



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

*“DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA RESOLVER
EL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES
AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO
PROGRESIVO-REGRESIVO”.*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

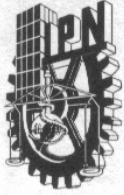
ING. ERIC MORALES AGUILAR.

Dr. Ricardo O. Mota Palomino
Director de Tesis.



MÉXICO D.F.

Junio del 2009



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 02 del mes de Abril del 2009 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

“DESARROLLO DE UN PROGRAMA PARA RESOLVER EL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA EN REDES AÉREAS DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO PROGRESIVO-REGRESIVO”

Presentada por el alumno:

MORALES

Apellido paterno

AGUILAR

materno

ERIC

nombre(s)

Con registro:

A	0	7	0	4	0	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

DR. RICARDO OCTAVIO ARTURO MOTA PALOMINO

Presidente

DR. DANIEL OLGÚN SALINAS

Segundo Vocal

DR. DAVID SEBASTIAN BALTAZAR

Tercer Vocal

M. EN C. GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

Secretario

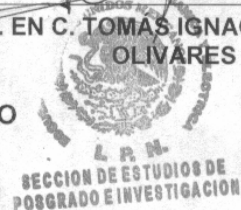
DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Suplente

M. EN C. TOMAS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA SESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 23 del mes Junio del año 2009, el (la) que suscribe **Ing. Eric Morales Aguilar** alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro A070404 adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Ricardo O. Mota Palomino** y cede los derechos del trabajo intitulado: **“Desarrollo de un programa para resolver el problema de flujos de potencia en redes aéreas de distribución por el método progresivo - regresivo”**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: *eric_m_a_170583@hotmail.com*.

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Eric Morales Aguilar

Nombre y firma

RESUMEN

En este trabajo de tesis se presenta el modelado los diferentes componentes de las redes de distribución radiales aéreas tales como cargas, líneas y transformadores, se desarrolla un paquete computacional en lenguaje FORTRAN el cual resuelve el problema de flujos de potencia en este tipo redes. El código y diagramas de flujo del software desarrollado se exponen al final del trabajo.

ABSTRACT

In this thesis work is modeling the various components of the air radial distribution systems, such as loads, lines and transformers, is a computer language FORTRAN package which solves the problem of power flow in this type networks. The code and flow charts of the software developed are presented at the end of work.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	I
ABSTRACT	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Justificación	2
1.4 Estado del arte.....	3
1.5 Aportaciones	4
1.6 Estructura del trabajo de tesis	4
1.7 Selección del algoritmo a implementar.	5
1.7.1. Algoritmos observados	6
1.7.2. Pruebas a los algoritmos flujo de potencia	6
CAPÍTULO 2 Características y modelo de elementos de redes de distribución.....	9
2.1 Impedancia serie de líneas de distribución.....	10
2.1.1 Impedancia serie de líneas aéreas	10
2.1.2 Líneas de distribución no traspuestas	11
2.1.3 Ecuaciones de Carson.....	12
2.1.4 Modificación a las ecuaciones de Carson.....	13
2.1.5 Matriz de impedancias primitivas para líneas aéreas	14
2.1.6 Matriz de impedancia de fase para líneas aéreas.....	15
2.1.7 Líneas de Distribución Aéreas en Paralelo	17
2.1.8 Desarrollo de matriz de impedancia	19
2.1.9 Metodología implementada para cálculo de impedancias de líneas aéreas.	19
2.2 Admitancia en paralelo de líneas aéreas	21
2.2.1 Ecuación general caída de Voltaje	22
2.2.2 Líneas Aéreas.....	23
2.2.3 La admitancia en derivación de líneas aéreas paralelas	26
2.2.4 Desarrollo de matriz de admitancia en paralelo	27
2.2.5 Metodología implementada para cálculo de admitancias en paralelo de líneas aéreas.....	28
2.3 Modelado de líneas en sistemas de distribución.....	29
2.3.1 Matrices generalizadas para líneas	29
2.3.2 Modelo exacto segmento de línea	30
2.3.3 Matrices generales de líneas paralelas	31
2.4 Modelos de transformadores trifásicos.....	32
2.4.1 Introducción.....	33

2.4.2	Matrices generalizadas.....	33
2.4.3	Conexión delta-estrella aterrizada reductora.....	34
2.4.4	Conexión estrella aislada-delta reductora.....	36
2.4.5	Conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada.....	38
2.4.6	Conexión delta-delta.....	41
2.4.7	Conexión Estrella abierta - Delta abierta.....	43
2.5	Modelado de carga.....	45
2.5.1	Carga conectada en estrella.....	45
2.5.1.1	Carga de potencia activa y reactiva constantes.....	46
2.5.1.2	Cargas de Impedancia constante.....	46
2.5.1.3	Corriente constante en la carga.....	47
2.5.2	Cargas conectadas en delta.....	48
2.5.2.1	Cargas de potencia activa y reactiva constantes.....	48
2.5.2.2	Cargas de impedancia constante.....	49
2.5.2.3	Cargas de corriente constante.....	49
2.5.2.4	Corrientes de línea que alimentan a una carga conectada en delta.....	50
2.5.3	Cargas bifásicas y monofásicas.....	50
CAPÍTULO 3 Metodología implementada.....		51
3.1	Ordenamiento por niveles de una red eléctrica.....	51
3.2	Técnica de barrido progresivo-regresivo (escalera) (V-I-PARS).....	55
3.2.1	Descripción del algoritmo.....	55
3.2.2	Barrido progresivo.....	55
3.2.3	Barrido regresivo.....	56
3.2.4	Calculo error y convergencia.....	56
CAPÍTULO 4 Análisis de resultados.....		59
4.1	Prueba de la sub-rutina para crear los vectores de guía.....	60
4.2	Prueba de las sub-rutinas para crear las matrices de impedancia de línea y Admitancia en paralelo.....	64
4.3	Prueba del algoritmo progresivo-regresivo (escalera).....	68
4.4	Pruebas de las conexiones de los transformadores.....	76
4.4.1	Conexión Delta – Estrella aterrizada.....	76
4.4.2	Conexión Estrella aterrizada – Estrella aterrizada.....	78
4.4.3	Conexión Delta - Delta.....	79
4.4.4	Conexión Estrella aterrizada - Delta.....	80
4.5	Discusión de los sistemas de pruebas.....	81
CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones.....		82
5.1	Conclusiones.....	82
5.2	Recomendaciones para trabajos futuros.....	83
BIBLIOGRAFIA.....		84
APÉNDICE A Descripción de los sistemas de prueba.....		87
APENDICE B Código del algoritmo realizado.....		93

B.1.- Como ingresar y extrer datos del programa realizado.....	148
--	-----

APENDICE C

Descripción de los algoritmos observados	152
C.1 Algoritmo de flujo de potencia por reducción de Norton para red para sistemas radiales (n-pars)	152
C.1.1 Descripción del algoritmo.....	152
C.1.2 Convergencia.....	153
C.2 Método Newton-Raphson	153
C.2.1 Descripción del Algoritmo.....	154
C.3 Algoritmos para flujo de potencia desacoplado rápido para sistemas radiales (depars) 156	
C.3.1 Descripción del algoritmo.....	157
C.3.2 Alimentador simple.....	158
C.3.3 Variaciones de DePARS	159
C.3.3.1 VI-DePARS.....	160
C.3.3.2 I-DePARS	160
C.5 Descripción de los sistemas de prueba	161

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1.- Iteraciones requerirás por cada algoritmo	6
Figura 1.2.- Propiedad de convergencia.....	7
Figura 1.3.- Total de operaciones flotantes por cada iteración.	7

CAPÍTULO 2

Figura 2.1.- Flujos magnéticos.....	10
Figura 2.2.- Conductores y sus imágenes.....	12
Figura 2.3.- Líneas Aéreas Paralelas.....	18
Figura 2.4.- Separaciones de fases en una línea de distribución trifásica.....	19
Figura 2.5.- Campo eléctrico alrededor de un conductor cargado.....	21
Figura 2.6.- Arreglo de conductores cercanos.....	22
Figura 2.7.- Conductores y sus imágenes.....	23
Figura 2.12.- Modelo del segmento de línea trifásica	30
Figura 2.13.- Equivalente Pi para líneas paralelas.....	31
Figura 2.14.- Banco de transformación trifásico	33
Figura 2.15.- Conexión delta-estrella aterrizada	34
Figura 2.16.- Conexión normalizada estrella aislada-delta	37
Figura 2.17.- Conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada.....	39
Figura 2.18.- Conexión delta-delta.....	41
Figura 2.19.- Conexión estrella abierta-delta abierta	43
Figura 2.20.- Carga conectada en estrella.....	45
Figura 2.21.- Carga conectada en delta	48

CAPÍTULO 3

Figura 3.1.- Red de seis nodos.....	52
Figura 3.2.-Vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”	52
Figura 3.3.- Red de seis nodos con niveles	53
Figura 3.4.-Vectores “V_nivel” y “V_bandera”	53
Figura 3.5.- Diagrama de flujo: “V_nivel” y “V_bandera”	54
Figura 3.6.- Diagrama de flujo general algoritmo Barrido progresivo-regresivo	57

CAPÍTULO 4

Figura 4.1.- Red de distribución radial.....	60
Figura 4.2.- Red radial con niveles.....	64
Figura 4.3.- línea de prueba 1	64
Figura 4.4.- línea de prueba 2	64
Figura 4.5.- Circuito de prueba 1	68
Figura 4.6.- Circuito de prueba 2.....	76
Figura 4.7.- Circuito de prueba 4.....	78
Figura 4.8.- Circuito de prueba 5.....	79
Figura 4.9.- Circuito de prueba 6.....	80

APENDICE B

Figura B.1.- Primer bloque de rutina forma vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”	93
Figura B.2.- Primer bloque de rutina forma vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”	94
Figura B.3.- Segundo bloque de rutina forma vectores “V_nivel” y “V_bandera”	95
Figura B.4.- Programa principal	101
Figura B.5.- Subrutina lee_datos_entrada	103
Figura B.6.- Subrutina lee_datos_entrada	104
Figura B.7.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	109
Figura B.8.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	110
Figura B.9.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	111
Figura B.10.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	112
Figura B.11.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	113
Figura B.12.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B	114
Figura B.13.- Subrutina Barrido_P_R	124
Figura B.14.- Subrutina Barrido_P_R	125
Figura B.15.- Subrutina Barrido_P_R	126
Figura B.16.- Subrutina Barrido_P_R	127
Figura B.17.- Subrutina Barrido_P_R	128
Figura B.18.- Subrutina Barrido_P_R	129
Figura B.19.- Subrutina Barrido_P_R	130
Figura B.20.- Subrutina Barrido_P_R	131
Figura B.21.- Subrutina Barrido_P_R	132
Figura B.22.- Subrutina Barrido_P_R	133
Figura B.22.- Datos de entrada	148
Figura B.23.- Datos de entrada	149
Figura B.24.- Datos de entrada	150
Figura B.25.- Datos de entrada	151

APENDICE C

Figura C.1.- Representación de la matriz Jacobiana y vectores: correcciones y error	155
Figura C.2.- ejemplo de alimentador radial simple	158

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1.- Datos de conductores.....	19
---------------------------------------	----

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1.- Método de barrido progresivo /regresivo.....	55
--	----

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1 - Primer bloque de Resultados: Vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”.....	61
Tabla 4.2.- Segundo bloque de Resultados: Vectores “V_nivel” y “V_bandera”.....	62
Tabla 4.3.- Datos de conductores.....	65
Tabla 4.3.- Matriz de impedancia de la línea de prueba 1.....	65
Tabla 4.4.- Matriz de admitancia en paralelo de la línea de prueba 1.....	65
Tabla 4.5.- Datos de conductores.....	66
Tabla 4.6.- Matriz de impedancia de la línea de prueba 2.....	66
Tabla 4.7.- Matriz de admitancia en paralelo de la línea de prueba 2.....	67
Tabla 4.8.- Resultados obtenidos de la prueba 1.....	69
Tabla 4.9.- Resultados obtenidos de la prueba 1.....	69
Tabla 4.10.- Resultados obtenidos de la prueba 1.....	70
Tabla 4.11.- Resultados obtenidos de la prueba 2.....	72
Tabla 4.12.- Resultados obtenidos de la prueba 2.....	73
Tabla 4.13.- Resultados obtenidos de la prueba 1.....	73
Tabla 4.13.- Resultados obtenidos de la prueba 2.....	76
Tabla 4.14.- Resultados obtenidos de la prueba 2.....	76
Tabla 4.15.- Resultados obtenidos de la prueba 2.....	77
Tabla 4.16.- Resultados obtenidos de la prueba 3.....	77
Tabla 4.17.- Resultados obtenidos de la prueba 3.....	77
Tabla 4.18.- Resultados obtenidos de la prueba 3.....	77
Tabla 4.19.- Resultados obtenidos de la prueba 4.....	78
Tabla 4.20.- Resultados obtenidos de la prueba 4.....	78
Tabla 4.21.- Resultados obtenidos de la prueba 4.....	78
Tabla 4.22.- Resultados obtenidos de la prueba 5.....	79
Tabla 4.23.- Resultados obtenidos de la prueba 5.....	79
Tabla 4.24.- Resultados obtenidos de la prueba 5.....	79
Tabla 4.25.- Resultados obtenidos de la prueba 6.....	80
Tabla 4.26.- Resultados obtenidos de la prueba 6.....	80
Tabla 4.27.- Resultados obtenidos de la prueba 6.....	80

APENDICE A

Tabla A1.- Carga en nodos del circuito de prueba 1.....	87
Tabla A2.- Impedancia de línea del circuito de prueba 1.....	88
Tabla A3.- Carga en nodos del circuito de prueba 1.....	88
Tabla A4.- Impedancia de línea del circuito de prueba 2.....	89
Tabla A5.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 2.....	89

Tabla A6.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 2	90
Tabla A7.- Impedancia de línea del circuito de prueba 3	90
Tabla A8.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 3	90
Tabla A9.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 3	90
Tabla A10.- Impedancia de línea del circuito de prueba 4.....	91
Tabla A11.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 4.....	91
Tabla A12.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 4.....	91
Tabla A13.- Impedancia de línea del circuito de prueba 5.....	91
Tabla A14.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 5.....	92
Tabla A15.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 5.....	92
Tabla A16.- Impedancia de línea del circuito de prueba 6.....	92
Tabla A17.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 6.....	92
Tabla A18.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 6.....	92

APENDICE C

Tabla C.1.- Método de reducción de la red (N-PARS).....	152
Tabla C.3.- Método de Newton	156
Tabla C.4.- Algoritmo de flujo de potencia desacoplado rápido para sistemas radiales.....	158
Tabla C.5.- Formulaciones para DePARS	159
Tabla C.6.- Datos de la prueba J	161

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

El problema de flujos de potencia en sistemas eléctricos a sido ampliamente estudiado durante varias décadas. Sin embargo, la mayor parte de las investigaciones han sido enfocadas a los sistemas de transmisión. Inicialmente, los resultados de estas investigaciones se usaron como metodología general de solución a todo tipo de redes (malladas y radiales), pasando por alto las posibles simplificaciones en el análisis de sistemas de distribución resultantes de un adecuado manejo de la topología radial.

Debido a las particularidades específicas que presentan los sistemas de distribución hacen necesario que el estudio de flujo de potencia se realice para cada fase, a diferencia del equivalente monofásico usado para redes de transmisión. Adicionalmente, para un adecuado estudio de problemas en secuencia positiva, considerando desbalance de cargas, estudios de caída de tensión y compensación capacitiva, entre otros, es necesario estudiar el problema de flujo de potencia radial en coordenadas de fase.

1.1 Objetivo general

Diseñar un programa de cómputo en base a un algoritmo que resuelva el problema de flujos de potencia en redes de distribución en forma trifásica tomando en consideración las particularidades de la red y los distintos elementos que en ella se encuentran.

1.2 Objetivos específicos

Estudiar el problema de flujos de potencia en redes de distribución, considerar distintos tipos de solución y seleccionar un método a desarrollar para realizar el análisis de distintas redes.

Programar un algoritmo que forme la matriz de impedancia de línea " Z_{abc} " dando el resultado en Ω considerando las líneas no transpuestas.

Programar el algoritmo que forme la matriz de admitancia en paralelo de la línea “ Y_{abc} ” dando el resultado en Siemens “S” esto debido a que en ocasiones se presenta una línea de longitud media.

Programar un algoritmo que forme vectores de ordenamiento por niveles que ayuden al manejo de la red de distribución tomando en consideración que es de tipo radial.

Programar un algoritmo que resuelva el problema de flujos en redes de distribución, que tome como datos de entrada, entre otros parámetros, los datos de salida de las subrutinas que forman la matriz de impedancia de línea “ Z_{abc} ”, la matriz de admitancia en paralelo de la línea “ Y_{abc} ” y los vectores de ordenamiento por niveles.

1.3 Justificación

Las metodologías implementadas para la solución del problema de flujos de potencia en redes de distribución tienen que tomar en cuenta particularidades de los sistemas como son:

- Desbalance de carga entre sus fases
- Baja relación X/R
- Líneas no transpuestas
- Topologías radiales
- Múltiples conexiones (trifásicas, bifásicas y monofásicas)
- Cargas de distinta naturaleza

Por este motivo se deben modelar correctamente los distintos elementos de la red en forma trifásica y tomando en cuenta la topología de la red se debe escoger un algoritmo que sea idóneo en convergencia, número de operaciones de punto flotante y precisión.

1.4 Estado del arte

En 1988 D. Shirmohammadi, H.W. Hong presentaron una metodología para el ordenamiento de redes radiales, esta consiste en ordenar el sistema por niveles estando el nodo que se alimenta de la subestación en el nivel cero y los conectados a él en nivel uno siguiendo así sucesivamente hasta llegar al nodo mas alejado de la fuente, también describió un algoritmo de flujos en redes de distribución basado en el método iterativo de barrido progresivo- regresivo (escalera) en el cual calcula voltajes en su barrido progresivo (del nodo 1 al nodo N) y calcula corrientes en su barrido regresivo (del nodo N al nodo 1), además de realizar trabajo en el área de reconfiguración de redes basado en la reducción de perdidas resistivas en la línea ^[1].

En 1990 Tsai-Hsiang Chen, Mo-Shing Chen realizan estudios en redes de distribución para determinar como afectan los transformadores, bancos de capacitores, carga y conductores al número de iteraciones requeridas para resolverlo por el método de solución de Gauss “ Z_{Bus} ”^[2].

En 1995 Ray Daniel Zimmerman realizo una comparación entre distintos algoritmos para la solución del problema de flujos de potencia en redes de distribución, en la cual concluyo que el mejor método es el de barrido progresivo-regresivo con el procedimiento de calculo de voltaje en el barrido progresivo (del nodo1 al nodo N) y calculo de corrientes en el barrido regresivo (del nodo N al Nodo 1) ^[3].

En 1999 W. Howard Phillips, William H. Kersting, presentan un modelado trifásico para transformador estrella aterrizada – delta considerando el desfaseamiento de 30 grados, así como un estudio de corto circuito en el sistema ^[4].

En 2003 Rade M. Ciric, Antonio P. Feltrin presentan un análisis del efecto de una línea con neutro no aterrizado contra neutro aterrizado, concluyendo que el sistema con neutro no aterrizado toma mas iteraciones para ser resuelto, basándose en el método iterativo de barrido progresivo-regresivo ^[5].

En 2006 L. R. Araujo, D. R. R. Penido, presentan un estudio comparativo entre un método basado en inyección de corriente aplicando el método de Newton para resolver las ecuaciones

no lineales y el método iterativo de barrido progresivo-regresivo, la comparación se basa en el número de iteraciones requeridas por cada método para la solución del sistema ^[6].

En 2007 William H. Kersting, hace un modelaje de elementos del sistema de distribución para el método iterativo de barrido progresivo-regresivo, representando la modelación de estos en matrices de 3x3 ^[7].

1.5 Aportaciones

- Desarrollo de subrutinas que preparan los parámetros de líneas y de la topología de la red para el programa principal de flujos de potencia.
- Desarrollo de un programa para resolver el problema de flujos de potencia en redes de distribución radiales con una modelación trifásica, auxiliar para futuras investigaciones.
- Proporcionar diagramas de flujo, manuales y algoritmos en lenguaje FORTRAN 90 del paquete computacional desarrollado, mediante el método de Barrido progresivo-regresivo que puedan ser modificados y/o adecuados para futuras investigaciones en redes de distribución radiales.

1.6 Estructura del trabajo de tesis

En el capítulo 1 se presenta una breve introducción al problema de flujos de potencia, los objetivos generales, objetivos específicos, justificación del trabajo de tesis, el estado del arte, las aportaciones del trabajo de tesis, la estructura de la tesis y la justificación del método iterativo seleccionado.

En el capítulo 2 se analizan las características físicas y modelo de elementos en redes de distribución radial, los elementos analizados son: Impedancia serie de líneas de distribución

aéreas, Admitancia en paralelo de líneas de distribución aéreas, modelado de líneas en sistemas de distribución, Modelos de transformadores trifásicos y Modelado de carga.

En el capítulo 3 se presenta la metodología implementada, el proceso y diagrama de flujo detallado para el ordenamiento por niveles de redes radiales, y detallado del algoritmo de barrido progresivo-regresivo.

En el capítulo 4 se presentan resultados obtenidos con el programa, en redes de distribución radiales.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros con esta línea de estudio.

1.7 Selección del algoritmo a implementar.

En este apartado se revisa la bibliografía existente acerca de los algoritmos que se han desarrollado en redes de distribución radiales, se realiza una breve descripción de los algoritmos existentes en el capítulo 3.2 y apéndice C, presentando los conceptos básicos y la forma como se realiza el procedimiento iterativo de cada algoritmo.

El objetivo principal del apartado es el de identificar un algoritmo para redes de distribución radial que sea el más idóneo para desarrollar basado en sus características particulares. Entre los distintos métodos observados, se revisa un comparativo de los desempeños de cada algoritmo ^[3], las comparaciones fueron hechas basándose en:

- Número de iteraciones para alcanzar una tolerancia determinada
- Factor de convergencia por método
- Número de operaciones de punto flotante necesarias por cada método

Estas tres pruebas se consideran las indicadas para determinar el rendimiento de cada algoritmo visto desde distintos puntos, la cual da una buena visión de las necesidades computacionales de cada método ^[3].

1.7.1. Algoritmos observados

En las comparaciones realizadas [3] están los 5 diferentes algoritmos descritos en el capítulo 3.2 y apendices C.1, C.2, C.3 y C.4 que pueden clasificarse en las cuatro categorías siguientes:

- Algoritmos tradicionales para la formulación estándar (Newton-Raphson)
- Método de reducción de la red (N-PARS)
- Método de barrido progresivo / regresivo (V-I-PARS)
- Métodos desacoplados rápidos (DePARS)

1.7.2. Pruebas a los algoritmos flujo de potencia

Este apartado revisa el desempeño, obtenido en [3], de los algoritmos de flujo de potencia descritos en el capítulo 3.2 y el apendice C. En primer lugar, se considera una comparación del número de iteraciones necesarias por los diferentes algoritmos para resolver sistemas de prueba B y J (Apendice C.5), los resultados se muestran en la Figura 1.1.

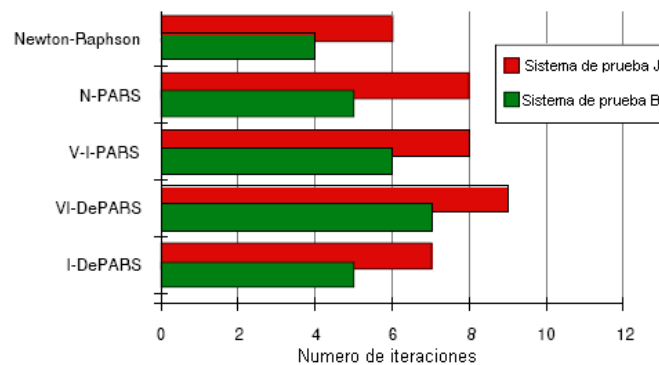


Figura 1.1.- Iteraciones requerirás por cada algoritmo

Con unas pocas excepciones, los algoritmos requieren entre cinco y diez iteraciones para converger.

El método Newton-Raphson requiere, en promedio, un menor número de iteraciones, debido a su propiedad de convergencia cuadrática. El resto de los algoritmos muestran lo que parece

ser convergencia lineal. El segundo criterio de evaluación usado en [3] (Figura 1.2) prueba la diferencia entre los métodos con relación a su error.

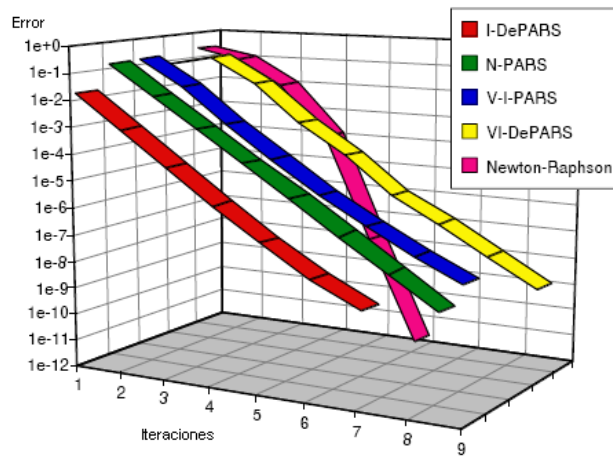


Figura 1.2.- Propiedad de convergencia.

A pesar de su excelente rendimiento en lo que respecta al número de iteraciones, la Figura 1.3 muestra que el número total de operaciones requeridas por el método Newton-Raphson es de un orden de magnitud mayor, en promedio, superior a la impuesta por el resto de los métodos^[3].

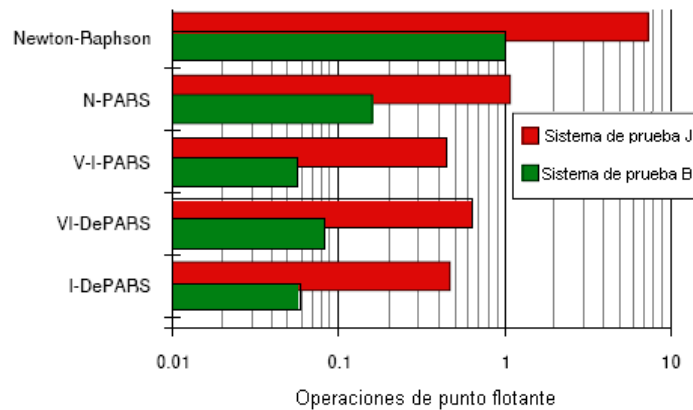


Figura 1.3.- Total de operaciones flotantes por cada iteración.

Después de revisar las distintas pruebas a los algoritmos se llega a los siguientes resultados [3], mostrando el mejor método por prueba:

- Número de iteraciones necesarias - Newton Raphson
- Propiedad de convergencia - Newton Raphson
- Número de operaciones flotantes totales – barrido progresivo-regresivo (V-I- PARS)

Se determinó que la prueba más importante es el número de operaciones de punto flotante que aunque no es una medida perfecta, es elegida como un indicador relativo de tiempo de ejecución en un lenguaje compilado dando como resultado que aunque el método de Newton-Raphson realiza menos iteraciones para converger, realiza muchísimo mas operaciones flotantes para poder lograrlo ^[3]. En la propiedad de convergencia una practica muy común es que se de una tolerancia de 1E-4 y en ese punto el método de Newton-Raphson es similar al resto de los demás métodos. En el número de operaciones flotantes el mejor método es V-I-PARS siendo similar a los demás en propiedad de convergencia y casi con el mismo número de iteraciones necesarias para lograr la convergencia ^[3]. Con esta base se decidió desarrollar el método V-I- PARS (barrido progresivo /regresivo) que se presenta en los siguientes capítulos.

CAPÍTULO 2

Características y modelo de elementos de redes de distribución.

En este capítulo se presentan las características y modelación de elementos de redes de distribución como es el transformador trifásico en conexiones: Delta-Delta, Estrella aterrizada-Delta, Estrella aterrizada-Estrella aterrizada y Delta-Estrella aterrizada; impedancia de línea aérea en conexión Delta y estrella-aterrizada, admitancia de línea en conexión delta y estrella-aterrizada, modelado de carga, modelación trifásica de líneas ya sea para circuitos trifásicos, bifásicos ó monofásicos.

En las redes de transmisión o distribución ya sea malladas o radiales la correcta modelación de sus elementos es esencial para un buen desarrollo de todo análisis ó software orientado a resolver el problema de flujos de potencia. En este capítulo se exponen distintos elementos de una red eléctrica como son: transformadores líneas y las cargas.

Desde que las líneas de distribución son generalmente no transpuestas, con baja relación X/R , en el análisis mas exacto no debe hacer ninguna suposición en cuanto al espacio entre conductores y su calibre.

La admitancia en derivación de una línea consiste de la conductancia y la susceptancia capacitiva. La conductancia es generalmente ignorada porque es muy pequeña en comparación con el susceptancia capacitiva. En las líneas de distribución se presentan generalmente líneas cortas (menos de 50 millas ó 80 Km.) por esta razón en la mayoría de los casos es ignorada, sin embargo hay ocasiones de que la línea de distribución es mediana (mas de 50 millas ó 80 Km. y menos de 150 millas ó 240 Km.) o se requiere de una modelación mas exacta, por lo tanto es importante tener su correcta modelación.

En el caso del transformador se pueden aplicar una variedad de conexiones, tanto puede ser un elemento trifásico o tres elementos monofásicos conectados en la forma deseada. En el caso de la carga en sistemas de distribución puede ser trifásica, bifásica o monofásica, que por lo general es una combinación de estas por esto, en el análisis de un transformador de

distribución, es importante que las diferentes conexiones trifásicas sean modelados correctamente.

La carga en un sistema de distribución es especificada típicamente por la potencia compleja consumida. Esta demanda se puede especificar en kVA y el factor de potencia, kW y factor de potencia, o por kW y kVAr. El voltaje especificado será siempre el voltaje en las terminales de baja tensión de la subestación de distribución. Esto crea un problema puesto que el requisito de corriente actual de las cargas no puede ser resuelto sin saber el voltaje. Por esta razón, debe ser empleada una técnica iterativa.

2.1 Impedancia serie de líneas de distribución

Antes de comenzar un análisis de potencia en sistemas de distribución primero se debe encontrar la impedancia serie $z = R + jX$ de las líneas [7]. La impedancia serie de una línea (monofásica, bifásica o trifásica) de distribución consiste en calcular la resistencia del conductor y la reactancia propia y mutua que resulta de los campos magnéticos circundantes al conductor.

2.1.1 Impedancia serie de líneas aéreas

La componente de reactancia inductiva (propia y mutua) de la impedancia es una función del total de los campos magnéticos que circundan un conductor la figura 2.1 muestra los conductores 1 hasta n con las líneas de flujo magnético creadas por flujo de corrientes en cada uno de los conductores. Y se asume que la suma de corrientes sea cero.

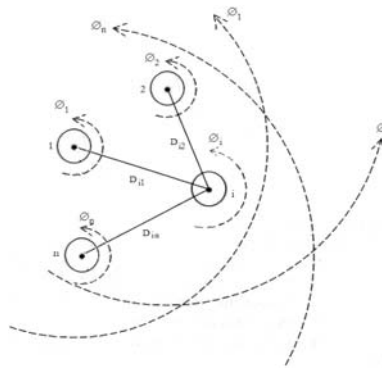


Figura 2.1.- Flujos magnéticos

$$I_1 + I_2 + \dots I_i + \dots I_n = 0 \quad 2.1$$

El flujo total que enlaza al conductor i es dado por:

$$\lambda_i = 2 \cdot 10^{-7} * \left[I_1 \cdot \ln \frac{1}{D_{i1}} + I_2 \cdot \ln \frac{1}{D_{i2}} + \dots I_i \cdot \ln \frac{1}{GMR_i} + \dots I_n \cdot \ln \frac{1}{D_{in}} \right] \quad W - T / m \quad 2.2$$

Donde:

D_{in} = Distancia entre el conductor i y el conductor n (pies)

GMR_i = Radio medio geométrico del conductor i (pies)

La inductancia del conductor i consiste de la “inductancia propia” del conductor i y de la inductancia mutua entre el conductor i y todos los de mas conductores ($n-1$).

Por definición:

$$\text{Inductancia propia:} \quad L_{ii} = \frac{\lambda_{ii}}{I_i} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{GMR_i} \quad \text{H/m} \quad 2.3$$

$$\text{Inductancia mutua:} \quad L_{in} = \frac{\lambda_{in}}{I_n} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D_{in}} \quad \text{H/m} \quad 2.4$$

2.1.2 Líneas de distribución no traspuestas

Debido a que los sistemas de distribución consisten líneas monofásicas bifásicas y trifásicas no traspuestas que alimentan a cargas no balanceadas es necesario conservar la identidad de los términos de las impedancias propias y mutuas de los conductores y tomar en cuenta el camino de retorno por tierra para corrientes desbalanceadas. La resistencia de los conductores es tomada directamente de la tabla de datos de conductores. Las ecuaciones 2.3 y 2.4 son usadas para calcular la reactancia inductiva y propia del conductor. La reactancia inductiva asociada a una frecuencia de 60 Hz, y la longitud del conductor sea supuesto una milla con estas suposiciones la impedancia propia y mutua son dadas por:

$$\bar{z}_{ii} = r_i + j0.12134 \cdot \ln \frac{1}{GMR_i} \quad \Omega/milla \quad 2.5$$

$$\bar{z}_{ij} = j0.12134 \cdot \ln \frac{1}{D_{ij}} \quad \Omega/milla \quad 2.6$$

2.1.3 Ecuaciones de Carson

En el artículo de Carson de 1926 [8], desarrollo una técnica en la cual las impedancias propias y mutuas para un número arbitrario de conductores aéreos pueden ser determinados. En el documento se asume que la tierra es infinita, sólida uniforme, con una superficie superior uniforme plana y una resistencia constante. Carson hizo uso de conductores de imagen esto es, cada conductor a una distancia dada sobre la tierra y tiene un conductor imagen a la misma distancia por debajo de la tierra, figura 2.2

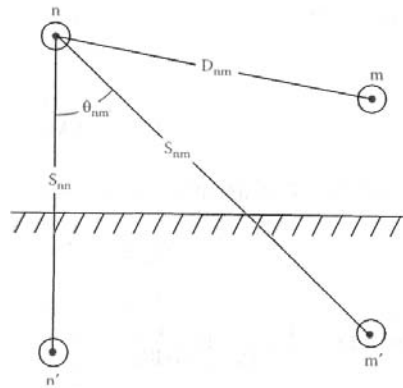


Figura 2.2.- Conductores y sus imágenes

Haciendo Referencia a la figura 2.2 las ecuaciones originales de Carson están dadas por la ecuaciones de Impedancia propia del conductor i (2.7) y de Impedancia mutua entre conductores i y j (2.8).

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 4wP_{ii}G + j \left(X_i + 2wG \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4wQ_{ii}G \right) \quad \Omega/milla \quad 2.7$$

$$\hat{z}_{ij} = r_i + 4wP_{ij}G + j \left(2wG \cdot \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4wQ_{ij}G \right) \quad \Omega/milla \quad 2.8$$

Donde:

\hat{z}_{ii} = Impedancia propia de l conductor i en $\Omega/milla$.

\hat{z}_{ij} = Impedancia mutua entre conductores i y j en $\Omega/milla$.

r_i = Resistencia del conductor i en $\Omega/milla$.

$w = 2\pi f$ = Frecuencia angular del sistema en radianes por segundos.

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

RD_i = Radio del conductor i en pies (ft).

GMR_i = Radio medio geométrico del conductor i en pies (ft).

f = frecuencia del sistema en Hertz.

p = Resistividad de tierra en ohms-metro.

D_{ij} = Distancia entre conductores i y j en pies (figura 2.2)

S_{ij} = Distancia entre el conductor i y la imagen j en pies (figura 2.2)

θ_{ij} = Ángulo entre el par de líneas dibujadas del conductor i con su imagen y del conductor i y la imagen del conductor j (figura 2.2).

2.1.4 Modificación a las ecuaciones de Carson

Solo 3 aproximaciones son hechas para encontrar las ecuaciones modificadas de Carson, las ecuaciones (2.7) y (2.8) no pueden ser utilizadas porque la *resistencia de tierra, el RMG de la tierra y las distancias de conductores a la tierra no eran conocidos*. Las ecuaciones de Carson modificadas tienen definidos los parámetros ausentes:

$$r_d = 0.09530 \Omega/milla \quad 2.9$$

$$\ln \frac{D_{id} \cdot D_{di}}{GMR_d} = \ln \frac{D_{dj} \cdot D_{jd}}{GMR_d} = 7.93402 \quad 2.10$$

Las ecuaciones de Carson con las aproximaciones descritas son:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.00158836 \cdot f + j0.00202237 f \cdot \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{\rho}{f} \right) \Omega/milla \quad 2.11$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.00158836 \cdot f + j0.00202237 f \cdot \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.6786 + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{\rho}{f} \right) \Omega/milla \quad 2.12$$

Ahora se asume por rutina y constancia de datos que:

f = Frecuencia = 60 Hertz

ρ = Resistencia de tierra = 100 ohm-metro

Usando estas aproximaciones (Ec 2.11 y Ec 2.12) y estas suposiciones f y ρ las ecuaciones modificadas de Carson son:

$$\hat{z}_{ii} = r_i + 0.09530 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.93402 \right) \Omega/milla \quad 2.13$$

$$\hat{z}_{ij} = 0.09530 + j0.12134 \cdot \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.93402 \right) \Omega/milla \quad 2.14$$

Las ecuaciones modificadas de Carson son usadas para calcular la impedancia propia primitiva e impedancia mutua primitiva de líneas aéreas y subterráneas.

2.1.5 Matriz de impedancias primitivas para líneas aéreas

Las ecuaciones 2.13 y 2.14 son usadas para calcularlos elementos de una matriz de impedancia primitiva $n_{cond} \times n_{cond}$. Un segmento de línea aérea de distribución de 3 conductores y con neutro aterrizado resultara en una matriz de 4 x 4. Para un segmento de línea aterrizado subterráneo consiste de tres cables neutros concéntricos la matriz resultante será de 6 x 6. La matriz de impedancia primitiva para una línea trifásica con m neutros será de la forma:

$$\left[\hat{z}_{primitiva} \right] = \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \hat{z}_{an1} & \hat{z}_{an2} & \hat{z}_{anm} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bn1} & \hat{z}_{bn2} & \hat{z}_{bnm} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cn1} & \hat{z}_{cn2} & \hat{z}_{cnm} \\ \hline \hat{z}_{n1a} & \hat{z}_{n1b} & \hat{z}_{n1c} & \hat{z}_{n1n1} & \hat{z}_{n1n2} & \hat{z}_{n1nm} \\ \hat{z}_{n2a} & \hat{z}_{n2b} & \hat{z}_{n2c} & \hat{z}_{n2n1} & \hat{z}_{n2n2} & \hat{z}_{n2nm} \\ \hat{z}_{nma} & \hat{z}_{nmb} & \hat{z}_{nmc} & \hat{z}_{nmn1} & \hat{z}_{nmn2} & \hat{z}_{nmnm} \end{bmatrix} \quad 2.15$$

En forma particionada, la ecuación 2.15 se convierte:

$$\left[\hat{z}_{primitiva} \right] = \begin{bmatrix} \left[\hat{z}_{ij} \right] & \left[\hat{z}_{im} \right] \\ \left[\hat{z}_{mj} \right] & \left[\hat{z}_{mm} \right] \end{bmatrix} \quad 2.16$$

2.1.6 Matriz de impedancia de fase para líneas aéreas

Para la mayoría de las aplicaciones la matriz de impedancias primitivas necesita ser reducida a una 3 x 3 matriz “marco de fase” que consiste del equivalente de la impedancia mutua y propia para las 3 fases. Un método común de reducción es la reducción de Kron [9]. Esta sugiere que el neutro esta multi-aterizado. El método de reducción de Kron aplica la LVK al circuito.

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{z}_{aa} & \hat{z}_{ab} & \hat{z}_{ac} & \hat{z}_{an} \\ \hat{z}_{ba} & \hat{z}_{bb} & \hat{z}_{bc} & \hat{z}_{bn} \\ \hat{z}_{ca} & \hat{z}_{cb} & \hat{z}_{cc} & \hat{z}_{cn} \\ \hat{z}_{na} & \hat{z}_{nb} & \hat{z}_{nc} & \hat{z}_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad 2.17$$

En forma particionada la ecuación 2.17 se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \left[V_{abc} \right] \\ \left[V_{ng} \right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left[V'_{abc} \right] \\ \left[V'_{ng} \right] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \left[\hat{z}_{ij} \right] & \left[\hat{z}_{in} \right] \\ \left[\hat{z}_{nj} \right] & \left[\hat{z}_{nn} \right] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \left[I_{abc} \right] \\ \left[I_n \right] \end{bmatrix} \quad 2.18$$

Debido a que el neutro esta aterizado los voltajes V_{ng} y V'_{ng} son iguales a cero. Sustituyendo esos valores en la ecuación (2.18) resulta en:

$$[V_{abc}] = [V'_{abc}] + [\hat{z}_{ij}] \cdot [I_{abc}] + [\hat{z}_{in}] \cdot [I_n] \quad 2.19$$

$$[0] = [0] + [\hat{z}_{nj}] \cdot [I_{abc}] + [\hat{z}_{nn}] \cdot [I_n] \quad 2.20$$

Al resolver 2.20 para $[I_n]$:

$$[I_n] = -[\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \cdot [I_{abc}] \quad 2.21$$

Al sustituir la ecuación 2.21 en la ecuación 2.19

$$\begin{aligned} [V_{abc}] &= [V'_{abc}] + \left([\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \right) [I_{abc}] \\ [V_{abc}] &= [V'_{abc}] + [\hat{z}_{abc}] [I_{abc}] \end{aligned} \quad 2.22$$

Donde:

$$[\hat{z}_{abc}] = [\hat{z}_{ij}] - [\hat{z}_{in}] \cdot [\hat{z}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{z}_{nj}] \quad 2.23$$

La ecuación 2.23 es la forma final de la técnica de reducción de Kron. La matriz de impedancia de fase final queda con la forma:

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \quad 2.24$$

Para una línea de distribución que generalmente es no transpuesta los términos de la diagonal de la ecuación 2.24 no serán iguales el uno a otro y los términos fuera de la diagonal no serán iguales uno con otro. Sin embargo la matriz será simétrica. Para líneas bifásicas y monofásicas en sistemas estrella aterrizada las ecuaciones modificadas de Carson pueden ser aplicadas, la cual conducirá las matrices de impedancia primitiva inicial 3 x 3 y 2 x 2. La reducción de Kron conducirá las matrices a 2 x 2 y un solo elemento. Estas matrices pueden ser expandidas a matrices de marco de fase de 3 x 3 por la adición de filas y columnas que consisten de elementos iguales a cero para las fases ausentes.

La matriz de impedancia de fase puede ser usada para determinar exactamente las caídas de voltaje en los segmentos de línea del alimentador, una vez que las corrientes han sido determinadas la aplicación de las ecuaciones modificadas de Carson y la matriz de bases lleva al modelo más exacto de un segmento de línea. Las ecuaciones de voltaje en forma de matriz para el segmento de línea son:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_n = \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix}_m \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad 2.25$$

Donde: $Z_{ij} = z_{ij} \cdot \text{longitud}$

La ecuación 2.25 puede ser escrita en forma concentrada como:

$$[VLG_{abc}]_n = [VLG_{abc}]_m + [Z_{abc}] \cdot [I_{abc}]_m \quad 2.26$$

2.1.7 Líneas de Distribución Aéreas en Paralelo

Es bastante común en un sistema de distribución encontrar casos donde dos líneas de distribución están físicamente en paralelo. La combinación en paralelo puede tener ambas líneas de distribución construidas en el mismo poste o las dos líneas pueden ir en paralelo en postes separados pero en el mismo derecho de vía.

La Figura 2.3 muestra el “faseo” de las dos líneas aéreas en un poste. La matriz de impedancia de fase para las líneas de distribución en paralelo es calculada aplicando las ecuaciones de Carson y el método de reducción de Kron.

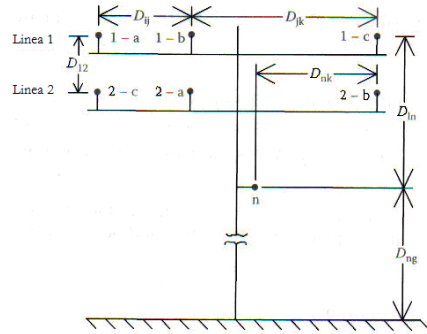


Figura 2.3.- Líneas Aéreas Paralelas

El primer paso es numerar las posiciones de las fases como sigue:

Posición	1	2	3	4	5	6	7
Línea - Fase	1-a	1-b	1-c	2-a	2-b	2-c	Neutro

Con las fases numeradas, la matriz de impedancia primitiva (7 x 7) por l millas puede ser calculada usando las ecuaciones modificadas de Carson. Se debe señalar que si las dos líneas en paralelo se encuentran en postes diferentes, muy probablemente cada poste tendrá un conductor neutro aterrizado. En este caso habrá 8 posiciones y la posición 8 corresponderá al neutro de la línea 2. Una matriz de impedancia primitiva de 8 x 8 se desarrollara como un caso mas critico. La reducción de Kron reducirá la matriz a un matriz de impedancias de fase de 6 x 6. Con referencia a la Figura 2.3, la caída de voltaje en las dos líneas esta dada por:

$$\begin{bmatrix} v1_a \\ v1_b \\ v1_c \\ v2_a \\ v2_b \\ v2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z11_{aa} & z11_{ab} & z11_{ac} & z12_{aa} & z12_{ab} & z12_{ac} \\ z11_{ba} & z11_{bb} & z11_{bc} & z12_{ba} & z12_{bb} & z12_{bc} \\ z11_{ca} & z11_{cb} & z11_{cc} & z12_{ca} & z12_{cb} & z12_{cc} \\ z21_{aa} & z21_{ab} & z21_{ac} & z22_{aa} & z22_{ab} & z22_{ac} \\ z21_{ba} & z21_{bb} & z21_{bc} & z22_{ba} & z22_{bb} & z22_{bc} \\ z21_{ca} & z21_{cb} & z21_{cc} & z22_{ca} & z22_{cb} & z22_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I1_a \\ I1_b \\ I1_c \\ I2_a \\ I2_b \\ I2_c \end{bmatrix} \quad 2.27$$

Particionando la ecuación 2.27 entre el tercer y el cuarto renglón y columna de tal manera que las caídas de voltaje para l milla estén dadas por:

$$[v] = [z][I] = \begin{bmatrix} [v1] \\ [v2] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [z11] & [z12] \\ [z21] & [z22] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [I1] \\ [I2] \end{bmatrix} \quad V \quad 2.28$$

Esta es una forma de calcular la impedancia de línea la cual será utilizada para desarrollar el programa de flujos de potencia.

2.1.8 Desarrollo de matriz de impedancia

Se realiza el procedimiento para la matriz de impedancia de fase del sistema de prueba 1 con el procedimiento mostrado en 2.1.6, tomando una distancia de línea de 0.4734 millas.

Se a desarrollado una rutina en FORTRAN con la finalidad de crear dicha matriz. Este programa toma los datos de la red de un archivo .dat que contiene los datos: número de fases, número de neutros, radio medio geométrico del conductor, resistencia, longitud de la línea y la coordenada del conductor.

2.1.9 Metodología implementada para cálculo de impedancias de líneas aéreas.

Una línea aérea de distribución trifásica se construye como se muestra en la Figura 2.4 se determina la matriz de impedancia de fase de la línea. Los conductores de fase son 336,400 26 / 7 ACSR a 25°C y el conductor neutral es 4/0 6/1 ACSR a 25°C.

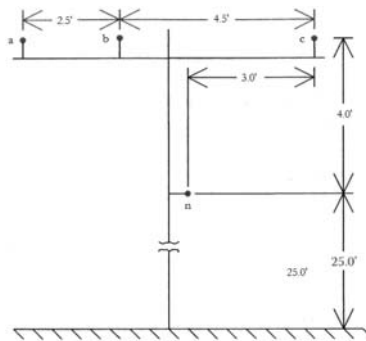


Figura 2.4.- Separaciones de fases en una línea de distribución trifásica

De tabla de datos estándar de conductores se encuentra que:

Tabla 2.1.- Datos de conductores

Datos de tabla "conductores"				
No. conductor	Tipo	Diámetro (Plg.)	RMG (Pies)	Resistencia (Ω /milla)
336,400 26/7 ACSR	Fase	0.721	0.0244	0.278
4/0 6/1 ACSR	Neutro	0.563	0.00814	0.448

Un muy utilizado y efectivo camino para calcular la distancia entre todos los conductores es el de especificar cada posición en coordenadas cartesianas utilizando números complejos donde los números reales representan el eje X y los números imaginarios el eje Y; el punto de referencia “Pr” $0 + 0j$ se toma como un punto en la tierra directamente debajo del conductor de extrema izquierda. El programa en FORTRAN identifica los conductores asignándoles un número, para este ejemplo la fase *a* esta la posición 1, la fase b en la posición 2, la fase c en la posición 3, y el neutro en posición 4.

$$P_1 = 0.0 + 29j \quad P_2 = 2.5 + 29j \quad P_3 = 7.0 + 29j \quad P_4 = 4.0 + 25j$$

Las distancias entre los puntos serán calculados como:

$$\begin{aligned} d_{ab} &= |P_a - P_b| & d_{bc} &= |P_b - P_c| & d_{ca} &= |P_c - P_a| \\ d_{an} &= |P_a - P_n| & d_{bn} &= |P_b - P_n| & d_{cn} &= |P_c - P_n| \end{aligned} \quad 2.29$$

$$\begin{aligned} D_{ab} &= 2.5' & D_{bc} &= 4.5' & D_{ca} &= 7.0' \\ D_{an} &= 5.6569' & D_{bn} &= 4.272' & D_{cn} &= 5.0' \end{aligned}$$

Aplicando las ecuaciones modificadas de Carson para impedancias propias (2.13) y mutuas (2.14), la matriz de impedancias primitivas es:

$$[\hat{z}] = \begin{bmatrix} 0.3733+j1.4133 & 0.0953+j0.8515 & 0.0953+j0.7266 & 0.0953+j0.7524 \\ 0.0953+j0.8515 & 0.3733+j1.4133 & 0.0953+j0.7802 & 0.0953+j0.7865 \\ 0.0953+j0.7266 & 0.0953+j0.7802 & 0.3733+j1.4133 & 0.0953+j0.7674 \\ 0.0953+j0.7524 & 0.0953+j0.7865 & 0.0953+j0.7674 & 0.5403+j1.5465 \end{bmatrix}$$

Aplicando la reducción de Kron (2.23) resulta en la matriz de impedancia de fase en $\Omega/milla$ (13):

$$[\hat{z}_{abc}] = \begin{bmatrix} 0.4028 + j1.0633 & 0.1281 + j0.4862 & 0.1263 + j0.3699 \\ 0.1281 + j0.4862 & 0.4096 + j1.0318 & 0.1297 + j0.4078 \\ 0.1263 + j0.3699 & 0.1297 + j0.4078 & 0.4058 + j1.0497 \end{bmatrix}$$

Tomando en cuenta que la matriz de impedancia de línea (2.5) esta dada en $\Omega/milla$ la longitud de línea debe ser expresada en millas.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.1907+0.5034j & 0.0606+0.2302j & 0.0598+0.1751j \\ 0.0606+0.2302j & 0.1939+0.4885j & 0.0614+0.1930j \\ 0.0598+0.1751j & 0.0614+0.1930j & 0.1921+0.4969j \end{bmatrix} \Omega$$

2.2 Admitancia en paralelo de líneas aéreas

La capacitancia de una línea es el resultado de la diferencia de potencial entre los conductores. Un conductor cargado crea un campo eléctrico que emana hacia el exterior, desde el centro del conductor [5]. Líneas de equipotenciales se crean, estas son concéntricas al conductor cargado (Figura 2.5). En la Figura 2.5, una diferencia de potencial entre dos puntos (P1 y P2) es el resultado de la intensidad de campo eléctrico del conductor cargado. Cuando la diferencia de potencial entre los dos puntos que se conoce, entonces la capacitancia entre los dos puntos pueden ser calculados. Si hay otros conductores cargados cerca, la diferencia de potencial entre los dos puntos será en función de la distancia a los demás conductores y la carga en cada conductor.

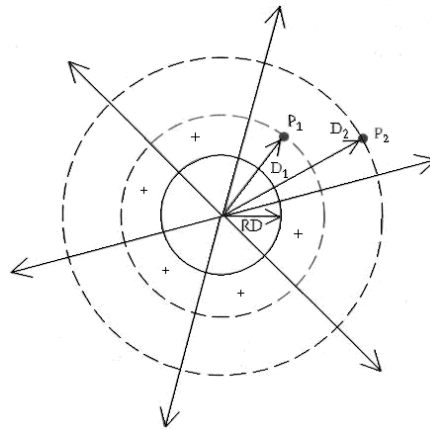


Figura 2.5.- Campo eléctrico alrededor de un conductor cargado

El principio de superposición se utiliza para calcular el voltaje total de caída entre dos puntos y la capacitancia resultante entre los puntos. Comprender que los puntos pueden ser puntos en el espacio, la superficie de dos conductores, o la superficie de un conductor y tierra.

2.2.1 Ecuación general caída de Voltaje

La Figura 2.6 muestra una serie de N cargas positivas sólidas alrededor de conductores. Cada conductor tiene una densidad de carga uniforme de q coulomb/metro [8].

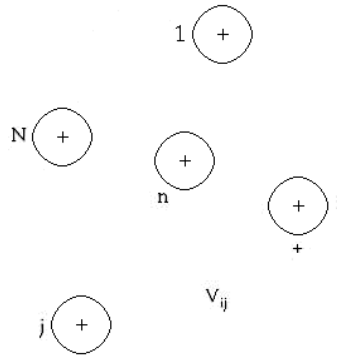


Figura 2.6.- Arreglo de conductores cercanos

La caída de tensión entre el conductor i y j como resultado de todos los conductores cargados viene dada por:

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_1 \ln \frac{D_{1j}}{D_{1i}} + \dots + q_i \ln \frac{D_{ij}}{D_i} + \dots + q_j \ln \frac{D_j}{D_{ij}} + \dots + q_N \ln \frac{D_{Nj}}{D_{Ni}} \right) \quad 2.29$$

La ecuación 2.29 puede ser escrita en una forma general como:

$$V_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{n=1}^N q_n \ln \frac{D_{nj}}{D_{ni}} \quad 2.30$$

Donde:

$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$ = Permitividad absoluta del medio

ϵ_0 = Permitividad de espacio al vacío = $8.8541878 \times 10^{-12}$ F/metro

ϵ_r = Permitividad relativa del medio

q_n = densidad de carga en conductor n cb/metro

D_{ni} = distancia entre el conductor n y el conductor i (Pies)

D_{nj} = distancia entre el conductor n y el conductor j (Pies)

D_{nn} = Radio (RDn) de conductor n

2.2.2 Líneas Aéreas

El método de conductores y sus imágenes se emplea en el cálculo de la capacitancia en derivación de líneas aéreas. Este es el mismo concepto que se utilizó en el apartado 2.1 en la aplicación general de las Ecuaciones Carson.

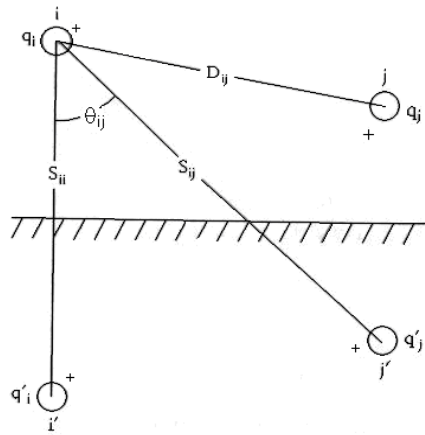


Figura 2.7.- Conductores y sus imágenes

La figura 2.7 ilustra los conductores y sus imágenes y se utilizará para desarrollar una ecuación de caída de voltaje para líneas aéreas. De la Figura 2.7 se asume que:

$$q_i = -q'_i \quad \text{y} \quad q_j = -q'_j \quad 2.32$$

Aplicando la ecuación 2.31 a la figura 2.6

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + q'_i \ln \frac{RD_i}{S_{ii}} + q_j \ln \frac{S_{ij}}{RD_{ij}} + q'_j \ln \frac{RD_{ij}}{S_{ij}} \right) \quad 2.33$$

En la ecuación 2.32, 2.33 se puede superponerse y ser simplificado:

$$V_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(2 \cdot q_i \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} + 2 \cdot q_j \ln \frac{S_{ij}}{RD_{ij}} \right) \quad 2.33$$

Donde:

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

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

D_{ij} = Distancia entre el conductor i y el conductor j (pies).

RD_i = Radio del conductor i (pies).

La ecuación 2.34 da la caída total entre el conductor i y su imagen. El voltaje de caída entre el conductor i y tierra será un medio de la ecuación 2.34, la cual en una forma general es:

$$V_{ig} = \frac{1}{2\pi\epsilon} \left(\hat{P}_{ii} \cdot q_i + \hat{P}_{ij} \cdot q_j \right) \quad 2.35$$

Donde \hat{P}_{ii} y \hat{P}_{ij} son los coeficientes de potencial propios y mutuos. Para líneas aéreas la permitividad relativa del aire es asumida 1.0 como:

$$\epsilon_{air} = 1.0 * 8.5 \times 10^{-12} \quad \text{F/metro} \quad 2.36$$

$$\epsilon_{air} = 1.4240 \times 10^{-2} \quad \mu\text{F/metro} \quad 2.37$$

Usando el valor de permitividad en $\mu\text{F}/\text{millas}$, los coeficientes de potencial propios y mutuos son definidos como:

$$\hat{P}_{ii} = 11.17689 \cdot \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} \quad \text{millas}/\mu\text{F} \quad 2.38$$

$$\hat{P}_{ij} = 11.17689 \cdot \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \quad \text{millas}/\mu\text{F} \quad 2.39$$

Para líneas aéreas las distancias entre conductores son típicamente especificadas en pies mientras el valor del diámetro del conductor de una tabla será típicamente en pulgadas. Se debe ser cuidadoso de tomar el radio del conductor en pies al aplicar las dos ecuaciones. Para una línea aérea de conductores n_{cond} , la “matriz de coeficientes de potencial primitiva” $[P_{primitiva}]$ puede ser construida. La matriz de coeficientes de potencial primitiva será una matriz de $n_{cond} \times n_{cond}$. Para una línea trifásica con neutro aterrizado la matriz de coeficientes primitiva será de la siguiente forma:

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{aa} & \hat{P}_{ab} & \hat{P}_{ac} & | & \hat{P}_{an} \\ \hat{P}_{ba} & \hat{P}_{bb} & \hat{P}_{bc} & | & \hat{P}_{bn} \\ \hat{P}_{ca} & \hat{P}_{cb} & \hat{P}_{cc} & | & \hat{P}_{cn} \\ \hline \hat{P}_{na} & \hat{P}_{nb} & \hat{P}_{nc} & | & \hat{P}_{nn} \end{bmatrix} \quad 2.40$$

En forma particionada, la ecuación 2.40 se convierte:

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{P}_{ij}] & [\hat{P}_{in}] \\ [\hat{P}_{nj}] & [\hat{P}_{nn}] \end{bmatrix} \quad 2.41$$

Debido a que el conductor neutro es aterrizado la matriz puede ser reducida usando el método de reducción de Kron a una matriz de coeficientes de potencial de fase $[P_{abc}]$ $nfase \times nfase$.

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] \cdot [\hat{P}_{nn}]^{-1} \cdot [\hat{P}_{nj}] \quad 2.42$$

La inversa de la matriz de coeficientes de potencial dará la matriz de capacitancia $[C_{abc}]$ de $nfase \times nfase$.

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad 2.43$$

Para una línea bifásica y/o monofásica, la matriz de capacitancia de la ecuación 2.43 será de 2 x 2 ó 1 x 1 renglones y columnas de ceros debe ser insertados para la(s) fase(s) faltante(s).

La matriz de admitancia en derivación de fase esta dada por:

$$[y_{abc}] = 0 + j \cdot w \cdot [C_{abc}] \quad \mu\text{S/milla} \quad 2.44$$

Donde:

$$w = 2 \cdot \pi \cdot f \quad 2.45$$

2.2.3 La admitancia en derivación de líneas aéreas paralelas

La numeración de los conductores debe ser la misma que se utilizó en el desarrollo de la matriz de impedancia de fase. Para desarrollar la matriz de admitancia de derivación para líneas aéreas es necesario conocer la distancia de cada conductor a tierra y será necesario conocer el radio (en pies) para cada conductor.

El primer paso es crear la matriz de coeficientes de potencial primitiva. Esta será una matriz de $ncond \times ncond$, donde $ncond$ es el número total de conductores de fase y tierra. Para las líneas de la figura 2.3, $ncond$ será 7, de dos líneas para cada uno de ellos con su propio neutro aterrizado $ncond$, será de 8. Los elementos de la matriz de coeficientes de potencial primitiva son dados por las ecuaciones 2.38 y 2.39

Las filas y columnas correspondientes a los neutros de la matriz de coeficientes de potencial primitiva se eliminan mediante la reducción de Kron. La ecuación del voltaje resultante es:

$$\begin{bmatrix} V1_{ag} \\ V1_{bg} \\ V1_{cg} \\ V2_{ag} \\ V2_{bg} \\ V2_{cg} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P11_{aa} & P11_{ab} & P11_{ac} & P12_{aa} & P12_{ab} & P12_{ac} \\ P11_{ba} & P11_{bb} & P11_{bc} & P12_{ba} & P12_{bb} & P12_{bc} \\ P11_{ca} & P11_{cb} & P11_{cc} & P12_{ca} & P12_{cb} & P12_{cc} \\ P21_{aa} & P21_{ab} & P21_{ac} & P22_{aa} & P22_{ab} & P22_{ac} \\ P21_{ba} & P21_{bb} & P21_{bc} & P22_{ba} & P22_{bb} & P22_{bc} \\ P21_{ca} & P21_{cb} & P21_{cc} & P22_{ca} & P22_{cb} & P22_{cc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q1_a \\ q1_b \\ q1_c \\ q2_a \\ q2_b \\ q2_c \end{bmatrix} \quad V \quad 2.46$$

$$[V_{LG}] = [P][q] \quad 2.47$$

La matriz de capacitancia en derivación es determinada por:

$$[q] = [P]^{-1} \cdot [V_{LG}] = [C] \cdot [V_{LG}] \quad 2.48$$

La resultante matriz de capacitancia es particionada entre la tercera y cuarta, columnas y filas:

$$[C] = [P]^{-1} = \begin{bmatrix} [C11] & [C12] \\ [C21] & [C22] \end{bmatrix} \quad 2.49$$

La matriz de admitancia en derivación esta dada por:

$$[y] = j\omega \cdot [C] \cdot 10^{-6} = \begin{bmatrix} [y11] & [y12] \\ [y21] & [y22] \end{bmatrix} \text{ S} \quad 2.46$$

La matriz de admitancia en derivación será utilizada como parte de la modelación de líneas de distribución.

2.2.4 Desarrollo de matriz de admitancia en paralelo

Se realiza el procedimiento de una de las matrices de admitancia en paralelo del sistema de prueba 1 (Figura 2.4) con el procedimiento mostrado en este apartado, tomando una distancia de línea de 1 milla.

Esta subrutina desarrollada en el mismo archivo F.90 que el programa “crea matriz de impedancia” ya que al necesitar los mismos datos de entrada es conveniente para no volver a re-escribir parte del código.

2.2.5 Metodología implementada para cálculo de admitancias en paralelo de líneas aéreas.

Una línea aérea de distribución trifásica se construye como se muestra en la Figura 2.4 se determina la matriz de impedancia de fase de la línea. Los datos de cables son los mismos que en la demostración de crea matriz de impedancia de línea (Tabla 2.1).

Se calculan las distancias entre los conductores y sus imágenes con $d_{ij} = |P_i - P_j|$ con lo cual resulta en la matriz:

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 58 & 58.0539 & 58.4209 & 54.1479 \\ 58.0539 & 58 & 58.1743 & 54.0208 \\ 58.4209 & 58.1743 & 58 & 54.0833 \\ 54.1479 & 54.0208 & 54.0833 & 50 \end{bmatrix}$$

Los elementos de la matriz propios y mutuos de la matriz Primitiva se calculan con las ecuaciones 2.35 y 2.36 dando como resultado una matriz primitiva de 4x4

$$[P_{primitiva}] = \begin{bmatrix} 84.5600 & 35.1522 & 23.7147 & 25.2469 \\ 35.1522 & 84.5600 & 28.6058 & 28.3590 \\ 23.7147 & 28.6058 & 84.5600 & 26.6131 \\ 25.2469 & 28.3590 & 26.6131 & 84.6659 \end{bmatrix}$$

Aplicando la reducción de Korn (ecuación 2.42)

$$[P_{abc}] = \begin{bmatrix} 77.1194 & 26.7944 & 15.8714 \\ 26.7944 & 75.1720 & 19.7957 \\ 15.8714 & 19.7957 & 76.2923 \end{bmatrix}$$

Invirtiendo P_{abc} para determinar la matriz de capacitancia en paralelo:

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} = \begin{bmatrix} 0.0159 & -0.0049 & -0.0019 \\ -0.0049 & 0.0159 & -0.0031 \\ -0.0019 & -0.0031 & 0.0143 \end{bmatrix}$$

Multiplicando $[C_{abc}]$ por w para determinar la matriz de admitancia en paralelo y finalmente por la unidad de longitud que en este caso es 1 milla.

$$[y_{abc}] = j \cdot 376.9911 \cdot [C_{abc}] = \begin{bmatrix} 5.6712j & -1.8362j & -0.7034j \\ -1.8362j & 5.9774j & -1.169j \\ -0.7034j & -1.169j & 5.3911j \end{bmatrix}$$

2.3 Modelado de líneas en sistemas de distribución

El modelado de distribución de líneas aéreas es un paso crítico en el análisis de un alimentador de distribución. Es importante en modelado de línea para incluir el estado actual de la línea y la correcta separación entre conductores. En el apartado 3.1 y 3.2 se vio el método para el cálculo de la impedancia de fase y las matrices de admitancia de fase sin asumir simplificaciones. Estas matrices serán utilizadas en los modelos para los segmentos de línea aéreos.

2.3.1 Matrices generalizadas para líneas

Los modelos a utilizarse en el estudio de flujos de potencia [5] se generalizan para las líneas haciendo su manejo más sencillo. Las ecuaciones matriciales para calcular los voltajes y corrientes en el nodo n como función de los voltajes y corrientes en el nodo m están dados por:

$$[VLN_{ABC}]_n = [a][VLN_{abc}]_m + [b][I_{abc}]_m \quad 2.51$$

$$[I_{ABC}]_n = [c][VLN_{abc}]_m + [d][I_{abc}]_m \quad 2.52$$

La técnica iterativa de escalera requiere que los voltajes en el nodo m sean una función de los voltajes en el nodo n y las corrientes en el nodo m . La ecuación requerida es:

$$[VLN_{abc}]_m = [A][VLN_{ABC}]_n - [B][I_{abc}]_m \quad 2.53$$

2.3.2 Modelo exacto segmento de línea

El modelo exacto de una línea trifásica se muestra en la Figura 2.12. Cuando un segmento de línea es bifásica (fase V) o monofásica, algunos de los valores de impedancia y admitancia serán cero. Por lo tanto, un conjunto de ecuaciones se pueden dar para todos los modelos para segmentos de línea.

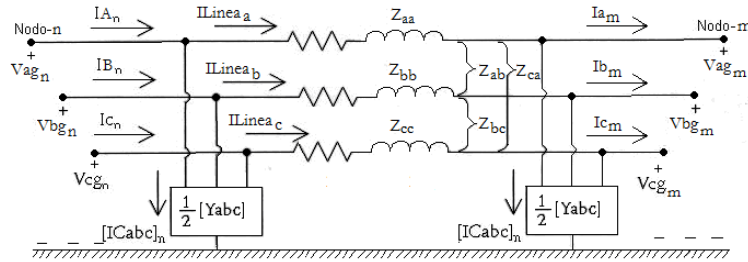


Figura 2.12.- Modelo del segmento de línea trifásica

Para el segmento de línea de la figura 2.12, las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes de la entrada (nodo n) con los de la salida (nodo m) se muestran enseguida.

De la ecuación generalizada 2.51 las matrices a y b son

$$[a] = [u] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [y_{abc}] \quad 2.54$$

$$[b] = [Z_{abc}] \quad 2.55$$

De la ecuación generalizada 2.52 las matrices c y d son:

$$[c] = [y_{abc}] + \frac{1}{4} \cdot [y_{abc}] \cdot [Z_{abc}] \cdot [y_{abc}] \quad 2.56$$

$$[d] = [u] + \frac{1}{2} \cdot [Z_{abc}] \cdot [y_{abc}] \quad 2.57$$

De la ecuación generalizada 2.53 las matrices A y B son:

$$[A] = [a]^{-1} \quad 2.58$$

$$[B] = [a]^{-1} \cdot [b] \quad 2.59$$

2.3.3 Matrices generales de líneas paralelas

El equivalente del circuito *Pi* para líneas trifásicas en paralelo se muestra en la Figura 2.13. Las matrices de impedancia de fase 6x6 y la de admitancia en derivación paralelas trifásicas se han desarrollado líneas en los apartados 2.1 y 2.2. Estas matrices se usan en las matrices generales utilizados en el modelado de líneas paralelas trifásicas.

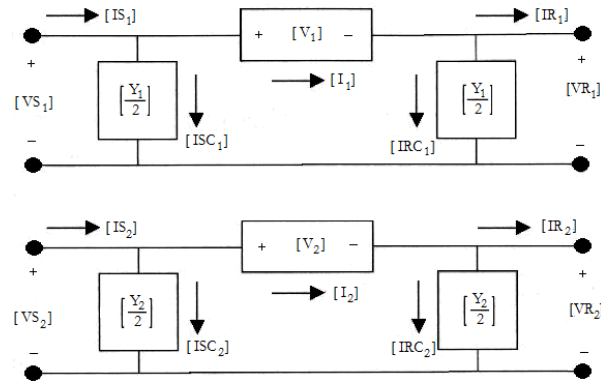


Figura 2.13.- Equivalente Pi para líneas paralelas

El primer paso es calcular las matrices *abcd*, multiplicar la matriz de impedancia de fase de 6 x 6 y la matriz de admitancia 6 x 6 por la distancia que las líneas son paralelas.

Las matrices multiplicadas por la longitud se utilizan en las ecuaciones generalizadas de líneas paralelas las cuales son:

$$[Vs]_n = [a] \cdot [VR]_m + [b] \cdot [IR]_m \quad 2.60$$

Donde

$$[a] = [u] + \frac{1}{2} \cdot [Z] \cdot [Y] \quad 2.61$$

$$[b] = [Z] \quad 2.62$$

$$[IS]_n = [c] \cdot [VR]_m + [d] \cdot [IR]_m \quad 2.63$$

donde

$$[c] = [Y] + \frac{1}{4}[Y] \cdot [Z] \cdot [Y] \quad 2.64$$

$$[d] = [u] + \frac{1}{2}[Y] \cdot [Z] \quad 2.65$$

$$[VR]_m = [A] \cdot [VR]_n + [B] \cdot [IR]_m \quad 2.66$$

donde

$$[A] = [a]^{-1} \quad 2.67$$

$$[B] = [a]^{-1} \cdot [b] \quad 2.68$$

2.4 Modelos de transformadores trifásicos

Los bancos de transformadores trifásicos generalmente se encuentran en la subestación de distribución donde el voltaje es transformado del nivel de la transmisión o sub-transmisión al nivel de los alimentadores de distribución. En la mayoría de los casos, el transformador de subestación será una unidad trifásica, probablemente con cambios de derivaciones en alta tensión sin carga ó con cambiador de derivaciones bajo carga en baja tensión. Para un alimentador de cuatro hilos en estrella, la conexión mas común de transformador de subestación es la delta-estrella aterrizada. Un alimentador en delta de tres hilos tendrá típicamente una conexión de transformador de subestación delta-delta.

En este apartado se desarrollan modelos de bancos de transformadores trifásicos aplicables a alimentadores de distribución radiales. Se incluyen modelos para las conexiones trifásicas siguientes:

1. Delta-Estrella Aterrizada
2. Estrella Aterrizada-Delta
3. Estrella Aterrizada-Estrella Aterrizada
4. Delta-Delta
5. Estrella Abierta-Delta Abierta

2.4.1 Introducción

En la Figura 2.14 se definen los diferentes voltajes y corrientes para todos los bancos de transformación conectados entre una fuente, lado de nodo n , y el lado de la carga, nodo m . Los modelos se pueden representar un banco de transformación reductor o elevador. La notación es que las letras mayúsculas A, B, C , y N siempre se referirán al lado *fuentes* (nodo n) y las letras minúsculas a, b, c y n siempre se referirán al lado *carga* (nodo m). Se considera que todas las variaciones de la conexión estrella-delta se conectan conforme a “la Norma Americana de 30°” [11]. Con la notación de fases descrita, los desfases normalizados para voltajes y corrientes de secuencia positiva son:

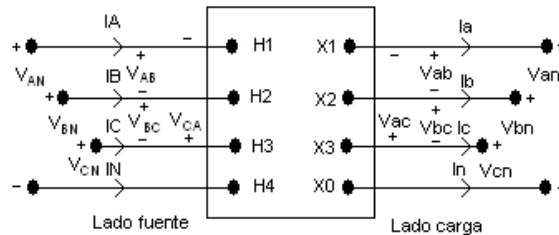


Figura 2.14.- Banco de transformación trifásico

Conexión reductora

$$V_{AB} \text{ Adelanta } V_{ab} \text{ 30 grados} \quad 2.69$$

$$I_A \text{ Adelanta } I_a \text{ 30 grados} \quad 2.70$$

Conexión elevadora

$$V_{ab} \text{ adelanta } V_{AB} \text{ 30 grados} \quad 2.71$$

$$I_a \text{ adelanta } I_A \text{ 30 grados} \quad 2.72$$

2.4.2 Matrices generalizadas

Los modelos a utilizarse en el estudio de flujos de potencia se generalizan para las diferentes conexiones [7]. Las ecuaciones matriciales para calcular los voltajes y corrientes en el nodo n como función de los voltajes y corrientes en el nodo m están dados por:

$$[VLN_{ABC}] = [a_t][VLN_{abc}] + [b_t][I_{abc}] \quad 2.73$$

$$[I_{ABC}] = [c_t][VLN_{abc}] + [d_t][I_{abc}] \quad 2.74$$

La técnica iterativa de escalera requiere que los voltajes en el nodo m sean una función de los voltajes en el nodo n y las corrientes en el nodo m . La ecuación requerida es:

$$[VLN_{abc}] = [A_t][VLN_{ABC}] - [B_t][I_{abc}] \quad 2.75$$

En las ecuaciones 2.73, 2.74, y 2.75 las matrices $[VLN_{ABC}]$ y $[VLN_{abc}]$ representan los voltajes de línea a neutro de una conexión en estrella aislada ó los voltajes de línea a tierra para una conexión en estrella aterrizada. Para una conexión en delta, las matrices de voltaje representan voltajes de línea a neutro “equivalentes”. Las matrices de corriente representan las corrientes de línea independientemente de la conexión de los devanados del transformador.

2.4.3 Conexión delta-estrella aterrizada reductora.

La conexión delta-estrella aterrizada reductora es una conexión muy popular que se usa típicamente en una subestación de distribución sirviendo un sistema alimentador de estrella a cuatro hilos. Debido a la conexión en delta-estrella, hay un desfase reductor de 30° figura 2.13

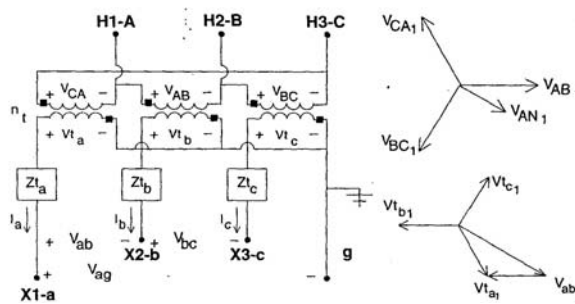


Figura 2.15.- Conexión delta-estrella aterrizada

Los cambios de magnitud entre los voltajes de la figura 2.15 se pueden definir en términos de la relación de vueltas de los devanados “ nt ”, esta relación se puede definir como:

$$n_t = \frac{VLL_{no\ min\ al\ lado\ de\ alta}}{VLN_{no\ min\ al\ lado\ de\ baja}} \quad 2.76$$

La impedancia del transformador requiere ser convertida a valores en ohms referidos al devanado de bajo voltaje, esta relación se puede dar como:

$$Z_base = \frac{VLL_{no\ min\ al\ lado\ de\ baja} (kV)}{Potencia_{transformador} (kVA)} \quad 2.77$$

$$Z_t_{ladobaja} = (impedancia\ del\ transformador\ en\ \%)*100*Z_base \quad 2.78$$

La ecuación 2.78 muestra la impedancia del transformador monofásico, esta se requiere expandir a la forma trifásica dando origen a la matriz de impedancia de fase:

$$[Zt_{abc}] = Zt_{ladobaja} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.79$$

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{an} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{cn} \end{bmatrix} \quad 2.80$$

Observando que en la ecuación 2.80 no hay restricción de las impedancias de las tres fases sean iguales esto debido a que la subestación puede tener un transformador trifásico o tres monofásicos.

De la ecuación generalizada 2.73 las matrices a_t y b_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[a_t] = \frac{-n_t}{3} \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.81$$

$$[b_t] = [a_t][Zt_{abc}] = \frac{-n_t}{3} \begin{bmatrix} 0 & 2Zt_{bn} & Zt_{cn} \\ Zt_{an} & 0 & 2Zt_{cn} \\ 2Zt_{an} & Zt_{bn} & 0 \end{bmatrix} \quad 2.82$$

De la ecuación generalizada 2.74 las matrices c_t y d_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[d_t] = \frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.83$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.84$$

Finalmente de la ecuación generalizada 2.73 las matrices A_t y B_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[A_t] = \frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.85$$

$$[B_t] = [Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{an} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{cn} \end{bmatrix} \quad 2.86$$

2.4.4 Conexión estrella aislada-delta reductora.

Tres transformadores monofásicos se pueden conectar en una conexión estrella aislada-delta y estar en una conexión normalizada de treinta grados, como se muestra en la figura 2.16. Los diagramas fasoriales de voltajes de secuencia positiva (figura 2.16) ilustran que los voltajes de línea a línea adelantan a los voltajes del lado de baja tensión por treinta grados; El mismo desfaseamiento ocurre entre el voltaje de línea a neutro del lado de alta tensión y el voltaje equivalente de línea a neutro del lado de baja tensión. El desfaseamiento de los voltajes de secuencia negativa es que el voltaje del lado de alta tensión estará atrasado del voltaje del lado de baja tensión por treinta grados.

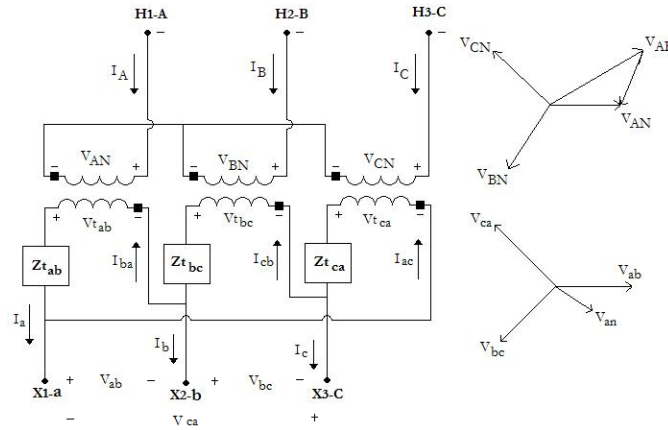


Figura 2.16.- Conexión normalizada estrella aislada-delta

La definición de “relación de vueltas n_t ” será en el numerador el voltaje de línea a neutro y en el denominador el voltaje de línea á línea.

$$n_t = \frac{VLN_{\text{nominal lado alta}}}{VLL_{\text{nominal lado baja}}} \quad 2.87$$

La ecuación 2.89 muestra la matriz de impedancia de fase para la conexión estrella aislada – delta reductora:

$$[Zt_{abc}] = Zt_{\text{ladobaja}} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.88$$

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{ca} \end{bmatrix} \quad 2.89$$

Observando que en la ecuación 2.89 tampoco hay restricción de las impedancias de las tres fases sean iguales. De la ecuación generalizada 2.73 las matrices a_t y b_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[a_t] = -n_t \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.90$$

$$[b_t] = \frac{n_t}{3} \begin{bmatrix} Zt_{ab} & -Zt_{ab} & 0 \\ Zt_{bc} & 2Zt_{bc} & 0 \\ -2Zt_{ca} & -Zt_{ca} & 0 \end{bmatrix} \quad 2.91$$

De la ecuación generalizada 2.74 las matrices c_t y d_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[d_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.92$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.93$$

Finalmente de la ecuación generalizada 2.75 las matrices A_t y B_t para la conexión Delta-Estrella aterrizada reductora son:

$$[A_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad 2.94$$

$$[B_t] = \frac{1}{9} \begin{bmatrix} 2Zt_{ab} + Zt_{bc} & 2Zt_{bc} - 2Zt_{ab} & 0 \\ 2Zt_{bc} - 2Zt_{ca} & 4Zt_{bc} - Zt_{ca} & 0 \\ Zt_{ab} - 4Zt_{ca} & -Zt_{ab} - 2Zt_{ca} & 0 \end{bmatrix} \quad 2.95$$

2.4.5 Conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada

La conexión estrella aterrizada-estrella aterrizada se usa principalmente para alimentar cargas monofásicas y trifásicas en sistemas de cuatro hilos multi-aterrizados. La conexión estrella aterrizada-estrella aterrizada se muestra en la figura 3.17. A diferencia de las conexiones delta-estrella y estrella-delta, no hay desfaseamiento entre los voltajes y las corrientes a ambos lados del banco.

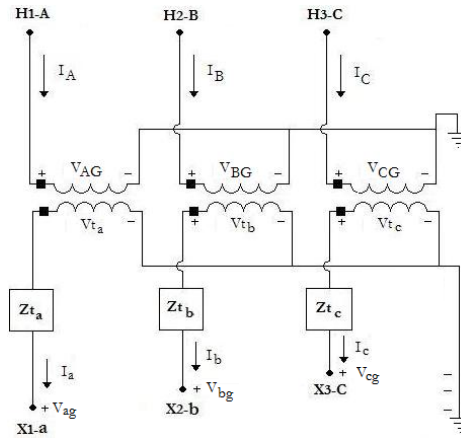


Figura 2.17.- Conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada

La definición de “relación de vueltas n_t ” será, en el numerador el voltaje de línea a neutro y en el denominador el voltaje de línea á neutro.

$$n_t = \frac{VLN_{\text{nominal lado alta}}}{VLN_{\text{nominal lado baja}}} \quad 2.96$$

La ecuación 2.98 muestra la matriz de impedancia de fase para la conexión Estrella aterrizada – Estrella aterrizada reductora:

$$[Zt_{abc}] = Zt_{\text{ladobaja}} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.97$$

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{an} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{cn} \end{bmatrix} \quad 2.98$$

Observando que en la ecuación 2.98 tampoco hay restricción de las impedancias de los tres transformadores sean iguales. De la ecuación generalizada 2.73 las matrices a_t y b_t para la conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada reductora son:

$$[a_t] = \begin{bmatrix} n_t & 0 & 0 \\ 0 & n_t & 0 \\ 0 & 0 & n_t \end{bmatrix} \quad 2.99$$

$$[b_t] = [a_t] * [Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} n_t \cdot Zt_{an} & 0 & 0 \\ 0 & n_t \cdot Zt_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & n_t \cdot Zt_{cn} \end{bmatrix} \quad 2.100$$

De la ecuación generalizada 2.74 las matrices c_t y d_t para la conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada reductora son:

$$[d_t] = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_t} \end{bmatrix} \quad 2.101$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.102$$

Finalmente de la ecuación generalizada 2.70 las matrices A_t y B_t para la conexión Estrella aterrizada-Estrella aterrizada reductora son:

$$[A_t] = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_t} \end{bmatrix} \quad 2.103$$

$$[B_t] = [Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{an} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{cn} \end{bmatrix} \quad 2.104$$

2.4.6 Conexión delta-delta

La conexión delta-delta se usa principalmente para proporcionar suministro eléctrico a cargas trifásicas. Tres transformadores monofásicos conectados en formación delta-delta se muestran en la figura 2.18.

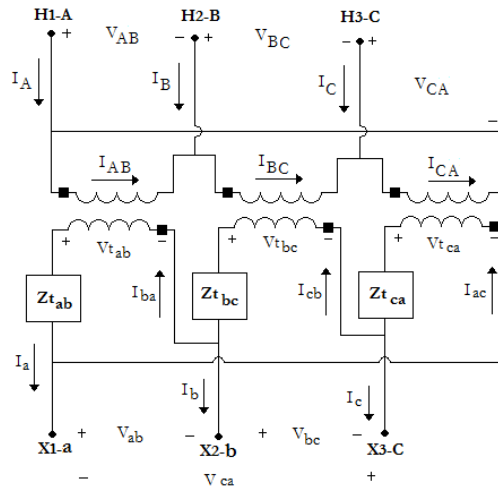


Figura 2.18.- Conexión delta-delta

La relación de vueltas “ n_t ” será, en el numerador el voltaje de línea a línea, al igual que en el denominador voltaje de línea a línea.

$$n_t = \frac{VLL_{\text{nominal lado alta}}}{VLL_{\text{nominal lado baja}}} \quad 2.105$$

La ecuación 2.107 muestra la matriz de impedancia de fase para la conexión Delta – Delta reductora:

$$[Zt_{abc}] = Zt_{\text{ladobaja}} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 2.106$$

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & Zt_{ca} \end{bmatrix} \quad 2.107$$

Observando que en la ecuación 2.107 tampoco hay restricción de las impedancias de los tres transformadores sean iguales.

De la ecuación generalizada 2.73 las matrices a_i y b_i para la conexión Delta – Delta reductora son:

$$[a_i] = \frac{n_i}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad 2.108$$

$$[b_i] = \begin{bmatrix} n_i & 0 & 0 \\ 0 & n_i & 0 \\ 0 & 0 & n_i \end{bmatrix} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \right) \cdot [Zt_{abc}] \cdot \left(\frac{1}{Zt_{ab} + Zt_{bc} + Zt_{ca}} \cdot \begin{bmatrix} Zt_{ca} & -Zt_{bc} & 0 \\ Zt_{ca} & Zt_{ab} + Zt_{ca} & 0 \\ -Zt_{ab} - Zt_{bc} & -Zt_{bc} & 0 \end{bmatrix} \right) \quad 2.109$$

De la ecuación generalizada 2.74 las matrices c_i y d_i para la conexión Delta – Delta reductora son:

$$[d_i] = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_i} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_i} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{n_i} \end{bmatrix} \quad 2.110$$

$$[c_i] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.111$$

Finalmente de la ecuación generalizada 2.75 las matrices A_i y B_i para la conexión Delta – Delta reductora son:

$$[A_i] = \frac{1}{3n_i} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad 2.112$$

$$[B_i] = \left(\frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \right) \cdot [Zt_{abc}] \cdot \left(\frac{1}{Zt_{ab} + Zt_{bc} + Zt_{ca}} \cdot \begin{bmatrix} Zt_{ca} & -Zt_{bc} & 0 \\ Zt_{ca} & Zt_{ab} + Zt_{ca} & 0 \\ -Zt_{ab} - Zt_{bc} & -Zt_{bc} & 0 \end{bmatrix} \right) \quad 2.113$$

2.4.7 Conexión Estrella abierta - Delta abierta

La figura 2.19 muestra la conexión Estrella abierta - Delta abierta y los fasores de voltajes de secuencia positiva primarios y secundarios.

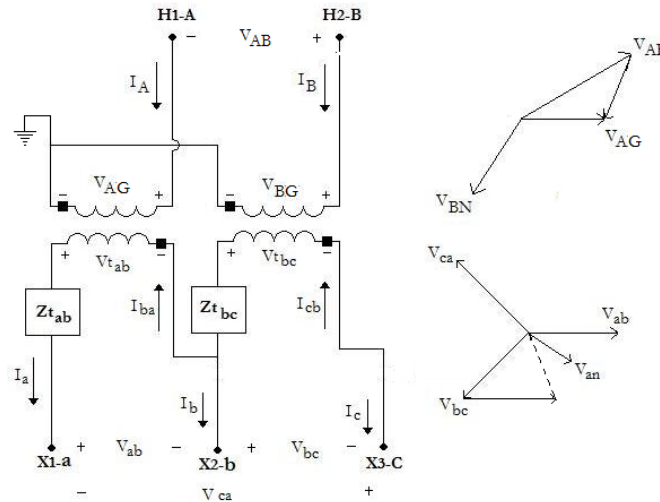


Figura 2.19.- Conexión estrella abierta-delta abierta

La relación de vueltas “ n_t ” será, en el numerador el voltaje de línea a línea, al igual que en el denominador voltaje de línea á línea.

$$n_t = \frac{VLL_{no\ minal\ lado\ alta}}{VLL_{no\ minal\ lado\ baja}} \quad 2.114$$

La ecuación 2.116 muestra la matriz de impedancia de fase para la conexión Estrella abierta – Delta abierta reductora:

$$[Zt_{abc}] = Zt_{ladobaja} * \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.115$$

$$[Zt_{abc}] = \begin{bmatrix} Zt_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.116$$

Observando que en la ecuación 2.116 tampoco hay restricción de las impedancias de los tres transformadores sean iguales. De la ecuación generalizada 2.73 las matrices a_t y b_t para la conexión Estrella abierta – Delta abierta reductora son:

$$[a_t] = \begin{bmatrix} n_t & -n_t & 0 \\ 0 & n_t & -n_t \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.117$$

$$[b_t] = \begin{bmatrix} -n_t \cdot Z_{t_{ab}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -n_t \cdot Z_{t_{bc}} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.118$$

De la ecuación generalizada 2.74 las matrices c_t y d_t para la conexión Estrella abierta – Delta abierta reductora son:

$$[d_t] = \begin{bmatrix} \frac{1}{n_t} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{n_t} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.119$$

$$[c_t] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.120$$

Finalmente de la ecuación generalizada 2.75 las matrices A_t y B_t para la conexión Estrella abierta – Delta abierta reductora son:

$$[A_t] = \frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix} \quad 2.121$$

$$[B_t] = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 \cdot Z_{t_{ab}} & 0 & -Z_{t_{bc}} \\ -Z_{t_{ab}} & 0 & -Z_{t_{bc}} \\ -Z_{t_{ab}} & 0 & 2 \cdot Z_{t_{bc}} \end{bmatrix} \quad 2.122$$

2.5 Modelado de carga

Las cargas en un alimentador de distribución pueden modelarse como una conexión estrella o delta. Las cargas pueden ser trifásicas, bifásicas, o monofásicas con cualquier grado de desequilibrio, y se pueden modelar como:

1. Potencia constante activa y reactiva, (PQ constante).
2. Corriente constante.
3. Impedancia constante.

El modelado desarrollado de cargas [12] debe ser utilizado en el proceso iterativo de un programa de flujos de potencia donde el voltaje de la carga se supone conocido inicialmente. Uno de los resultados del análisis de flujos es sustituir los voltajes supuestos por los voltajes reales de la carga. Todos los modelos son definidos inicialmente por una potencia compleja por fase y un voltaje supuesto de línea a neutro (carga en estrella) o voltajes de línea a línea supuestos (carga en delta). Las unidades de la potencia compleja pueden ser V-A y V, o los VA por-unidad y V por-unidad. Para todas las cargas se requieren las corrientes de línea entrando a la carga para realiza el análisis del flujo de potencia.

2.5.1 Carga conectada en estrella

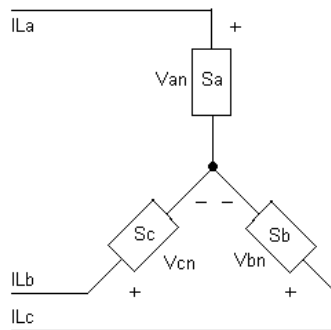


Figura 2.20.- Carga conectada en estrella

La Figura 2.20 es el modelo de una carga conectada en estrella. La notación para las potencias complejas y los voltajes especificados son:

$$\begin{aligned}
 \text{Fase } a: & \quad |S_a| \angle \theta_a = P_a + jQ_a \quad \text{y} \quad |V_{an}| \angle \delta_a \\
 \text{Fase } b: & \quad |S_b| \angle \theta_b = P_b + jQ_b \quad \text{y} \quad |V_{bn}| \angle \delta_b \\
 \text{Fase } c: & \quad |S_c| \angle \theta_c = P_c + jQ_c \quad \text{y} \quad |V_{cn}| \angle \delta_c
 \end{aligned}
 \tag{2.123}$$

2.5.1.1 Carga de potencia activa y reactiva constantes.

Las corrientes de línea para las cargas constantes de potencia activa y reactiva (cargas PQ) se dan por:

$$\begin{aligned}
 IL_a &= \left(\frac{S_a}{V_{an}} \right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|} \angle \delta_a - \theta_a = |IL_a| \angle \alpha_a \\
 IL_b &= \left(\frac{S_b}{V_{bn}} \right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|} \angle \delta_b - \theta_b = |IL_b| \angle \alpha_b \\
 IL_c &= \left(\frac{S_c}{V_{cn}} \right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|} \angle \delta_c - \theta_c = |IL_c| \angle \alpha_c
 \end{aligned}
 \tag{2.124}$$

En este modelo los voltajes línea a neutro cambiarán durante cada iteración hasta que se alcance la convergencia

2.5.1.2 Cargas de Impedancia constante.

La carga de “impedancia constante” se determina primero de la potencia compleja especificada y los voltajes línea-a-neutro supuestos.

$$\begin{aligned}
Z_a &= \frac{|V_{an}|^2}{S_a^*} = \frac{|V_{an}|^2}{|S_a|} \underline{\theta}_a = |Z_a| \underline{\theta}_a \\
Z_b &= \frac{|V_{bn}|^2}{S_b^*} = \frac{|V_{bn}|^2}{|S_b|} \underline{\theta}_b = |Z_b| \underline{\theta}_b \\
Z_c &= \frac{|V_{cn}|^2}{S_c^*} = \frac{|V_{cn}|^2}{|S_c|} \underline{\theta}_c = |Z_c| \underline{\theta}_c
\end{aligned}
\tag{2.125}$$

Las corrientes de carga en función de las cargas de impedancia constante se dan como:

$$\begin{aligned}
IL_a &= \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|} \underline{\delta}_a - \underline{\theta}_a = |IL_a| \underline{\alpha}_a \\
IL_b &= \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|} \underline{\delta}_b - \underline{\theta}_b = |IL_b| \underline{\alpha}_b \\
IL_c &= \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|} \underline{\delta}_c - \underline{\theta}_c = |IL_c| \underline{\alpha}_c
\end{aligned}
\tag{2.126}$$

En este modelo los voltajes línea-a-neutro cambiarán durante cada iteración, pero la impedancia seguirá siendo constante.

2.5.1.3 Corriente constante en la carga.

En este modelo las magnitudes de las corrientes se calculan y después se mantienen constantes mientras que el ángulo del voltaje (δ) cambia dando por resultado un cambio de ángulo en la corriente de modo que el factor de potencia de la carga siga siendo constante.

$$\begin{aligned}
IL_a &= |IL_a| \underline{\delta}_a - \underline{\theta}_a \\
IL_b &= |IL_b| \underline{\delta}_b - \underline{\theta}_b \\
IL_c &= |IL_c| \underline{\delta}_c - \underline{\theta}_c
\end{aligned}
\tag{2.127}$$

Donde : δ_{abc} = ángulos línea - a - neutro del voltaje
 θ_{abc} = ángulos del factor de potencia

2.5.2 Cargas conectadas en delta.

El modelo para una carga conectada en delta se muestra en la figura 2.21. La notación para la potencia compleja especificada y los voltajes en la figura 2.21 son como sigue:

$$\begin{aligned}
 \text{Fase } ab: & |S_{ab}| \angle \theta_{ab} = P_{ab} + jQ_{ab} \quad \text{y} \quad |V_{ab}| \angle \delta_{ab} \\
 \text{Fase } bc: & |S_{bc}| \angle \theta_{bc} = P_{bc} + jQ_{bc} \quad \text{y} \quad |V_{bc}| \angle \delta_{bc} \\
 \text{Fase } ca: & |S_{ca}| \angle \theta_{ca} = P_{ca} + jQ_{ca} \quad \text{y} \quad |V_{ca}| \angle \delta_{ca}
 \end{aligned}
 \tag{2.128}$$

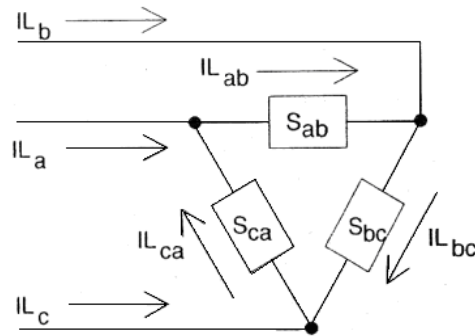


Figura 2.21.- Carga conectada en delta

2.5.2.1 Cargas de potencia activa y reactiva constantes.

Las corrientes en las cargas conectadas en delta son:

$$\begin{aligned}
 I_{L_{ab}} &= \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}} \right)^* = \frac{|S_{ab}|}{|V_{ab}|} \angle \delta_{ab} - \theta_{ab} = |I_{L_{ab}}| \angle \alpha_{ab} \\
 I_{L_{bc}} &= \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}} \right)^* = \frac{|S_{bc}|}{|V_{bc}|} \angle \delta_{bc} - \theta_{bc} = |I_{L_{bc}}| \angle \alpha_{bc} \\
 I_{L_{ca}} &= \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}} \right)^* = \frac{|S_{ca}|}{|V_{ca}|} \angle \delta_{ca} - \theta_{ca} = |I_{L_{ca}}| \angle \alpha_{ca}
 \end{aligned}
 \tag{2.129}$$

En este modelo los voltajes de línea a línea cambiarán durante cada iteración dando por resultado nuevas magnitudes de corriente y ángulo al principio de cada iteración.

2.5.2.2 Cargas de impedancia constante.

La carga de impedancia constante primero se determina de la potencia compleja especificada y de los voltajes de línea a línea.

$$\begin{aligned}
 Z_{ab} &= \frac{|V_{ab}|^2}{S_{ab}^*} = \frac{|V_{ab}|^2}{|S_{ab}|} \underline{\theta_{ab}} = |Z_{ab}| \underline{\theta_{ab}} \\
 Z_{bc} &= \frac{|V_{bc}|^2}{S_{bc}^*} = \frac{|V_{bc}|^2}{|S_{bc}|} \underline{\theta_{bc}} = |Z_{bc}| \underline{\theta_{bc}} \\
 Z_{ca} &= \frac{|V_{ca}|^2}{S_{ca}^*} = \frac{|V_{ca}|^2}{|S_{ca}|} \underline{\theta_{ca}} = |Z_{ca}| \underline{\theta_{ca}}
 \end{aligned} \tag{2.130}$$

Las corrientes de la carga en delta como funciones de la impedancia de carga constante son:

$$\begin{aligned}
 IL_{ab} &= \frac{V_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{|V_{ab}|}{|Z_{ab}|} \underline{\delta_{ab} - \theta_{ab}} = |IL_{ab}| \underline{\alpha_{ab}} \\
 IL_{bc} &= \frac{V_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{|V_{bc}|}{|Z_{bc}|} \underline{\delta_{bc} - \theta_{bc}} = |IL_{bc}| \underline{\alpha_{bc}} \\
 IL_{ca} &= \frac{V_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{|V_{ca}|}{|Z_{ca}|} \underline{\delta_{ca} - \theta_{ca}} = |IL_{ca}| \underline{\alpha_{ca}}
 \end{aligned} \tag{2.131}$$

En este modelo los voltajes de línea a línea cambiarán durante cada iteración hasta que se alcance la convergencia.

2.5.2.3 Cargas de corriente constante.

En este modelo las magnitudes de las corrientes se calculan según las ecuaciones 2.132 y se mantienen constantes mientras que el ángulo del voltaje (δ) cambia durante cada iteración. Esto mantiene el factor de potencia de la carga constante.

$$\begin{aligned}
 IL_{ab} &= |IL_{ab}| \underline{\delta_{ab} - \theta_{ab}} \\
 IL_{bc} &= |IL_{bc}| \underline{\delta_{bc} - \theta_{bc}} \\
 IL_{ca} &= |IL_{ca}| \underline{\delta_{ca} - \theta_{ca}}
 \end{aligned} \tag{2.132}$$

2.5.2.4 Corrientes de línea que alimentan a una carga conectada en delta.

Las corrientes de línea entrando a la carga conectada en delta es determinada aplicando la ley de corrientes de Kirchoff's en cada uno de los nodos de la delta. En forma de matriz las ecuaciones son:

$$\begin{bmatrix} IL_a \\ IL_b \\ IL_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} IL_{ab} \\ IL_{bc} \\ IL_{ca} \end{bmatrix} \quad 2.133$$

2.5.3 Cargas bifásicas y monofásicas.

En ambas, cargas conectadas en estrella o delta, las cargas monofásicas y bifásicas son modeladas fijando las corrientes de fase que faltan en cero. Las corrientes en las fases presentes se calculan usando las mismas ecuaciones para la potencia compleja constante, la impedancia constante, y la corriente constante.

CAPÍTULO 3

Metodología implementada

En este capítulo se muestra la metodología implementada en el desarrollo de la subrutina “forma vectores” la cual da un manejo de la red radial por niveles y la metodología implementada para el programa para resolver problemas de flujos en redes de distribución, este se basa en el barrido progresivo-regresivo conocido comúnmente como el método de escalera también descrito en este capítulo del cual se hace un diagrama general del método.

3.1 Ordenamiento por niveles de una red eléctrica

Con el fin de implementar una mejor técnica para recorrer una red de distribución radial se ha desarrollado una rutina en FORTRAN con la finalidad de crear listas de almacenamiento que muestren en forma de niveles las conexiones de la red. Este programa toma los datos de la red de un archivo .dat que contiene los datos de nodo A a nodo B, número de nodos, número de conexiones y nodo alimentado, y esta dividido básicamente en dos partes. La primera parte realiza los vectores:

- *I_fila* .- En este vector se almacena la localidad en la cual se encuentra el “Número de conexiones” de cada nodo en el vector “*I_col*”, tiene una longitud igual al número de nodos del sistema.
- *I_col*.- Es el vector en el cual se encuentran almacenados los datos del número de conexiones y las conexiones del sistema, en su primera localidad se encuentra el número de conexiones del nodo alimentado y siguiendo a este el número del nodo al cual esta conectado, una vez terminado se continua con el nodo al que ocupe la primera conexión del nodo alimentado y así sucesivamente hasta llegar al N nodo, tiene una longitud de $2*\text{número de conexiones}+\text{número de nodos}$.

- Y_ling .- Es el vector en el cual se encuentran almacenados los datos de enlace entre los elementos de I_col siendo posible tener los datos almacenados en I_col de forma no continua, tiene una longitud igual a la de I_col .

Se toma una red de distribución radial de demostración (Figura 3.1) y se desarrollan los vectores antes mencionados (Figura 3.2) para una mejor ilustración.

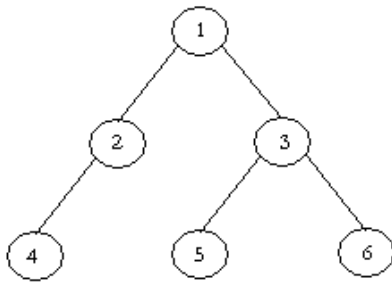


Figura 3.1.- Red de seis nodos

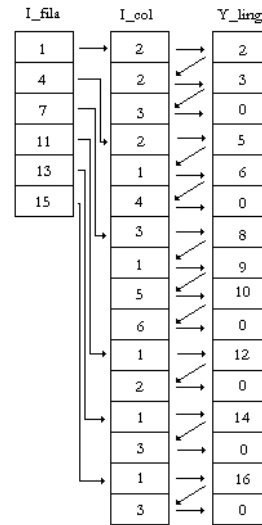


Figura 3.2.-Vectores “ I_fila ”, “ I_col ” y “ Y_ling ”

El segundo bloque realiza la subrutina del ordenamiento por niveles o capas esto es basado en los vectores antes mencionados, se crean dos nuevos vectores, el vector de nivel “ V_nivel ” el cual contiene el nivel de cada nodo en forma ascendente con respecto al nodo alimentado (nivel 0) ^[1], y el vector bandera “ $V_bandera$ ” el cual determina si el nodo ya tiene nivel o no mediante una combinación binaria 1 y 0 respectivamente.

Para ilustrar los vectores antes mencionados se realiza el ordenamiento por niveles de la figura 1, se definen los niveles considerando que el nodo alimentado es el número uno, dando como resultado la figura 3.3 y se muestran los vectores V_nivel y $V_bandera$ con este ordenamiento en la figura 3.4. Los vectores V_nivel y $V_bandera$ son de la misma longitud de I_fila .

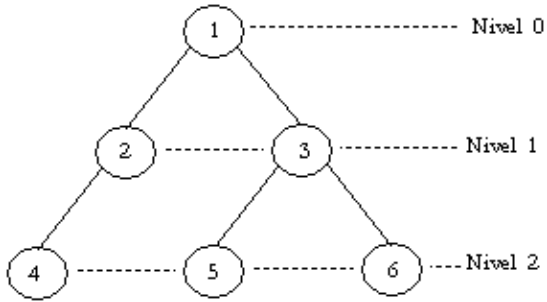


Figura 3.3.- Red de seis nodos con niveles

Num_nodo	V_nivel	V_bandera
1	0	1
2	1	1
3	1	1
4	2	1
5	2	1
6	2	1

Figura 3.4.-Vectores “V_nivel” y “V_bandera”

Finalmente se guarda el número de nodos por nivel en el vector llamado “V_num_nodos_x_nivel”.

Un diagrama de flujo general de la subrutina realizada para el ordenamiento de redes de distribución radial es mostrado en la figura 3.5.

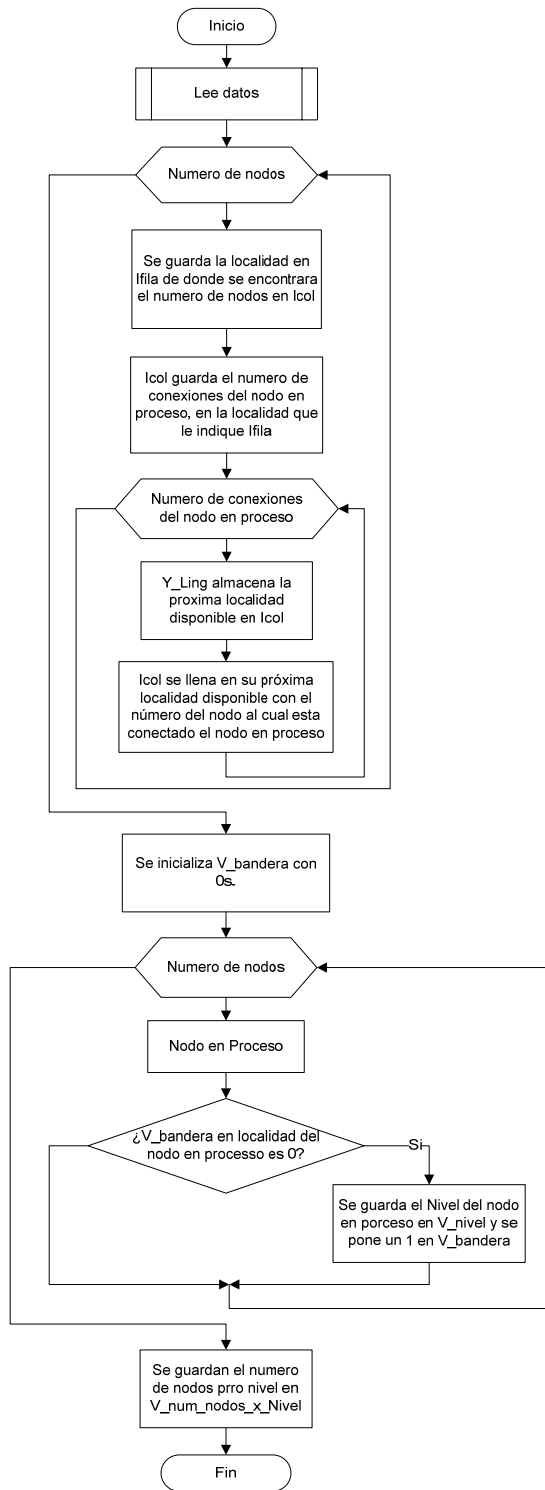


Figura 3.5.- Diagrama de flujogeneral de: “V_nivel” y “V_bandera”

3.2 Técnica de barrido progresivo-regresivo (escalera) (V-I-PARS)

Uno de los rasgos distintivos de la red de distribución radial es que existe una única ruta de acceso de cualquier bus de vuelta a la fuente. Esta es la característica fundamental de la explotación del algoritmo barrido progresivo/regresivo. Este método se basa en la actualización de voltajes y corrientes a lo largo de estas redes.

3.2.1 Descripción del algoritmo

El proceso general de este algoritmo es mostrado en la tabla 3.2, consta de dos pasos básicos, el barrido progresivo y barrido regresivo, que se repite hasta que se logre la convergencia. El barrido progresivo es una corriente calculada con actualizaciones de voltaje y el barrido regresivo es un voltaje calculado con actualizaciones de corriente [13].

Tabla 3.1.- Método de barrido progresivo /regresivo

Iniciar todas las corrientes en ceros.		
1	Barrido progresivo	Calcula caídas de voltaje.
2	Barrido regresivo	Calcula corrientes de rama.
Repetir los pasos 1 y 2 hasta que se logre la convergencia.		

3.2.2 Barrido progresivo

En la primera iteración se inicializan todas las corrientes de bus en ceros. En la primera mitad de V-I-PARS el algoritmo comienza con un barrido progresivo, procesando las ramas en un orden preestablecido (ordenamiento por niveles). Cada rama es recorrida yendo del nodo fuente hacia el nodo más alejado (Fuente \rightarrow N), en la cual se realiza la ecuación 3.1

$$V_m = V_n - Z_{mn} * I_{mn} \quad 3.1$$

Donde:

V_m = Voltaje en el nodo m , nodo más alejado de la fuente (aguas abajo)

V_n = Voltaje en el nodo n , nodo mas cercano a la fuente (aguas arriba)

Z_{mn} = Impedancia de línea entre en nodo m y n

I_{mn} = Corriente de línea entre el nodo m y n

3.2.3 Barrido regresivo

La segunda mitad de cada iteración del algoritmo es el barrido regresivo que se inicia en los nodos finales y recorre la red hacia el nodo fuente (N→Fuente). Durante el barrido regresivo, la red es recorrida en el orden inverso del barrido progresivo. Con los voltajes calculados por el barrido progresivo se calcula la corriente de carga " I_m " que es generada por la potencia de carga conectada en el nodo m . En cada rama se calculara un flujo de corriente que será la incógnita en la ecuación (3.2):

$$(I_{mn})_{ABC} = (I_m)_{ABC} + \sum (I_{Ln})_{ABC} \quad (3.2)$$

Donde:

L : Es todo nodo que se conecte a m , siendo L todo nodo posicionado en un nivel mayor que m (L estas más alejado del nodo fuente).

n : Es el nodo que al cual se conecta m , estando n en un nivel menor que m (más cerca de la fuente).

I_m : Corriente inyectada en m debido a la carga.

I_{mn} : Flujo de corriente por la línea entre los nodos $m-n$ (corriente de rama).

I_{Lm} : Flujo de corriente entre los nodos $L-m$.

3.2.4 Calculo error y convergencia

El voltaje calculado del nodo alimentado " V_c " en cada iteración se calcula con la ecuación 3.3

$$V_c = V_m + Z_{mn} * I_{mn} \quad 3.3$$

El cálculo del error se realiza con la norma de la diferencia del voltaje calculado V_c y el voltaje específico de la fuente V_e ecuación 3.4

$$error = |V_e - V_c| \quad 3.4$$

La convergencia se logra cuando el error es menor a una tolerancia deseada.

Tomando en consideración lo descrito en este apartado y la modelación de los elementos en los apartados 2.3 y 2.4 se diseña un diagrama de flujo general para este algoritmo el cual esta mostrado en la figura 3.6

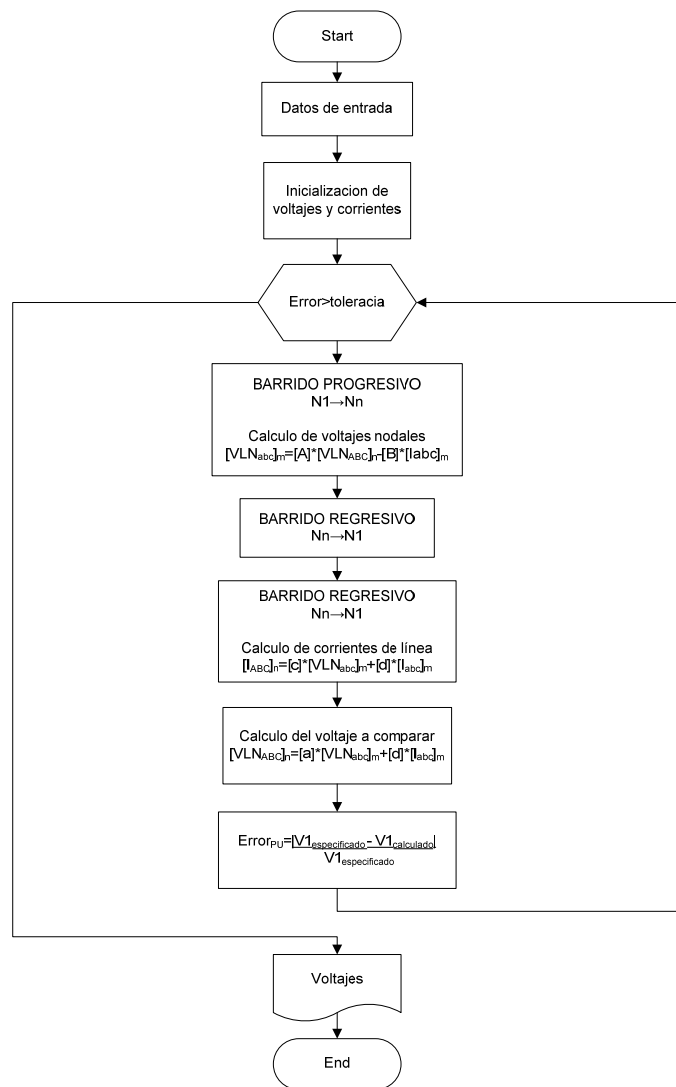


Figura 3.6.- Diagrama de flujo general algoritmo Barrido progresivo-regresivo

El programa completo de flujos para redes de distribución realizado, consta de 1 programa principal “Prog_Flujos_distribucion” y tres sub-rutinas: “Lee_datos_entrada”, “crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B” y “Barrido_P_R” el código y diagramas de flujo del programa es escrito en el Apendice B.

CAPÍTULO 4

Análisis de resultados

Con el fin de validar el modelo de flujos de potencia de redes de distribución para sistemas radiales por el método iterativo de barrido progresivo- regresivo (Escalera) desarrollado en lenguaje Fortran se prueba el algoritmo en los circuitos de IEEE 4 nodos [7] y [15] para la prueba de las sub-rutinas:

- Matriz de impedancia de linea (Capitulo 2.1)
- Matriz de admitancia en Paralelo (Capitulo 2.2)
- Conexiones de transformador (Capitulo 2.4)
 - Delta – Estrella Aterrizada
 - Estrella Aterrizada – Estrella Aterrizada
 - Delta – Delta
 - Estrella Aterrizada – Delta.
- Vectores “I_fil”, “I_col” y “Y_ling” (Capitulo 3.1)
- Vector “V_nivel” (Capitulo 3.1)
- Prueba de la rutina principal (Apartado 3.2)

El Algoritmo fue implementado en lenguaje Fortran en “Fortran Power Station” la versión utilizada fue la 4.0, se decidió trabajar con Fortran ya que este es capaz de crear una versión ejecutable y cuenta con la biblioteca IMSL haciendo la programación menos compleja.

4.1 Prueba de la sub-rutina para crear los vectores de guía

El circuito en la cual se prueba y valida las sub-rutinas “Crea Vectores I_fil, I_col y Y_ling” y “Crea vector V_nivel” se obtiene de [1] el circuito de prueba es el mostrado en la figura 4.1

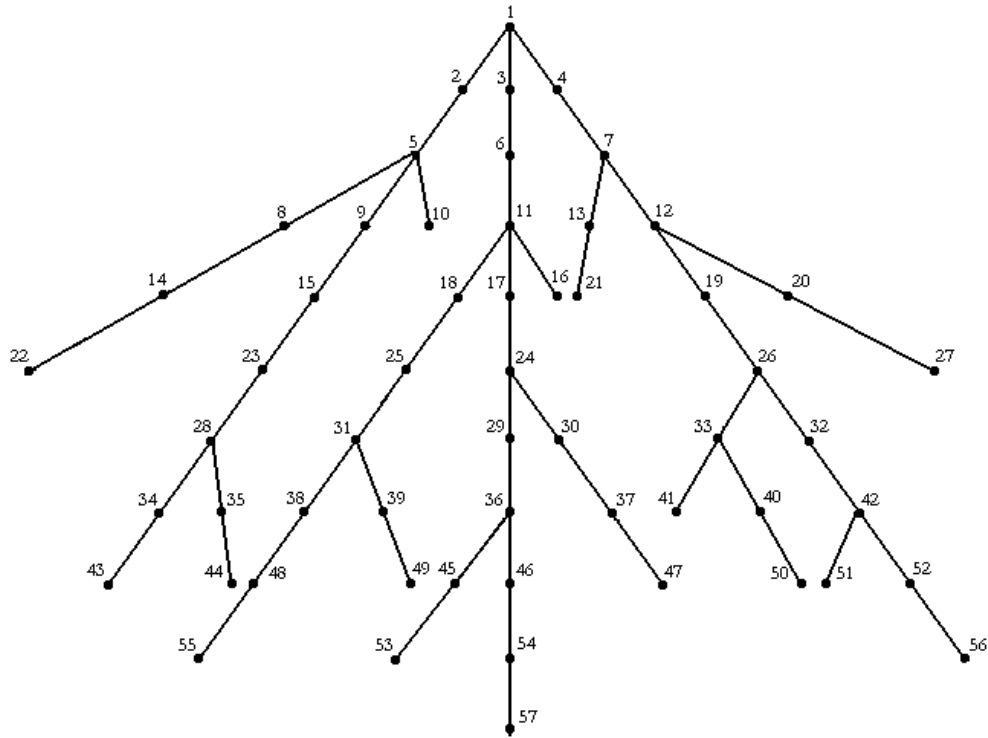


Figura 4.1.- Red de distribución radial

La prueba fue realizada según lo descrito en el apartado 2.6 obteniendo los resultados mostrados en las tablas 4.1 y 4.2

Tabla 4.1 - Primer bloque de Resultados: Vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”

# nodo	Vector I fila	Vector nivel
1	1	0
2	4	1
3	7	1
4	10	2
5	15	2
6	20	3
7	23	3
8	25	3
9	28	3
10	31	3
11	33	3
12	36	4
13	38	4
14	41	4
15	44	4
16	47	5
17	50	5
18	55	5
19	60	6
20	62	6
21	64	6
22	66	6
23	68	6
24	71	6
25	73	6
26	76	7
27	78	7
28	81	8
29	84	9

Tabla 4.2.- Segundo bloque de Resultados: Vectores “V_nivel” y “V_bandera”

Vector I col	Vector Linic
2	2
2	3
3	0
2	5
1	6
4	0
2	8
1	9
5	0
4	11
2	12
6	13
7	14
8	0
4	16
3	17
9	18
10	19
11	0
2	21
4	22
12	0
1	24
4	0
2	26
4	27
13	0
2	29
5	30
14	0
1	32
5	0
2	34
5	35
15	0
1	37
6	0
2	39
8	40
16	0
2	42
9	43
17	0

2	45
11	46
18	0
2	48
13	49
19	0
4	51
14	52
20	53
21	54
22	0
4	56
15	57
23	58
24	59
25	0
1	61
16	0
1	63
17	0
1	65
17	0
1	67
17	0
2	69
18	70
26	0
1	72
18	0
2	74
18	75
27	0
1	77
23	0
2	79
25	80
28	0
2	82
27	83
29	0
1	85
28	0

Los resultados obtenidos en las tablas 4.1 y 4.3 se acomodan para una mejor visualización en la figura 4.2

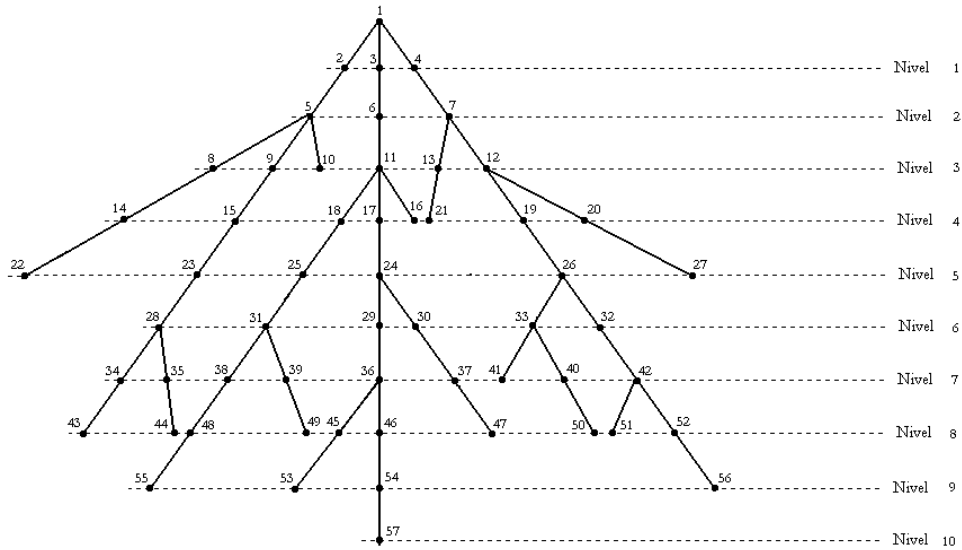


Figura 4.2.- Red radial con niveles

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios por lo cual se asume el buen funcionamiento de las sub-utinas “Crea Vectores I_filá, I_col y Y_ling” y “Crea vector V_nivel”.

4.2 Prueba de las sub-rutinas para crear las matrices de impedancia de línea y Admitancia en paralelo

Las líneas de prueba en la cual se prueban las sub-rutinas “Crea Matriz de impedancia de línea” y “crea Admitancia en paralelo” descrita en el apartados 2.1 y 2.2 se obtienen de [7], las líneas de prueba son mostradas en las figuras 4.3 y 4.4

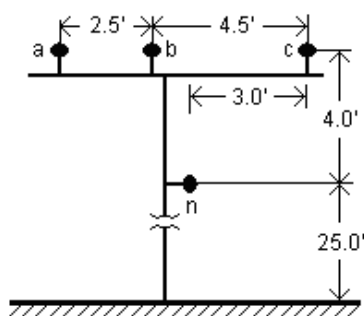


Figura 4.3.- línea de prueba 1

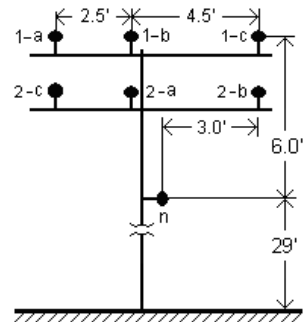


Figura 4.4.- línea de prueba 2

Los datos de los conductores para la figura 4.3 son mostrados en la tabla 4.3:

Tabla 4.3.- Datos de conductores

Datos de tabla "contutores"					
No. conductor	Tipo	Diámetro (Plg.)	RMG (Pies)	Resistencia ($\Omega/milla$)	Radio del conductor (Pies)
336,400 26/7 ACSR	Fase	0.721	0.0244	0.306	0.0300415
4/0 6/1 ACSR	Neutro	0.563	0.00814	0.592	0.0234583

La prueba fue realizada según lo descrito en el apartado 2.2 los resultados obtenidos en la línea de prueba 1 de la figura 4.3 son mostrados en la tabla 4.3 y 4.4.

Tabla 4.3.- Matriz de impedancia de la línea de prueba 1

MATRIZ DE IMPEDANCIA DE LINEA		
Z _{abc} (1, 1)	.45755	1.07803 j
Z _{abc} (1, 2)	.15595	.50167 j
Z _{abc} (1, 3)	.15348	.38493 j
Z _{abc} (2, 1)	.15595	.50167 j
Z _{abc} (2, 2)	.46663	1.04816 j
Z _{abc} (2, 3)	.15801	.42365 j
Z _{abc} (3, 1)	.15348	.38493 j
Z _{abc} (3, 2)	.15801	.42365 j
Z _{abc} (3, 3)	.46147	1.06506 j

Tabla 4.4.- Matriz de admitancia en paralelo de la línea de prueba 1

MATRIZ DE ADMITANCIA EN PARALELO		
Y _{abc} (1, 1)	.0	.5671128E-05 j
Y _{abc} (1, 2)	.0	-.1836205E-05 j
Y _{abc} (1, 3)	.0	-.7033472E-06 j
Y _{abc} (2, 1)	.0	-.1836205E-05 j
Y _{abc} (2, 2)	.0	.5977374E-05 j
Y _{abc} (2, 3)	.0	-.1168964E-05 j
Y _{abc} (3, 1)	.0	-.7033472E-06 j
Y _{abc} (3, 2)	.0	-.1168964E-05 j
Y _{abc} (3, 3)	.0	.5391032E-05 j

Los datos de los conductores para la figura 4.4 son mostrados en la tabla 4.5

Tabla 4.5.- Datos de conductores

Datos de tabla "contutores"					
No. conductor	Tipo	Diámetro (Plg.)	RMG (Pies)	Resistencia ($\Omega/milla$)	Radio del conductor (Pies)
336,400 26/7 ACSR	Fase-1a-1b-1c	0.721	0.0244	0.306	0.0300415
	Fase-2a-2b-2c	0.567	0.0171	0.410	0.0236250
4/0 6/1 ACSR	Neutro	0.563	0.00814	0.592	0.0234583

La prueba fue realizada según lo descrito en el apartado 2.2 los resultados obtenidos en la línea de prueba 2 de la figura 4.4 son mostrados en las tablas 4.6 y 4.7.

Tabla 4.6.- Matriz de impedancia de la línea de prueba 2

MATRIZ DE IMPEDANCIA DE LINEA		
Zabc(1, 1)	.45015	1.10285 j
Zabc(1, 2)	.14643	.53341 j
Zabc(1, 3)	.14522	.41255 j
Zabc(1, 4)	.15191	.48484 j
Zabc(1, 5)	.14958	.39305 j
Zabc(1, 6)	.14775	.55601 j
Zabc(2, 1)	.14643	.53341 j
Zabc(2, 2)	.45478	1.08726 j
Zabc(2, 3)	.14754	.45838 j
Zabc(2, 4)	.15446	.53359 j
Zabc(2, 5)	.15205	.43234 j
Zabc(2, 6)	.15015	.49093 j
Zabc(3, 1)	.14522	.41255 j
Zabc(3, 2)	.14754	.45838 j
Zabc(3, 3)	.45231	1.09556 j
Zabc(3, 4)	.15311	.42867 j
Zabc(3, 5)	.15074	.54599 j
Zabc(3, 6)	.14888	.39548 j
Zabc(4, 1)	.15191	.48484 j
Zabc(4, 2)	.15446	.53359 j
Zabc(4, 3)	.15311	.42867 j
Zabc(4, 4)	.57063	1.09130 j
Zabc(4, 5)	.15801	.42365 j
Zabc(4, 6)	.15595	.50167 j
Zabc(5, 1)	.14958	.39305 j
Zabc(5, 2)	.15205	.43234 j

Zabc(5, 3)	.15074	.54599 j
Zabc(5, 4)	.15801	.42365 j
Zabc(5, 5)	.56547	1.10819 j
Zabc(5, 6)	.15348	.38493 j
Zabc(6, 1)	.14775	.55601 j
Zabc(6, 2)	.15015	.49093 j
Zabc(6, 3)	.14888	.39548 j
Zabc(6, 4)	.15595	.50167 j
Zabc(6, 5)	.15348	.38493 j
Zabc(6, 6)	.56155	1.12117 j

Tabla 4.7.- Matriz de admitancia en paralelo de la línea de prueba 2

MATRIZ DE ADMITANCIA EN PARALELO		
Y_abc(1, 1)	.0	.6299160E-05 j
Y_abc(1, 2)	.0	-.1341339E-05 j
Y_abc(1, 3)	.0	-.4135464E-06 j
Y_abc(1, 4)	.0	-.7889067E-06 j
Y_abc(1, 5)	.0	-.2992210E-06 j
Y_abc(1, 6)	.0	-.1643779E-05 j
Y_abc(2, 1)	.0	-.1341339E-05 j
Y_abc(2, 2)	.0	.6500935E-05 j
Y_abc(2, 3)	.0	-.8038377E-06 j
Y_abc(2, 4)	.0	-.1443958E-05 j
Y_abc(2, 5)	.0	-.5697809E-06 j
Y_abc(2, 6)	.0	-.7987719E-06 j
Y_abc(3, 1)	.0	-.4135465E-06 j
Y_abc(3, 2)	.0	-.8038375E-06 j
Y_abc(3, 3)	.0	.6025666E-05 j
Y_abc(3, 4)	.0	-.5552623E-06 j
Y_abc(3, 5)	.0	-.1862848E-05 j
Y_abc(3, 6)	.0	-.2985233E-06 j
Y_abc(4, 1)	.0	-.7889065E-06 j
Y_abc(4, 2)	.0	-.1443958E-05 j
Y_abc(4, 3)	.0	-.5552623E-06 j
Y_abc(4, 4)	.0	.6327771E-05 j
Y_abc(4, 5)	.0	-.6196991E-06 j
Y_abc(4, 6)	.0	-.1127648E-05 j
Y_abc(5, 1)	.0	-.2992210E-06 j
Y_abc(5, 2)	.0	-.5697814E-06 j
Y_abc(5, 3)	.0	-.1862848E-05 j
Y_abc(5, 4)	.0	-.6196991E-06 j
Y_abc(5, 5)	.0	.5901606E-05 j
Y_abc(5, 6)	.0	-.2950476E-06 j

Y_abc(6, 1)	.0	-.1643779E-05 j
Y_abc(6, 2)	.0	-.7987718E-06 j
Y_abc(6, 3)	.0	-.2985233E-06 j
Y_abc(6, 4)	.0	-.1127648E-05 j
Y_abc(6, 5)	.0	-.2950476E-06 j
Y_abc(6, 6)	.0	.6105132E-05 j

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios por lo cual se asume el buen funcionamiento de las sub-rutinas “Crea Matriz de impedancia de línea” y “Crea Matriz de admitancia de línea”.

4.3 Prueba del algoritmo progresivo-regresivo (escalera)

Al circuito de la prueba 1 [6] (figura 4.5) se le aplica la subrutina de ordenamiento por capas mostrado en el apartado 3.6 y probado en el apartado 4.1. Los datos del circuito de prueba 1 son mostrados en el apendice A1.

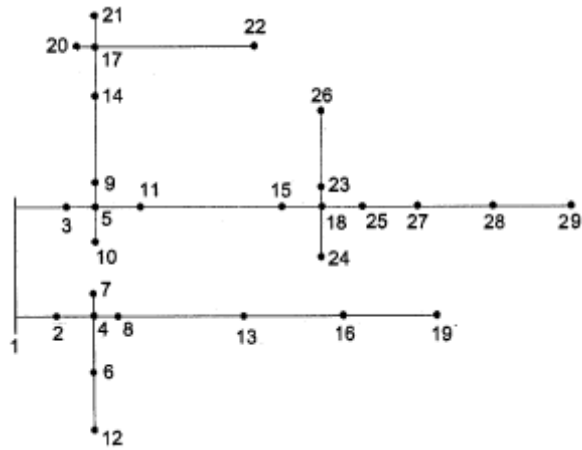


Figura 4.5.- Circuito de prueba 1

Las tablas 4.8, 4.9 y 4.10 muestran los resultados obtenidos en el Circuito de prueba 1

Tabla 4.8.- Resultados obtenidos de la prueba 1

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
Número de Nodo	Fase A		Fase B		Fase C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	1212.44	0.00	1212.44	-120.00	1212.44	120.00
2	1209.80	-0.01	1209.06	-119.97	1209.20	120.04
3	1207.09	0.00	1207.48	-119.93	1209.45	120.00
4	1207.16	-0.02	1205.69	-119.94	1205.97	120.09
5	1202.06	0.01	1202.64	-119.86	1206.46	120.00
6	1207.02	-0.02	1205.57	-119.94	1205.67	120.09
7	1207.16	-0.02	1205.69	-119.94	1205.97	120.09
8	1204.66	-0.03	1202.43	-119.92	1203.03	120.13
9	1201.49	0.00	1201.71	-119.87	1206.14	120.00
10	1201.97	0.01	1202.57	-119.86	1206.24	120.00
11	1198.23	0.03	1199.12	-119.78	1204.24	120.01
12	1206.85	-0.02	1205.48	-119.95	1205.59	120.09
13	1203.32	-0.02	1200.67	-119.90	1201.48	120.15
14	1201.02	0.00	1200.95	-119.88	1205.80	120.00
15	1194.41	0.06	1195.59	-119.70	1202.02	120.01
16	1202.17	-0.01	1199.21	-119.88	1200.13	120.17
17	1200.64	-0.01	1200.39	-119.88	1205.53	120.00
18	1193.22	0.03	1194.53	-119.70	1200.15	119.99
19	1202.01	-0.01	1198.82	-119.88	1199.66	120.17
20	1200.66	-0.01	1200.23	-119.88	1205.40	120.00
21	1200.44	-0.01	1200.03	-119.89	1205.40	120.00
22	1200.44	-0.01	1200.36	-119.88	1205.52	120.01
23	1192.75	0.02	1194.29	-119.70	1200.15	120.00
24	1193.14	0.03	1194.53	-119.70	1200.15	119.99
25	1192.59	0.01	1193.70	-119.70	1198.30	119.97
26	1192.35	0.02	1194.12	-119.71	1200.14	120.00
27	1191.94	-0.01	1192.99	-119.71	1196.55	119.96
28	1191.80	-0.02	1192.60	-119.71	1195.46	119.94
29	1191.72	-0.02	1192.52	-119.71	1195.46	119.94

Tabla 4.9.- Resultados obtenidos de la prueba 1

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A →Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	3.76	-32.77	4.42	-154.98	4.59	80.74
1	3	7.10	-34.76	6.67	-163.82	4.36	99.18
2	4	3.76	-32.77	4.42	-154.98	4.59	80.74
3	5	6.72	-35.72	6.51	-164.52	4.36	99.18
4	6	0.23	-18.22	0.14	-138.12	0.39	101.89

4	7	0.32	-13.00	0.41	-125.21	0.21	103.28
4	8	3.54	-33.70	4.29	-155.53	4.22	78.82
5	9	0.77	-19.57	1.25	-138.07	0.50	101.81
5	10	0.15	-21.26	0.09	-138.03	0.30	101.81
5	11	5.15	-41.34	5.07	-174.57	3.28	97.62
6	12	0.23	-18.22	0.12	-138.14	0.10	101.88
8	13	1.92	-42.52	2.31	-157.71	2.25	81.38
9	14	0.66	-18.21	1.01	-138.07	0.50	101.81
11	15	5.15	-41.34	5.07	-174.57	3.28	97.62
13	16	1.66	-46.57	1.95	-161.53	1.98	78.43
14	17	0.53	-18.21	0.74	-138.07	0.39	101.81
15	18	1.91	-11.23	1.34	-135.65	2.49	105.11
16	19	0.29	-18.21	0.49	-138.08	0.66	101.98
17	20	0.00	0.00	0.21	-138.07	0.19	101.81
17	21	0.27	-18.21	0.48	-138.08	0.20	101.82
17	22	0.26	-18.21	0.05	-138.06	0.00	0.00
18	23	0.60	-18.18	0.34	-137.90	0.00	0.00
18	24	0.10	-18.15	0.00	0.00	0.00	0.00
18	25	1.22	-7.22	1.00	-134.88	2.49	105.11
23	26	0.50	-18.18	0.24	-137.90	0.00	0.00
25	27	1.22	-7.22	0.85	-134.35	2.34	105.32
27	28	0.39	-10.59	0.43	-137.90	1.57	114.22
28	29	0.10	-18.20	0.10	-137.89	0.00	0.00

Tabla 4.10.- Resultados obtenidos de la prueba 1

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A →Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	3.83	2.47	4.39	3.08	4.31	3.52
1	3	7.07	4.91	5.84	5.60	4.94	1.88
2	4	3.82	2.46	4.38	3.07	4.29	3.51
3	5	6.59	4.74	5.60	5.52	4.92	1.87
4	6	0.26	0.09	0.16	0.05	0.45	0.15
4	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	8	3.55	2.37	4.21	3.01	3.83	3.36
5	9	0.87	0.31	1.42	0.47	0.58	0.19
5	10	0.17	0.06	0.10	0.03	0.35	0.11
5	11	4.65	4.09	3.52	4.97	3.66	1.51
6	12	0.26	0.09	0.14	0.05	0.12	0.04
8	13	1.71	1.56	2.20	1.70	2.11	1.69
9	14	0.75	0.25	1.15	0.38	0.58	0.19
11	15	4.63	4.08	3.50	4.96	3.66	1.51
13	16	1.38	1.45	1.75	1.56	1.78	1.58
14	17	0.61	0.20	0.84	0.28	0.45	0.15
15	18	2.24	0.45	1.54	0.44	2.90	0.77

16	19	0.33	.11	0.56	0.18	0.75	0.25
17	20	0.00	.00	0.24	0.08	0.22	0.07
17	21	0.31	.10	0.54	0.18	0.23	0.08
17	22	0.29	.10	0.06	0.02	0.00	0.00
18	23	0.68	.22	0.39	0.13	0.00	0.00
18	24	0.11	.04	0.00	0.00	0.00	0.00
18	25	1.44	.18	1.15	0.31	2.89	0.77
23	26	0.57	.19	0.27	0.09	0.00	0.00
25	27	1.44	0.18	0.98	0.26	2.72	0.71
27	28	0.46	0.09	0.48	0.16	1.87	0.19
28	29	0.12	0.04	0.12	0.04	0.00	0.00
2	1	-3.82	-2.46	-4.38	-3.07	-4.29	-3.51
3	1	-7.04	-4.89	-5.81	-5.59	-4.92	-1.87
4	2	-3.82	-2.45	-4.37	-3.06	-4.28	-3.51
5	3	-6.56	-4.72	-5.57	-5.50	-4.91	-1.87
6	4	-0.26	-0.09	-0.16	-0.05	-0.45	-0.15
7	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	4	-3.55	-2.36	-4.19	-3.00	-3.82	-3.35
9	5	-0.87	-0.31	-1.42	-0.47	-0.58	-0.19
10	5	-0.17	-0.06	-0.10	-0.03	-0.35	-0.11
11	5	-4.63	-4.08	-3.50	-4.96	-3.66	-1.51
12	6	-0.26	-0.09	-0.14	-0.05	-0.12	-0.04
13	8	-1.70	-1.56	-2.19	-1.70	-2.11	-1.69
14	9	-0.75	-0.25	-1.15	-0.38	-0.58	-0.19
15	11	-4.62	-4.07	-3.48	-4.95	-3.65	-1.50
16	13	-1.38	-1.45	-1.75	-1.55	-1.77	-1.58
17	14	-0.61	-0.20	-0.84	-0.28	-0.45	-0.15
18	15	-2.24	-0.45	-1.53	-0.44	-2.89	-0.77
19	16	-0.33	-0.11	-0.56	-0.18	-0.75	-0.25
20	17	0.00	0.00	-0.24	-0.08	-0.22	-0.07
21	17	-0.31	-0.10	-0.54	-0.18	-0.23	-0.08
22	17	-0.29	-0.10	-0.06	-0.02	0.00	0.00
23	18	-0.68	-0.22	-0.39	-0.13	0.00	0.00
24	18	-0.11	-0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
25	18	-1.44	-0.18	-1.15	-0.31	-2.89	-0.77
26	23	-0.57	-0.19	-0.27	-0.09	0.00	0.00
27	25	-1.44	-0.18	-0.98	-0.25	-2.71	-0.71
28	27	-0.46	-0.09	-0.48	-0.16	-1.87	-0.19
29	28	-0.12	-0.04	-0.12	-0.04	0.00	0.00

Se realizo la prueba 2 con las cargas equilibradas del circuito de prueba 1 (figura 4.5) manteniendo las demas variables iguales a la prueba 1. Las cargas son mostradas en el apendice A1. Las tablas 4.11, 4.12 y 4.13 muestran los resultados obtenidos de esta prueba.

Tabla 4.11.- Resultados obtenidos de la prueba 2

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
Número de Nodo	Fase A		Fase B		Fase C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	1212.44	0.00	1212.44	-120.00	1212.44	120.00
2	1209.37	0.00	1209.20	-119.97	1209.43	120.03
3	1208.14	0.00	1207.87	-119.97	1208.19	120.04
4	1206.30	0.00	1205.95	-119.94	1206.41	120.07
5	1203.97	-0.01	1203.45	-119.93	1204.09	120.09
6	1206.13	0.00	1205.76	-119.95	1206.23	120.07
7	1206.30	0.00	1205.95	-119.94	1206.41	120.07
8	1203.41	0.00	1202.91	-119.92	1203.59	120.10
9	1203.39	-0.02	1202.81	-119.93	1203.48	120.09
10	1203.84	-0.01	1203.32	-119.93	1203.96	120.09
11	1200.81	0.01	1200.18	-119.88	1201.07	120.14
12	1206.03	0.00	1205.64	-119.95	1206.12	120.07
13	1201.86	0.01	1201.28	-119.90	1202.08	120.13
14	1202.89	-0.02	1202.25	-119.94	1202.95	120.09
15	1197.66	0.02	1196.91	-119.84	1198.05	120.19
16	1200.52	0.01	1199.90	-119.88	1200.81	120.15
17	1202.51	-0.03	1201.83	-119.94	1202.55	120.08
18	1196.38	0.00	1195.46	-119.85	1196.67	120.18
19	1200.19	0.01	1199.53	-119.88	1200.46	120.15
20	1202.42	-0.03	1201.73	-119.94	1202.45	120.08
21	1202.29	-0.03	1201.58	-119.94	1202.32	120.08
22	1202.44	-0.03	1201.75	-119.94	1202.47	120.08
23	1196.17	0.00	1195.22	-119.86	1196.45	120.18
24	1196.36	0.00	1195.44	-119.85	1196.65	120.18
25	1195.34	-0.02	1194.28	-119.87	1195.55	120.17
26	1196.00	-0.01	1195.03	-119.86	1196.27	120.18
27	1194.37	-0.04	1193.17	-119.88	1194.49	120.17
28	1193.86	-0.05	1192.58	-119.89	1193.93	120.16
29	1193.81	-0.06	1192.52	-119.89	1193.88	120.16

Tabla 4.12.- Resultados obtenidos de la prueba 2

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A →Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	4.25	-35.94	4.25	-155.85	4.25	84.18
1	3	5.96	-34.85	5.97	-154.72	5.96	85.31
2	4	4.25	-35.94	4.25	-155.85	4.25	84.18
3	5	5.78	-35.40	5.78	-155.27	5.78	84.77
4	6	0.25	-18.18	0.25	-138.13	0.25	101.89
4	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	.00
4	8	4.01	-37.05	4.01	-156.95	4.01	83.07
5	9	0.84	-18.64	0.84	-138.55	0.84	101.47
5	10	0.18	-19.03	0.18	-138.95	0.18	101.07
5	11	4.39	-41.84	4.39	-161.69	4.39	78.34
6	12	0.15	-18.19	0.15	-138.14	0.15	101.88
8	13	2.16	-39.54	2.16	-159.43	2.16	80.60
9	14	0.72	-18.22	0.72	-138.14	0.72	101.89
11	15	4.39	-41.84	4.39	-161.69	4.39	78.34
13	16	1.86	-43.13	1.86	-163.02	1.86	77.01
14	17	0.55	-18.22	0.55	-138.13	0.55	101.89
15	18	1.91	-13.94	1.91	-133.77	1.91	106.27
16	19	0.48	-18.19	0.48	-138.07	0.48	101.95
17	20	0.13	-18.23	0.13	-138.14	0.13	101.89
17	21	0.32	-18.22	0.32	-138.13	0.32	101.90
17	22	0.10	-18.23	0.10	-138.14	0.10	101.88
18	23	0.31	-18.20	0.31	-138.05	0.31	101.98
18	24	0.03	-18.21	0.03	-138.06	0.03	101.97
18	25	1.57	-12.99	1.57	-132.83	1.57	107.22
23	26	0.25	-18.20	0.25	-138.05	0.25	101.99
25	27	1.47	-12.63	1.47	-132.47	1.47	107.58
27	28	0.80	-8.79	0.80	-128.63	0.80	111.42
28	29	0.07	-18.27	0.07	-138.10	0.07	101.94

Tabla 4.13.- Resultados obtenidos de la prueba 1

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A →Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	4.17	3.03	4.18	3.02	4.18	3.02
1	3	5.93	4.13	5.95	4.12	5.94	4.11
2	4	4.16	3.01	3.02	4.17	4.17	3.01
3	5	5.69	4.05	5.70	4.04	5.70	4.03
4	6	0.29	0.10	0.29	0.10	0.29	0.10

4	7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	8	3.86	2.91	3.86	2.91	3.86	2.91
5	9	0.96	0.32	0.96	0.32	0.96	0.32
5	10	0.20	0.07	0.20	0.07	0.20	0.07
5	11	3.94	3.53	3.94	3.52	3.94	3.52
6	12	0.18	0.06	0.18	0.06	0.18	0.06
8	13	2.00	1.65	2.00	1.65	2.00	1.65
9	14	0.83	0.27	0.83	0.27	0.83	0.27
11	15	3.93	3.52	3.93	3.52	3.93	3.51
13	16	1.63	1.53	1.63	1.53	1.63	1.53
14	17	0.63	0.21	0.63	0.21	0.63	0.21
15	18	2.22	0.55	2.22	0.55	2.22	0.55
16	19	0.55	0.18	0.55	0.18	0.55	0.18
17	20	0.15	0.05	0.15	0.05	0.15	0.05
17	21	0.36	0.12	0.36	0.12	0.36	0.12
17	22	0.12	0.04	0.12	0.04	0.12	0.04
18	23	0.36	0.12	0.36	0.12	0.36	0.12
18	24	0.04	0.01	0.04	0.01	0.04	0.01
18	25	1.83	0.42	1.83	0.42	1.83	0.42
23	26	0.28	0.09	0.28	0.09	0.28	0.09
25	27	1.71	0.38	1.71	0.38	1.71	0.38
27	28	0.94	0.14	0.94	0.14	0.94	0.14
28	29	0.08	0.03	0.08	0.03	0.08	0.03
2	1	-4.16	-3.02	-4.17	-3.01	-4.17	-3.01
3	1	-5.91	-4.12	-5.92	-4.11	-5.92	-4.11
4	2	-4.15	-3.01	-4.15	-3.01	-4.15	-3.01
5	3	-5.67	-4.03	-5.68	-4.03	-5.68	-4.02
6	4	-0.29	-0.10	-0.29	-0.10	-0.29	-0.10
7	4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	4	-3.85	-2.91	-3.85	-2.91	-3.85	-2.91
9	5	-0.96	-0.32	-0.96	-0.32	-0.96	-0.32
10	5	-0.20	-0.07	-0.20	-0.07	-0.20	-0.07
11	5	-3.93	-3.52	-3.93	-3.52	-3.93	-3.51
12	6	-0.17	-0.06	-0.17	-0.06	-0.17	-0.06
13	8	-2.00	-1.65	-2.00	-1.65	-2.00	-1.65
14	9	-0.83	-0.27	-0.83	-0.27	-0.83	-0.27
15	11	-3.92	-3.51	-3.92	-3.51	-3.92	-3.51
16	13	-1.63	-1.53	-1.63	-1.53	-1.63	-1.53
17	14	-0.63	-0.21	-0.63	-0.21	-0.63	-0.21
18	15	-2.22	-0.55	-2.22	-0.55	-2.22	-0.55
19	16	-0.55	-0.18	-0.55	-0.18	-0.55	-0.18
20	17	-0.15	-0.05	-0.15	-0.05	-0.15	-0.05
21	17	-0.36	-0.12	-0.36	-0.12	-0.36	-0.12
22	17	-0.12	-0.04	-0.12	-0.04	-0.12	-0.04
23	18	-0.36	-0.12	-0.36	-0.12	-0.36	-0.12
24	18	-0.04	-0.01	-0.04	-0.01	-0.04	-0.01

25	18	-1.83	-0.42	-1.83	-0.42	-1.83	-0.42
26	23	-0.28	-0.09	-0.28	-0.09	-0.28	-0.09
27	25	-1.71	-0.38	-1.71	-0.38	-1.71	-0.38
28	27	-0.94	-0.14	-0.94	-0.14	-0.94	-0.14
29	28	-0.08	-0.03	-0.08	-0.03	-0.08	-0.03

4.4 Pruebas de las conexiones de los transformadores

Se prueban las diferentes conexiones de los transformadores según lo descrito en el apartado 2.4 y se comparan los resultados con los mostrados en [7] y [15] dando una correcta convergencia. Los datos de los circuitos de prueba 2-6 son mostrados en el apéndice A1.

4.4.1 Conexión Delta – Estrella aterrizada

El circuito de la figura 4.6 muestra el sistema radial de [7] con un transformador en conexión Delta – Estrella aterrizada, las tablas 4.13 - 4.15 muestran los resultados obtenidos.

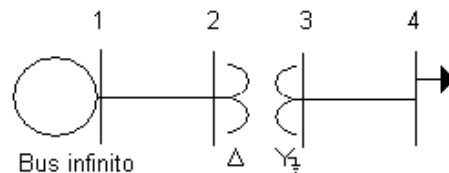


Figura 4.6.- Circuito de prueba 2

Tabla 4.13.- Resultados obtenidos de la prueba 2

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
NODO	FASE A		FASE B		FASE C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	12470.02	30.00	12469.96	-90.00	12470.02	150.00
2	12424.04	29.82	12412.34	-90.22	12411.07	149.85
3	2349.58	-31.18	2342.07	-151.70	2334.30	87.77
4	2278.11	-31.84	2199.85	-153.53	2211.15	83.10

Tabla 4.14.- Resultados obtenidos de la prueba 2

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	128.38	-25.76	166.59	-143.33	156.32	83.39
3	4	329.22	-63.62	454.58	-179.37	565.32	64.90

Tabla 4.15.- Resultados obtenidos de la prueba 2

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	900.78	1323.48	1240.62	1666.22	773.87	1789.18
3	4	652.83	414.92	942.94	494.30	1215.90	512.81
2	1	-901.65	-1315.73	-1241.26	-1653.76	-775.02	-1778.63
4	3	-637.50	-395.09	-900.00	-435.89	-1187.50	-390.31

El circuito de la figura 4.6 muestra el sistema radial de [15] con un transformador en conexión Delta – Estrella aterrizada, las tablas 4.16 - 4.18 muestran los resultados obtenidos.

Tabla 4.16.- Resultados obtenidos de la prueba 3

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
NODO	FASE A		FASE B		FASE C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	12470.02	30.00	12469.96	-90.00	12470.02	150.00
2	12350.24	29.60	12313.77	-90.39	12332.69	149.75
3	2290.29	-32.40	2261.61	-153.81	2213.93	85.18
4	2156.81	-34.24	1936.30	-157.03	1849.28	73.39

Tabla 4.17.- Resultados obtenidos de la prueba 3

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	285.63	-27.61	402.69	-149.59	349.15	74.35
3	4	695.47	-66.03	1032.90	177.12	1351.88	55.20

Tabla 4.18.- Resultados obtenidos de la prueba 3

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	1907.96	3007.74	2541.69	4330.77	1079.02	4218.11
3	4	1326.18	882.25	2041.90	1134.73	2592.55	1495.50
2	1	-1910.22	-2965.69	-2539.17	-4259.18	-1085.24	-4166.99
4	3	-1275.00	-790.17	-1800.00	-871.78	-2375.00	-780.62

4.4.2 Conexión Estrella aterrizada – Estrella aterrizada

El circuito de prueba de la figura 4.7 muestra un sistema radial con un transformador en conexión Delta – Estrella aterrizada, las tablas 4.19 - 4.21 muestran los resultados obtenidos.

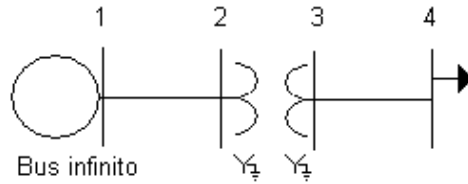


Figura 4.7.- Circuito de prueba 4

Tabla 4.19.- Resultados obtenidos de la prueba 4

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
NODO	FASE A		FASE B		FASE C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	7199.56	.00	7199.56	-120.00	7199.56	120.00
2	7163.72	-.14	7110.48	-120.18	7082.03	119.27
3	2305.49	-2.26	2254.66	-123.63	2202.81	114.79
4	2174.97	-4.12	1929.81	-126.80	1832.67	102.85

Tabla 4.20.- Resultados obtenidos de la prueba 4

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	230.07	-35.91	345.73	-152.64	455.07	84.65
3	4	689.67	-35.91	1036.37	-152.64	1364.13	84.65

Tabla 4.21.- Resultados obtenidos de la prueba 4

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	1341.57	971.56	2096.05	1342.52	2672.30	1895.55
3	4	1323.53	881.15	2043.40	1508.70	2598.71	1133.36
2	1	-1337.25	-963.46	-2074.38	-1319.23	-2652.38	-1830.73
4	3	-1275.00	-790.17	-1800.00	-871.78	-2375.00	-780.62

4.4.3 Conexión Delta - Delta

El circuito de prueba 5 de la figura 4.8 muestra un sistema radial con un transformador en conexión Delta – Delta, las tablas 4.22 - 4.24 muestran los resultados obtenidos.

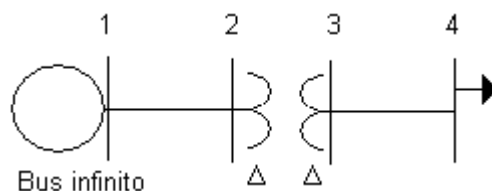


Figura 4.8.- Circuito de prueba 5

Tabla 4.22.- Resultados obtenidos de la prueba 5

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
NODO	FASE A		FASE B		FASE C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	12470.02	30.00	12469.96	-90.00	12470.02	150.00
2	12341.03	29.81	12370.24	-90.48	12301.79	149.55
3	3901.75	27.20	3972.45	-93.91	3871.37	145.74
4	3430.67	24.27	3647.43	-100.36	3293.70	138.61

Tabla 4.23.- Resultados obtenidos de la prueba 5

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	361.66	-41.03	283.47	-153.04	366.51	93.15
3	4	1084.12	-41.03	849.73	-153.04	1098.65	93.15

Tabla 4.24.- Resultados obtenidos de la prueba 5

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	1465.89	4265.07	1602.74	3150.65	2499.42	3826.40
3	4	1568.53	3928.41	1731.97	2897.31	2584.35	3378.10
2	1	-1464.57	-4216.17	-1615.86	-3112.12	-2495.30	-3755.28
4	3	-1553.74	-3379.18	-1879.30	-2464.58	-2538.05	-2579.28

4.4.4 Conexión Estrella aterrizada - Delta

El circuito de prueba de la figura 4.9 muestra un sistema radial con un transformador en conexión Estrella aterrizada - Delta, las tablas 4.25 - 4.27 muestran los resultados obtenidos.

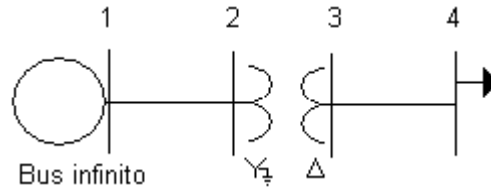


Figura 4.9.- Circuito de prueba 6

Tabla 4.25.- Resultados obtenidos de la prueba 6

VOLTAJES DEL CIRCUITO						
NODO	FASE A		FASE B		FASE C	
	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)	Volts	Angulo (grados)
1	7199.56	.00	7199.56	-120.00	7199.56	120.00
2	7111.14	-.20	7143.62	-120.43	7111.10	119.54
3	3896.29	-2.82	3972.08	-123.83	3875.03	115.70
4	3425.43	-5.76	3646.29	-130.28	3297.62	108.58

Tabla 4.26.- Resultados obtenidos de la prueba 6

CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)	Amperes	Angulo (grados)
1	2	309.79	-41.69	315.56	-145.19	387.20	85.89
3	4	1083.84	-71.03	849.91	176.98	1098.70	63.14

Tabla 4.27.- Resultados obtenidos de la prueba 6

FLUJOS DE POTENCIA DEL CIRCUITO							
Nodo A → Nodo B		FASE A		FASE B		FASE C	
		Kw	Kvars	Kw	Kvars	Kw	Kvars
1	2	1665.43	1483.47	2055.87	966.86	2308.02	1563.31
3	4	1567.82	3921.13	1728.76	2899.67	2588.27	3380.40
2	1	-1650.19	-1459.37	-2047.02	-944.06	-2292.06	-1525.65
4	3	-1553.16	-3372.13	-1875.98	-2466.69	-2542.03	-2581.65

4.5 Discusión de los sistemas de pruebas

Los sistemas de prueba 1-6 fueron seleccionados debido a las siguientes características:

- Sistema en modelación trifásica
- Desbalanceo de carga en las tres fases
- Cuentan con ramales múltiples (sistema de prueba 1)
- Cuentan con transformadores (sistemas de prueba 2-6)

Los resultados obtenidos en los sistemas de prueba mostrados en este capítulo son satisfactorios con lo cual se asume su buen funcionamiento.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- La técnica iterativa de barrio PROGRESIVO-REGRESIVO (Escalera) se consideró la mas idónea para el desarrollo de este trabajo debido a su buena convergencia y sobre todo que requiere menos operaciones punto flotante dando como resultado que el tiempo de ejecución sea menor en comparación con los algoritmos descritos en el capitulo 1.
- La correcta modelación de los elementos de la red, como por ejemplo la impedancia en las líneas, la cual tiene que considerar que las líneas son generalmente no transpuestas, tiene gran efecto en el resultado final.
- Los vectores I_{fila} , I_{col} , Y_{ling} y V_{nivel} sirven como herramienta para un mejor manejo de la red de topología radial, asiendo que el recorrido por la esta lleve menos operaciones y por lo tanto el algoritmo tarde menos en su tiempo de ejecución.
- Aunque la carga se encuentre balanceada en una red de distribución es importante seguir con una modelación trifásica, debido a que la línea generalmente no es transpuesta la impedancia no sera la misma para las tres fases, ocasionando un desvalancede de voltaje en las tres fases.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- Tomar en consideración los reguladores de voltaje en transformadores y los capacitores en derivación ya que estos ayudan a mantener al sistema con valores de voltajes dentro de normas.
- Tomar en consideración el reestablecimiento de carga de la red ya que en caso de falla o mantenimiento de alguna línea se podrá elegir la mejor forma de reestablecer el suministro de energía eléctrica a los usuarios.
- En los algoritmos descritos en este trabajo tomar en consideración los efectos de los elementos en instalaciones subterráneas.
- Tomar en cuenta el tipo de modelación de la carga: impedancia constante y corriente constante, descritos en el apartado 2.5.
- Hacer modificaciones al método para que pueda resolver casos en donde la red sea mallada ya que solo puede resolver redes radiales.
- Hacer modificaciones del método para tomar en consideración la generación distribuida en redes de distribución.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Shirmoharmnadi, H. W. Hong, A. Semlyen, G. X. Luo, A Compensation-Based Power Flow Method For Weakly Meshed Distribution And Transmission Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, No. 2, May 1988.
- [2] T. H. Chen, M. S. Chen, K. J. Hwang, P. Kotas, and E. Chebli, "Distribution System Power Flow Analysis - A Rigid Approach", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 6, No. 3, July 1991, pp. 1146-1152.
- [3] Ray Daniel Zimmerman, COMPREHENSIVE DISTRIBUTION POWER FLOW: MODELING, FORMULATION, SOLUTION ALGORITHMS AND ANALYSIS, Tesis, enero 1995.
- [4] Kersting, W. H. and Phillips, "A New Approach to Modeling Three-Phase Transformer Connections", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35 No. 1, January / February 1999.
- [5] Rade M. Ciric, Antonio Padilha Feltrin, Power Flow in Four wire Distribution Networks, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 18, No. 4, Noviembre 2003.
- [6] B.Stott, "Review of Load – Flow Calculation Methods", Proceedings of the IEEE, Vol. 62 No. 7, Julio 1974, pp 916-929.
- [7] William H. Kersting, Distribution System Modeling and Analysis, Libro, CRC Press LLC, Pag
- [8] Carson, JohnR., Wave propagation in overhead wires with ground return, Bell system technical journal, Vol 5, New York, 1926.
- [9] Kron, G., Tensorial analysis of integrated transmission systems, Part I, the six basic reference frames, AIEE trans., Vol 71, 1952.

- [10] Glover, J.D. and Sarma, M., Power System Analysis and Design, 2nd edition, PWS-Kent publishing, Boston, 1995.
- [11] American National Standard for Electric Power – systems and equipment Voltage Ratings (60 Hertz), ANSI C84.1-1995, National Electrical Manufacturers Association, Rosslyn, VA, 1996.
- [12] Kersting, W. H. and Phillips, Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines, IEEE transactions on Industry Applications, Marzo/abril 1997.
- [13] A. Garcés Ruiz, M. Granada, R. A. Gallego R., Flujo De Carga Trifásico Para Sistemas Radiales De Distribución, Scientia et Technica Año X, No 24, Mayo 2004. UTP. ISSN 0122-1701.
- [14] Stagg G. W, Computer methods in power System Analysis, libro, Mc Graw Hill, Pag
- [15] Martin L. Baughman, chen-ching Liu, *IEEE 4 node Test Feeder* , Distribution System Analisis Subcommittee
- [16] D. I. H. Sun, S. Abe, R. R. Shoults, M. S. Chen, P. Eichenberger, and D. Farris, “Calculation of Energy Losses in a Distribution System”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 4, July/August 1980, pp. 1347-1356.
- [17] B.Stott, “Review of Load – Flow Calculation Methods”, Proceedings of the IEEE, Vol. 62 No. 7, Julio 1974, pp 916-929.
- [18] W. F. Tinney and C.E. Hart, “Power Flow Solution by Newton’s Method”, IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No.11, Noviembre 1967, pp. 1449-1460.

- [19] Grainger J. J, Stevenson W. D. Jr, Analisis de sistemas de potencia, libro, Mc Graw Hill, pags 309-390.
- [20] B. Stott and O. Alsac, "Fast Decouple Load Flow", IEEE transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-93, May/June 1974, pp. 859-869
- [21] M. E. Baran and F. F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System", IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, Enero 1989, pp. 735-742.

APÉNDICE A

Descripción de los sistemas de prueba

Las conexiones del sistema de prueba 1 se muestran en la figura 5.10 en el apartado 5.3, el voltaje L-N es de 1212.4. Del sistema de prueba 1 los datos de carga se muestran en la tabla A1.

Tabla A1.- Carga en nodos del circuito de prueba 1

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
2	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
3	.4514 , .1484j	.2097 , .0689j	.0000 , .0000j
4	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
5	.8700 , .2500j	.5300 , .0300j	.3200 , .0550j
6	.0000 , .0000j	.0181 , .0059j	.3292 , .1082j
7	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
8	1.8417 , .8009j	1.9979 , 1.3008j	1.7049 , 1.6600j
9	.1182 , .0619j	.2688 , .0884j	.0000 , .0000j
10	.1660 , .0646j	.0972 , .0319j	.3493 , .1148j
11	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
12	.2625 , .0863j	.1424 , .0468j	.1201 , .0395j
13	.3264 , .1073j	.4410 , .1449j	.3313 , .1089j
14	.1472 , .0484j	.3104 , .1020j	.1271 , .0418j
15	2.3771 , 3.6239j	1.9486 , 4.5146j	.7535 , .7326j
16	1.0444 , 1.3433j	1.1854 , 1.3696j	1.0201 , 1.3353j
17	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
18	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
19	.3306 , .1087j	.5625 , .1849j	.7542 , .2479j
20	.0000 , .0000j	.2368 , .0778j	.2160 , .0710j
21	.3111 , .1023j	.5444 , .1789j	.2347 , .0771j
22	.2944 , .0968j	0597 , .0196j	0000 , .0000j
23	.1125 , .0370j	.1125 , .0370j	.0000 , .0000j
24	.1139 , .0374j	.0000 , .0000j	.0000 , .0000j
25	.0000 , .0000j	.1708 , .0561j	.1708 , .0561j

26	.5708 , .1876j	.2736 , .0899j	.0000 , .0000j
27	.9776 , .0958j	.4910 , .0956j	.8431 , .5208j
28	.3444 , .0475j	.3667 , .1205j	1.8694 , .1872j
29	.1181 , .0388j	.1181 , .0388j	.0000 , .0000j

La matriz de impedancia de línea A-B-C en Ω para el circuito de prueba 1, es la mostrada en la tabla A2, este circuito de prueba cuenta con una sola matriz de impedancia de línea que es tomada para todos los segmentos de línea.

Tabla A2.- Impedancia de línea del circuito de prueba 1

.6644 , .4778j	.0095 , .0237j	.0200 , .1003j
.0095 , .0237j	.6621 , .3778j	.0029 , .0730j
.0200 , .1003j	.0029 , .0730j	.6631 , .3778j

Los datos de carga del la prueba 2 del circito de prueba 1 son:

Tabla A3.- Carga en nodos del circuito de prueba 1

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
2	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
3	0.2204 , 0.0724j	0.2204 , 0.0724j	0.2204 , 0.0724j
4	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
5	0.5733 , 0.1117j	0.5733 , 0.1117j	0.5733 , 0.1117j
6	0.1158 , 0.0380j	0.1158 , 0.0380j	0.1158 , 0.0380j
7	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
8	1.8482 , 1.2539j	1.8482 , 1.2539j	1.8482 , 1.2539j
9	0.1290 , 0.0501j	0.1290 , 0.0501j	0.1290 , 0.0501j
10	0.2042 , 0.0704j	0.2042 , 0.0704j	0.2042 , 0.0704j
11	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
12	0.1750 , 0.0575j	0.1750 , 0.0575j	0.1750 , 0.0575j
13	0.3662 , 0.1204j	0.3662 , 0.1204j	0.3662 , 0.1204j

14	0.1949 , 0.0641j	0.1949 , 0.0641j	0.1949 , 0.0641j
15	1.6931 , 2.9570j	1.6931 , 2.9570j	1.6931 , 2.9570j
16	1.0833 , 1.3494j	1.0833 , 1.3494j	1.0833 , 1.3494j
17	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
18	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j	0.0000 , 0.0000j
19	0.5491 , 0.1805j	0.5491 , 0.1805j	0.5491 , 0.1805j
20	0.1509 , 0.0496j	0.1509 , 0.0496j	0.1509 , 0.0496j
21	0.3634 , 0.1194j	0.3634 , 0.1194j	0.3634 , 0.1194j
22	0.1180 , 0.0388j	0.1180 , 0.0388j	0.1180 , 0.0388j
23	0.0750 , 0.0247j	0.0750 , 0.0247j	0.0750 , 0.0247j
24	0.0380 , 0.0125j	0.0380 , 0.0125j	0.0380 , 0.0125j
25	0.1139 , 0.0374j	0.1139 , 0.0374j	0.1139 , 0.0374j
26	0.2815 , 0.0925j	0.2815 , 0.0925j	0.2815 , 0.0925j
27	0.7706 , 0.2374j	0.7706 , 0.2374j	0.7706 , 0.2374j
28	0.8602 , 0.1184j	0.8602 , 0.1184j	0.8602 , 0.1184j
29	0.0787 , 0.0259j	0.0787 , 0.0259j	0.0787 , 0.0259j

Las conexiones del sistema de prueba 2 se muestran en la figura 4.12 en el apartado 4.4.1, el voltaje L-L es de 12.47 kV. Del sistema de prueba 2 los datos de carga que no son cero se muestran en la tabla A4.

Tabla A4.- Impedancia de línea del circuito de prueba 2

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
1	637.5000 , 395.0870j	900.0000 , 435.8899j	1187.5000 , 390.3124j

Las matrices de impedancia de línea A-B-C en Ω , para el circuito de prueba 2 son mostradas en las tablas A5 – A6.

Tabla A5.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 2

0.1414 , 0.5353j	0.0361 , 0.3225j	0.0361 , 0.2752j
0.0361 , 0.3225j	0.1414 , 0.5353j	0.0361 , 0.2955j
0.0361 , 0.2752j	0.0361 , 0.2955j	0.1414 , 0.5353j

Tabla A6.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 2

0.1907 , 0.5035j	0.0607 , 0.2302j	0.0598 , 0.1751j
0.0607 , 0.2302j	0.1939 , 0.4885j	0.0614 , 0.1931j
0.0598 , 0.1751j	0.0614 , 0.1931j	0.1921 , 0.4970j

Las conexiones del sistema de prueba 3 se muestran en la figura 4.12 en el apartado 4.4.1, el voltaje L-L es de 12.47 kV. Del sistema de prueba 3 los datos de carga que no son cero se muestran en la tabla A7.

Tabla A7.- Impedancia de línea del circuito de prueba 3

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
4	1275.0+790.17403 j	1800.0+871.77978 j	2375.0+780.62475 j

Las matrices de impedancia de línea A-B-C en Ω , para el circuito de prueba 3 son mostradas en las tablas A8 – A9.

Tabla A8.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 3

0.1520+0.5353j	0.0361+0.3225j	0.0361+0.2752j
0.0361+0.3225j	0.1520+0.5353j	0.0361+0.2955j
0.0361+0.2752j	0.0361+0.2955j	0.1520+0.5353j

Tabla A9.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 3

0.2166+0.5104j	0.0738+0.2375j	0.0726+0.1822j
0.0738+0.2375j	0.2209+0.4962j	0.0748+0.2005j
0.0726+0.1822j	0.0748+0.2005j	0.2185+0.5042j

Las conexiones del sistema de prueba 4 se muestran en la figura 4.15 en el apartado 4.4.2, el voltaje L-L es de 12.47 kV. Del sistema de prueba 4 los datos de carga que no son cero se muestran en la tabla A10.

Tabla A10.- Impedancia de línea del circuito de prueba 4

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
4	1275.0+790.17403 j	1800.0+871.77978 j	2375.0+780.62475 j

Las matrices de impedancia de línea A-B-C en Ω , para el circuito de prueba 4 son mostradas en las tablas A11 - A.12

Tabla A11.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 4

0.17331+0.40834 j	0.05907+0.19002 j	0.05813+0.14580 j
0.05907+0.19002 j	0.17675+0.39703 j	0.05985+0.16047 j
0.05813+0.14580 j	0.05985+0.16047 j	0.17480+0.40343 j

Tabla A12.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 4

0.21664+0.51043j	0.07383+0.23753 j	0.07267+0.18226 j
0.07383+0.23753j	0.22094+0.49628 j	0.07481+0.20059 j
0.07267+0.18226j	0.07481+0.20059 j	0.21850+0.50428 j

Las conexiones del sistema de prueba 5 se muestran en la figura 4.17 en el apartado 4.4.3, el voltaje L-L es de 12.47 kV. Del sistema de prueba 5 los datos de carga que no son cero se muestran en la tabla A13.

Tabla A13.- Impedancia de línea del circuito de prueba 5

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
4	1275.0+790.17403 j	1800.0+871.77978 j	2375.0+780.62475 j

Las matrices de impedancia de línea A-B-C en Ω , para el circuito de prueba 5 son mostradas en las tablas A14 – A15.

Tabla A14.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 5

(0.15200,0.53532 j	0.03609+0.32254 j	0.03609+0.27522 j
(0.03609,0.32254 j	0.15200+0.53532 j	0.03609+0.29553 j
(0.03609,0.27522 j	0.03609+0.29553 j	0.15200+0.53532 j

Tabla A15.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 5

0.19000,0.66916 j	0.04512+0.40318j	0.04512+0.34403 j
0.04512,0.40318 j	0.19000+0.66916j	0.04512+0.36941 j
0.04512,0.34403 j	0.04512+0.36941j	0.19000+0.66916 j

Las conexiones del sistema de prueba 6 se muestran en la figura 4.19 en el apartado 4.4.4, el voltaje L-L es de 12.47 kV. Del sistema de prueba 6 los datos de carga que no son cero se muestran en la tabla A16.

Tabla A16.- Impedancia de línea del circuito de prueba 6

Nodo	Carga en forma de potencia constante en P+Qj		
	Fase A	Fase B	Fase C
4	1275.0+790.17403 j	1800.0+871.77978 j	2375.0+780.62475 j

Las matrices de impedancia de línea A-B-C en Ω , para el circuito de prueba 6 son mostradas en las tablas A17 – A18.

Tabla A17.- Impedancia de línea de la sesión nodo 1-2 del circuito de prueba 6.

0.17331+0.40834 j	0.05907+0.19002j	0.05813+0.14580 j
0.05907+0.19002 j	0.17675+0.39703j	0.05985+0.16047 j
0.05813+0.14580 j	0.05985+0.16047j	0.17480+0.40343 j

Tabla A18.- Impedancia de línea de la sesión nodo 3-4 del circuito de prueba 6.

0.19000+0.66916j	0.04512+0.40318 j	0.04512+0.34403 j
0.04512+0.40318j	0.19000+0.66916 j	0.04512+0.36941 j
0.04512+0.34403j	0.04512+0.36941 j	0.19000+0.66916 j

APENDICE B

Código del algoritmo realizado

El diagrama de flujo de la subrutina realizada para el ordenamiento de la red de distribución radial es mostrado a continuación.

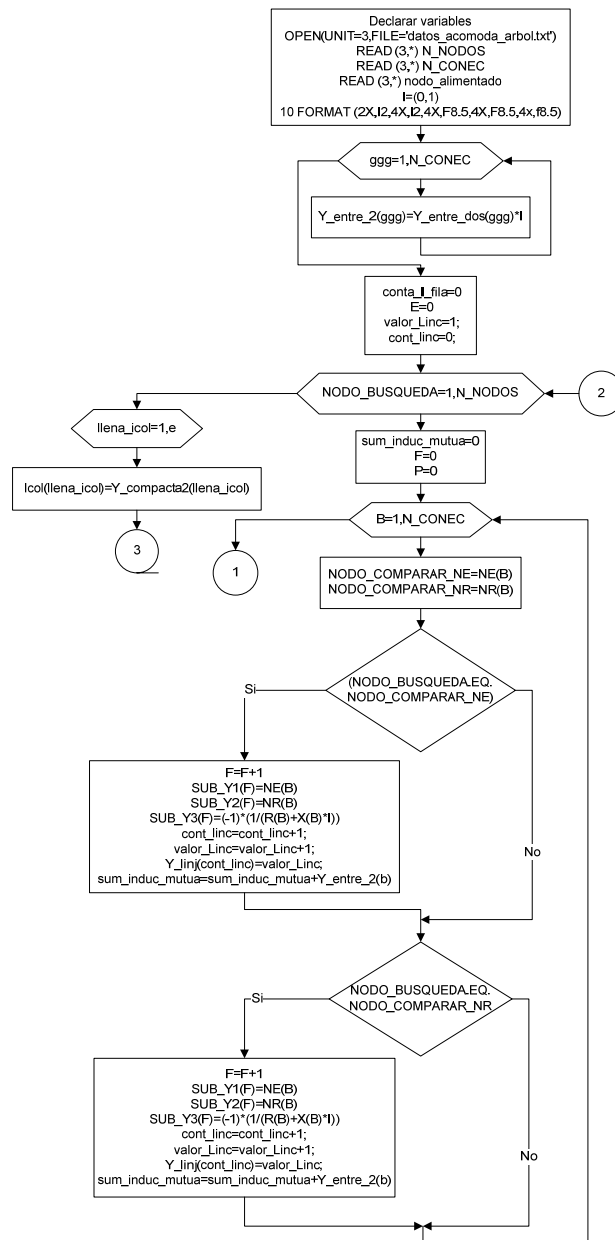


Figura B.1.- Primer bloque de rutina forma vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_linc”

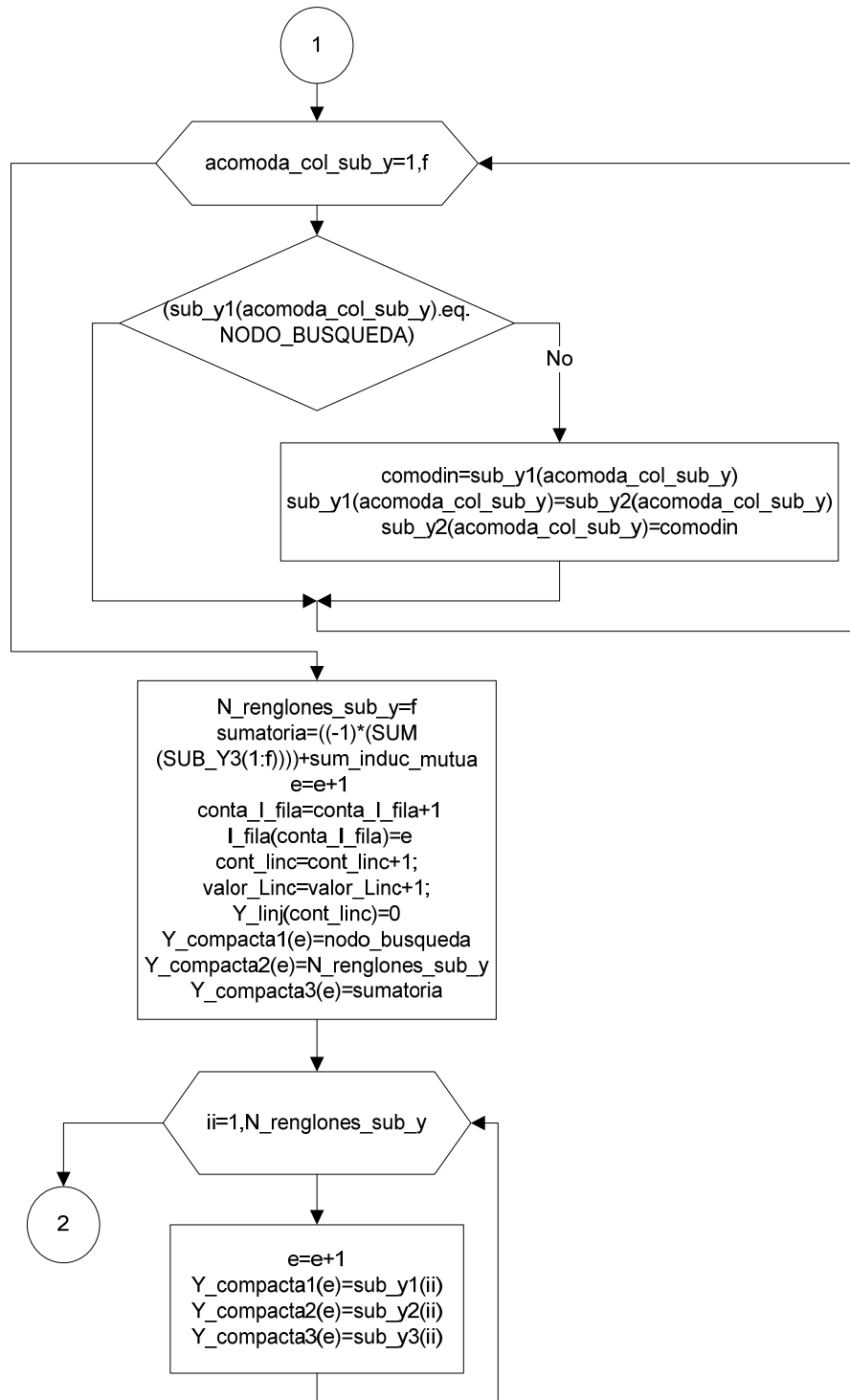


Figura B.2.- Primer bloque de rutina forma vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”

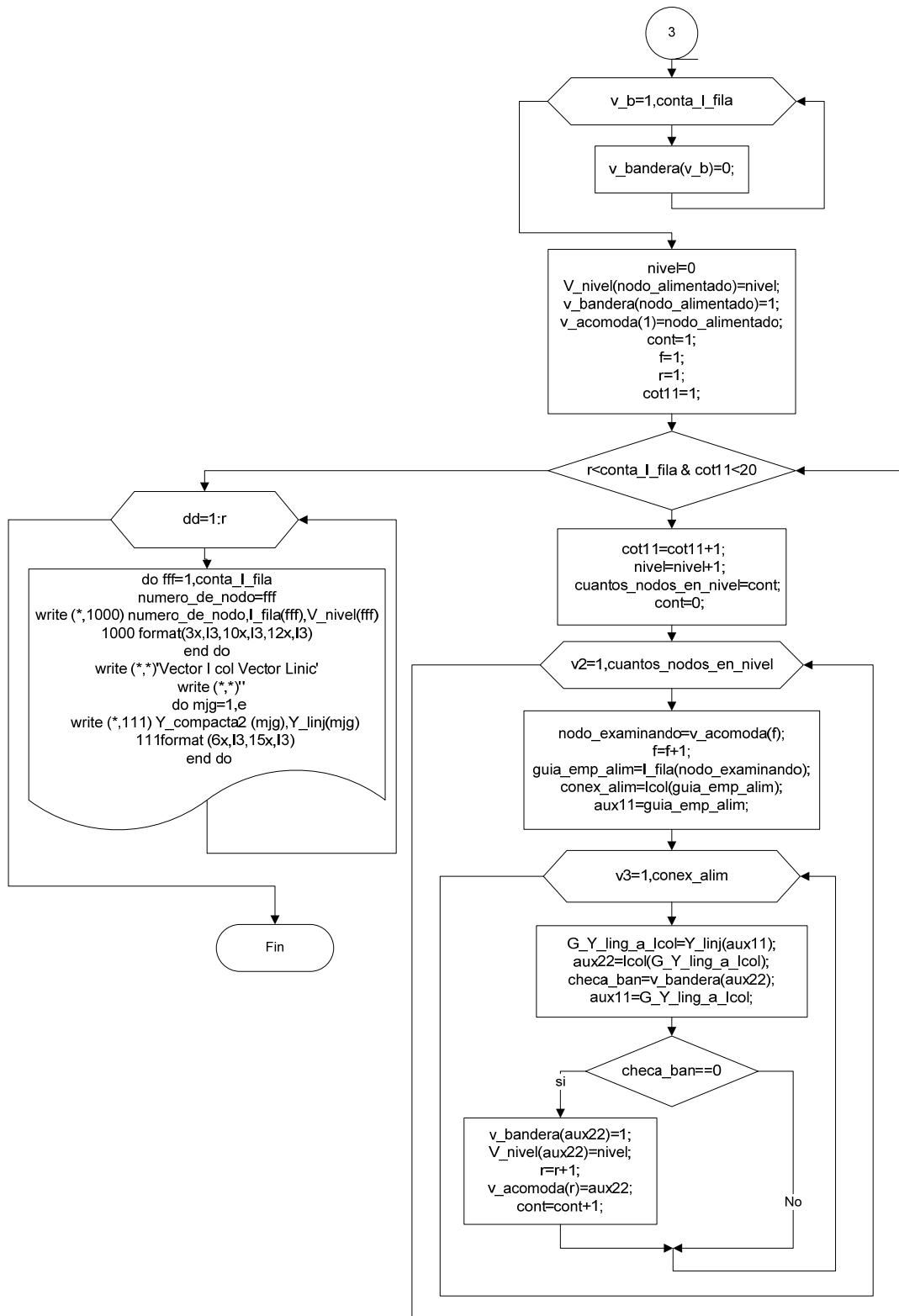


Figura B3.- Segundo bloque de rutina forma vectores “V_nivel” y “V_bandera”

El código de flujo de la subrutina realizada para el ordenamiento de la red de distribución radial es mostrado a continuación.

```
! Last change: EMO 19 Mar 2008 6:52 pm
implicit none
character (len=30) :: archDat,archRes
integer N_CONEC, N_NODOS, Gg, F,b, P, nodo_busqueda,e,N_RENGLONES_SUB_Y
integer
NODO_COMPARAR_NE,mjg,NODO_COMPARAR_NR,acomoda_col_sub_y,comodin
integer NE (100),NR(100),conta_I_fila,I_fila(300),ii

integer Y_linj(300),Y_compacta1(300),Y_compacta2(300),valor_Linc,cont_linc
REAL SUB_Y1(300),SUB_Y2(300)
COMPLEX SUB_Y3(300),sumatoria,sum_induc_mutua,Y_compacta3(300)
INTEGER v_b,v_bandera(100),nivel,nodo_alimentado
INTEGER V_nivel(100),f1,r1,cot11,cuantos_nodos_en_nivel
INTEGER conex_alim,v3,G_Y_ling_a_Icol,aux22
INTEGER v_acomoda(100),Icol(300),llena_icol,Número_de_nodo

write (6,*) ''
write (6,*) ' ***** '
write (6,*) ' PROGRAMA PARA ORDENAR UNA RED DE DISTRIBUCION'
write (6,*) ' ***** '
write (6,*) ''
write (6,*) ' Eric M. A.'

print *, ' De el nombre del archivo de datos'
read *,archdat
open (unit=15, file=archdat , status='old')

write (6,*) ''
write (6,*) ''

print *, ' De el nombre del archivo de Salida'
read *,archres
open (unit=20, file=archres , status='new') !se modifiko new por old

write (20,*) ''
write (20,*) ' ***** '
write (20,*) ' PROGRAMA PARA ORDENAR UNA RED DE DISTRIBUCION'
write (20,*) ' ***** '
write (20,*) ''
write (20,*) ' Eric M. A.'
write (20,*) ''
```

```
write (20,*) ''
```

```
READ (15,*) N_NODOS  
READ (15,*) N_CONEC  
READ (15,*) nodo_alimentado
```

```
do Gg=1,N_CONEC  
    READ (15,*) NE(Gg),NR(Gg)  
end do
```

```
conta_I_fila=0  
E=0
```

```
valor_Linc=1;  
cont_linc=0;
```

```
DO NODO_BUSQUEDA=1,N_NODOS  
    sum_induc_mutua=0  
    F=0  
    P=0  
    DO B=1,N_CONEC  
        NODO_COMPARAR_NE=NE(B)  
        NODO_COMPARAR_NR=NR(B)  
        IF (NODO_BUSQUEDA.EQ.NODO_COMPARAR_NE) THEN  
            F=F+1  
            SUB_Y1(F)=NE(B)  
            SUB_Y2(F)=NR(B)  
  
            cont_linc=cont_linc+1;  
            valor_Linc=valor_Linc+1;  
            Y_linj(cont_linc)=valor_Linc;  
  
        END IF  
        IF (NODO_BUSQUEDA.EQ.NODO_COMPARAR_NR) THEN  
            F=F+1  
            SUB_Y1(F)=NE(B)  
            SUB_Y2(F)=NR(B)  
  
            cont_linc=cont_linc+1;  
            valor_Linc=valor_Linc+1;  
            Y_linj(cont_linc)=valor_Linc;  
  
        END IF  
    END DO
```

```

!acomoda vector busqueda
do acomoda_col_sub_y=1,f
  if (sub_y1(acomoda_col_sub_y).eq.NODO_BUSQUEDA) then
  else
    comodin=sub_y1(acomoda_col_sub_y)
    sub_y1(acomoda_col_sub_y)=sub_y2(acomoda_col_sub_y)
    sub_y2(acomoda_col_sub_y)=comodin

  end if

end do

! se mete el elemento Yjj es la sumatoria del vector

N_renglones_sub_y=f

sumatoria=((-1)*(SUM (SUB_Y3(1:f))))+sum_induc_mutua

e=e+1
conta_I_fila=conta_I_fila+1
I_fila(conta_I_fila)=e

cont_linc=cont_linc+1;
valor_Linc=valor_Linc+1;
Y_linj(cont_linc)=0

Y_compacta1(e)=nodo_busqueda
Y_compacta2(e)=N_renglones_sub_y
Y_compacta3(e)=sumatoria

do ii=1,N_renglones_sub_y
  e=e+1
  Y_compacta1(e)=sub_y1(ii)
  Y_compacta2(e)=sub_y2(ii)
  Y_compacta3(e)=sub_y3(ii)
end do

end do
!!!!!!!!!!!!1!!!!!!!!!!
! se crea Icol, copiando a Y_compacta2
do llena_icol=1,e
  Icol(llena_icol)=Y_compacta2(llena_icol)
end do
!!!!!!!!!!!!!!

```

Código B.1.- Primer bloque de rutina forma vectores “I_fila”, “I_col” y “Y_ling”

```

DO v_b=1,conta_I_fila
  v_bandera(v_b)=0;
END DO
nivel=0;
V_nivel(nodo_alimentado)=nivel;

v_bandera(nodo_alimentado)=1;
v_acomoda(1)=nodo_alimentado;
cont=1;
f1=1;
r1=1;
cot11=1;

do WHILE (r1.lt.conta_I_fila)
  cot11=cot11+1;
  nivel=nivel+1;
  cuantos_nodos_en_nivel=cont;
  cont=0;
  do v2=1,cuantos_nodos_en_nivel
    nodo_examinando=v_acomoda(f1);
    f1=f1+1;
    guia_emp_alim=I_fila(nodo_examinando);
    conex_alim=Icol(guia_emp_alim);
    aux11=guia_emp_alim;
    do v3=1,conex_alim
      G_Y_ling_a_Icol=Y_linj(aux11);
      aux22=Icol(G_Y_ling_a_Icol);
      checa_ban=v_bandera(aux22);
      aux11=G_Y_ling_a_Icol;
      if (checa_ban==0) then
        v_bandera(aux22)=1;
        V_nivel(aux22)=nivel;
        r1=r1+1;
        v_acomoda(r1)=aux22;
        cont=cont+1;
      end if
    end do
  end do
END do

! SE IMPRIMEN LOS DATOS

WRITE (6,*)'# nodo  Vector I fila  Vector nivel'
write (6,*)"

```

```

WRITE (20,*)'# nodo  Vector I fila  Vector nivel'
write (20,*)"

do fff=1,conta_I_fila
  Número_de_nodo=fff
  write (6,1000) numero_de_nodo,I_fila(fff),V_nivel(fff)
    write (20,1000) número_de_nodo,I_fila(fff),V_nivel(fff)
  1000 format(2x,I3,10x,I3,12x,I3)
end do

write (6,*)"
write (6,*)'Vector I col  Vector Linić'
write (6,*)"

write (20,*)"
write (20,*)'Vector I col  Vector Linić'
write (20,*)"

do mĵg=1,e
  write (6,111) Y_compacta2 (mĵg),Y_linĵ(mĵg)
    write (20,111) Y_compacta2 (mĵg),Y_linĵ(mĵg)

  111 format (6x,I3,15x,I3 )
end do

write (6,*)"
write (20,*)"
pause 'fin de programa'

END

```

Codigo B.2.- Segundo bloque de rutina forma vectores “V_nivel” y “V_bandera”

Se muestra el diagrama de flujo detallado del programa principal que se realizo

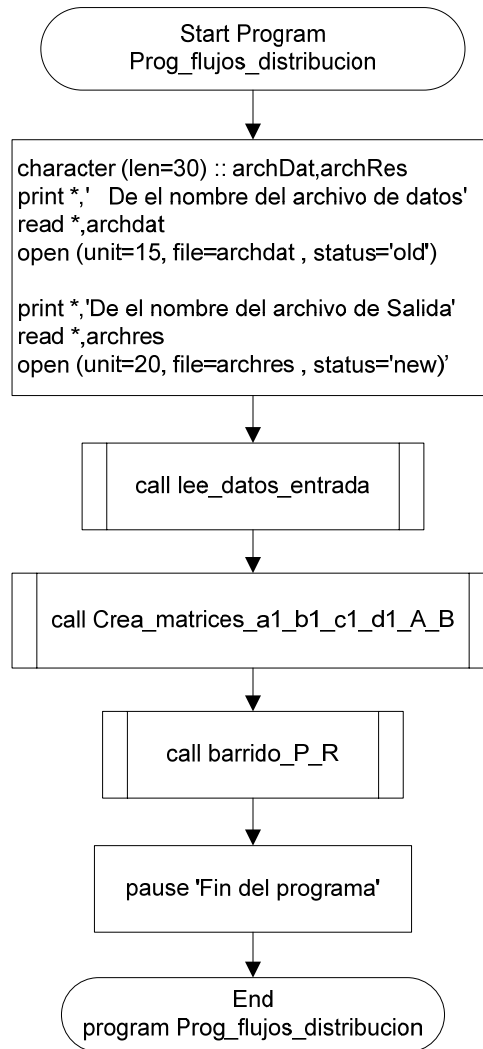


Figura B.4.- Programa principal

Se muestra el programa computacional para redes de distribución que fue realizado en este trabajo.

```
program Prog_flujos_distribucion

implicit none
    character (len=30) :: archDat,archRes

write (6,*)"
write (6,*)' IPN                                UNIDAD ZACATENCO'
write (6,*)"
write (6,*)'
write (6,*)'     ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
'
write (6,*)"
write (6,*)"
write (6,*)'     PROGRAMA PARA EL CALCULO DE FLUJOS DE POTENCIA '
write (6,*)"
write (6,*)'     EN REDES DE DISTRIBUCION '
write (6,*)"
write (6,*)'     MORALES AGUILAR ERIC '
write (6,*)"

    print *, ' De el nombre del archivo de datos'
    read *,archdat
    open (unit=15, file=archdat , status='old')
write (6,*)''
    print *,'De el nombre del archivo de Salida'
    read *,archres
    open (unit=20, file=archres , status='new')    !se modifiko new por old

call lee_datos_entrada
call Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B
call barrido_P_R

pause 'Fin del programa'

end program Prog_flujos_distribucion
```

Código 1A.- Programa principal

Se muestra la subrutina que lee los datos de entrada llamada “lee_datos_entrada”

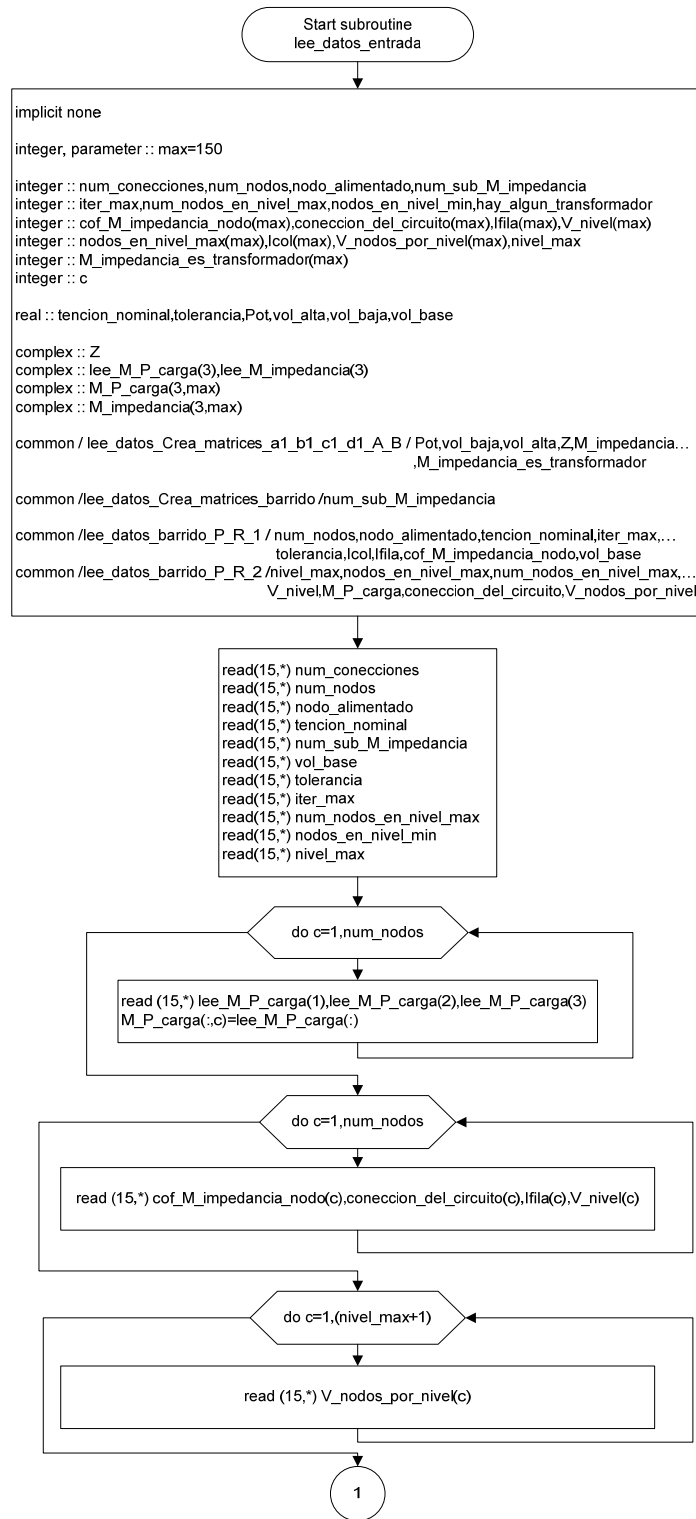


Figura B.5.- Subrutina lee_datos_entrada

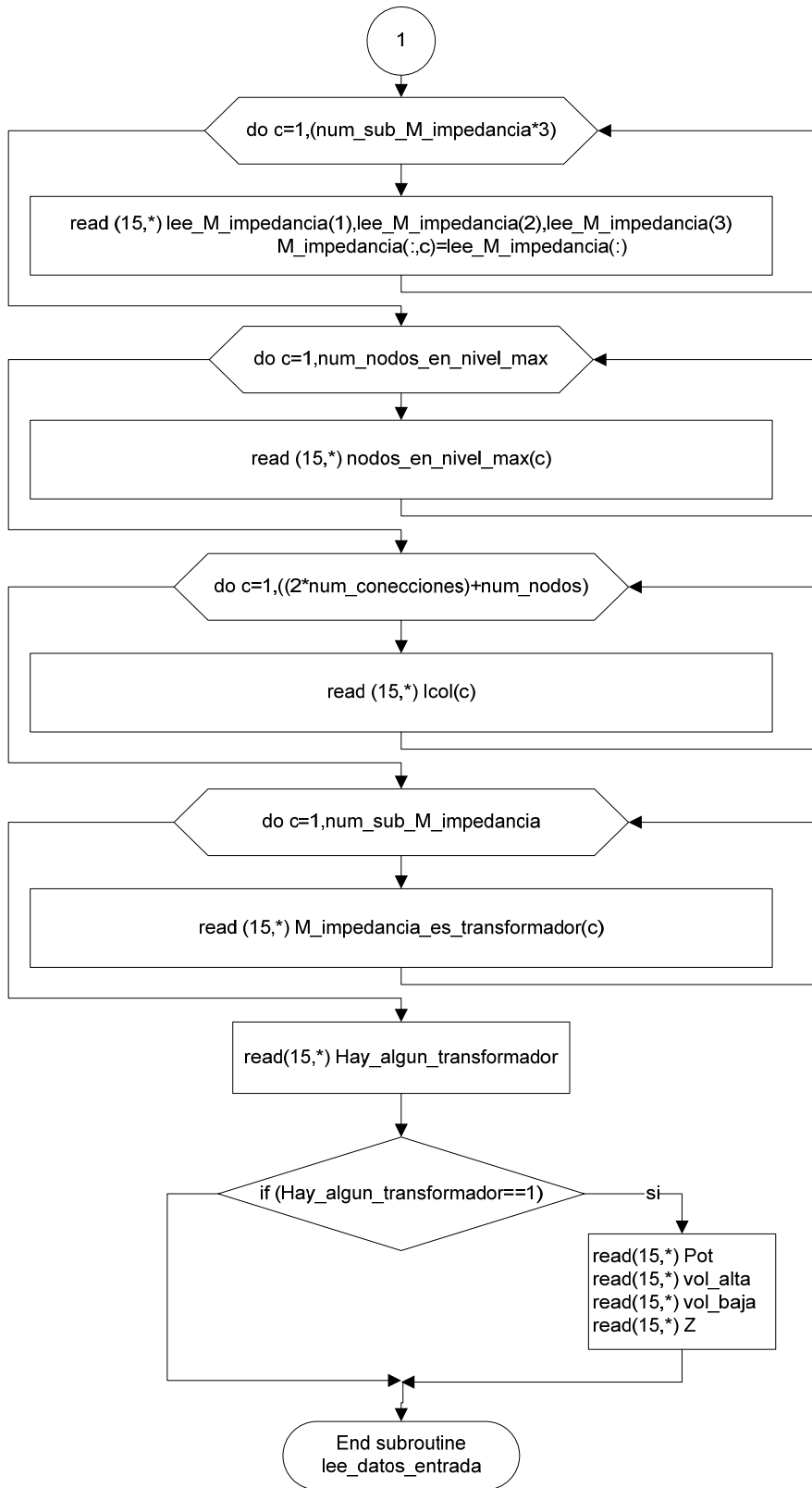


Figura B.6.- Subrutina lee_datos_entrada

```

subroutine lee_datos_entrada

implicit none

integer, parameter :: max=150

integer :: num_conecciones,num_nodos,nodo_alimentado,num_sub_M_impedancia
integer :: iter_max,num_nodos_en_nivel_max,nodos_en_nivel_min,hay_algun_transformador
integer :: cof_M_impedancia_nodo(max),coneccion_del_circuito(max),Ifila(max),V_nivel(max)
integer :: nodos_en_nivel_max(max),Icol(max),V_nodos_por_nivel(max),nivel_max

integer :: M_impedancia_es_transformador(max),V_tipo_elemento(max)

integer :: c

real :: tencion_nominal,tolerancia,Pot,vol_alta,vol_baja,vol_base

complex :: Z
complex :: lee_M_P_carga(3),lee_M_impedancia(3)
complex :: M_P_carga(3,max)
complex :: M_impedancia(3,max)

common /lee_datos_Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B /
Pot,vol_baja,vol_alta,Z,M_impedancia,M_impedancia_es_transformador

common /lee_datos_Crea_matrices_barrido /num_sub_M_impedancia

common /lee_datos_barrido_P_R_1 /
num_nodos,nodo_alimentado,tencion_nominal,iter_max,tolerancia,Icol,Ifila,cof_M_im
pedancia_nodo,vol_base,V_tipo_elemento

common /lee_datos_barrido_P_R_2 /
/nivel_max,nodos_en_nivel_max,num_nodos_en_nivel_max,V_nivel,M_P_carga,cone
ccion_del_circuito,V_nodos_por_nivel

read(15,*) num_conecciones
read(15,*) num_nodos
read(15,*) nodo_alimentado
read(15,*) tencion_nominal
read(15,*) num_sub_M_impedancia
read(15,*) tolerancia
read(15,*) iter_max
read(15,*) num_nodos_en_nivel_max
read(15,*) nodos_en_nivel_min
read(15,*) nivel_max

```

lse imprimen en el archivo de salida "20"

```
write (20,*) ''
write (20,*) '      XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (20,*) ''
write (20,*) '          DATOS EN EL ARCHIVO DE ENTRADA  '
write (20,*) ''
write (20,*) '      XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'

write (20,*) 'num_conecciones      ',num_conecciones
write (20,*) 'num_nodos          ',num_nodos
write (20,*) 'nodo_alimentado    ',nodo_alimentado
write (20,*) 'tencion_nominal    ',tencion_nominal
write (20,*) 'num_sub_M_impedancia ',num_sub_M_impedancia
write (20,*) 'vol_base          ',vol_base
write (20,*) 'tolerancia        ',tolerancia
write (20,*) 'iter_max          ',iter_max
write (20,*) 'num_nodos_en_nivel_max',num_nodos_en_nivel_max
write (20,*) 'nodos_en_nivel_min  ',nodos_en_nivel_min
write (20,*) 'nivel_max          ',nivel_max
write (20,*) ''
write (20,*) ''

write (20,*) ' M_P_carga '
do c=1,num_nodos
    read (15,*) lee_M_P_carga(1),lee_M_P_carga(2),lee_M_P_carga(3)
    M_P_carga(:,c)=lee_M_P_carga(:)
    ! write (6,100) M_P_carga(1,c),M_P_carga(2,c),M_P_carga(3,c)
    write (20,100) M_P_carga(1,c),M_P_carga(2,c),M_P_carga(3,c)
end do

100 format (2x,f9.4,' ',f9.4,'j',4x,f9.4,' ',f9.4,'j',4x,f9.4,' ',f9.4,'j')

write (20,*) ''
write (20,*) ' V_tipo_elemento '
do c=1,num_nodos
    read (15,*) V_tipo_elemento(c)
    ! write (6,100) M_P_carga(1,c),M_P_carga(2,c),M_P_carga(3,c)
    write (20,105) V_tipo_elemento(c)
end do

105 format (2x,I3)

write (20,*) ''
write (20,*) ' cof_M_impedancia_nodo  conexion_del_circuito  Ifila  V_nivel'
do c=1,num_nodos
```

```

        read (15,*) cof_M_impedancia_nodo(c),conexcion_del_circuito(c),Ifila(c),V_nivel(c)
        lwrite (6,101) cof_M_impedancia_nodo(c),conexcion_del_circuito(c),Ifila(c),V_nivel(c)
        write (20,101) cof_M_impedancia_nodo(c),conexcion_del_circuito(c),Ifila(c),V_nivel(c)
    end do

```

```

101 format (12x,I3,20x,I3,11x,I3,5x,I3,4x,I3,4x,I3)

```

```

        write (20,*) ''
        write (20,*) ' V_nodos_x_nivel'
    do c=1,(nivel_max+1)
        read (15,*) V_nodos_por_nivel(c)
        lwrite (6,104) V_nodos_por_nivel(c)
        write (20,104) V_nodos_por_nivel(c)
    end do

```

```

104 format (4x,I3)

```

```

        write (20,*) ''
        write (20,*) ' M_impedancia'
    do c=1,(num_sub_M_impedancia*3)
        read (15,*) lee_M_impedancia(1),lee_M_impedancia(2),lee_M_impedancia(3)
        M_impedancia(:,c)=lee_M_impedancia(:)
        lwrite (6,102) M_impedancia(1,c),M_impedancia(2,c),M_impedancia(3,c)
        write (20,102) M_impedancia(1,c),M_impedancia(2,c),M_impedancia(3,c)
    end do

```

```

102 format (2x,f7.4,' ',f7.4,')',4x,f7.4,' ',f7.4,')',4x,f7.4,' ',f7.4,')')

```

```

        write (20,*) ''
        write (20,*) ' nodos_en_nivel_max'

    do c=1,num_nodos_en_nivel_max
        read (15,*) nodos_en_nivel_max(c)
        ! write (6,103) nodos_en_nivel_max(c)
        write (20,103) nodos_en_nivel_max(c)
    end do

```

```

103 format (2x,I3)

```

```

        write (20,*) ''
        write (20,*) ' Icol'
    do c=1,((2*num_conecciones)+num_nodos)
        read (15,*) Icol(c)
        ! write (6,103) Icol(c)
        write (20,103) Icol(c)
    end do

```

```

write (20,*) ''
write (20,*) ' M_impedancia_es_transformador'
do c=1,num_sub_M_impedancia
  read (15,*) M_impedancia_es_transformador(c)
  write (20,103) M_impedancia_es_transformador(c)

end do

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
!%      DATOS DEL TRANSFORMATOR
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

read(15,*) Hay_algun_transformador !0 no
!1 si

write (20,*) ''
write (20,*) ' Hay_algun_transformador ',Hay_algun_transformador

write (20,*) ''

if (Hay_algun_transformador==1) then

  read(15,*) Pot      ! KVA
  read(15,*) vol_alta ! KV
  read(15,*) vol_baja ! KV
  read(15,*) Z        ! En porciento

  write (20,*) ' Pot      ',Pot
  write (20,*) ' vol_alta ',vol_alta
  write (20,*) ' vol_baja ',vol_baja
  write (20,*) ' Z        ',Z

end if

end subroutine lee_datos_entrada

```

Código 2A.- Sub-rutina lee_datos_entrada

Se muestra la sub-rutina la cual calcula las matrices a, b, c, d, A y B

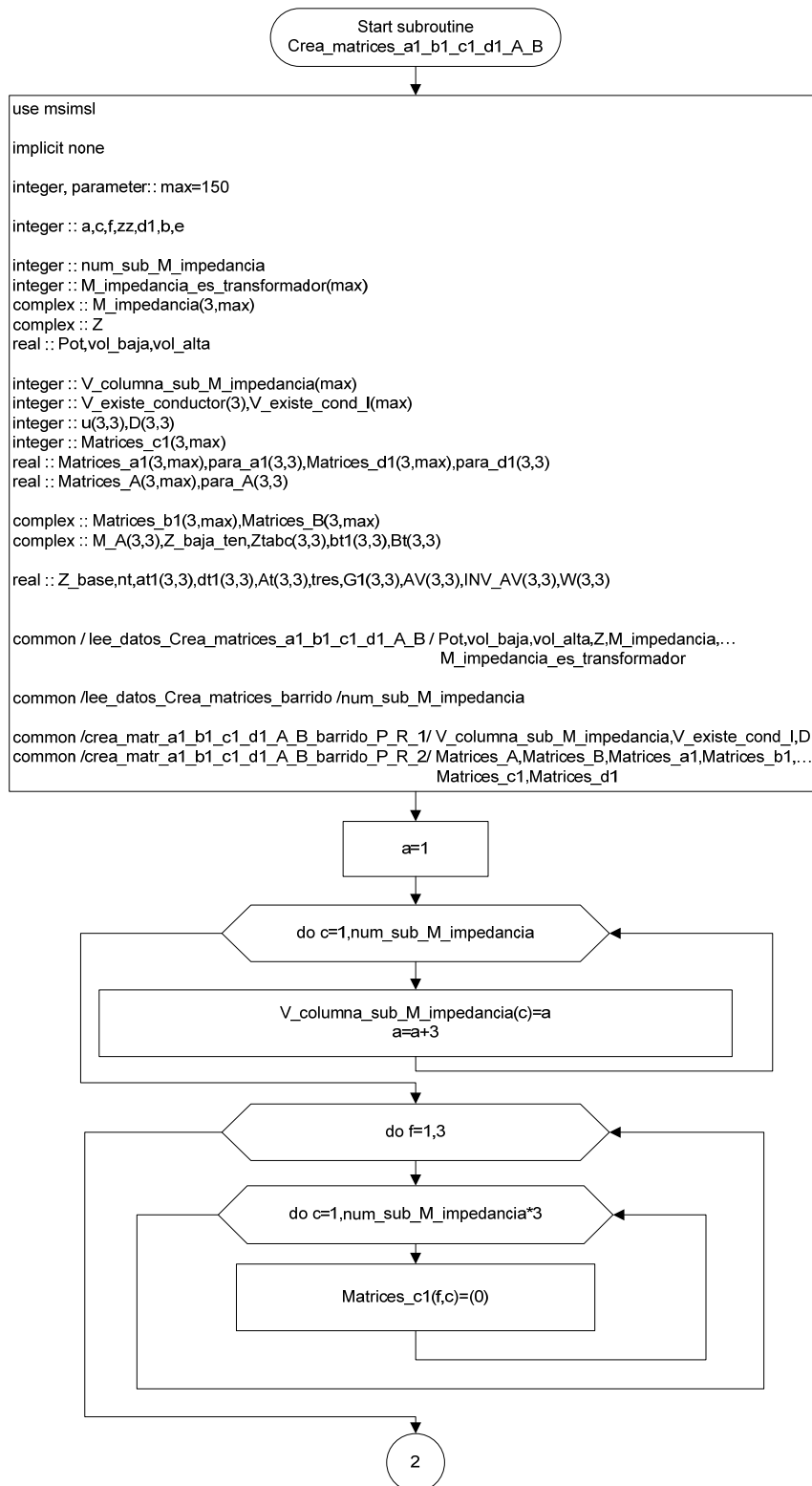


Figura B.7.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

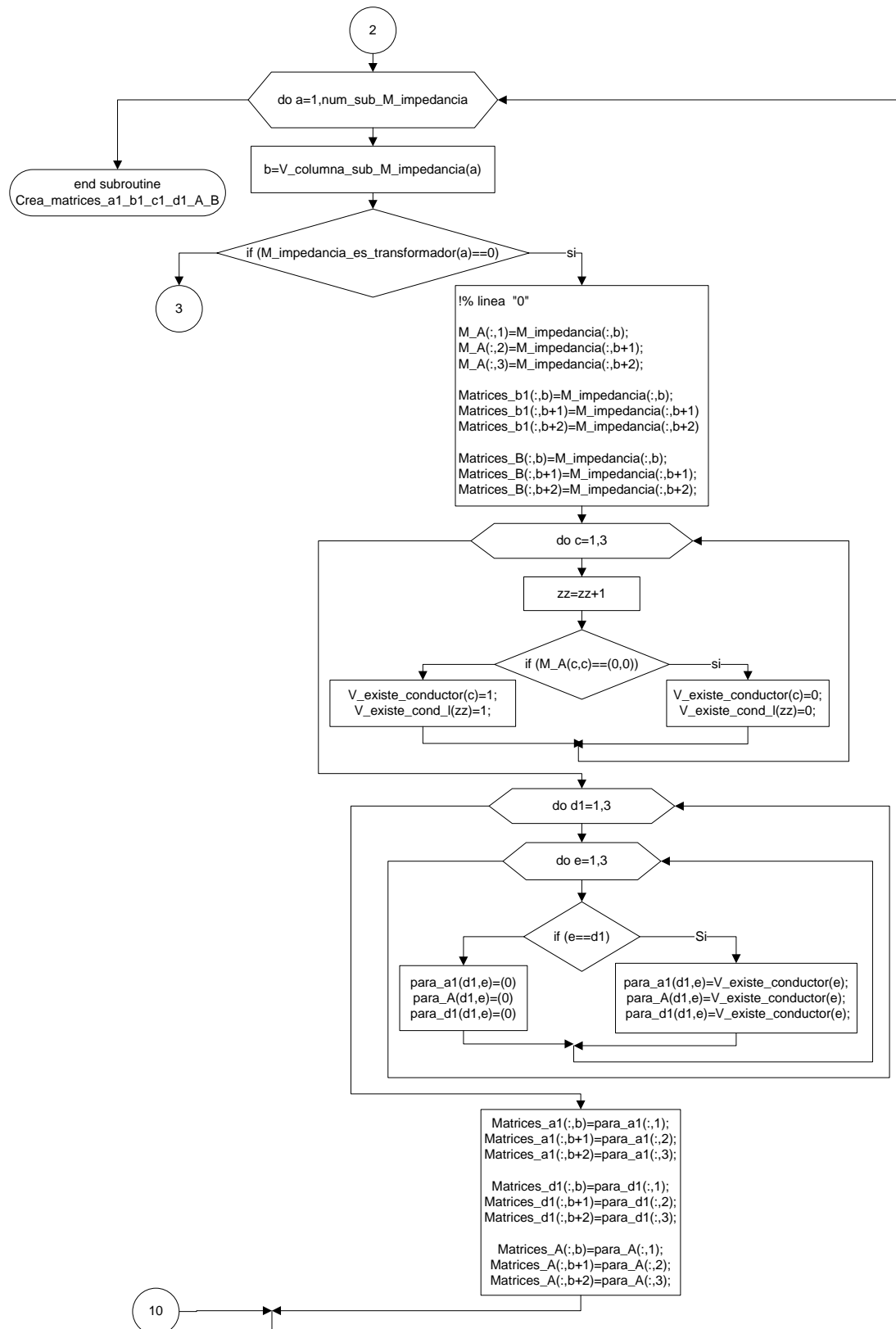


Figura B.8.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B



Figura B.9.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

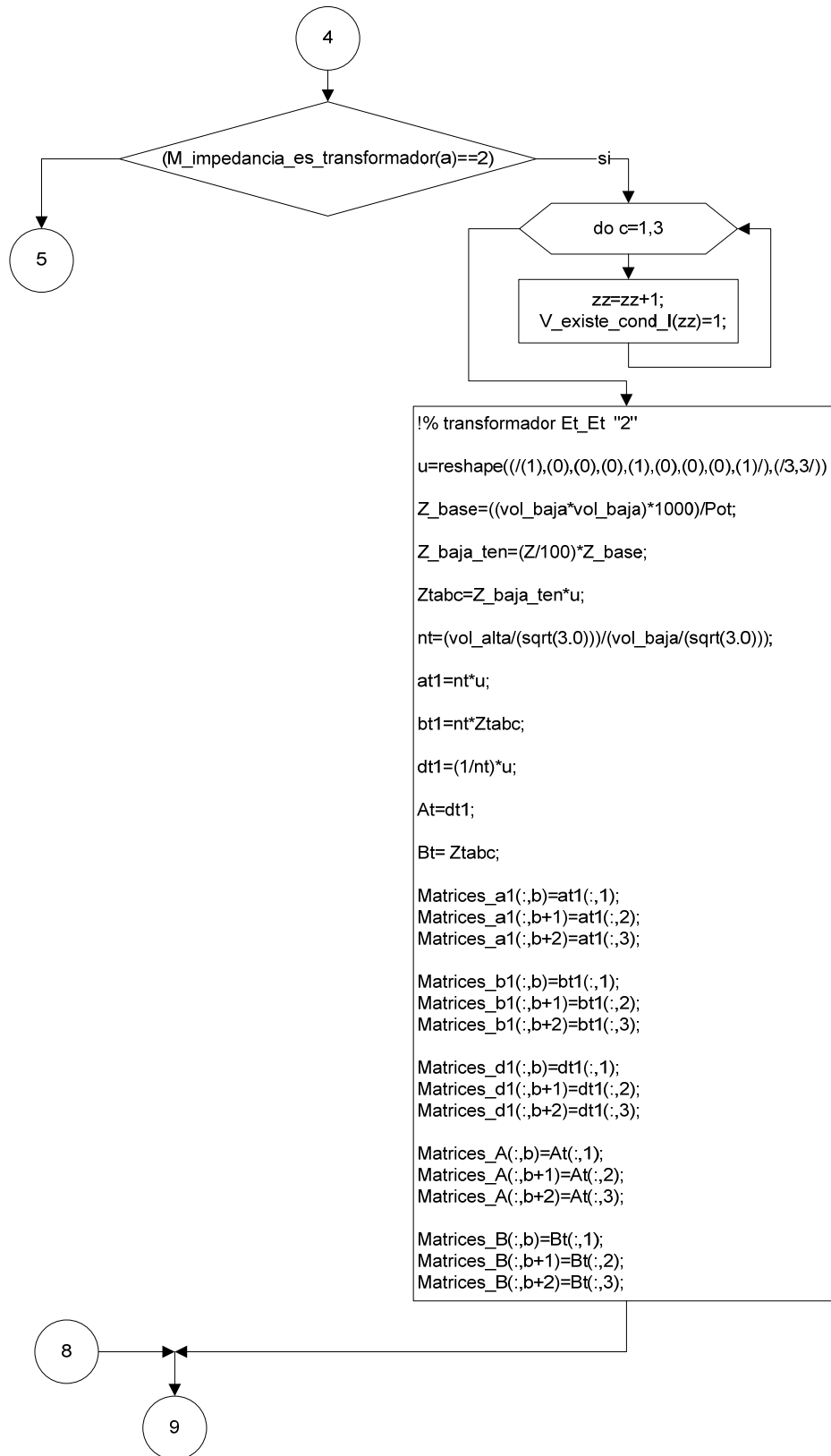


Figura B.10.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

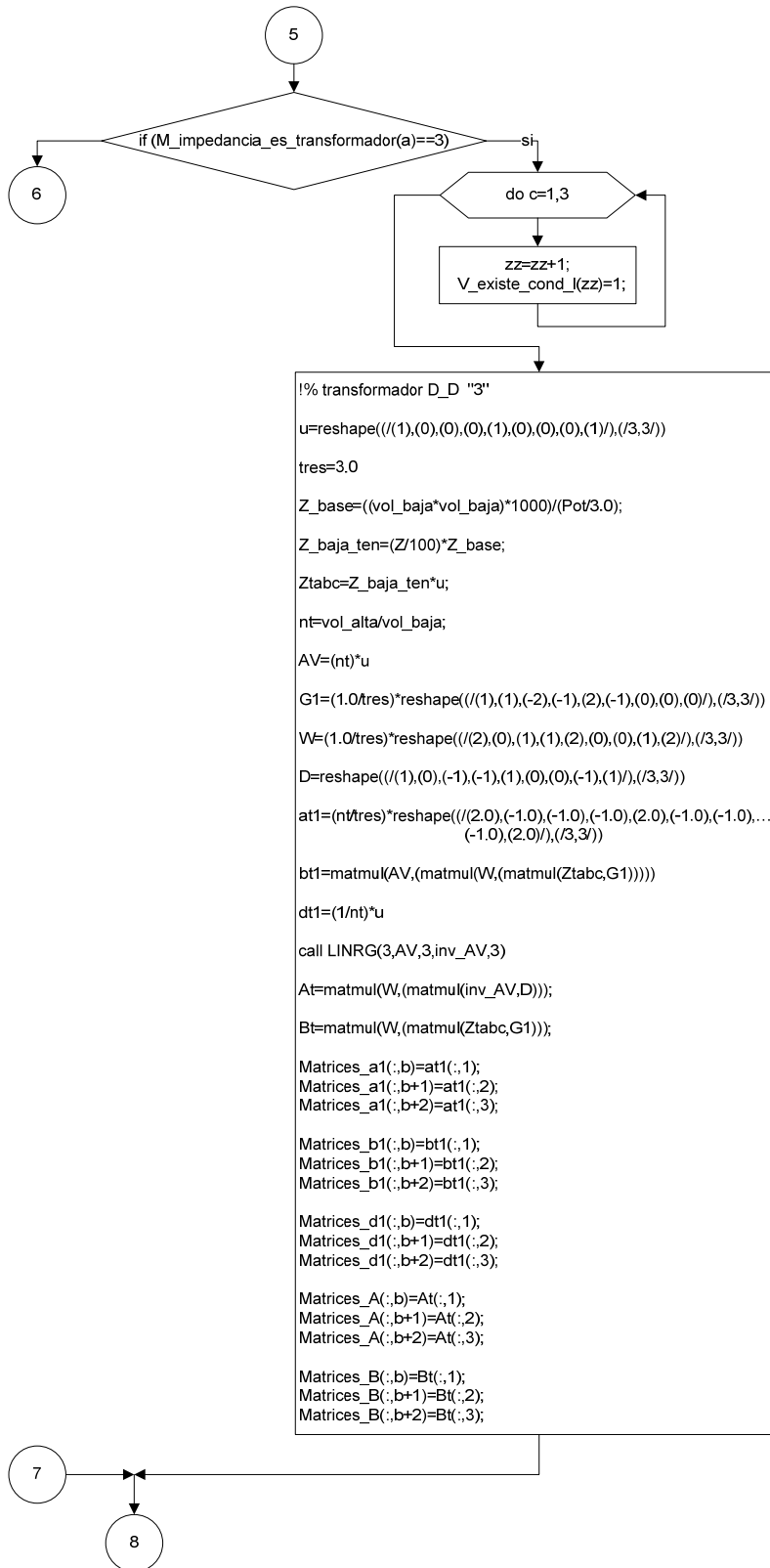


Figura B.11.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

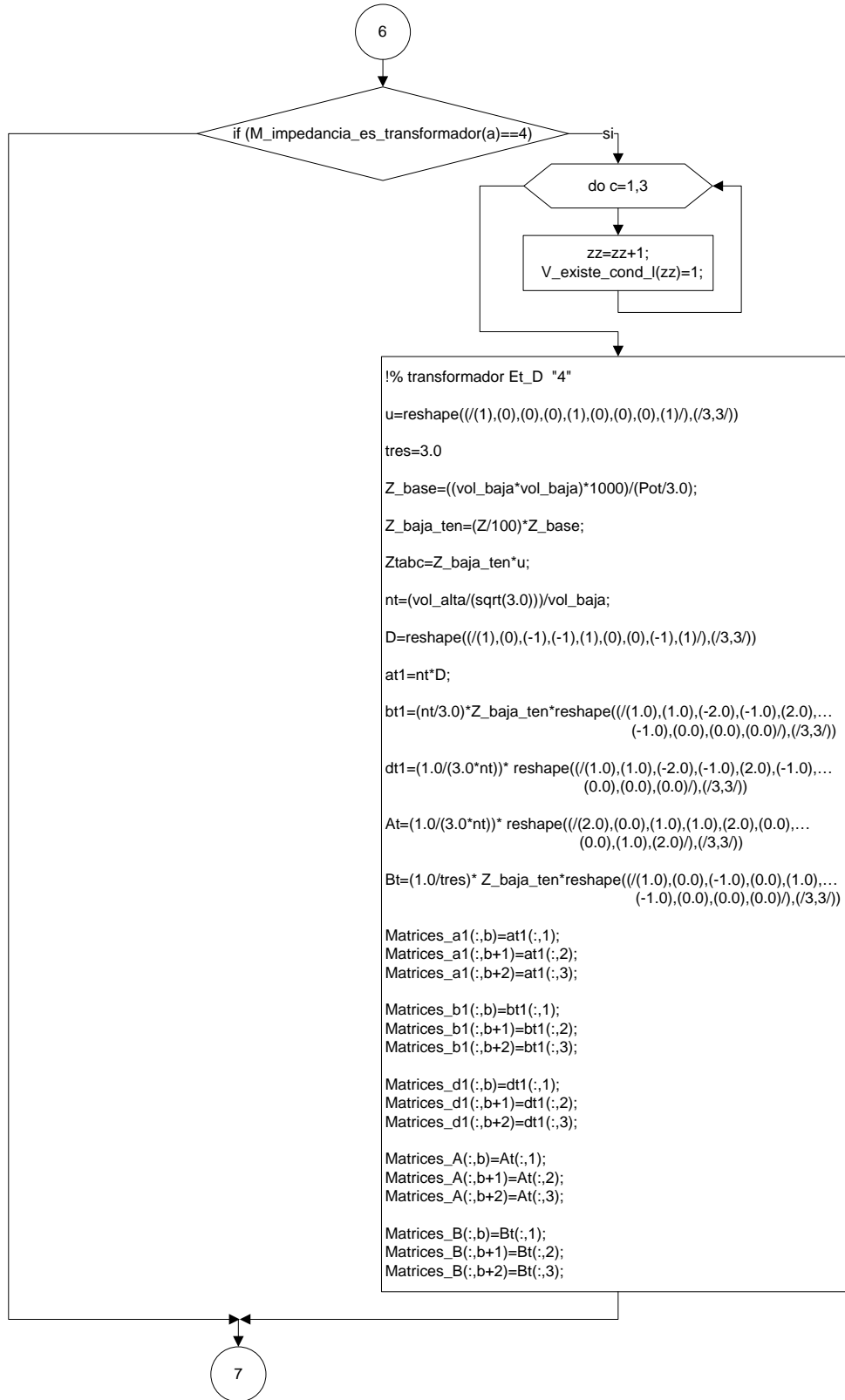


Figura B.12.- Subrutina crea matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

```

subroutine Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

use msimsl

implicit none

integer, parameter:: max=150

!contadores
integer :: a,c,f,zz,d1,b,e
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

!bienen en el common
integer :: num_sub_M_impedancia
integer :: M_impedancia_es_transformador(max)
complex :: M_impedancia(3,max)
complex :: Z
real :: Pot,vol_baja,vol_alta
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

integer :: V_columna_sub_M_impedancia(max)
integer :: V_existe_conductor(3),V_existe_cond_l(max)
integer :: u(3,3),D(3,3)
integer :: Matrices_c1(3,max)
real :: Matrices_a1(3,max),para_a1(3,3),Matrices_d1(3,max),para_d1(3,3),Matrices_A(3,max),
      para_A(3,3)

complex :: Matrices_b1(3,max),Matrices_B(3,max)
complex :: M_A(3,3),Z_baja_ten,Ztabc(3,3),bt1(3,3),Bt(3,3)

real :: Z_base,nt,at1(3,3),dt1(3,3),At(3,3),tres,G1(3,3),AV(3,3),INV_AV(3,3),W(3,3)

!bienen
common / lee_datos_Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B / Pot,vol_baja,vol_alta,Z,
      M_impedancia, M_impedancia_es_transformador

common /lee_datos_Crea_matrices_barrido /num_sub_M_impedancia

!van
common /crea_matr_a1_b1_c1_d1_A_B_barrido_P_R_1/ V_columna_sub_M_impedancia,
      V_existe_cond_l,D
common /crea_matr_a1_b1_c1_d1_A_B_barrido_P_R_2/ Matrices_A,Matrices_B,
      Matrices_a1, Matrices_b1,Matrices_c1,Matrices_d1

a=1

```

```

do c=1,num_sub_M_impedancia
    V_columna_sub_M_impedancia(c)=a
    a=a+3
end do

! write (6,*) V_columna_sub_M_impedancia

do f=1,3
    do c=1,num_sub_M_impedancia*3
        Matrices_c1(f,c)=(0)
    end do
end do

! write (6,*)    Matrices_c1

zz=0

D=reshape((/(1),(0),(-1),(-1),(1),(0),(0),(-1),(1)/),(/3,3/))

do a=1,num_sub_M_impedancia
    b=V_columna_sub_M_impedancia(a);

    if (M_impedancia_es_transformador(a)==0) then
        !%%%%%%%%%%
        !% linea "0"
        !%%%%%%%%%%

        M_A(:,1)=M_impedancia(:,b);
        M_A(:,2)=M_impedancia(:,b+1);
        M_A(:,3)=M_impedancia(:,b+2);

        Matrices_b1(:,b)=M_impedancia(:,b);
        Matrices_b1(:,b+1)=M_impedancia(:,b+1);
        Matrices_b1(:,b+2)=M_impedancia(:,b+2);

        Matrices_B(:,b)=M_impedancia(:,b);
        Matrices_B(:,b+1)=M_impedancia(:,b+1);
        Matrices_B(:,b+2)=M_impedancia(:,b+2);

        ! ESTE for ES PARA VER SI EXISTE LA LINEA O FASE
    do c=1,3
        zz=zz+1;
        if (M_A(c,c)==(0,0)) then

```

```

        V_existe_conductor(c)=0;
        V_existe_cond_1(zz)=0;
    else
        V_existe_conductor(c)=1;
        V_existe_cond_1(zz)=1;
    end if
end do
!xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

```

```

do d1=1,3
    do e=1,3
        if (e==d1) then
            para_a1(d1,e)=V_existe_conductor(e);
            para_A(d1,e)=V_existe_conductor(e);
            para_d1(d1,e)=V_existe_conductor(e);
        else
            para_a1(d1,e)=(0)
            para_A(d1,e)=(0)
            para_d1(d1,e)=(0)
        end if
    end do
end do

```

```

Matrices_a1(:,b)=para_a1(:,1);
Matrices_a1(:,b+1)=para_a1(:,2);
Matrices_a1(:,b+2)=para_a1(:,3);

```

```

Matrices_d1(:,b)=para_d1(:,1);
Matrices_d1(:,b+1)=para_d1(:,2);
Matrices_d1(:,b+2)=para_d1(:,3);

```

```

Matrices_A(:,b)=para_A(:,1);
Matrices_A(:,b+1)=para_A(:,2);
Matrices_A(:,b+2)=para_A(:,3);

```

else

```

if (M_impedancia_es_transformador(a)==1) then

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
!% transformador D_Et "1"
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
do c=1,3
    zz=zz+1;
    V_existe_cond_1(zz)=1;
end do

```



```

u=reshape((/ (1),(0),(0),(0),(1),(0),(0),(0),(1)/),(/3,3/))

Z_base=((vol_baja*vol_baja)*1000)/Pot

Z_baja_ten=(Z/100)*Z_base

Ztabc=Z_baja_ten*u

nt=vol_alta/(vol_baja/(sqrt(3.0)));

!D=reshape((/ (1),(0),(-1),(-1),(1),(0),(0),(-1),(1)/),(/3,3/))

at1=- (nt/3.0)*reshape((/ (0),(1),(2),(2),(0),(1),(1),(2),(0)/),(/3,3/))

bt1=matmul(at1,Ztabc)

dt1=(1/nt)*D

At=(1/nt)*reshape((/ (1),(-1),(0),(0),(1),(-1),(-1),(0),(1)/),(/3,3/))

Bt=Ztabc;

Matrices_a1(:,b)=at1(:,1);
Matrices_a1(:,b+1)=at1(:,2);
Matrices_a1(:,b+2)=at1(:,3);

Matrices_b1(:,b)=bt1(:,1);
Matrices_b1(:,b+1)=bt1(:,2);
Matrices_b1(:,b+2)=bt1(:,3);

Matrices_d1(:,b)=dt1(:,1);
Matrices_d1(:,b+1)=dt1(:,2);
Matrices_d1(:,b+2)=dt1(:,3);

Matrices_A(:,b)=At(:,1);
Matrices_A(:,b+1)=At(:,2);
Matrices_A(:,b+2)=At(:,3);

Matrices_B(:,b)=Bt(:,1);
Matrices_B(:,b+1)=Bt(:,2);
Matrices_B(:,b+2)=Bt(:,3);

```

else

```

if (M_impedancia_es_transformador(a)==2) then
    !%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

!% transformador Et_Et "2"
!%%%%%%%%%%

do c=1,3
    zz=zz+1;
    V_existe_cond_1(zz)=1;
end do

u=reshape((/ (1),(0),(0),(0),(1),(0),(0),(0),(1)/), (/3,3/))

Z_base=((vol_baja*vol_baja)*1000)/Pot;

Z_baja_ten=(Z/100)*Z_base;

Ztabc=Z_baja_ten*u;

nt=((vol_alta/(sqrt(3.0)))/(vol_baja/(sqrt(3.0))))

at1=nt*u

bt1=nt*Ztabc

dt1=(1/nt)*u

At=dt1

Bt=Ztabc

    Matrices_a1(:,b)=at1(:,1);
Matrices_a1(:,b+1)=at1(:,2);
Matrices_a1(:,b+2)=at1(:,3);

    Matrices_b1(:,b)=bt1(:,1);
Matrices_b1(:,b+1)=bt1(:,2);
Matrices_b1(:,b+2)=bt1(:,3);

Matrices_d1(:,b)=dt1(:,1);
Matrices_d1(:,b+1)=dt1(:,2);
Matrices_d1(:,b+2)=dt1(:,3);

Matrices_A(:,b)=At(:,1);
Matrices_A(:,b+1)=At(:,2);
Matrices_A(:,b+2)=At(:,3);

```

```

Matrices_B(:,b)=Bt(:,1);
Matrices_B(:,b+1)=Bt(:,2);
Matrices_B(:,b+2)=Bt(:,3);

else
if (M_impedancia_es_transformador(a)==3) then

!% transformador D_D "3"

do c=1,3
zz=zz+1;
V_existe_cond_l(zz)=1;
end do

u=reshape((/ (1),(0),(0),(0),(1),(0),(0),(0),(1)/), (/3,3/))

tres=3.0

Z_base=((vol_baja*vol_baja)*1000)/(Pot/3.0);

Z_baja_ten=(Z/100)*Z_base;

Ztabc=Z_baja_ten*u;

nt=vol_alta/vol_baja;

AV=(nt)*u

G1=(1.0/tres)*reshape((/ (1),(1),(-2),(-1),(2),(-1),(0),(0),(0)/), (/3,3/))

W=(1.0/tres)*reshape((/ (2),(0),(1),(1),(2),(0),(0),(1),(2)/), (/3,3/))

at1=(nt/tres)*reshape((/ (2.0),(-1.0),(-1.0),(-1.0),(2.0),(-1.0),(-1.0),(-
1.0),(2.0)/), (/3,3/))

bt1=matmul(AV,(matmul(W,(matmul(Ztabc,G1))))))

dt1=(1/nt)*u

call LINRG(3,AV,3,inv_AV,3)

At=matmul(W,(matmul(inv_AV,D)));

```

```

Bt=matmul(W,(matmul(Ztabc,G1)));

Matrices_a1(:,b)=at1(:,1);
Matrices_a1(:,b+1)=at1(:,2);
Matrices_a1(:,b+2)=at1(:,3);

Matrices_b1(:,b)=bt1(:,1);
Matrices_b1(:,b+1)=bt1(:,2);
Matrices_b1(:,b+2)=bt1(:,3);

Matrices_d1(:,b)=dt1(:,1);
Matrices_d1(:,b+1)=dt1(:,2);
Matrices_d1(:,b+2)=dt1(:,3);

Matrices_A(:,b)=At(:,1);
Matrices_A(:,b+1)=At(:,2);
Matrices_A(:,b+2)=At(:,3);

Matrices_B(:,b)=Bt(:,1);
Matrices_B(:,b+1)=Bt(:,2);
Matrices_B(:,b+2)=Bt(:,3);
else

if (M_impedancia_es_transformador(a)==4) then

!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
!% transformador Et_D "4"
!%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

do c=1,3
    zz=zz+1;
    V_existe_cond_l(zz)=1;
end do

u=reshape((/ (1),(0),(0),(0),(1),(0),(0),(0),(1)/), (/3,3/))

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

tres=3.0

Z_base=((vol_baja*vol_baja)*1000)/(Pot/3.0);

Z_baja_ten=(Z/100)*Z_base;

```

```

Ztabc=Z_baja_ten*u;

nt=(vol_alta/(sqrt(3.0)))/vol_baja;

!D=reshape((/(1),(0),(-1),(-1),(1),(0),(0),(-1),(1)/),(/3,3/))

        at1=nt*D;

        bt1=(nt/3.0)*Z_baja_ten*reshape((/(1.0),(1.0),(-2.0),(-1.0),(2.0),(-
1.0),(0.0),(0.0),(0.0)/),(/3,3/))

        dt1=(1.0/(3.0*nt))*                reshape((/(1.0),(1.0),(-2.0),(-1.0),(2.0),(-
1.0),(0.0),(0.0),(0.0)/),(/3,3/))

        At=(1.0/(3.0*nt))*
reshape((/(2.0),(0.0),(1.0),(1.0),(2.0),(0.0),(0.0),(1.0),(2.0)/),(/3,3/))

        Bt=(1.0/tres)*                Z_baja_ten*reshape((/(1.0),(0.0),(-1.0),(0.0),(1.0),(-
1.0),(0.0),(0.0),(0.0)/),(/3,3/))

```

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

Matrices_a1(:,b)=at1(:,1);
Matrices_a1(:,b+1)=at1(:,2);
Matrices_a1(:,b+2)=at1(:,3);

Matrices_b1(:,b)=bt1(:,1);
Matrices_b1(:,b+1)=bt1(:,2);
Matrices_b1(:,b+2)=bt1(:,3);

Matrices_d1(:,b)=dt1(:,1);
Matrices_d1(:,b+1)=dt1(:,2);
Matrices_d1(:,b+2)=dt1(:,3);

Matrices_A(:,b)=At(:,1);
Matrices_A(:,b+1)=At(:,2);
Matrices_A(:,b+2)=At(:,3);

Matrices_B(:,b)=Bt(:,1);
Matrices_B(:,b+1)=Bt(:,2);
Matrices_B(:,b+2)=Bt(:,3);
else

```

```
!%AQUI SE PONE LA CONFIGURACION QUE SE DESEA GREGAR
!%CON NUMERACION 5 EN "M_impedancia_es_transformador"
!%NO OLVIDAR ACTUALIZAR "V_existe_cond_1"(COPIARLO)
```

```
end      if ! transformador Et_D "4"
end if   ! transformador D_D "3"
end      if ! transformador Et_Et "2"
end      if   ! transformador D_Et "1"
end if   ! linea "0"
end      do
```

```
end subroutine Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B
```

Código 3A.- sub-rutina Crea_matrices_a1_b1_c1_d1_A_B

Se muestra la subrutina que hace el barrido progresivo-regresivo para redes de distribución que fue realizado en este trabajo



Figura B.13.- Subrutina Barrido_P_R

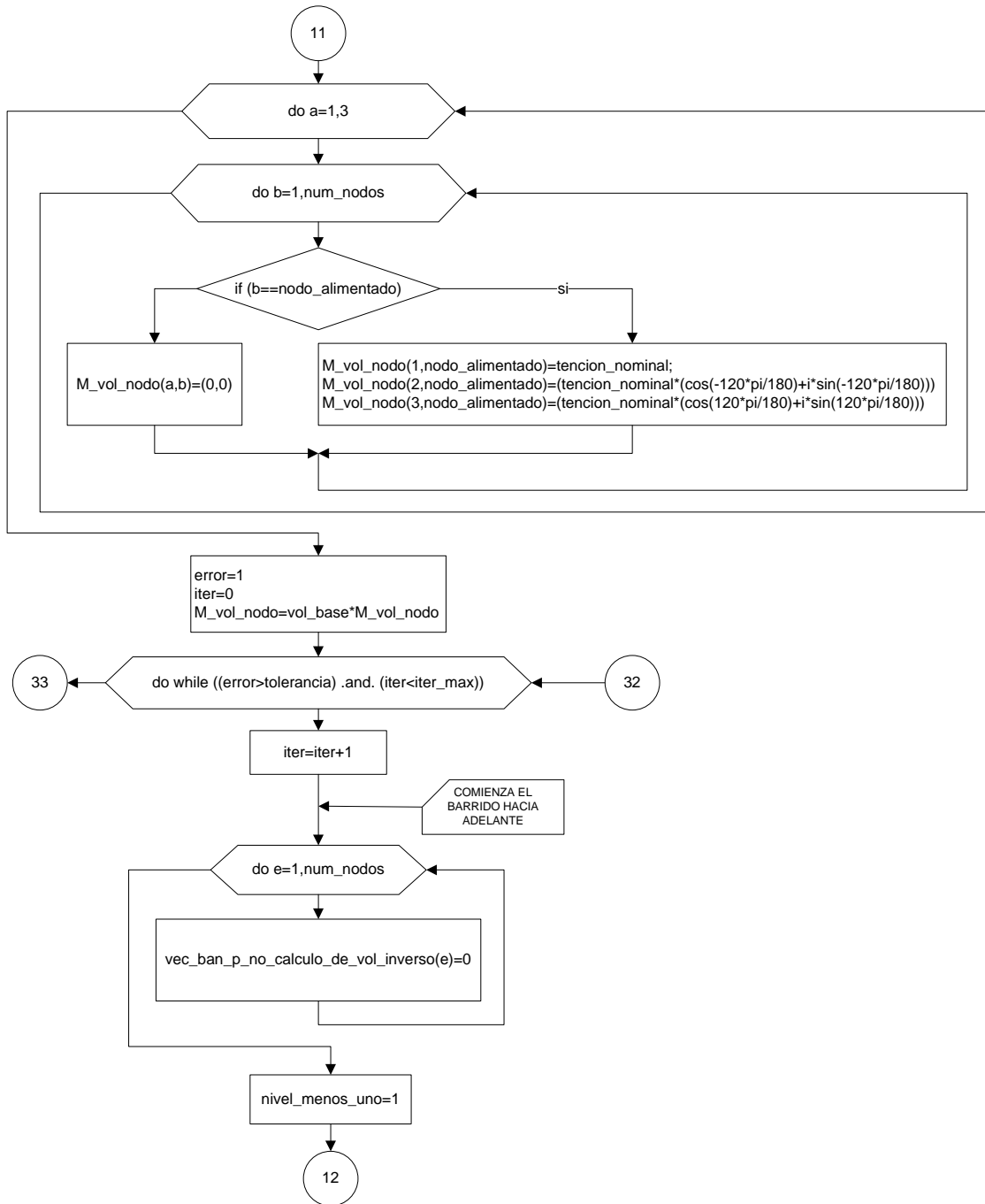


Figura B.14.- Subrutina Barrido_P_R

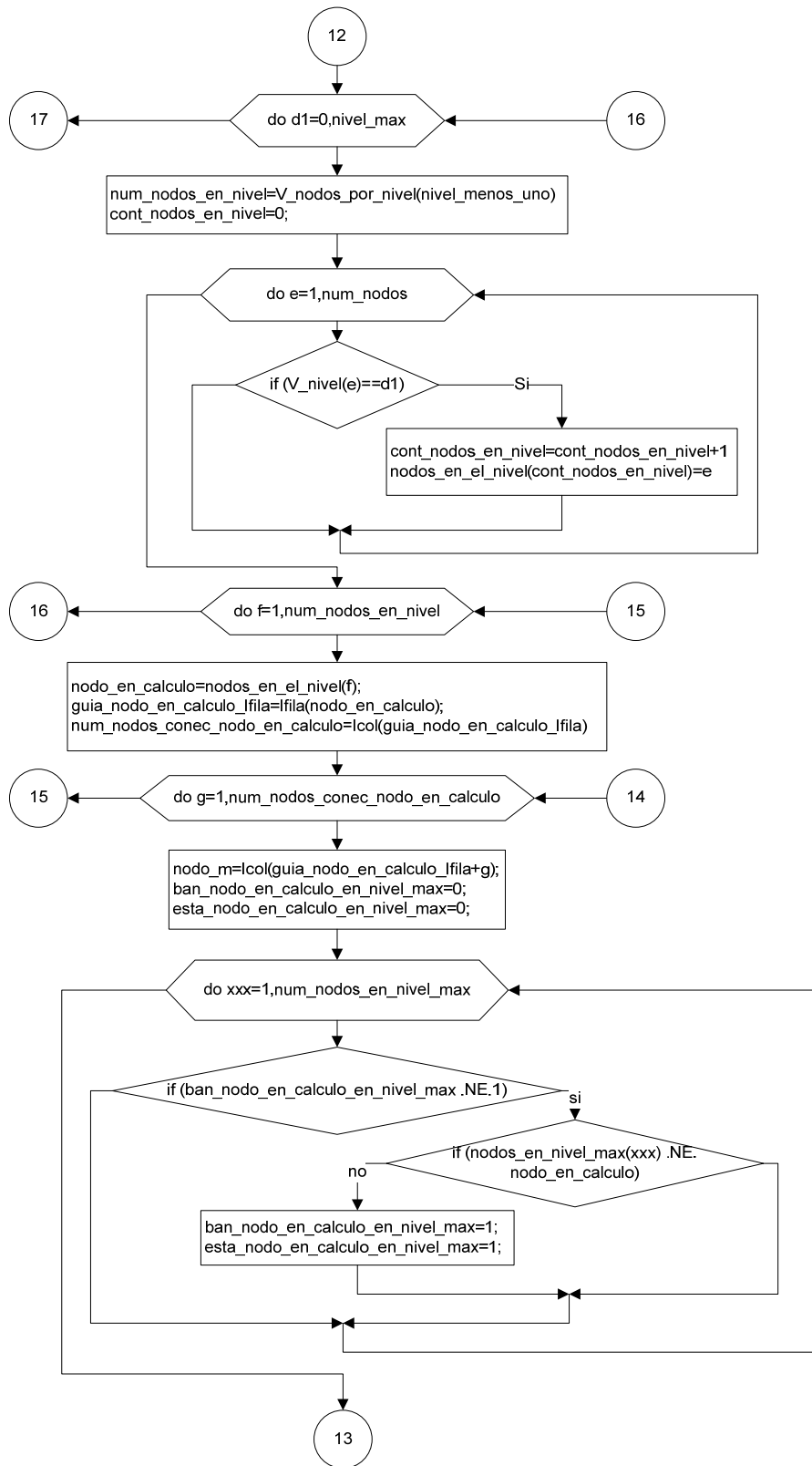


Figura B.15.- Subrutina Barrido_P_R

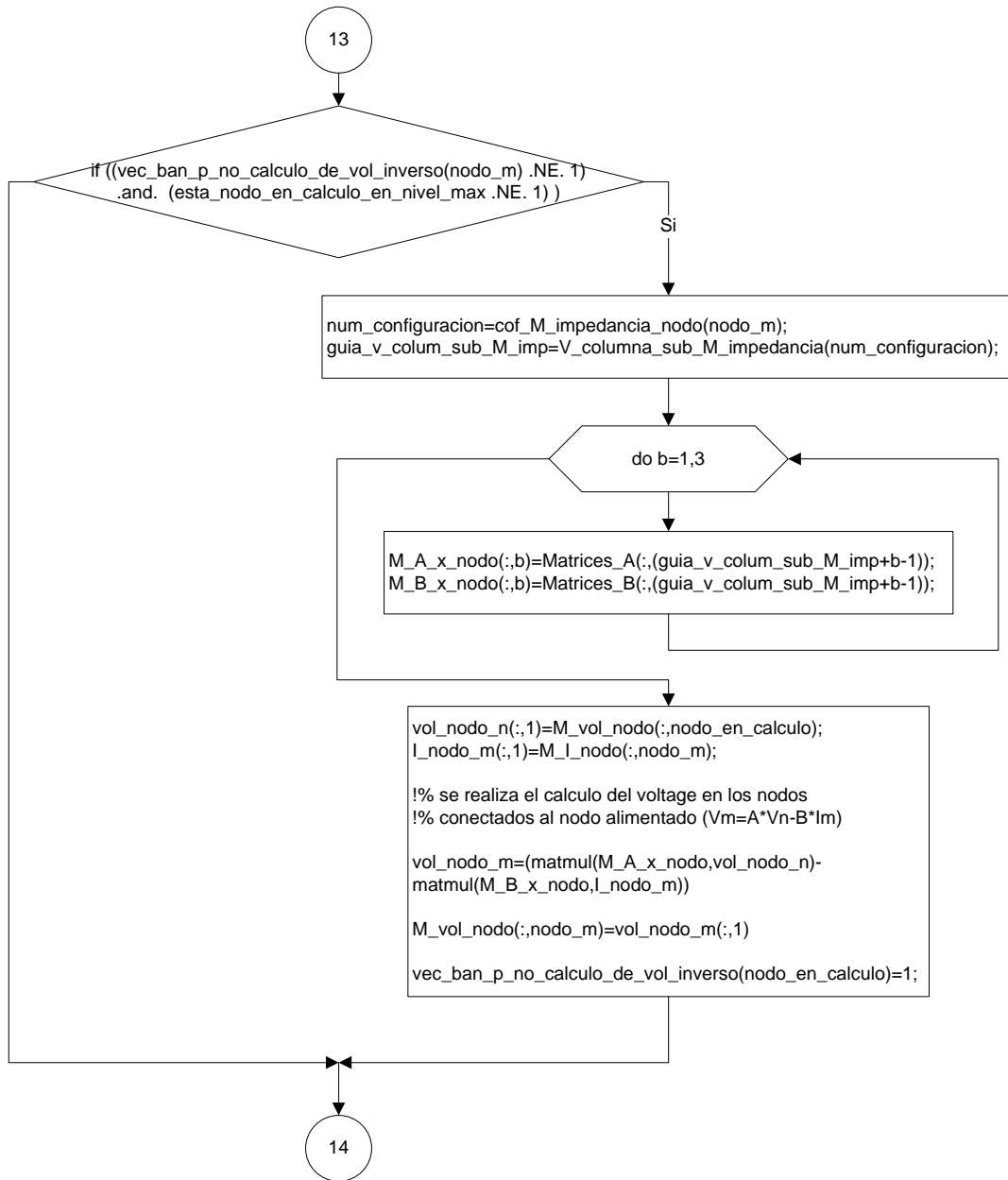


Figura B.16.- Subrutina Barrido_P_R

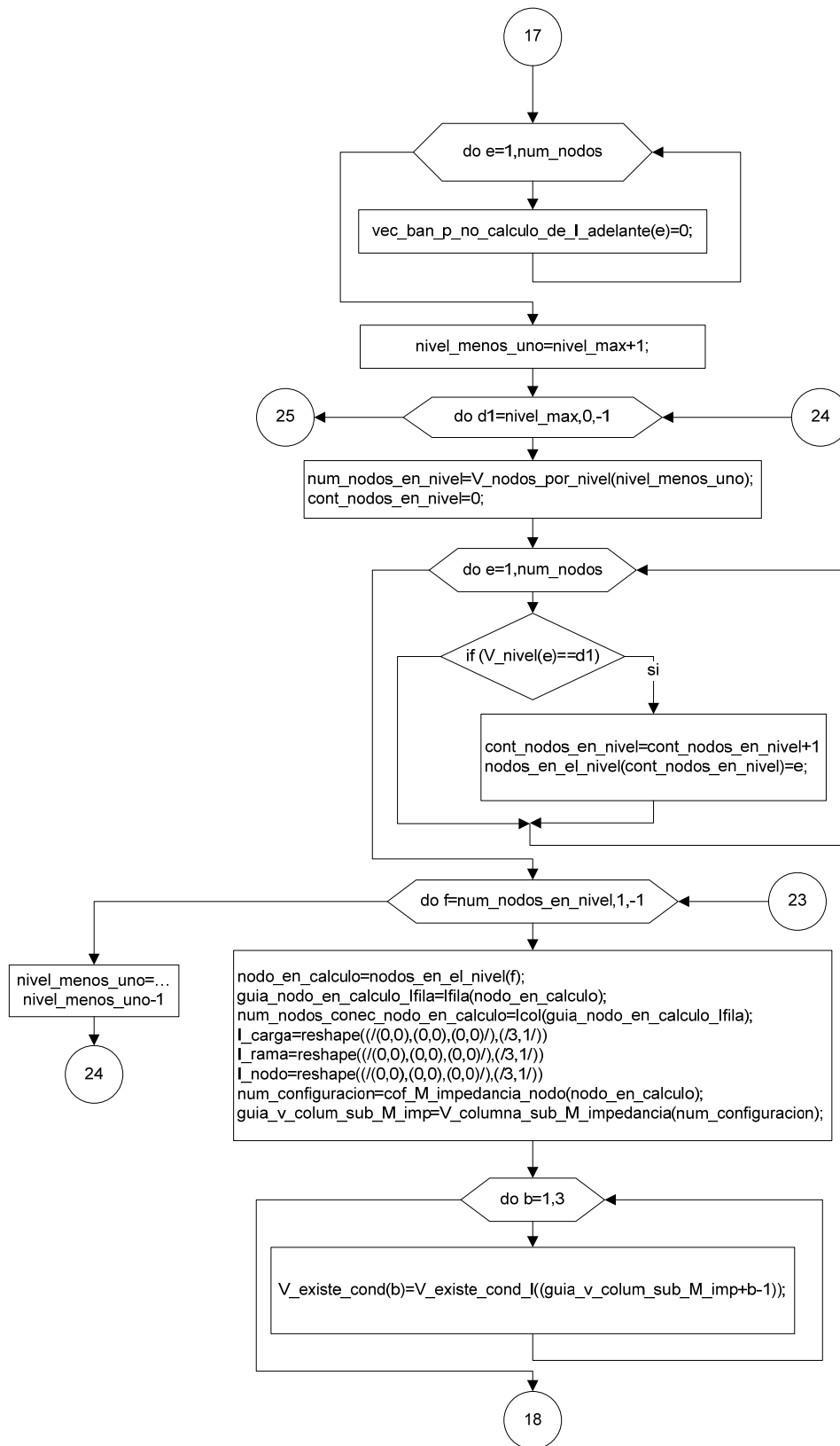


Figura B.17.- Subrutina Barrido_P_R

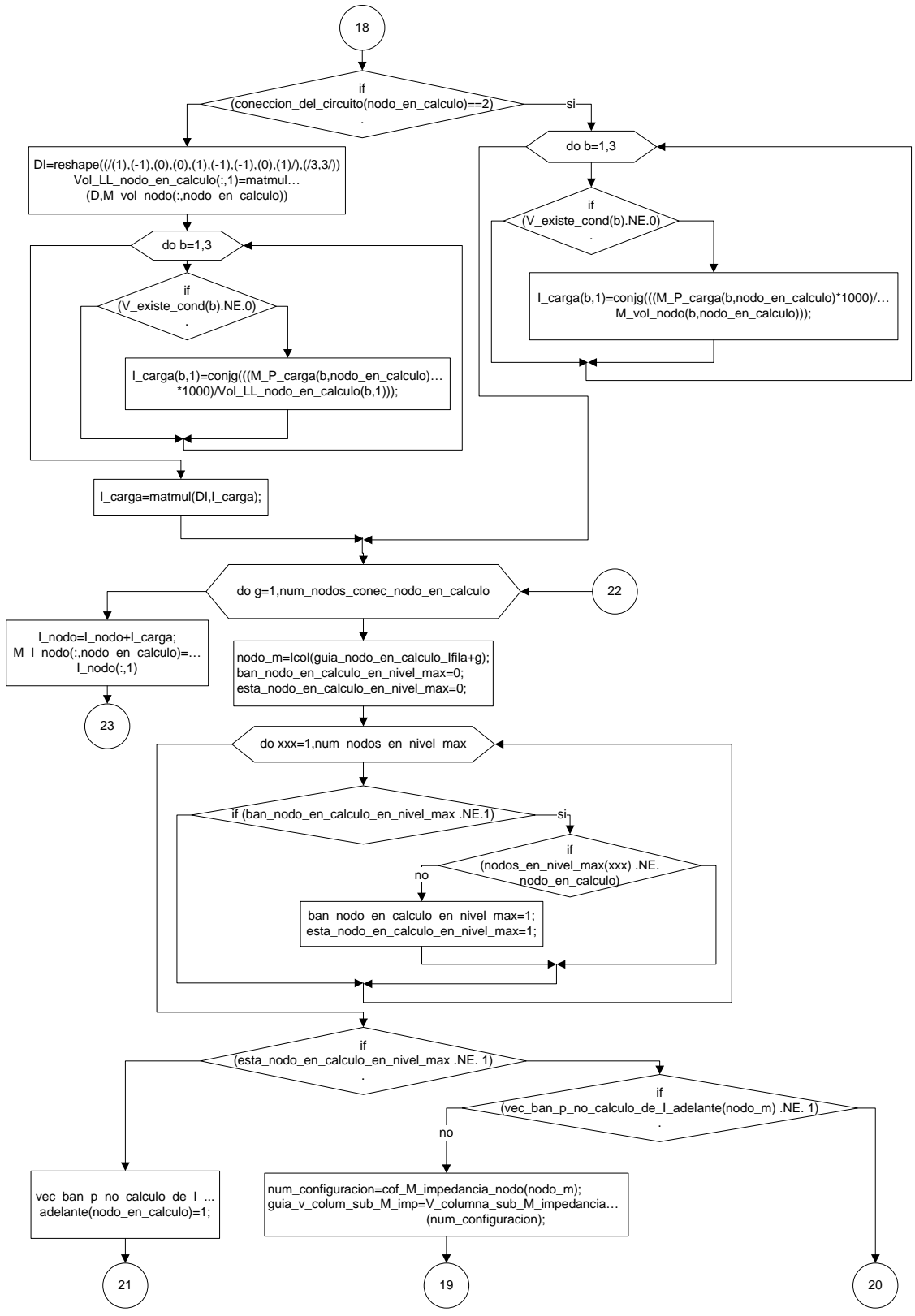


Figura B.18.- Subrutina Barrido_P_R

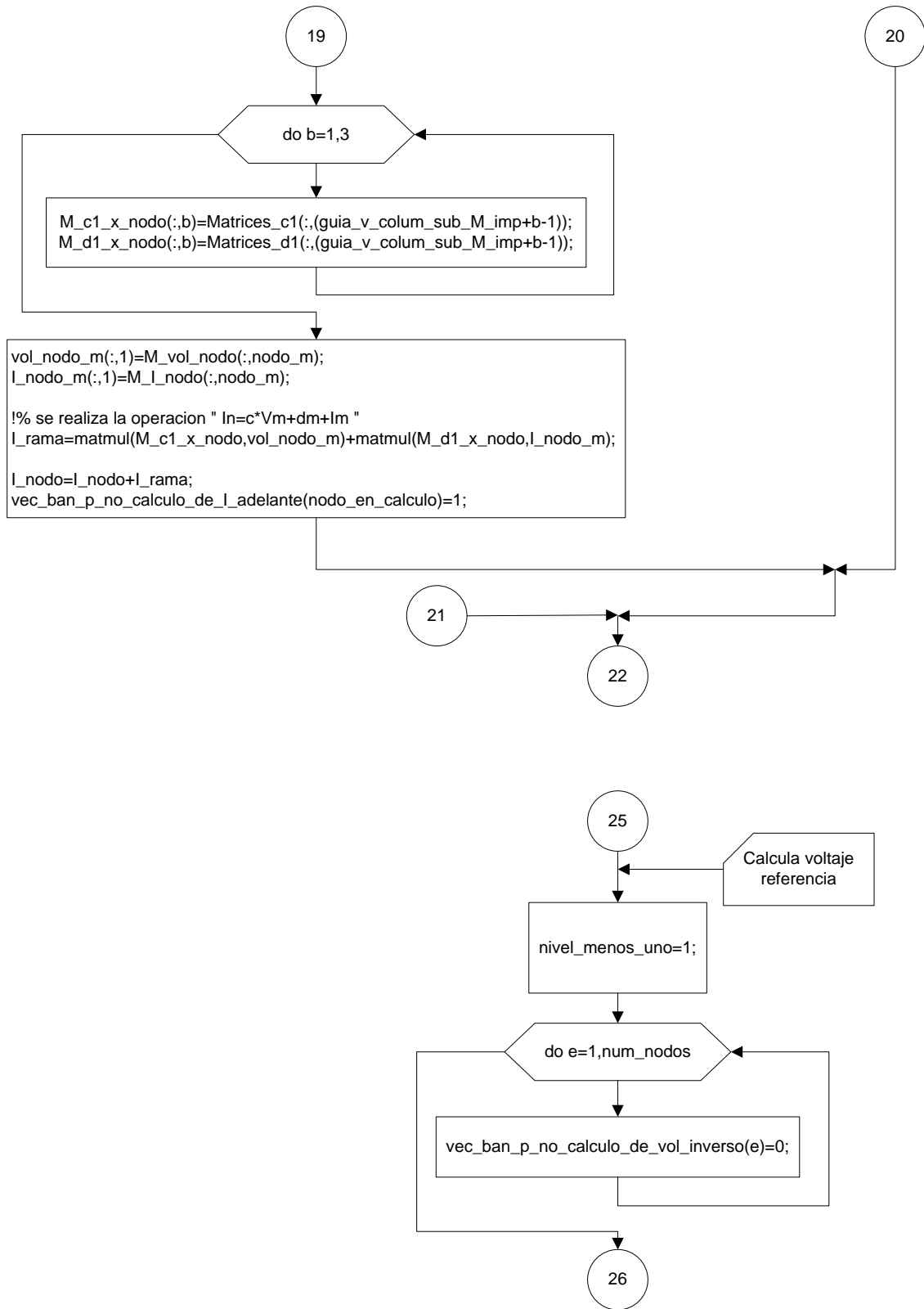


Figura B.19.- Subrutina Barrido_P_R

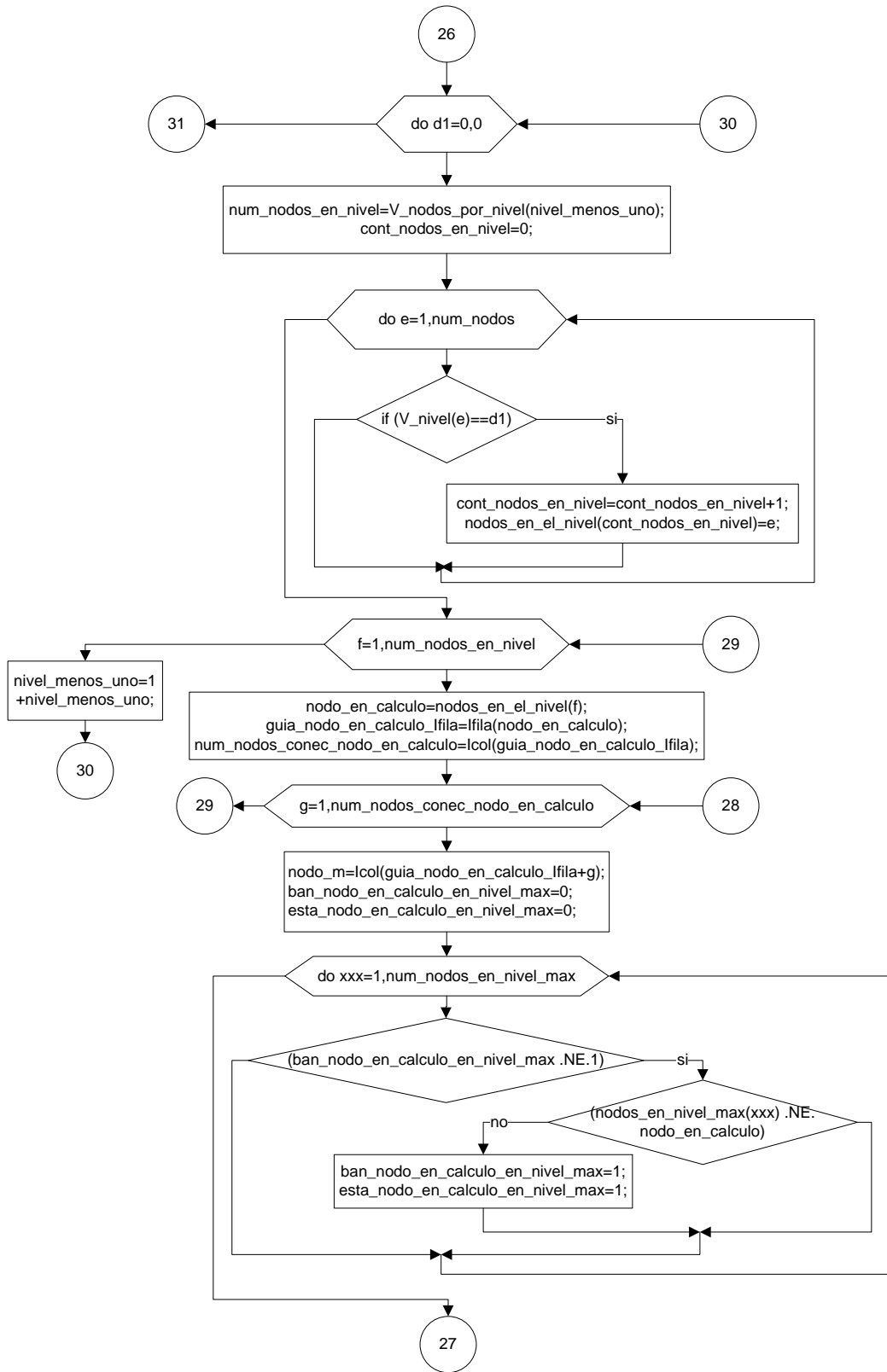


Figura B.20.- Subrutina Barrido_P_R

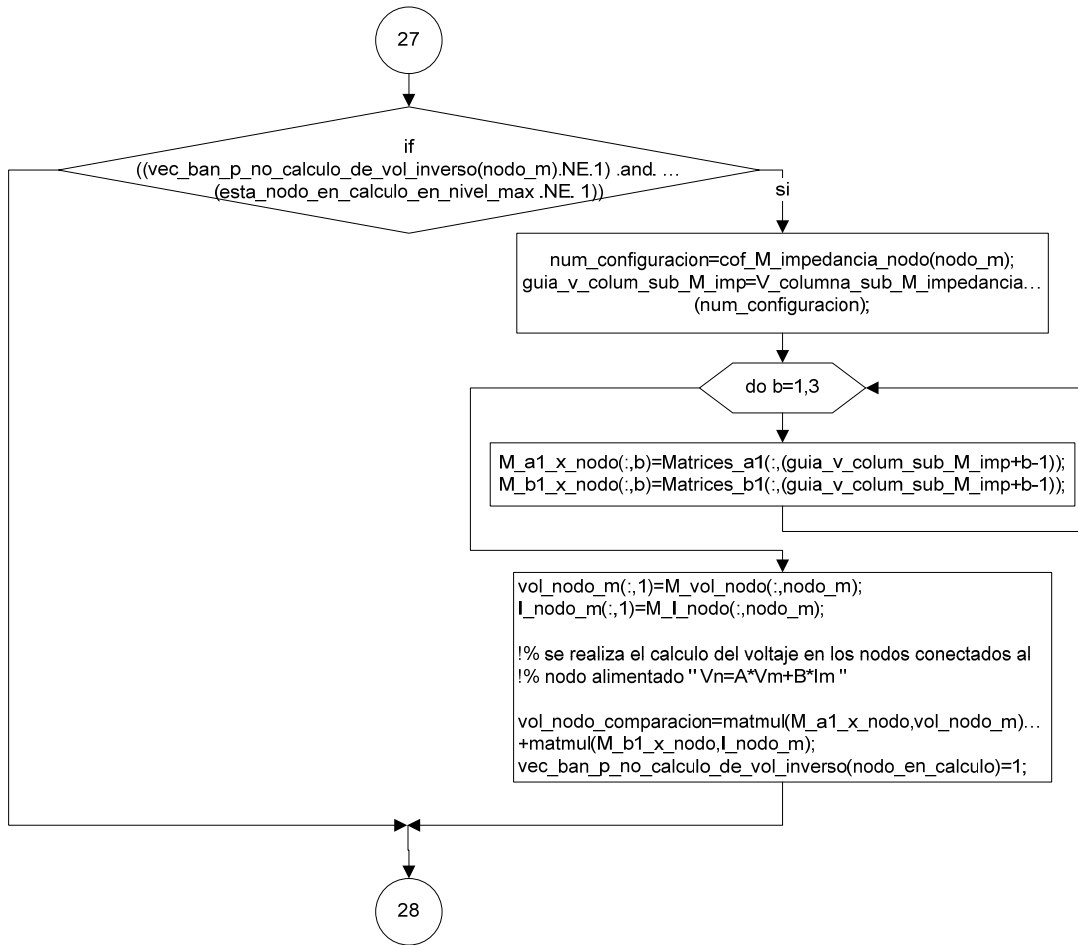


Figura B.21.- Subrutina Barrido_P_R

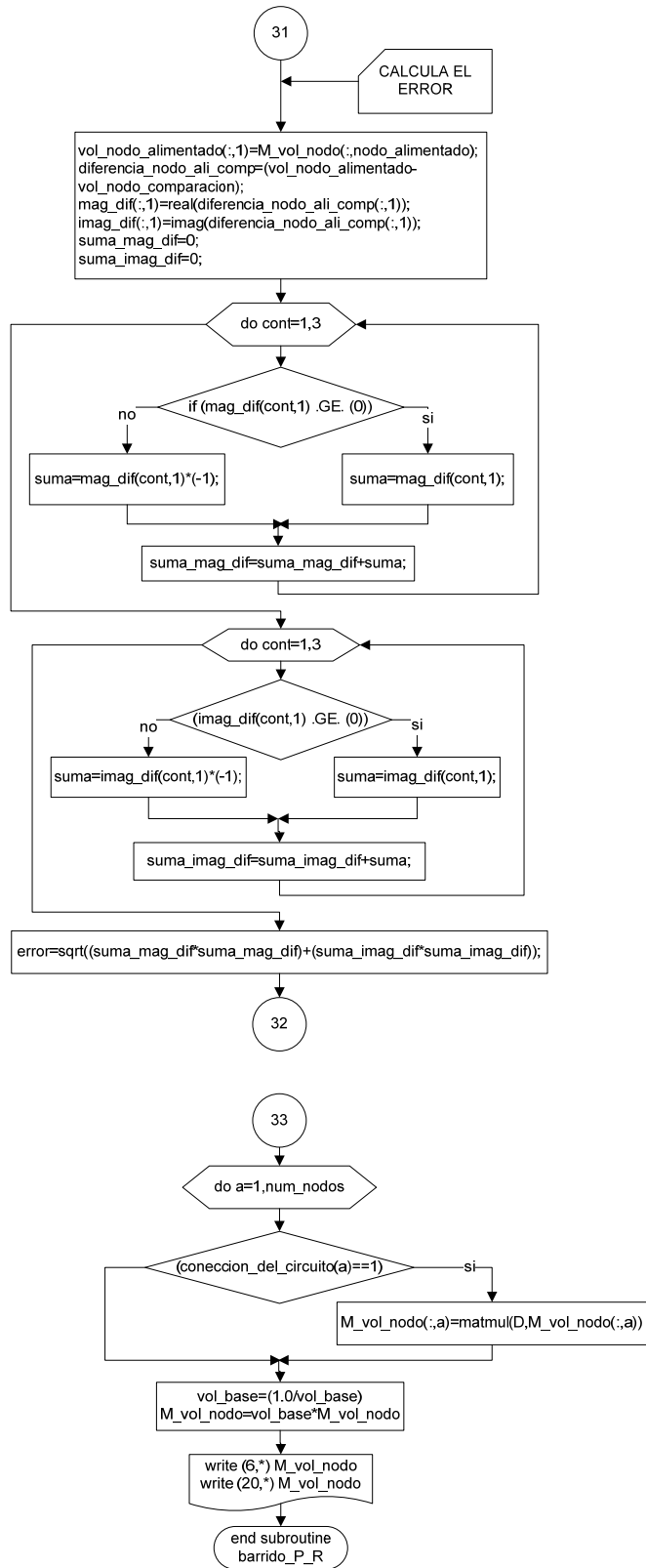


Figura B.22.- Subrutina Barrido_P_R

subroutine barrido_P_R

implicit none

integer, parameter:: max=150

!contadores

integer :: a,b,e,d1,f,g,xxx,cont

!xx

!bien en el common "lee_datos_barrido_P_R_1"

integer :: num_nodos,nodo_alimentado,iter_max,cof_M_impedancia_nodo(max)

integer :: nivel_max,nodos_en_nivel_max(max),num_nodos_en_nivel_max,V_tipo_elemento(max)

integer :: Ifila(max),Icol(max),V_nivel(max),V_nodos_por_nivel(max),coneccion_del_circuito(max)

real :: tencion_nominal,tolerancia,vol_base

complex :: M_P_carga(3,max)

!bien en el common "lee_datos_Crea_matrices_barrido"

integer :: num_sub_M_impedancia

!bien en el common "crea_matr_a1_b1_c1_d1_A_B_barrido_P_R"

integer :: Matrices_c1(3,max),V_columna_sub_M_impedancia(max),V_existe_cond_l(max),D(3,3)

real :: Matrices_A(3,max),Matrices_a1(3,max),Matrices_d1(3,max)

complex :: Matrices_B(3,max),Matrices_b1(3,max)

common /lee_datos_Crea_matrices_barrido /num_sub_M_impedancia

common /lee_datos_barrido_P_R_1 /
num_nodos,nodo_alimentado,tencion_nominal,iter_max,tolerancia,Icol,Ifila,cof_M_impedanci
a_nodo,vol_base,V_tipo_elemento

common /lee_datos_barrido_P_R_2 /
/nivel_max,nodos_en_nivel_max,num_nodos_en_nivel_max,V_nivel,M_P_carga,coneccion_d
el_circuito,V_nodos_por_nivel

common /crea_matr_a1_b1_c1_d1_A_B_barrido_P_R_1/
V_columna_sub_M_impedancia,V_existe_cond_l,D

common /crea_matr_a1_b1_c1_d1_A_B_barrido_P_R_2/
Matrices_A,Matrices_B,Matrices_a1,Matrices_b1,Matrices_c1,Matrices_d1

!xx

!variables de la subrutina


```

M_vol_nodo(2,nodo_alimentado)=(tencion_nominal*(cos(-120*pi/180)+i*sin(-120*pi/180)));
M_vol_nodo(3,nodo_alimentado)=(tencion_nominal*(cos(120*pi/180)+i*sin(120*pi/180)));
else
M_vol_nodo(a,b)=(0,0)
end      if
end do
end do

```

```

error=1
iter=0

```

```

M_vol_nodo=vol_base*M_vol_nodo

```

```

do while ((error>tolerancia) .and. (iter<iter_max))

```

```

    iter=iter+1

```

```

    !XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

    !%% CREA EL BARRIDO HACIA ADELANTE

```

```

    !XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

```

```

    do e=1,num_nodos
    vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(e)=0
    end do

```

```

    nivel_menos_uno=1

```

```

    do d1=0,nivel_max

```

```

        !%se extraen el número de nodos en el nivel
        num_nodos_en_nivel=V_nodos_por_nivel(nivel_menos_uno)

```

```

        !% se crea el vector "nodos_en_el_nivel" que contiene los nodos
        !% en el nivel de observacion (en el que se esta trabajando)
        cont_nodos_en_nivel=0;

```

```

        do e=1,num_nodos
            if (V_nivel(e)==d1) then
                cont_nodos_en_nivel=cont_nodos_en_nivel+1;
                nodos_en_el_nivel(cont_nodos_en_nivel)=e;
            end if

```

```

        end do

```

```

!write (6,*) nodos_en_el_nivel

do f=1,num_nodos_en_nivel
    nodo_en_calculo=nodos_en_el_nivel(f);

    !%se ve con quien esta conectado el "nodo en calculo"
    guia_nodo_en_calculo_Ifila=Ifila(nodo_en_calculo);
    num_nodos_conec_nodo_en_calculo=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila);

    do g=1,num_nodos_conec_nodo_en_calculo
        nodo_m=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila+g);

        !% este for es porque en la version de fortran no tiene la funcion de
        !% checar en todo un vector si hay un nodo igual esto se utiliza
        !% en el siguiente if para ver si el nodo en calculo no esta en
        !% nodos_en_nivel_max

        ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;
        esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;

        do xxx=1,num_nodos_en_nivel_max
            if (ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE.1) then
                if (nodos_en_nivel_max(xxx) .NE. nodo_en_calculo) then
                    else
                        ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
                        esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
                    end if
                end if
            end do
        end do

        !% un if para separar los nodos aguas arriba de los aguas abajo
        !% y delos que se encuentran en ultimos niveles    .NE.=diferente que

        if ((vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(nodo_m)    .NE.    1)    .and.
(esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE. 1) ) then
            !write (6,*) nodo_m;

            !% se obtiene la configuracion correspondiente de A y B
            !% para cada tipo de nodo

            num_configuracion=cof_M_impedancia_nodo(nodo_m);
            !write (6,*) V_columna_sub_M_impedancia;

```

```

guia_v_colum_sub_M_imp=V_columna_sub_M_impedancia(num_configuracion);

do b=1,3

M_A_x_nodo(:,b)=Matrices_A(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));
M_B_x_nodo(:,b)=Matrices_B(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));
end do

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

!%se extraen los valores de voltage y corriente del nodo alimentado
vol_nodo_n(:,1)=M_vol_nodo(:,nodo_en_calculo);
I_nodo_m(:,1)=M_I_nodo(:,nodo_m);

!% se realiza el calculo del voltage en los nodos conectados al
!% nodo alimentado (Vm=A*Vn-B*Im)
vol_nodo_m=(matmul(M_A_x_nodo,vol_nodo_n)-
matmul(M_B_x_nodo,I_nodo_m))

!write (6,*) vol_nodo_m
!wwrite (6,*) "

M_vol_nodo(:,nodo_m)=vol_nodo_m(:,1)

vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(nodo_en_calculo)=1;
end if
end do
end do

!% se aumenta el número de nivel para ir explorando la red
!% le puse menos uno porque el primer nivel es 0 y no me lo
!% reconoce en V_nodos_por_nivel
nivel_menos_uno=1+nivel_menos_uno;

end do

! write (6,*) M_vol_nodo

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
!%CREA EL BARRIDO REGRESIVO
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

do e=1,num_nodos
vec_ban_p_no_calculo_de_I_adelante(e)=0;
end do

nivel_menos_uno=nivel_max+1;

do d1=nivel_max,0,-1

num_nodos_en_nivel=V_nodos_por_nivel(nivel_menos_uno);

cont_nodos_en_nivel=0;
do e=1,num_nodos
    if (V_nivel(e)==d1)then
        cont_nodos_en_nivel=cont_nodos_en_nivel+1;
        nodos_en_el_nivel(cont_nodos_en_nivel)=e;
        !write (6,*) nodos_en_el_nivel(cont_nodos_en_nivel)
    end if
end do

do f=num_nodos_en_nivel,1,-1

    nodo_en_calculo=nodos_en_el_nivel(f);
!write (6,*)nodo_en_calculo

    !%se ve con quien esta conectado el "nodo en calculo"
    guia_nodo_en_calculo_Ifila=Ifila(nodo_en_calculo);

    !% se pone un solo nodo ya que cualquier nodo solo tiene un solo
    !% nodo de regreso a la fuente
    num_nodos_conec_nodo_en_calculo=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila);
!write (6,*) nodo_en_calculo;

    I_carga=reshape((/(0,0),(0,0),(0,0)/),(/3,1/))
    I_rama=reshape((/(0,0),(0,0),(0,0)/),(/3,1/))
I_nodo=reshape((/(0,0),(0,0),(0,0)/),(/3,1/))

!write (6,*) nodo_en_calculo

!%se calcula La corriente de carga en el nodo_en calculo

num_configuracion=cof_M_impedancia_nodo(nodo_en_calculo);
guia_v_colum_sub_M_imp=V_columna_sub_M_impedancia(num_configuracion);

do b=1,3

```

```

        V_existe_cond(b)=V_existe_cond_l((guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));
    end    do

!do b=1,num_nodos
    ! write (6,*) conexion_del_circuito(b)
!end do

!pause 'comienza calculo I_carga barrido regresivo'

    %% el if "D ó E" es porque la conexion "D" delta "1"
    %% necesita ser multiplicada por ID cuando
    %% se saca la I_CARGA.                estrella 2

    if (conexion_del_circuito(nodo_en_calculo)==2) then !% "D ó E"

        do b=1,3
            if (V_existe_cond(b).NE.0) then !NE.=diferente que

I_carga(b,1)=conjg(((M_P_carga(b,nodo_en_calculo)*1000)/M_vol_nodo(b,nodo_en_calculo)
));
                end if
            end    do

        else

            DI=reshape((/(1),(-1),(0),(0),(1),(-1),(-1),(0),(1)/),(/3,3/))

            !write (6,*) nodo_en_calculo;

            Vol_LL_nodo_en_calculo(:,1)=matmul(D,M_vol_nodo(:,nodo_en_calculo))

            do b=1,3
                if (V_existe_cond(b).NE.0) then

I_carga(b,1)=conjg(((M_P_carga(b,nodo_en_calculo)*1000)/Vol_LL_nodo_en_calculo(b,1)));
                    end if
                end    do

            I_carga=matmul(DI,I_carga);

        end    if

!pause 'termina calculo I_carga barrido regresivo'

```

```

!write (6,*) nodo_en_calculo;
ld.dat
!write (6,*) I_carga;
!write (6,*) M_I_nodo;

! write (6,*) M_vol_nodo;
! write (6,*) M_I_nodo;

!% se calcula la corriente de rama conectado de todos los nodos
!% conectados al nodo_en_calculo
do g=1,num_nodos_conec_nodo_en_calculo

    nodo_m=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila+g);

!% este for es porque en la version de fortran no tiene la funcion de
!% checar en todo un vector si hay un nodo igual esto se utiliza
!% en el siguiente if para ver si el nodo en calculo no esta en
!% nodos_en_nivel_max

ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;
esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;
do xxx=1,num_nodos_en_nivel_max
    if (ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE.1) then
        if (nodos_en_nivel_max(xxx) .NE. nodo_en_calculo) then
            else
                ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
                esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
            end if
        end if
    end do

!% este if es para calcular las corrientes en los nodos que esten en un maximo
!% nivel y haci no calcular corriente de rama
if (esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE. 1) then

    !write (6,*) nodo_en_calculo
    !write (6,*) nodo_m
!pause 'write (6,*)'

!% este if es para identificar conecciones aguas arriba y poder
!% calcular suc corriente de rama
if (vec_ban_p_no_calculo_de_I_adelante(nodo_m) .NE. 1) then
    else

        num_configuracion=cof_M_impedancia_nodo(nodo_m);
        !write (6,*) V_columna_sub_M_impedancia;

guia_v_colum_sub_M_imp=V_columna_sub_M_impedancia(num_configuracion);
do b=1,3
M_c1_x_nodo(:,b)=Matrices_c1(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));

```



```

M_d1_x_nodo(:,b)=Matrices_d1(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));
end do

vol_nodo_m(:,1)=M_vol_nodo(:,nodo_m);
I_nodo_m(:,1)=M_I_nodo(:,nodo_m);

!% se realiza la operacion " In=c*Vm+dm+Im " que es la
!% corriente de rama, y se suman las diferentes ramas aguas abajo
!% del nodo n en "I_nodo"

I_rama=matmul(M_c1_x_nodo,vol_nodo_m)+matmul(M_d1_x_nodo,I_nodo_m);
I_nodo=I_nodo+I_rama;

M_I_rama(:,nodo_m)=I_rama(:,1)

vec_ban_p_no_calculo_de_I_adelante(nodo_en_calculo)=1;

end if

else

vec_ban_p_no_calculo_de_I_adelante(nodo_en_calculo)=1;

end if

end do

I_nodo=I_nodo+I_carga;
M_I_nodo(:,nodo_en_calculo)=I_nodo(:,1)

!write (6,*) 'M_I_nodo',M_I_nodo

end do

nivel_menos_uno=nivel_menos_uno-1;
end do

! write (6,*) M_vol_nodo;
!write (6,*) 'M_I_nodo',M_I_nodo;
! write (6,*) I_carga;
!pause "

!% SE CALCULA EL VALOR DEL NODO_COMPARADOR PARA PODER
!% CALCULAR EL VALOR DEL ERROR

```

```

nivel_menos_uno=1;
do e=1,num_nodos
    vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(e)=0;
end do

do d1=0,0

!%se extraen el número de nodos en el nivel
num_nodos_en_nivel=V_nodos_por_nivel(nivel_menos_uno);

!% se crea el vector "nodos_en_el_nivel" que contiene los nodos
!% en el nivel de observacion (en el que se esta trabajando)
cont_nodos_en_nivel=0;
do e=1,num_nodos
    if (V_nivel(e)==d1) then
        cont_nodos_en_nivel=cont_nodos_en_nivel+1;
        nodos_en_el_nivel(cont_nodos_en_nivel)=e;
    end if
end do

do f=1,num_nodos_en_nivel
    nodo_en_calculo=nodos_en_el_nivel(f);

    guia_nodo_en_calculo_Ifila=Ifila(nodo_en_calculo);
    num_nodos_conec_nodo_en_calculo=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila);

    do g=1,num_nodos_conec_nodo_en_calculo
        nodo_m=Icol(guia_nodo_en_calculo_Ifila+g);

        !% este for es porque en la version de fortran no tiene la funcion de
        !% checar en todo un vector si hay un nodo igual esto se utiliza
        !% en el siguiente if para ver si el nodo en calculo no esta en
        !% nodos_en_nivel_max

        ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;
        esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=0;
        do xxx=1,num_nodos_en_nivel_max
            if (ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE.1) then
                if (nodos_en_nivel_max(xxx) .NE. nodo_en_calculo) then
                    else
                        ban_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
                        esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max=1;
                    end if
                end if
            end do
            !% un if para separar los nodos aguas arriba de los aguas abajo
            !% y delos que se encuentran en ultimos niveles .NE. diferente que
            if ((vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(nodo_m).NE.1) .and.
(esta_nodo_en_calculo_en_nivel_max .NE. 1)) then
                !write (6,*) nodo_m;

```

```

        !% se obtiene la configuracion correspondiente de A y B
        !% para cada tipo de nodo

        !write (6,*)nodo_en_calculo;
        !write (6,*)nodo_m;

        num_configuracion=cof_M_impedancia_nodo(nodo_m);
        !write (6,*) V_columna_sub_M_impedancia;

    guia_v_colum_sub_M_imp=V_columna_sub_M_impedancia(num_configuracion);
        do b=1,3

    M_a1_x_nodo(:,b)=Matrices_a1(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));

    M_b1_x_nodo(:,b)=Matrices_b1(:,(guia_v_colum_sub_M_imp+b-1));
        end do

        !%se extraen los valores de voltage y corriente del nodo alimentado

        vol_nodo_m(:,1)=M_vol_nodo(:,nodo_m);
        I_nodo_m(:,1)=M_I_nodo(:,nodo_m);

        !% se realiza el calculo del voltage en los nodos conectados al
        !% nodo alimentado "  $V_n=A*V_m+B*I_m$  "

    vol_nodo_comparacion=matmul(M_a1_x_nodo,vol_nodo_m)+matmul(M_b1_x_nodo,I_nodo_m);

        vec_ban_p_no_calculo_de_vol_inverso(nodo_en_calculo)=1;
        end if
    end do
end do

nivel_menos_uno=1+nivel_menos_uno;

end do

!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

!%SE CALCULA EL ERROR

!XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
vol_nodo_alimentado(:,1)=M_vol_nodo(:,nodo_alimentado);
!write (6,*) vol_nodo_comparacion;

diferencia_nodo_ali_comp=(vol_nodo_alimentado-vol_nodo_comparacion);

mag_dif(:,1)=real(diferencia_nodo_ali_comp(:,1));
imag_dif(:,1)=imag(diferencia_nodo_ali_comp(:,1));
suma_mag_dif=0;

```

```

suma_imag_dif=0;

do cont=1,3
if (mag_dif(cont,1) .GE. (0)) then
    suma=mag_dif(cont,1);
else
    suma=mag_dif(cont,1)*(-1);
end if
suma_mag_dif=suma_mag_dif+suma;
end do

do cont=1,3
if (imag_dif(cont,1) .GE. (0)) then ! >= .GE.
    suma=imag_dif(cont,1);
else
    suma=imag_dif(cont,1)*(-1);
end if
suma_imag_dif=suma_imag_dif+suma;
end do

!write (6,*) suma_mag_dif
!write (6,*) suma_imag_dif

error=sqrt((suma_mag_dif*suma_mag_dif)+(suma_imag_dif*suma_imag_dif));

!write (6,*)      'iteracion', iter
!write (6,*)      "
!write (6,*)      M_vol_nodo
!write (6,*)      "

end do ! while

!write (6,*) 'iteracion', iter

!AJUSTE DE VOLTAGE _Del_Est

do a=1,num_nodos
    if (conexcion_del_circuito(a)==1) then
        M_vol_nodo(:,a)=matmul(D,M_vol_nodo(:,a))
    else
        end if
end do

vol_base=(1.0/vol_base)

M_vol_nodo=vol_base*M_vol_nodo

write (6,*)"

```

```

write (6,*)'          XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (6,*)"
write (6,*)'          VOLTAJES NODALES DEL CIRCUITO '
write (6,*)"
write (6,*)'          XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (6,*)"
write (6,*)' NODO      FASE A          FASE B          FASE C '
write (6,*)"
write (6,*)'      VOL   ANG      VOL   ANG      VOL   ANG '
write (6,*)"
write (6,*)"

```

```
do a=1,num_nodos
```

```

write (6,300)
a,abs(M_vol_nodo(1,a)),ANGULO(M_vol_nodo(1,a)),abs(M_vol_nodo(2,a)),ANGULO(M_v
ol_nodo(2,a)),abs(M_vol_nodo(3,a)),ANGULO(M_vol_nodo(3,a))
! write (15,300)
a,abs(M_vol_nodo(1,a)),ANGULO(M_vol_nodo(1,a)),abs(M_vol_nodo(2,a)),ANGULO(M_v
ol_nodo(2,a)),abs(M_vol_nodo(3,a)),ANGULO(M_vol_nodo(3,a))
end do

```

```
300 format (4x,I2,4x,f8.2,1x,f7.2,8x,f8.2,2x,f7.2,8x,f8.2,2x,f7.2)
```

```

write (6,*)"
write (6,*)'          XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (6,*)"
write (6,*)'          CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO '
write (6,*)"
write (6,*)'          XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (6,*)"
write (6,*)' NODO RESEPTOR  FASE A          FASE B          FASE C '
write (6,*)"
write (6,*)'      I   ANG      I   ANG      I   ANG '
write (6,*)"

```

```
do a=1,num_nodos
```

```

es_linea=V_tipo_elemento(a)
if ((es_linea==1) .and. (nodo_alimentado.NE.a)) then
write (6,302)
a,abs(M_I_rama(1,a)),ANGULO(M_I_rama(1,a)),abs(M_I_rama(2,a)),ANGULO(M_I_rama(2,
a)),abs(M_I_rama(3,a)),ANGULO(M_I_rama(3,a))
else
end if
end do

```

```
302 format (6x,I2,6x,f8.2,1x,f8.2,6x,f7.2,2x,f8.2,4x,f8.2,2x,f8.2)
```

```
write (20,*)"
```

```

write (20,*)'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (20,*)"
write (20,*)'          VOLTAJES DEL CIRCUITO '
write (20,*)"
write (20,*)'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (20,*)"
write (20,*)'
write (20,*)' NODO      FASE A          FASE B          FASE C '
write (20,*)'
write (20,*)'      VOL  ANG      VOL  ANG      VOL  ANG '
write (20,*)'

do a=1,num_nodos
  write
  a,abs(M_vol_nodo(1,a)),ANGULO(M_vol_nodo(1,a)),abs(M_vol_nodo(2,a)),ANGULO(M_v
  ol_nodo(2,a)),abs(M_vol_nodo(3,a)),ANGULO(M_vol_nodo(3,a))
end do

write (20,*)"
write (20,*)'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (20,*)"
write (20,*)'          CORRIENTES DE RAMA DEL CIRCUITO '
write (20,*)"
write (20,*)'XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX'
write (20,*)"
write (20,*)'
write (20,*)' NODO RESEPTOR  FASE A          FASE B          FASE C '
write (20,*)'
write (20,*)'      I  ANG      I  ANG      I  ANG '
write (20,*)'

do a=1,num_nodos
  es_linea=V_tipo_elemento(a)
  if ((es_linea==1) .and. (nodo_alimentado.NE.a)) then
    write
    a,abs(M_I_rama(1,a)),ANGULO(M_I_rama(1,a)),abs(M_I_rama(2,a)),ANGULO(M_I_rama(2,
    a)),abs(M_I_rama(3,a)),ANGULO(M_I_rama(3,a))
  else
  end if
end do

end subroutine barrido_P_R

```

Código 4A.- sub-rutina barrido_P_R

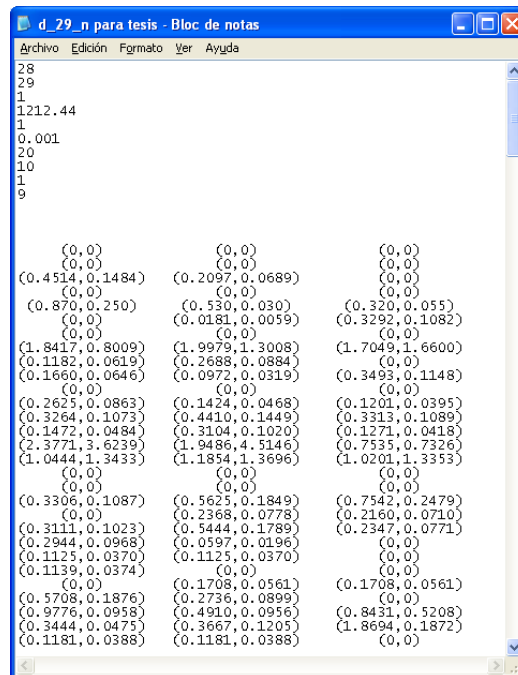
B.1.- Como ingresar y extrer datos del programa realizado

Se muestran las imagenes del archivo de entrada del programa desarrollado, los datos mostrados en la imagen corresponden al sistema de prueba 1 (Figura 4.5).

En figura B22 se encuentran los primeros 10 datos llendo de la parte superior a la inferior son:

- Número de conexiones
- Número de nodos
- Nodo fuente
- Tensión nominal
- Número de subMatrices de impedancia
- Tolerancia
- Número de iteraciones maxima
- Número de nodos en el nivel maximo
- Nodos en nivel mínimo
- Número del nivel máximo

El segundo bloque igualmente de la figura B22 muestra las cargas trifasicas en los 29 nodos de la red en faceo ABC en forma de Potencia constante activa y reactiva $P +jQ$, la carga del nodo 1 en el primer renglón, del nodo 2 en el segundo renglón y asi sucesivamente hasta el nodo 29 en el renglón 29.



```
d_29_n para tesis - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
28
29
1
1212.44
1
0.001
20
10
1
9
(0,0) (0,0) (0,0)
(0,0) (0,0) (0,0)
(0.4514,0.1484) (0.2097,0.0689) (0,0)
(0,0) (0,0) (0,0)
(0.870,0.250) (0.530,0.030) (0.320,0.055)
(0,0) (0.0181,0.0059) (0.3292,0.1082)
(0,0) (0,0) (0,0)
(1.8417,0.8009) (1.9979,1.3008) (1.7049,1.6600)
(0.1182,0.0619) (0.2688,0.0884) (0,0)
(0.1660,0.0646) (0.0972,0.0319) (0.3493,0.1148)
(0,0) (0,0) (0,0)
(0.2625,0.0863) (0.1424,0.0468) (0.1201,0.0395)
(0.3264,0.1073) (0.4410,0.1449) (0.3313,0.1089)
(0.1472,0.0484) (0.3104,0.1020) (0.1271,0.0418)
(2.3771,3.6239) (1.9486,4.5146) (0.7535,0.7326)
(1.0444,1.3433) (1.1854,1.3696) (1.0201,1.3353)
(0,0) (0,0) (0,0)
(0,0) (0,0) (0,0)
(0.3306,0.1087) (0.5623,0.1849) (0.7542,0.2479)
(0,0) (0.2368,0.0778) (0.2160,0.0710)
(0.3111,0.1023) (0.5444,0.1789) (0.2347,0.0771)
(0.2944,0.0968) (0.0597,0.0196) (0,0)
(0.1125,0.0370) (0.1125,0.0370) (0,0)
(0.1139,0.0374) (0,0) (0,0)
(0,0) (0.1708,0.0561) (0.1708,0.0561)
(0.5708,0.1876) (0.2736,0.0899) (0,0)
(0.9776,0.0958) (0.4910,0.0556) (0.8431,0.5208)
(0.3444,0.0475) (0.3667,0.1205) (1.8694,0.1872)
(0.1181,0.0388) (0.1181,0.0388) (0,0)
```

Figura B.22.- Datos de entrada

En la figura B23 se muestran primeramente cuatro columnas estas son correspondientes a los vectores:

“*cof_M_impedancia_nodo*”.- este vector dice el número en que esta acomodada la matriz correspondiente a la impedancia de la línea del tramo a tratar, dentro de la matriz generalizada *M_impedancia_nodo* siendo esta la que almacena todas las impedancias de línea.
 “*conexcion_del_circuito*”.- este vector indica como es la conexión del circuito en el tramo de seccion analizada, 1 para delta y 2 para estrella. *Ifila* y *V_nivel*.- Estos dos vectores son explicados en el apartado 3.1.

Después se aprecia una columna de 10 renglones el cual es el vector “*V_nodos_x_nivel*” el cual se explica en el apartado 3.1; Más abajo se observa una matriz de 3 x 3 la cual es la matriz “*M_impedancia_nodo*”. Finalmente en la parte inferior se aprecia un vector columna de 10 renglones mallado “*nodos_en_nivel_max*” el cual contiene los nodos posicionados en un nivel Máximo para la rama en el que se encuentra.

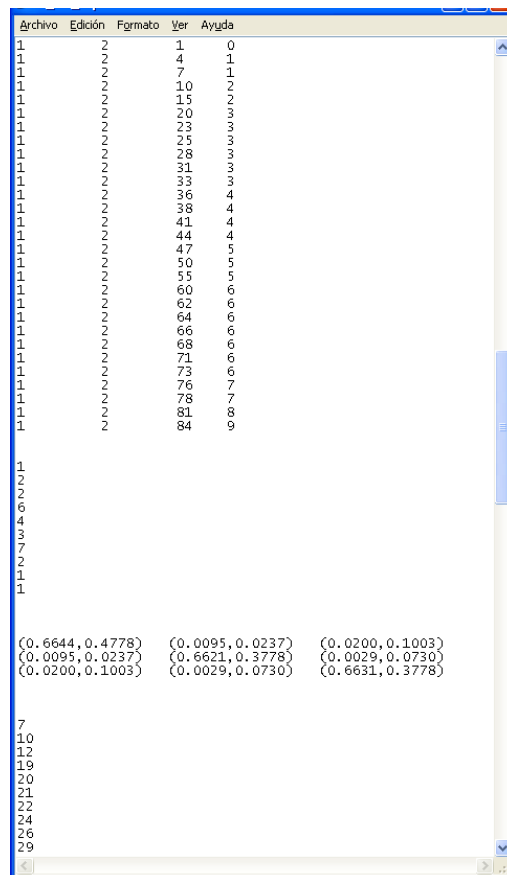


Figura B.23.- Datos de entrada

En la figura B.24 se observa un vector "Icol" el cual se explica en el apartado 3.1

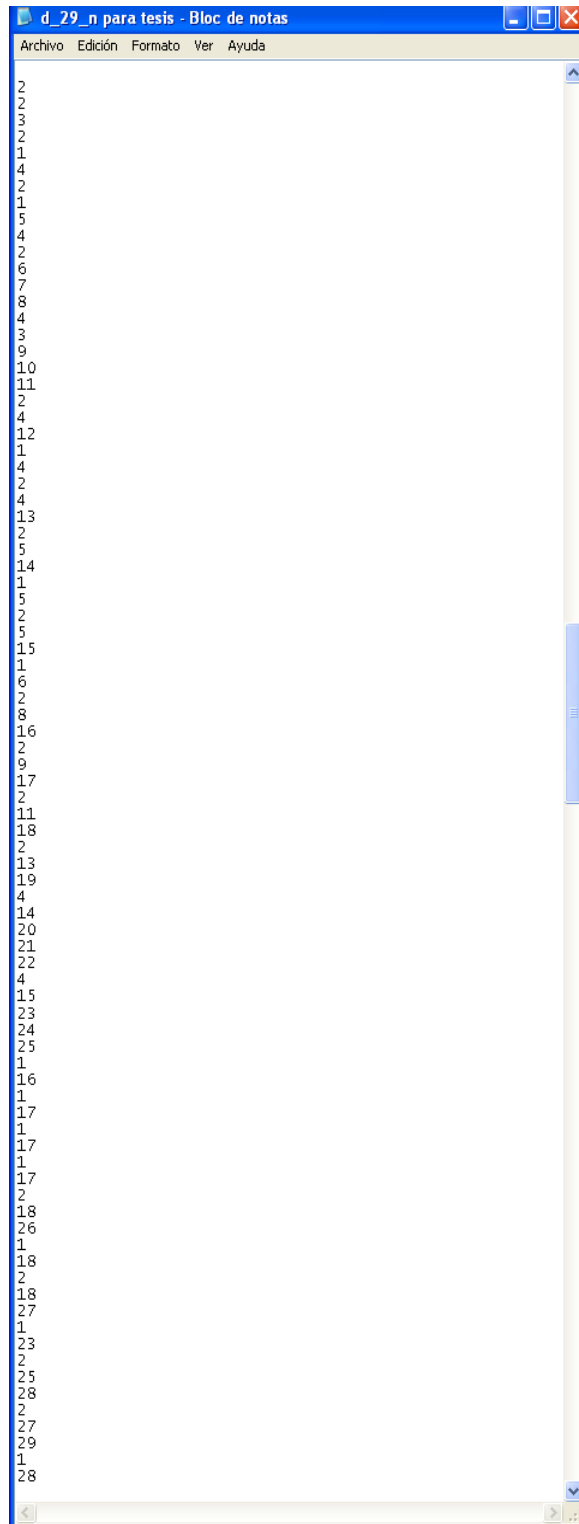


Figura B.24.- Datos de entrada

En la figura B.25 se observan dos ceros, el primero significa el vector “M_impedancia_es_transformador” como no hay transformadores su numero es 0; el segundo sero da las especificaciones del transformdor a conecta pero igualmente es 0 ya que este circuito de prueba no contiene transformadores.

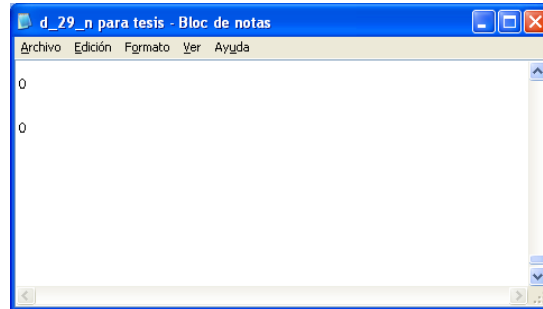


Figura B.25.- Datos de entrada

APENDICE C

Descripción de los algoritmos observados

C.1 Algoritmo de flujo de potencia por reducción de Norton para red para sistemas radiales (n-pars)

La solución al problema de flujo de potencia es generalmente considerada como la solución a un conjunto de ecuaciones balanceadas de potencia. Es posible ver el problema desde un punto de vista de teoría de circuitos. El sistema de distribución, es un circuito compuesto de una fuente de tensión (trifásica), varios elementos de impedancia constante, posiblemente algunos elementos de corriente constante y algunos de los elementos con una relación no-lineal entre el voltaje y la corriente (los elementos de potencia constante). Si cada elemento no-lineal es sustituido por un elemento lineal, el nuevo sistema se puede resolver mediante los métodos estándar nodales para el análisis de circuitos lineales.

El método de reducción de red estudiado en este apartado aprovecha de la estructura radial en la solución del "equivalente" de circuito lineal. En lugar de utilizar el método general nodal, la técnica de reducción de red se aplica recursivamente para encontrar un punto lineal equivalente para cada bus. Estos equivalentes se utilizan para resolver tensiones y corrientes de la red. El nombre N-PARS se utilizó en [3] para referirse a la red de reducción del algoritmo de esta clase.

C.1.1 Descripción del algoritmo

El algoritmo general (N-PARS), se muestra en la tabla C.1, consta de tres pasos básicos que se repiten hasta que se logre la convergencia.

Tabla C.1.- Método de reducción de la red (N-PARS)

Algoritmo N-PARS	
1	Iniciar todos los voltajes de bus.
2	Linealizar el sistema, basado en corrientes de bus y voltajes.
3	Crear el equivalente del circuito en cada bus.
4	Calcular todos los voltajes y corrientes.
5	Repetir los pasos 1 a 3 hasta que se logre la convergencia.

C.1.2 Convergencia

Las características de convergencia de N-PARS son exactamente las mismas que las de los métodos de Z-matriz [2, 16], incluyendo el método de Gauss implícito. El método de N-PARS resuelve el circuito lineal obtenido mediante la sustitución de todos los dispositivos PQ constante con su equivalente corriente de inyección en cada iteración. En un circuito sin los componentes de potencia constante, la solución es obtenida en una sola iteración y la convergencia no es un problema. Para el caso más general, incluidos los dispositivos de potencia constante, el comportamiento de la convergencia se discute en [17]. La conclusión general de [17] es que la convergencia es mejor cuando la potencia de carga es pequeña, una condición que se cumple por el sistema de distribución típico.

C.2 Método Newton-Raphson

La formulación tradicional del problema de flujo de potencia en distribución es un conjunto de ecuaciones de balance de potencia en cada bus de carga en función de los voltajes de bus [16]. S_{bus} es el vector de potencia inyectada en el sistema por elementos de potencia constante, I_{bus} es el vector de inyección de corriente por elementos de corriente constante y Y_{bus} es la matriz de admitancias de bus que contiene todos los elementos de impedancia constante. La ecuación de balance de potencia puede ser escrita en términos del vector:

$$S_{bus} = V_{bus} \cdot (Y_{bus} V_{bus} - I_{bus})^* \quad C.6$$

El problema de flujo de potencia requiere encontrar un vector de voltaje de bus " V_{bus} " que cumpla este balance de potencia. En términos generales, el método de Newton-Raphson [14,17,18,19] resuelve este problema mediante el establecimiento de la matriz jacobiana y la obtención de las raíces a través del método de Newton. El conjunto de ecuaciones del método Newton-Raphson consiste en la ecuación (C.7) asociada con la carga de los buses, las incógnitas son los voltajes de bus en los nodos de carga, ya que la fuente de tensión se supone de voltaje controlado.

$$F(V_{bus}) = V_{bus} \cdot (Y_{bus} V_{bus} - I_{bus})^* - S_{bus} = 0 \quad C.7$$

C.2.1 Descripción del Algoritmo.

Para un estudio de flujos de potencia por el método de Newton Raphson se expresarán los voltajes de barra y las admitancias en línea en forma polar. Para calcular P_i , Q_i que constituyen las potencias real y reactiva totales que entran a la red a través de la barra i se tienen las ecuaciones 2.7 y 2.8.

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \partial_n - \partial_i) \quad C.8$$

$$Q_i = |V_i|^2 B_{ii} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^N |V_i V_n Y_{in}| \text{sen}(\theta_{in} + \partial_n - \partial_i) \quad C.9$$

Sea P_{gi} la potencia programada que se esta generando en la barra i y P_{di} la potencia que demanda la carga en esa barra. Entonces la expresión $P_{i,prog} = P_{gi} - P_{di}$ da la potencia programada total que esta siendo inyectada dentro de la red en la barra i se nombra al valor calculado de P_i como $P_{i,calc}$ y se llega a la definición del error ΔP_i como el valor programado $P_{i,prog}$ menos el valor calculado $P_{i,calc}$ y de la misma manera para la potencia reactiva en la barra i .

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} \quad C.10$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} \quad C.11$$

Se considera que en las barras de carga con demandas conocidas, se tienen que calcular dos variables de estado δ_i y $|V_i|$ en la solución de flujos de potencia. En las barras de carga que no son de compensación ni de generación, los valores estimados de δ_i y $|V_i|$ se consideran de inicio plano ($1 \angle 0^\circ$).

Los errores que componen al vector Δg se expresan como:

$$\Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n |V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \frac{\Delta |V_j|}{|V_j|} \quad \text{C.12}$$

$$\Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} \Delta \delta_j + \sum_{j=1}^n |V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \frac{\Delta |V_j|}{|V_j|} \quad \text{C.13}$$

Cada barra del sistema que no es de compensación, ni voltaje controlado tiene dos ecuaciones ΔP_i y ΔQ_i .

Las barras de voltaje controlado se pueden tomar en cuenta fácilmente si se tiene la forma polar de la ecuaciones de flujos de potencia, si la barra i del sistema es de voltaje controlado entonces la $|V_i|$ tiene un valor constante especificado por lo tanto la corrección del voltaje $\Delta |V_i|/|V_i|$ siempre debe ser cero en consecuencia esta columna de la jacobiana siempre será multiplicada por cero y así puede ser eliminada, la barra del nodo slack tiene valores especificados para δ_i y $|V_i|$. Al juntar todas las ecuaciones de error en forma de una matriz-vector se llega a la jacobiana, correcciones, errores:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{cc}
 \downarrow J_{J1} & \downarrow J_{J2} \\
 \left[\begin{array}{cc|cc}
 \frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} & \dots & \frac{\partial P_i}{\partial \delta_n} & |V_j| \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \dots |V_n| \frac{\partial P_i}{\partial |V_n|} \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial P_n}{\partial \delta_j} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & |V_j| \frac{\partial P_n}{\partial |V_j|} \dots |V_n| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \\
 \hline
 \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} & \dots & \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_n} & |V_j| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \dots |V_n| \frac{\partial Q_i}{\partial |V_n|} \\
 \vdots & & \vdots & \vdots \\
 \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_j} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & |V_j| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_j|} \dots |V_n| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}
 \end{array} \right] & \begin{bmatrix} \Delta \delta_i \\ \Delta \delta_n \\ \frac{\Delta |V_i|}{|V_i|} \\ \frac{\Delta |V_n|}{|V_n|} \end{bmatrix} & = & \begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \\
 \uparrow J_{J1} & & \uparrow J_{J2} & \\
 \text{Jacobiana} & & \text{Correcciones} & \text{Errores}
 \end{array}
 \end{array}$$

Figura C.1.- Representación de la matriz Jacobiana y vectores: correcciones y error

Las ecuaciones que calculan los valores de los elementos de la matriz Jacobiana se describen en [16] y [17]. Con la construcción de la matriz Jacobiana se sigue el procedimiento que se muestra en la tabla C.3 la cual muestra El método estándar de Newton

Tabla C.3.- Método de Newton

Solución de $F(x)=0$ por método de Newton	
1	Inicializar voltajes de barra.
2	Evaluar $F(i)=F(x(i))$.
3	Alto si $\ F(i) \ \leq$ alguna tolerancia
4	Evaluar el jacobiano $J^{(i)} = \left. \frac{\delta F}{\delta x} \right _{x^{(i)}}$
5	Resolver $J^{(i)} s^{(i)} = -F^{(i)}$
6	Realizar $x^{(i+1)} = x^{(i)} + s^{(i)}$
7	Realizar $i=i+1$ e ir a el paso 3 hasta lograr la convergencia

C.3 Algoritmos para flujo de potencia desacoplado rápido para sistemas radiales (departs)

Uno de los más ampliamente utilizados algoritmos de flujo de potencia en toda la industria de energía es el método de Newton desacoplado rápido propuesto en 1974 en [20]. Este método explota algunas de las propiedades numéricas de la formulación estándar de flujo de potencia para hacer simplificaciones que permitan un ahorro significativo en el cálculo sobre el método estándar de Newton. Por desgracia, este enfoque no es generalmente adecuado para las redes de distribución radial, a menudo hay malos acondicionamientos, problemas debido a la formulación y a las suposiciones necesarias para las simplificaciones utilizadas en el método estándar de Newton desacoplado rápido [3].

Los métodos presentados en [3] muestran una clase de algoritmos que aprovechan la estructura topológica radial para reducir el número de ecuaciones e incógnitas en la formulación. Estos algoritmos también se aprovechan de la estructura numérica de la nueva formulación para reducir aún más el cálculo necesario para cada iteración. Esta clase de algoritmos serán referidos como: Algoritmos de flujo de potencia desacoplado rápido de Sistemas radiales (DePARS) y esta sección estudia las dos variantes de DePARS “VI-DePARS e I-DePARS ”.

C.3.1 Descripción del algoritmo.

El método desacoplado rápido estándar utilizado en los sistemas de transmisión se basa en el conocido método de Newton [18] para resolver ecuaciones no-lineales. En este caso, las ecuaciones no-lineales que se resuelven son las ecuaciones de balance de potencia que se especifica que en cada tipo de bus, la potencia compleja generada menos la potencia absorbida por la carga, debe ser igual a la potencia inyectada en el resto de la red. En un sistema de distribución con un bus fuente y muchos buses de carga, la tradicional formulación de flujo de potencia tendría seis ecuaciones para cada bus de carga, balanceando la parte real y reactiva en cada una de las tres fases. El tradicional método desacoplado rápido estándar para sistemas de transmisión mejora en el método estándar de Newton, que se muestra en la tabla C.3, haciendo la simplificación de las aproximaciones que reducen la carga computacional para el paso 4 y paso 5, sin embargo, DePARS^[1] también utiliza una formulación diferente de ecuaciones de flujo de potencia que explotan la estructura de la topológica radial de la red resultando en un número reducido de ecuaciones e incógnitas.

La tabla C.4 da una vista de DePARS y sus pasos básicos. Los pasos 4, 5 y 6 del original método de Newton (tabla C.3) se han simplificado y agrupado en el paso 2 de DePARS (tabla C.4). En el lado derecho de la tabla C.4 los detalles se han mantenido en general para cubrir las dos variaciones del método. La primera opción en cada paso es la utilizada por VI-DePARS. Para VI DePARS, las variables independientes son los voltajes. Las ecuaciones de flujo de potencia corrigen la diferencia de tensión, esta debe ser cero en la solución. Si esta diferencia es diferente de cero puede ser utilizado para actualizar los voltajes de la próxima iteración.

Tabla C.4.- Algoritmo de flujo de potencia desacoplado rápido para sistemas radiales.

Algoritmo DePARS		
	Iniciar variables independientes:	Inicializar los voltajes. o Iniciar corrientes o flujos de potencia inyectada en cada rama.
1	Evaluar ecuaciones de flujo de potencia:	Calcular el desfase de voltaje en cada rama. o Calculo de las corrientes o flujos de potencia que se inyectan
2	Solución actualizado calculada:	Actualizar los voltajes finales o Actualización de las corrientes o flujos de potencia que se inyectan
Repetir los pasos 1 a 2 hasta que se logre la convergencia.		

C.3.2 Alimentador simple

Considere primero una red de una simple rama trifásica balanceada con N buses de carga, como se muestra en la Figura C.2. La formulación tradicional de las ecuaciones de flujo de potencia deberían ser $6 \cdot N$ ecuaciones reales y $6 \cdot N$ ecuaciones incógnitas. Sin embargo, no es necesario resolver un gran sistema de ecuaciones no lineales sólo para encontrar todos los voltajes de bus en estado estable ya que V_N determina el resto de voltajes y corrientes en el sistema.

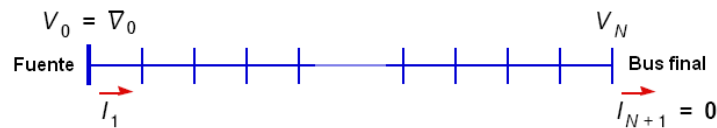


Figura C.2.- ejemplo de alimentador radial simple

Utilizando el mismo procedimiento utilizado por V-I-PARS en la Sección C.2, "barrido progresivo - regresivo", todos los voltajes y corrientes se actualizan mediante la aplicación de (C.14) en cada bus, comenzando del bus final y avanzando hacia la fuente. Este procedimiento es:

$$\begin{aligned}
w_{N-1} &= g_N(w_N) = g_N\left(\begin{bmatrix} V_N \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\right) \\
w_{N-2} &= g_{N-1}(w_{N-1}) = g_{N-1} \cdot g_N\left(\begin{bmatrix} V_N \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\right) \\
&\vdots \\
w_0 &= \begin{bmatrix} V_0 \\ I_1 \end{bmatrix} = g_1(w_1) = g_1 \cdot \dots \cdot g_{N-1} \cdot g_N\left(\begin{bmatrix} V_N \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}\right)
\end{aligned}
\tag{C.14}$$

Aquí, tanto la fuente de voltaje V_0 y la fuente de corriente I_1 se expresan como funciones del voltaje final. Para V-I-PARS, la corriente $\tilde{I}_1(V_N)$ es de interés primordial, ya que se utiliza durante el barrido progresivo para actualizar el voltaje final V_N . Para VI-DePARS, el voltaje $\tilde{V}_0(V_N)$ es de primordial importancia, ya que se utiliza para el cálculo del desfase. En la solución, la diferencia entre el cálculo del voltaje de la fuente $\tilde{V}_0(V_N)$ y el voltaje especificado de la fuente debe ser cero. La ecuación del error de flujo de potencia, puede ser escrito como:

$$F(V_N) = \tilde{V}_0(V_N) - \bar{V}_0 = 0 \tag{C.15}$$

C.3.3 Variaciones de DePARS

Hay dos variaciones al DePARS dados en la Tabla C.5. El primer método “VI-DePARS” usa un barrido regresivo para la función de evaluación y una aproximación de Newton para la actualización de las variables independientes en lugar hacer un barrido progresivo de V-I-PARS. El segundo método “I-DePARS” utiliza un barrido progresivo para la función de evaluación y una de aproximación de Newton, en lugar de un barrido regresivo. La tabla C.5 resume las dos variaciones.

Tabla C.5.- Formulaciones para DePARS

Algoritmo	Basado en	Variable Independiente	Función de evaluación
VI-DePARS	Voltajes	Voltaje final de cada rama	Diferencia de voltaje de fuente en dos iteraciones seguidas
I-DePARS	Corriente	Corriente de rama	Diferencia de corrientes en dos iteraciones seguidas

C.3.3.1 VI-DePARS

Para VI-DePARS se calcula la diferencia de voltaje al comienzo de cada rama en función de los voltajes finales y se basa en corrientes como opuesto al flujo de potencia, para un sistema que consta de un único alimentador, se utiliza C.16 para actualizar los voltajes finales directamente de la diferencia de voltaje de la fuente.

$$s_i = s_{i-1} - F_i \quad \text{C.16}$$

Sin embargo, en la extensión a una estructura radial general, se debe actualizar el voltaje final de todas las ramas en cada iteración, las ecuaciones asociadas con cada rama se resuelven una por una. Una vez que se logra la convergencia de todas las ramas del niveles l , el nivel $l-1$ es resuelto. Cuando todas las ramas se han resuelto el proceso se repite.

C.3.3.2 I-DePARS

En el alimentador simple de la Figura C.2, hay dos condiciones límite: la fuente de voltaje es una constante y la corriente final es cero. La primera variación de DePARS se basa en el uso de la condición de frontera al final de la rama para calcular en un barrido regresivo el valor de la fuente, obteniendo una diferencia de voltaje, de la fuente en función del voltaje final. I-DePARS toma el enfoque contrario. La fuente de voltaje como condición de frontera en un barrido regresivo para obtener una diferencia de corriente en el final de la rama en función de la corriente inyectada a la fuente.

En este caso, las variables independientes son las corrientes inyectadas en el comienzo de cada rama. La función de evaluación es equivalente al barrido progresivo y la aproximación de Newton como actualización de las variables independientes, en lugar de un barrido regresivo.

C.5 Descripción de los sistemas de prueba

Dos sistemas de prueba fueron utilizados en [3] para evaluar el desempeño de los algoritmos de flujo de potencia que se examinan. Las redes B y J proceden de dos modelos diferentes (J más detallada), de NYSEG's [21] sistema de distribución en Elmira, Nueva York. El sistema de prueba J utiliza los datos el pico de carga del verano de 1993, y es el principal conjunto de datos utilizados. Estos resultados presentados se referirán como: prueba J. La tabla 2.6 ofrece un resumen de la prueba J realizada en [3].

La otra red de distribución es utilizada para estudiar el comportamiento de los algoritmos en relación con un tamaño menor de red [3]. Los datos de este sistema se deriva del modelo proporcionado por Rochester Gas & Electric en Nueva York y será referido como: prueba B.

Tabla C.6.- Datos de la prueba J

ID	bus	Nodo	Rama	Transformador	Potencia de carga		Perdida potencia real	Magnitud de voltaje
					P(kW)	Q(kVAR)		
A	63	135	32	---	710.4	-276.8	1.04%	0.98 p.u.
B	125	249	26	---	1673.9	-650.7	1.74%	0.97 p.u.
C	204	348	101	Delta-estrella aterrizada	1154.2	-115.0	2.49%	0.93 p.u.
D	242	423	66	---	4007.7	1676.8	2.13%	0.94 p.u.
E	380	754	97	---	4524.6	1187.1	0.74%	0.98 p.u.
F	446	811	123	---	6807.7	2042.5	2.58%	0.94 p.u.
G	293	829	85	estrella aterrizada - Delta	29227.2	11214.7	1.34%	0.91 p.u.
H	552	1031	139	---	4696.7	830.6	2.34%	0.89 p.u.
I	599	1063	149	---	3962.8	-1603.9	1.88%	0.94 p.u.
J	396	1133	108	estrella aterrizada - Delta	29116.3	9757.4	2.15%	0.99 p.u.
K	1064	1976	284	---	18405.0	7799.9	2.95%	0.87 p.u.