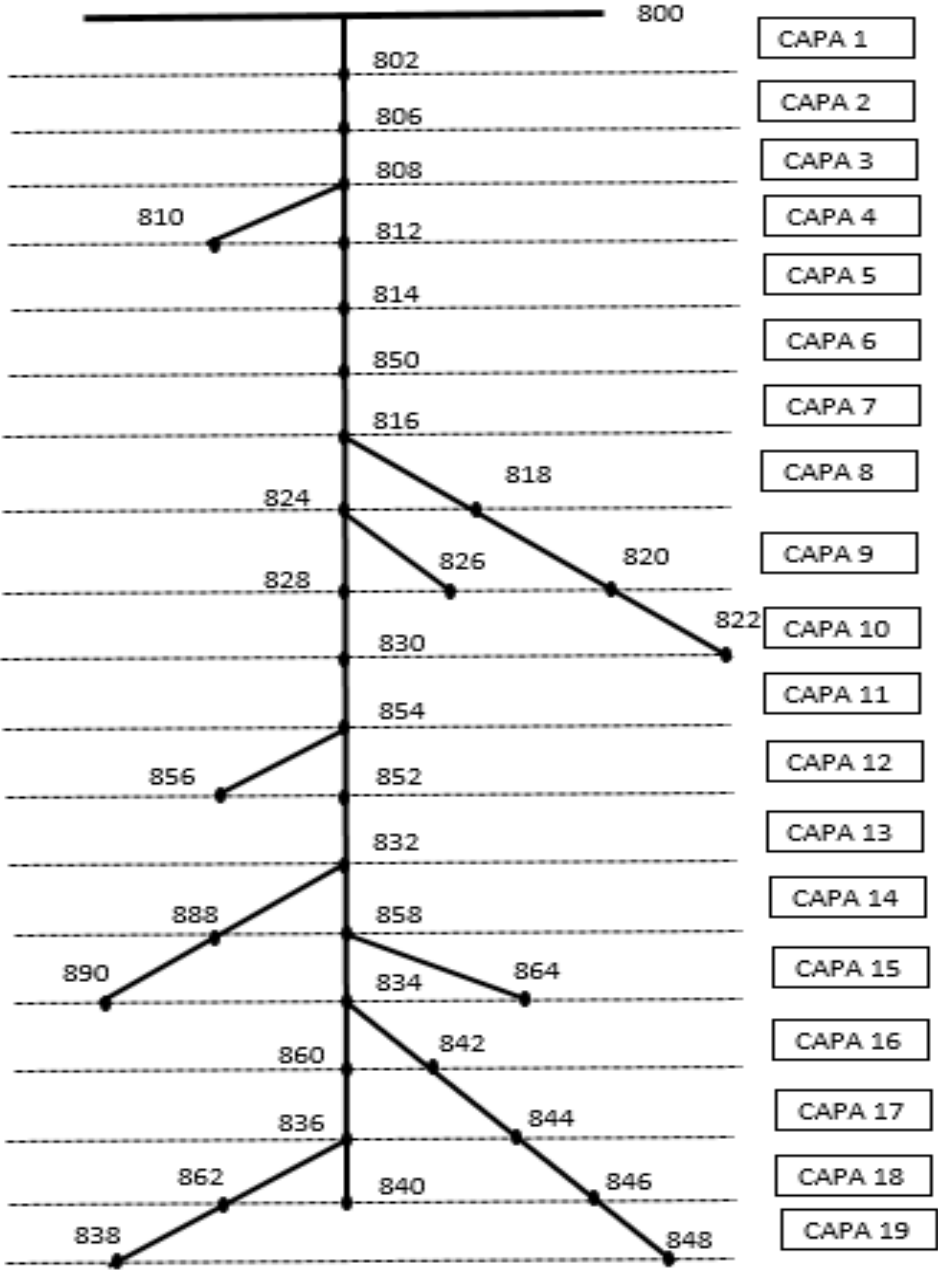


Figura 4.8.- Sistema de distribución de 34 nodos dividido en capas.

Las cargas de los nodos en potencia constante  $P+jQ$  se expresan en la tabla 4.7.  
 Note el desbalance entre fases.

Tabla 4.7.- Cargas en nodos de la red de la figura 4.5

Nodo	“ $P+ jQ$ ” en kW y kVAR, respectivamente		
	Fase a	Fase b	Fase c
802	---	---	---
806	---	15.45 + 7.72j	12.87 + 7.21j
808	---	---	---
810	---	8.24 + 4.12j	---
812	---	---	---
814	---	---	---
850	---	---	---
816	---	---	---
818	---	---	---
820	17.51 + 8.75j	0	---
822	69.52 +36.05j	0	---
824	---	2.57 + 1.03j	---
826	---	20.6 +10.3j	---
828	---	---	2.06 + 1.03j
830	8.75 + 4.12j	5.15 + 2.57j	12.87 + 5.15j
854	---	---	---
856	---	2.06 + 1.03j	---
852	---	---	---

832	---	---	---
888	---	---	---
890	77.25 +38.62j	77.25 +38.62j	77.25 +38.62j
858	3.60 + 1.54j	1.03 + 0.51j	3.09 + 1.54j
864	1.03 + 0.51j	---	---
834	2.06 + 1.03j	7.72 + 4.12j	6.69 + 3.6j
842	---	---	---
844	74.16 + 56.65j	69.52 + 54.07j	69.52 + 54.07j
846	---	12.87 + 6.18j	10.30 + 5.66j
848	10.30 + 8.24j	22.14 +13.9j	10.30 + 8.24j
860	18.54 + 12.36j	20.60 + 13.39j	66.95 + 36.56j
840	13.9 + 8.24j	15.96 + 9.27j	4.63 + 3.6j
836	5.15 + 7.72j	5.15 + 3.09j	21.63 +11.33j
862	---	---	---
838	---	14.42 + 7.21j	---

Al calcular los voltajes en el sistema de la figura 4.5, bajo las condiciones de carga expuestas en la tabla 4.7, se obtienen los resultados de caída de voltaje expresados en la tabla 4.8. Los cálculos mostrados en la tabla 4.8 se realizan con el método de barrido progresivo-regresivo desarrollado en MATLAB, estos resultados obtenidos se compararon con una simulación de la misma red de 34 nodos realizada en el programa RDAP [12] y también se muestran en la tabla 4.8 a modo de comparación

Tabla 4.8.- Voltajes calculados en red de 34 nodos.

NODO	MATLAB		RDAP		MATLAB		RDAP		MATLAB		RDAP	
	Van	/_Van	Van	/_Van	Vbn	/_Vbn	Vbn	/_Vbn	Vcn	/_Vcn	Vcn	/_Vcn
800	14376	0.000°	14376	0.000	14376	-120.000°	14376	-120.00°	14376	120.000°	14376	120.00°
802	14359	-0.013°	14359	-0.01°	14361	-120.018°	14361	-120.02°	14359	119.987°	14359	119.99°
806	14348	-0.021°	14348	-0.02°	14350	-120.030°	14351	-120.03°	14347	119.978°	14347	119.98°
808	14133	-0.183°	14133	-0.18°	14172	-120.242°	14172	-120.24°	14137	119.834°	14137	119.83°
810	0	0.000	0	0.000	14170	-120.243°	14170	-120.24°	0	0.000	0	0.000
812	13880	-0.370°	13880	-0.37°	13969	-120.462°	13969	-120.46°	13886	119.681°	13886	119.68°
814	13676	-0.507°	13677	-0.51°	13807	-120.626°	13807	-120.63°	13685	119.569°	13685	119.57°
850	13676	-0.507°	13676	-0.51°	13807	-120.626°	13807	-120.63°	13685	119.569°	13685	119.57°
816	13673	-0.507°	13674	-0.51°	13804	-120.626°	13804	-120.63°	13682	119.569°	13682	119.57°
818	13666	-0.510°	13666	-0.51°	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
820	13461	-0.565°	13461	-0.56°	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
822	13413	-0.569°	13413	-0.57°	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
824	13609	-0.469°	13609	-0.47°	13716	-120.624°	13716	-120.62°	13590	119.553°	13590	119.55°
826	0	0.000	0	0.000	13713	-120.625°	13713	-120.62°	0	0.000	0	0.000
828	13604	-0.467°	13604	-0.47°	13709	-120.623°	13710	-120.62°	13582	119.552°	13582	119.55°
830	13476	-0.402°	13476	-0.40°	13549	-120.600°	13549	-120.60°	13395	119.531°	13395	119.53°
854	13472	-0.400°	13472	-0.40°	13545	-120.599°	13545	-120.60°	13390	119.531°	13390	119.53°
856	0	0.000	0	0.000	13543	-120.606°	13544	-120.61°	0	0.000	0	0.000
852	13247	-0.251°	13247	-0.25°	13259	-120.523°	13259	-120.52°	13065	119.519°	13065	119.52°
832	13247	-0.251°	13247	-0.25°	13259	-120.523°	13259	-120.52°	13065	119.519°	13065	119.52°
888	13247	-0.251°	13247	-0.25°	13259	-120.523°	13259	-120.52°	13065	119.519°	13065	119.52°
890	13229	-0.262°	13229	-0.26°	13242	-120.540°	13242	-120.54°	13046	119.503°	13046	119.50°
858	13228	-0.229°	13228	-0.23°	13232	-120.508°	13232	-120.51°	13033	119.520°	13033	119.52°
864	13228	-0.229°	13228	-0.23°	0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
834	13207	-0.201°	13207	-0.20°	13199	-120.490°	13199	-120.49°	12996	119.522°	12996	119.52°
842	13206	-0.200°	13206	-0.20°	13198	-120.490°	13198	-120.49°	12996	119.523°	12995	119.52°
844	13202	-0.195°	13202	-0.20°	13193	-120.488°	13193	-120.49°	12991	119.525°	12991	119.53°
846	13201	-0.191°	13201	-0.19°	13189	-120.489°	13189	-120.49°	12989	119.524°	12989	119.52°
848	13201	-0.190°	13201	-0.19°	13188	-120.489°	13188	-120.49°	12989	119.524°	12989	119.52°
860	13205	-0.199°	13205	-0.20°	13195	-120.487°	13195	-120.49°	12990	119.519°	12989	119.52°
836	13203	-0.195°	13203	-0.20°	13192	-120.488°	13192	-120.49°	12988	119.519°	12988	119.52°
840	13203	-0.195°	13203	-0.19°	13191	-120.488°	13191	-120.49°	12988	119.519°	12987	119.52°
862	13203	-0.195°	13203	-0.19°	13192	-120.488°	13192	-120.49°	12988	119.519°	12988	119.52°
838	0	0.000	0	0.000	13189	-120.490°	13189	-120.49°	0	0.000	0	0.000

Para una mejor visualización de los resultados mostrados en la tabla 4.8 las magnitudes de los voltajes en las fases *abc* de la trayectoria de flujo de corriente formado entre el nodo raíz 800 y el nodo 848, son graficados en la figura 4.9.

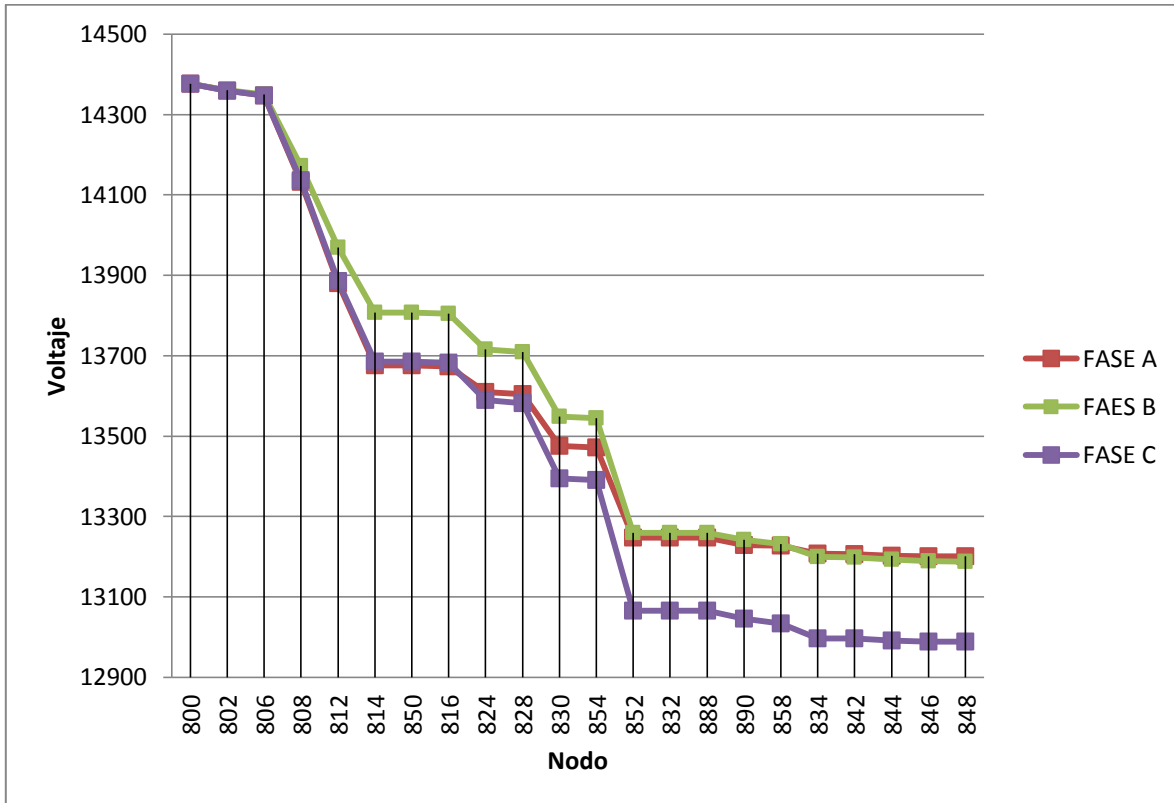


Figura 4.9.- Voltajes calculados a lo largo de la red de la figura 4.5.

La figura 4.9 muestra un descenso en la magnitud del voltaje en cuanto los nodos se alejan de la fuente, este es un comportamiento típico de una red radial.

En la figura 4.10 se muestran los valores de voltajes obtenidos en la fase a en cada uno de los nodos de la red de la figura 4.5, aquí también se puede ver la variación de los voltajes en los distintos nodos y se puede notar como es que conforme más alejados estén los nodos de la fuente, menor es el voltaje. En la figura 4.11 se muestran los valores de voltaje obtenidos en la fase b en cada uno de los nodos de la red de la figura 4.5 y finalmente en la figura 4.12 se muestran los valores de voltaje obtenidos en la fase c.

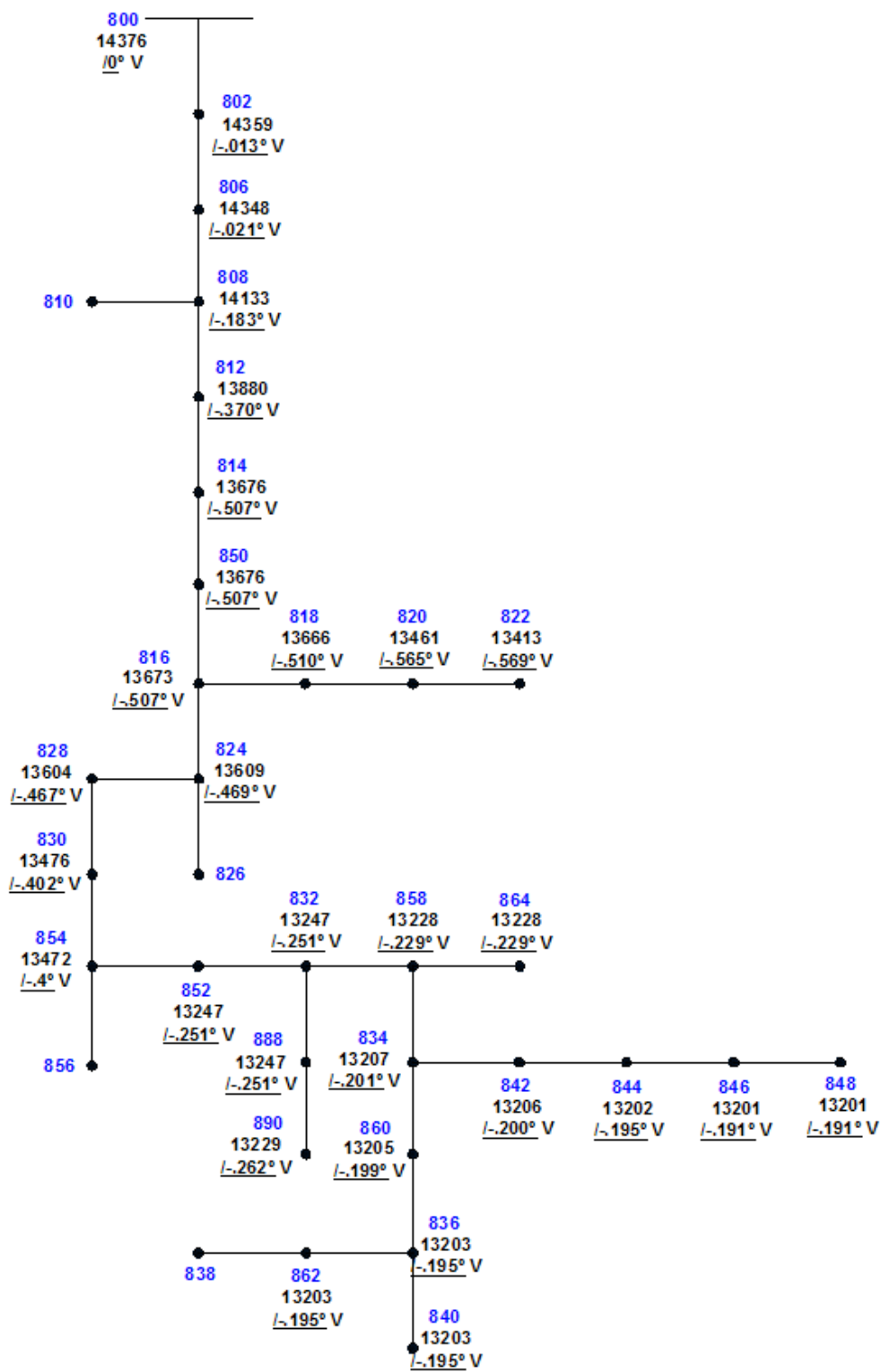


Figura 4.10.- Voltajes en la fase a de la red de 34 nodos.

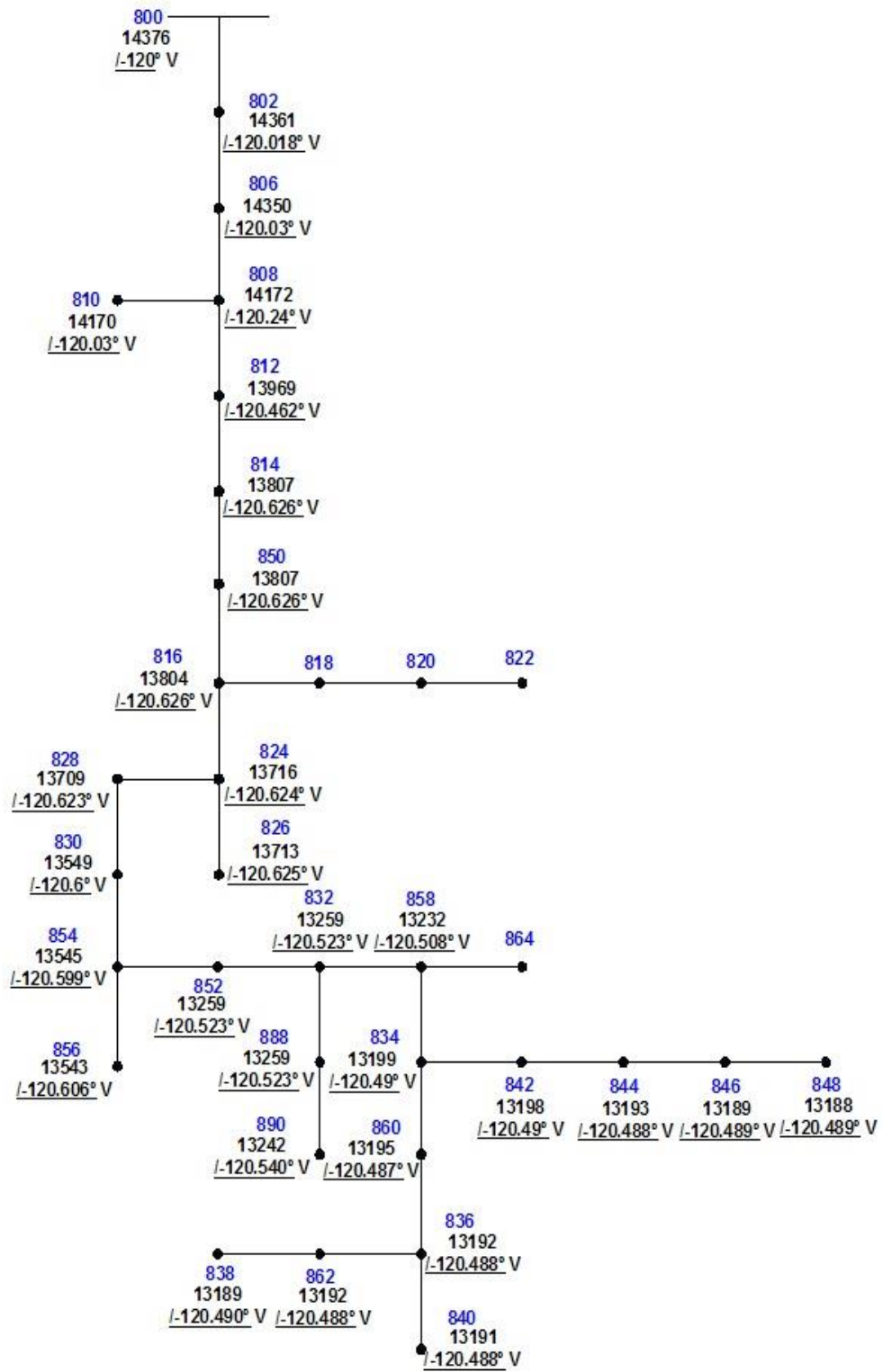


Figura 4.11.- Voltajes en la fase *b* de la red de 34 nodos.

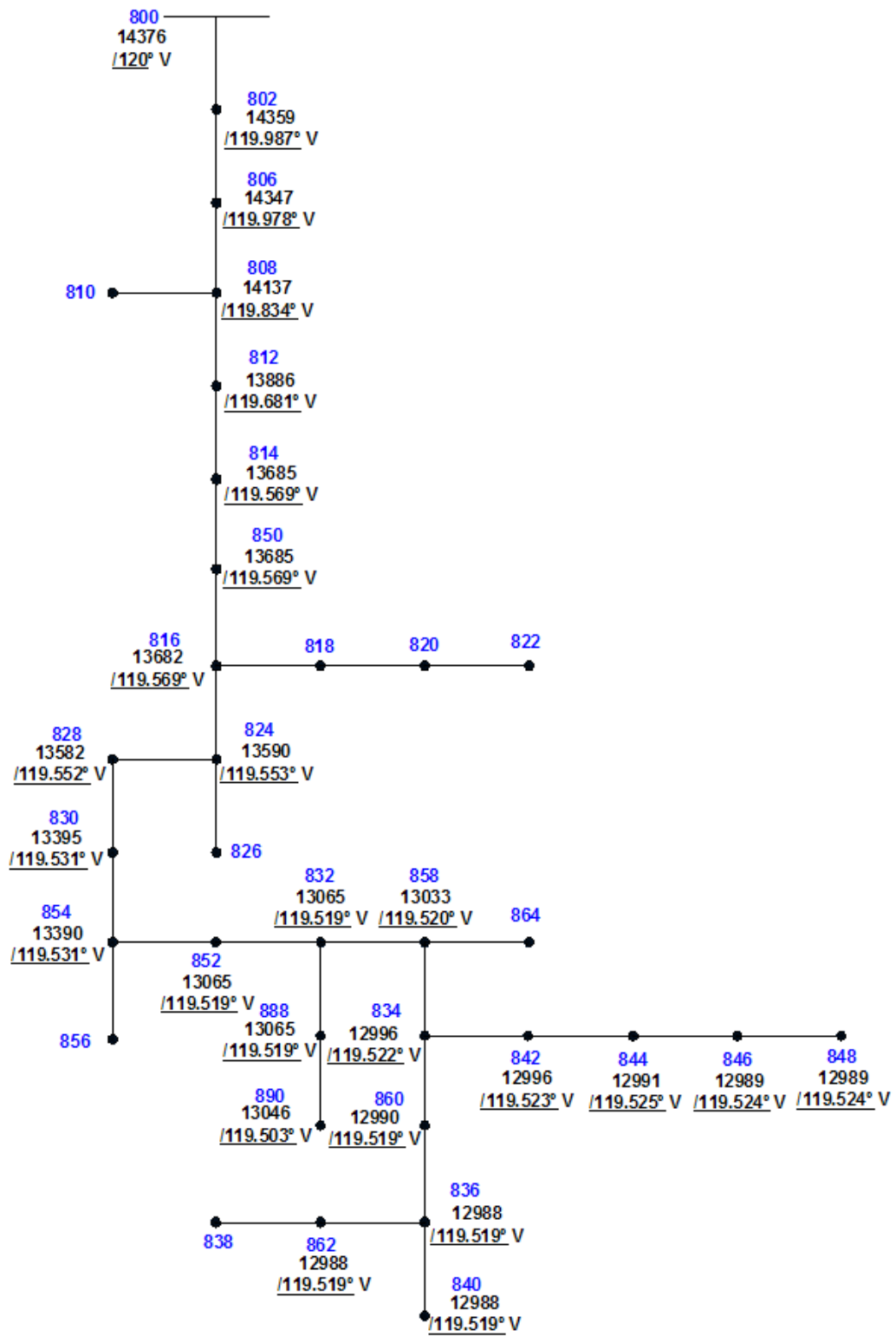


Figura 4.12.- Voltajes en la fase c de la red de 34 nodos.

En la tabla 4.9 se muestran las corrientes obtenidas en los diferentes segmentos de línea de la red de 34 nodos.

Tabla 4.9.- Corrientes calculadas en red de 34 nodos.

Segmento	Fase a (A)		Fase b (A)		Fase c (A)	
	<i>I<sub>a</sub></i>	$\angle I_a$	<i>I<sub>b</sub></i>	$\angle I_b$	<i>I<sub>c</sub></i>	$\angle I_c$
800-802	26.619	-31.694°	26.188	-151.027°	26.500	88.873°
802-806	26.619	-31.694°	26.188	-151.027°	26.500	88.873°
806-808	26.619	-31.694°	24.988	-151.241°	25.473	88.799°
808-810	0.000	0.000	0.650	-146.809°	0.000	0.000
808-812	26.619	-31.694°	24.340	-151.359°	25.473	88.799°
812-814	26.619	-31.694°	24.340	-151.359°	25.473	88.799°
814-850	26.619	-31.694°	24.340	-151.359°	25.473	88.799°
850-816	26.619	-31.694°	24.340	-151.359°	25.473	88.799°
816-818	7.292	-27.806°	0.000	0.000	0.000	0.000
818-820	7.292	-27.806°	0.000	0.000	0.000	0.000
820-822	5.838	-27.977°	0.000	0.000	0.000	0.000
816-824	19.350	-33.158°	24.340	-151.359°	25.473	88.799°
824-826	0.000	0.000	1.680	-147.192°	0.000	0.000
824-828	19.350	-33.158°	22.466	-151.750°	25.473	88.799°
828-830	19.350	-33.158°	22.466	-151.750°	25.304	88.771°
830-854	18.638	-33.447°	22.043	-151.839°	24.282	88.391°
854-856	0.000	0.000	0.170	-147.169°	0.000	0.000
854-852	18.638	-33.447°	21.873	-151.875°	24.282	88.391°
852-832	18.638	-33.447°	21.873	-151.875°	24.282	88.391°
832-888	6.529	-26.826°	6.522	-147.103°	6.620	92.940°
888-890	6.529	-26.826°	6.522	-147.103°	6.620	92.940°
832-858	12.176	-36.992°	15.383	-153.896°	17.691	86.690°
858-864	0.087	-26.572°	0.000	0.000	0.000	0.000
858-834	11.803	-37.406°	15.297	-153.936°	17.428	86.594°
834-842	8.068	-37.730°	9.715	-155.839°	8.689	82.501°
842-844	8.068	-37.730°	9.715	-155.839°	8.689	82.501°
844-846	0.999	-38.851°	3.060	-150.323°	1.913	85.514°
846-848	0.999	-38.851°	1.982	-152.609°	1.016	80.864°
834-860	3.564	-37.192°	4.934	-150.909°	8.198	90.601°
860-836	1.882	-40.151°	3.075	-149.336°	2.326	89.898°
836-840	1.224	-30.855°	1.399	-150.639°	0.452	81.651°
836-862	0.000	0.000	1.222	-147.056°	0.000	0.000
862-838	0.000	0.000	1.222	-147.056°	0.000	0.000

Para una mejor visualización de los resultados mostrados en la tabla 4.9 las corrientes obtenidas en los diferentes segmentos de línea de la fase a se muestran en la figura 4.13

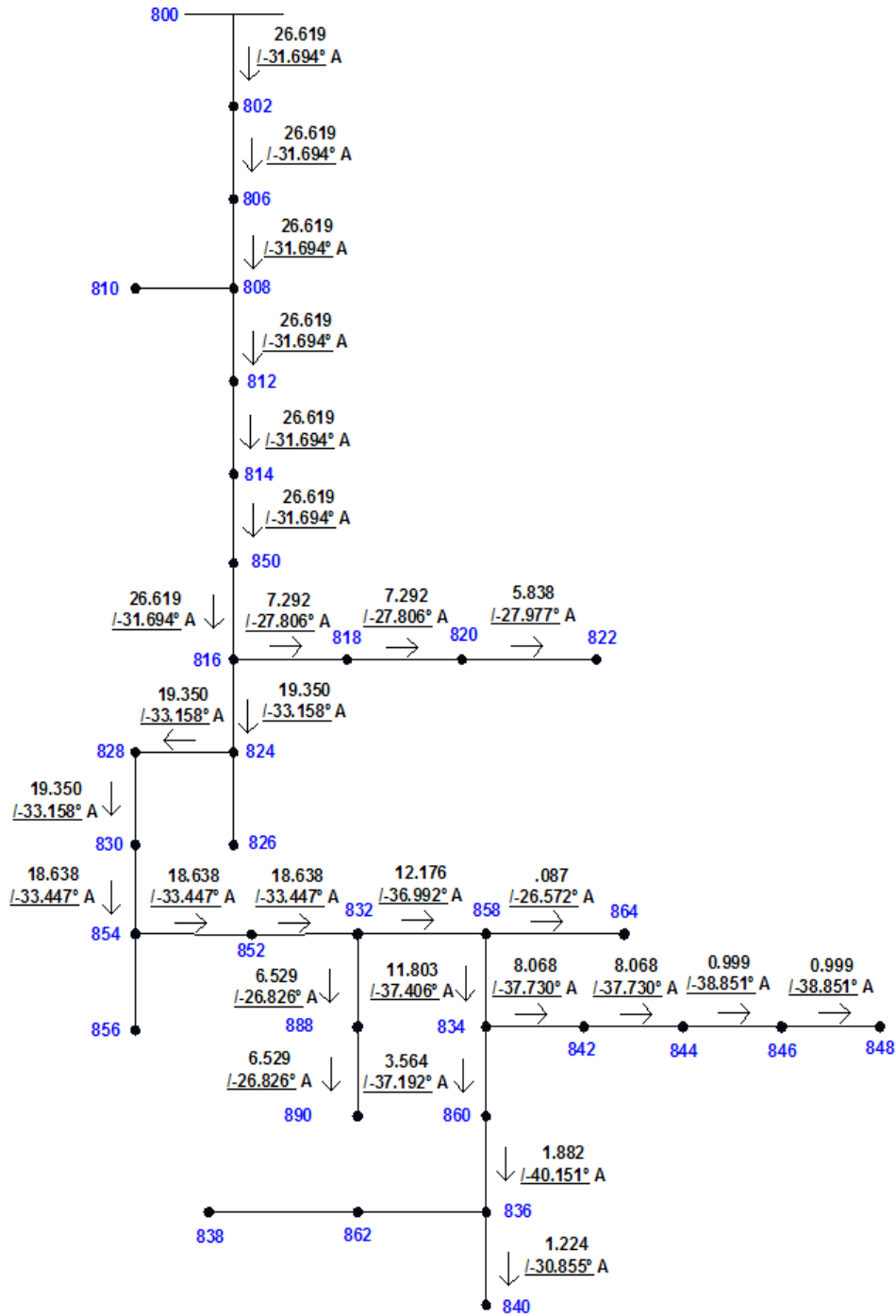


Figura 4.13.- Corrientes de la fase a de la red de 34 nodos.

Las corrientes obtenidas en los segmentos de línea de la fase b se muestran en la figura 4.14.

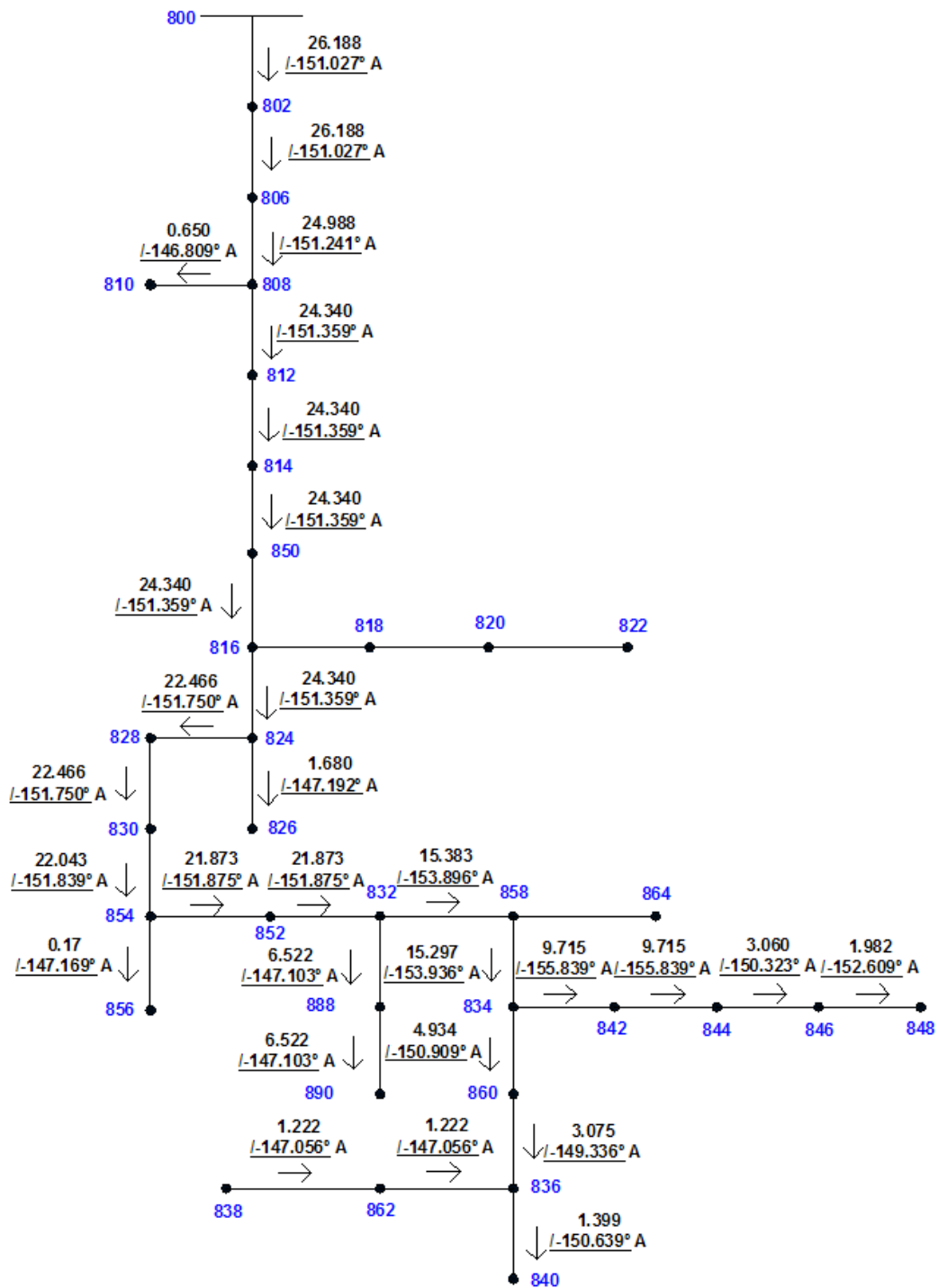


Figura 4.14.- Corrientes de la fase b de la red de 34 nodos.

Las corrientes obtenidas en los segmentos de línea de la fase c se muestran en la figura 4.15.

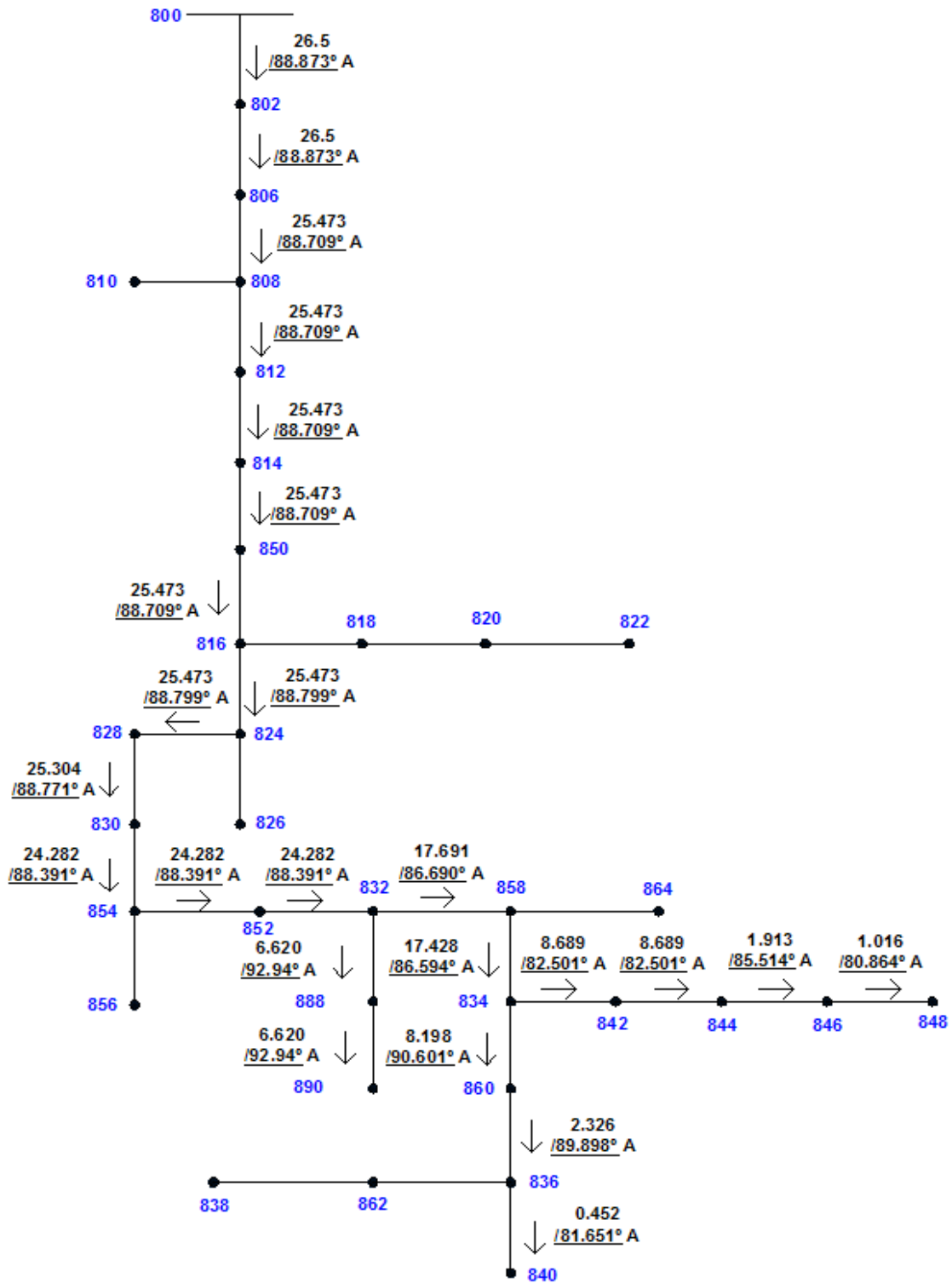


Figura 4.15.- Corrientes de la fase c de la red de 34 nodos.

## CONCLUSIONES.

Se realiza la solución de flujos de corriente en redes de distribución aplicando el barrido progresivo regresivo con el cual se obtuvieron los voltajes en los nodos de la red, los resultados obtenidos fueron validados con el software RDAP para estudio de redes de distribución.

Se presenta el desarrollo del modelado de impedancias y admitancias de línea, cargas, corrientes de rama, corrientes de carga, voltajes y ángulos de fase para su incorporación a la técnica de barrido progresivo-regresivo.

Se muestra a detalle como es el proceso de aplicación del barrido progresivo regresivo en redes de distribución de 3, 8 y 34 nodos en la solución de flujos de corriente.

Con el estudio realizado se hace evidente la importancia y la necesidad de realizar estudios cada vez más especializados así como el modelado - incorporación de nuevos elementos al esquema de solución, en este trabajo de tesis para obtener mayor eficiencia, con el objetivo de brindar un servicio de mayor calidad.

## TRABAJO PUBLICADO

- [1]. **Macuilt Ramírez Omar** y Morales Aguilar Eric, “Modelado de Flujos de Corriente en Redes de Distribución”, *REUNION INTERNACIONAL DE VERANO, RVP-AI/2014*, Acapulco Gro., del 20 al 26 de julio del 2014.

## TRABAJO FUTURO

- Cada día nuevos elementos son diseñados e incorporados a las redes de distribución, para que el trabajo aquí presentado no pierda su aplicación es importante modelar e incorporar estos nuevos elementos al esquema de solución de la técnica de barrido progresivo-regresivo, con el objetivo de seguir siendo una herramienta útil y de calidad.

## BIBLIOGRAFIA.

- [1]. MATLAB R2008b, The language of technical computing, The Mathworks Inc.
- [2]. 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.
- [3]. NMX-J-098-ANCE-1999. Norma Mexicana ANCE. 17 de Junio de 1999.
- [4]. Donald G. Fink, H. Wayne Beaty, Manual de Ingeniería Eléctrica, Decimotercera edición, Tomo II, Mc Graw Hill, USA, 2012.
- [5]. Grainger J.J., Stevenson W.D. Jr., Análisis de Sistemas de Potencia, Libro, Mc Graw Hill, Estados Unidos.
- [6]. W.H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, Libro, CRC Press, Estados Unidos.
- [7]. Carson Jhon R., Wave propagation in overhead wires with ground return, *Bell System Technical Journal*, Vol. 5, New York, 1926.
- [8]. T.H. Chen, M.S. Chen, K.J. Hwang, P. Kotas y E.A. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis" *IEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, n°. 3, pp. 1146-1152, July 1991.

- [9]. J.C.M Vieira Jr, W. Freitas y A. Morelato, "Phase-Decoupled Method for Three-Phase Power-Flow Analysis of Unbalanced Distribution Systems", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib*, vol. 151, n°. 5, pp. 568-574, September 2004.
- [10]. Sarika Khushalani, Noel Schulz, "Unbalanced Distribution Power Flow with Distributed Generation", IEEE, USA.
- [11]. J. H. Teng, "A Modified Gauss-Seidel Algorithm of Three-Phase Power Flow Analysis in Distribution Networks", *Electrical Power and Energy Systems*, pp. 97-102, February 2001.
- [12]. RDAP, Radial Distribution Analysis Package, Version 3.0, September 1999.

## Apéndice A.

En esta parte se desarrolla el 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 las siguientes:

Para fase: 1/0 ACSR

Para neutro: 1/0 ACSR

De la tabla de conductores tenemos que para un conductor de 1/0 ACSR el  $GMR=0.00446$  y la resistencia= $1.12\Omega/\text{milla}$ . La configuración de los conductores se muestra en la figura A.1

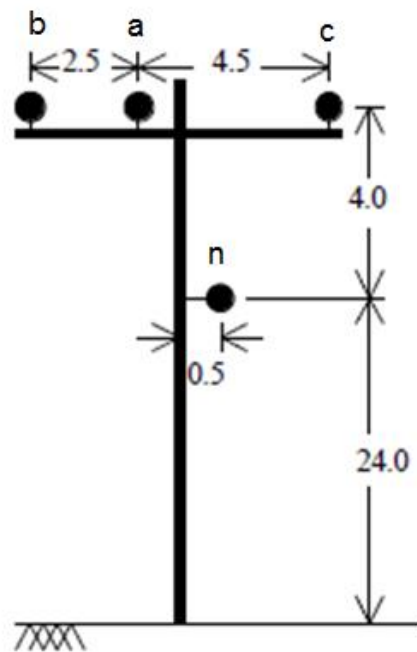


Figura A.1.- Configuración de conductores.

Las distancias entre conductores están dadas por:

$$\begin{aligned} D_{ab} &= 2.5 \text{ ft} & D_{bc} &= 7 \text{ ft} & D_{ca} &= 4.5 \text{ ft} & D_{an} &= 4.272 \text{ ft} \\ D_{bn} &= 5.6569 \text{ ft} & D_{cn} &= 5.0 \text{ ft} & & & & \end{aligned}$$

Aplicando las ecuaciones modificadas de Carson 2.10 y 2.11 tenemos:

$$\hat{Z}_{aa} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right) = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{Z}_{ab} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{2.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.8515i$$

$$\hat{Z}_{ac} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{4.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7802i$$

$$\hat{Z}_{ba} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{2.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.8515i$$

$$\hat{Z}_{bb} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right) = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{Z}_{bc} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{7} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7266i$$

$$\hat{Z}_{ca} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{4.5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7802i$$

$$\hat{Z}_{cb} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{7} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7266i$$

$$\hat{Z}_{cc} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right) = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{Z}_{an} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{4.272} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7865i$$

$$\hat{Z}_{bn} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5.6569} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7524i$$

$$\hat{Z}_{cn} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7674i$$

$$\hat{Z}_{nn} = 1.12 + 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{0.00446} + 7.93402 \right) = 1.2153 + 1.6195i$$

$$\hat{Z}_{na} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{4.272} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7865i$$

$$\hat{Z}_{nb} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5.6569} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7524i$$

$$\hat{Z}_{cn} = 0.09530 + j0.12134 \left( \ln \frac{1}{5} + 7.93402 \right) = 0.0953 + 0.7674i$$

Con lo anterior obtenemos la matriz de impedancias primitiva.

$Z_{primitiva}$

$$= \begin{bmatrix} 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.8515i & 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7865i \\ 0.0953 + 0.8515i & 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.7266i & 0.0953 + 0.7524i \\ 0.0953 + 0.7802i & 0.0953 + 0.7266i & 1.2153 + 1.6195i & 0.0953 + 0.7674i \\ 0.0953 + 0.7865i & 0.0953 + 0.7524i & 0.0953 + 0.7674i & 1.2153 + 1.6195i \end{bmatrix}$$

La Z primitiva está dada en  $\Omega/milla$ .

La  $Z_{primitiva}$  se divide en:

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

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

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

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

Aplicando la ecuación 2.14 que corresponde a la reducción de Kron, obtenemos 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 presenta el cálculo de la matriz de admitancias.

Las características del conductor son las siguientes:

Fase: 1/0 ACSR

Neutro: 1/0 ACSR

De la tabla de conductores tenemos que para un conductor de 1/0 ACSR el diámetro es de 0.398 pulgadas lo que corresponde a un diámetro de 0.01658 pies.

La configuración de los conductores se muestra en la figura A.1

Para iniciar se calcula la matriz de distancias entre los conductores y las imágenes. La matriz de distancias es:

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

Se calcula la matriz primitiva de coeficientes de potencial.

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

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

$$P_{ac} = 11.17689 \ln \left( \frac{56.1805}{4.5} \right) = 28.2160 \text{ milla}/\mu F$$

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

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

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

$$P_{ca} = 11.17689 \ln \left( \frac{56.1805}{4.5} \right) = 28.2160 \text{ milla}/\mu F$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Se obtiene la matriz primitiva de coeficientes de potencial

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

Aplicando la reducción de Kron, la matriz de coeficientes de potencial de fase es:

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

Se invierte  $[P_{abc}]$  para determinar la matriz de capacitancias en derivación.

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

La matriz de admitancia en derivación trifásica final es:

$$Y_{abc} = i * (376.9911) * [C_{abc}] = \begin{bmatrix} 5.3381i & -1.5273i & -0.9902i \\ -1.5273i & 5.1026i & -0.6165i \\ -0.9902i & -0.6165i & 4.8932i \end{bmatrix} \mu S/\text{milla}$$

## Apéndice B.

A continuación se muestra la solución en Matlab para la red de 8 nodos, el programa se dividió en tres archivos: main, valores iniciales y datos\_8n.

A continuación se muestra el archivo main, es en este donde se desarrolla el barrido progresivo-regresivo, para esto usa los archivos valores iniciales y datos\_8n.

```
clc
clear all

datos_8n

valores_iniciales

iter_max=10;
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

abs(V2) % saca magnitud para voltajes
angle(V2)*(180/pi) %saca angulo en grados

abs(V3) % saca magnitud para voltajes
angle(V3)*(180/pi) %saca angulo en grados

```

```

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

abs(V5)    % saca magnitud para voltajes
angle(V5)*(180/pi)    %saca angulo en grados

abs(V6)    % saca magnitud para voltajes
angle(V6)*(180/pi)    %saca angulo en grados

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

abs(V8)    % saca magnitud para voltajes
angle(V8)*(180/pi)    %saca angulo en grados

```

A continuación se muestra el archivo datos\_8n, es en este donde se introduce el valor de las cargas en diferentes nodos, los valores de las matrices de impedancias [Z], admitancias [Y] y las matrices [A], [B], [a], [b], [c] y [d].

```

%      A      B      C
S2=[17+10j;   66+38j;   117+68j];
S3=[20+10j;   15+7j;    30+9j];
S4=[385+220j; 385+220j;  385+220j];
S5=[0;        170+125j;  0];
S6=[160+110j; 120+90j;   120+90j];
S7=[100+50j;  50+25j;   100+50j];
S8=[ 0;        230+132j;  0];

% %      A      B      C
% S2=[17+10j;   66+38j;   117+68j];
% S3=[20+10j;   15+7j;    30+9j];
% S4=[385+220j; 385+220j;  385+220j]*1.1;
% S5=[0;        170+125j;  0];
% S6=[160+110j; 120+90j;   120+90j];
% S7=[100+50j;  50+25j;   100+50j]*1.1;
% 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)];
%abs(V1) % saca magnitud para voltajes
%angle(V1)*(180/pi) %saca angulo en grados

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;

```

A continuación se muestra el archivo valores\_iniciales, es en este donde se establecen los valores iniciales de corrientes en los diferentes nodos.

```

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;

```

## Apéndice C.

A continuación se muestra la solución en Matlab para la red de 34 nodos, el programa se dividió en tres archivos: main, valores iniciales y datos\_34n.

A continuación se muestra el archivo main, es en este donde se desarrolla el barrido progresivo-regresivo, para esto usa los archivos valores iniciales y datos\_34n.

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

```
V800
AbsV800=abs (V800);
Ang800=angle (V800) * (180/pi);
```

```
V802
AbsV802=abs (V802);
Ang802=angle (V802) * (180/pi);
```

```
V806
AbsV806=abs (V806);
Ang806=angle (V806) * (180/pi);
```

```
V808
AbsV808=abs (V808);
Ang808=angle (V808) * (180/pi);
```

```
V810
AbsV810=abs (V810);
Ang810=angle (V810) * (180/pi);
```

```
V812
AbsV812=abs (V812);
Ang812=angle (V812) * (180/pi);
```

```
V814
AbsV814=abs (V814);
Ang814=angle (V814) * (180/pi);
```

```
V850
AbsV850=abs (V850);
Ang850=angle (V850) * (180/pi);
```

```
V816
AbsV816=abs (V816);
Ang816=angle (V816) * (180/pi);
```

```
V824
AbsV824=abs (V824);
Ang824=angle (V824) * (180/pi);
```

```
V828
AbsV828=abs (V828);
Ang828=angle (V828) * (180/pi);
```

```
V830
```

AbsV830=abs (V830) ;  
Ang830=angle (V830) \* (180/pi) ;

V854  
AbsV854=abs (V854) ;  
Ang854=angle (V854) \* (180/pi) ;

V852  
AbsV852=abs (V852) ;  
Ang852=angle (V852) \* (180/pi) ;

V832  
AbsV832=abs (V832) ;  
Ang832=angle (V832) \* (180/pi) ;

V858  
AbsV858=abs (V858) ;  
Ang858=angle (V858) \* (180/pi) ;

V834  
AbsV834=abs (V834) ;  
Ang834=angle (V834) \* (180/pi) ;

V842  
AbsV842=abs (V842) ;  
Ang842=angle (V842) \* (180/pi) ;

V844  
AbsV844=abs (V844) ;  
Ang844=angle (V844) \* (180/pi) ;

V846  
AbsV846=abs (V846) ;  
Ang846=angle (V846) \* (180/pi) ;

V848  
AbsV848=abs (V848) ;  
Ang848=angle (V848) \* (180/pi) ;

V810  
AbsV810=abs (V810) ;  
Ang810=angle (V810) \* (180/pi) ;

V818  
AbsV818=abs (V818) ;  
Ang818=angle (V818) \* (180/pi) ;

V820  
AbsV820=abs (V820) ;  
Ang820=angle (V820) \* (180/pi) ;

V822  
AbsV822=abs (V822) ;  
Ang822=angle (V822) \* (180/pi) ;

```
V826
AbsV826=abs (V826) ;
Ang826=angle (V826) * (180/pi) ;
```

```
V856
AbsV856=abs (V856) ;
Ang856=angle (V856) * (180/pi) ;
```

```
V888
AbsV888=abs (V888) ;
Ang888=angle (V888) * (180/pi) ;
```

```
V890
AbsV890=abs (V890) ;
Ang890=angle (V890) * (180/pi) ;
```

```
V864
AbsV864=abs (V864) ;
Ang864=angle (V864) * (180/pi) ;
```

```
V860
AbsV860=abs (V860) ;
Ang860=angle (V860) * (180/pi) ;
```

```
V836
AbsV836=abs (V836) ;
Ang836=angle (V836) * (180/pi) ;
```

```
V840
AbsV840=abs (V840) ;
Ang840=angle (V840) * (180/pi) ;
```

```
V838
AbsV838=abs (V838) ;
Ang838=angle (V838) * (180/pi) ;
```

```
V862
AbsV862=abs (V862) ;
Ang862=angle (V862) * (180/pi) ;
```

A continuación se muestra el archivo datos\_34n, es en este donde se introduce el valor de las cargas en diferentes nodos, se calcula para cada segmento de línea: las matrices de impedancias [Z], admitancias [Y] y las matrices [A], [B], [a], [b], [c] y [d].

%	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)];
%abs(V1)    % saca magnitud para voltajes
%angle(V1)*(180/pi)    %saca angulo en grados

```

```

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;

```

```

% U=[1 0 0
%     0 1 0   ec6.7
%     0 0 1];
%
% a=U+(1/2)*Zabc*Yabc;   ec. 6.9
%
% b=Zabc   ec. 6.10
%
% c=Yabc+(1/4)*Yabc*Zabc*Yabc   ec. 6.17
%
% d=a   ec. 6.18
%
% A=a-1 ec. 6.27
%
% B=a-1*b

```

```

% a=U+(1/2)*Zabc*Yabc;   ec. 6.9

```

```

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;

```

A continuación se muestra el archivo valores\_iniciales, es en este donde se establecen los valores iniciales de corrientes en los diferentes nodos.

```

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);
```