



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

*“MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES
DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO
PROGRAMACIÓN DINÁMICA”*

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

PRESENTA:

ING. OSCAR MIRANDA URIÓSTEGUI



MÉXICO D.F.

Junio del 2009



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de México, Distrito Federal, el día 24 del mes de Junio del año 2009, el (la) que suscribe OSCAR MIRANDA URIÓSTEGUI alumno(a) del Programa de Posgrado en Ingeniería Eléctrica con número de registro A070407, 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 titulado: "MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO PROGRAMACIÓN DINÁMICA", 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: omuriostegui22@hotmail.com y/o rmotap@ipn.mx.

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

Oscar Miranda Urióstegui
Nombre y Firma



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 24 del mes de Junio 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:

“MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN EMPLEANDO PROGRAMACIÓN DINÁMICA”

Presentada por el alumno:

MIRANDA
Apellido paterno

URIÓSTEGUI
materno

OSCAR
nombre(s)

Con registro:

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

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 OLGÚIN SALINAS

Segundo Vocal

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Tercer Vocal

DR. DAVID SEBASTIAN BALTAZAR

Secretario

DR. DAVID ROMERO ROMERO

Suplente

M. en C. GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



DEDICATORIAS

A mis padres Félix y Celia por darme la oportunidad de existir y dar dirección a mi vida gracias por todo lo que han hecho por mí.

Mis hermanos Jesús y José Manuel que me motivaron a seguir adelante en la realización de mis sueños

Mis tíos José Guadalupe y Margarita por todo el tiempo que me apoyaron y la fortaleza que me daban al estar lejos de casa.

AGRADECIMIENTOS

A dios por darme una vida maravillosa en compañía de mi familia, por darme fuerza y valor en los momentos difíciles.

A mi asesor Dr. Ricardo Mota Palomino por su interés, dirección y consejos en la realización de este trabajo.

A los profesores de la S.E.P.I E.S.I.M.E.- ZAC y los amigos que ahí conocí en especial a Yurai, Vero, Eric, Rubén y Edgar, Gracias por todo amigos.

A P.I.F.I. y al CONACYT, por el apoyo recibido durante la realización de este trabajo

RESUMEN

En este trabajo se presentan los modelos de elementos encontrados en las redes de distribución para ser incorporados a un algoritmo de flujos de potencia trifásico por el método de barrido regresivo/progresivo y conocer las variables de estado del sistema.

El método consiste en numerar los nodos de la red y clasificarlos por niveles, después el voltaje en todos los nodos de la red se hace igual al voltaje del nodo compensador, se calculan las corrientes de nodo demandadas por las cargas, se hace un barrido regresivo calculando las corrientes en todas las ramas de la red. Finalmente, se realiza la actualización de voltajes de los nodos con un barrido progresivo, esto proceso es repetido tantas veces hasta que el sistema converge.

Los capacitores son empleados en las redes para dar soporte de voltaje, liberar capacidad de las líneas y minimizar las pérdidas eléctricas. Los capacitores conmutables son utilizados para la compensación de potencia reactiva cuando la carga es variable y su correcta operación permite optimizar las pérdidas en una red.

Con la automatización de las redes de distribución se pueden obtener las curvas de carga de los alimentadores y con esta información proceder a un análisis previo de despacho de capacitores para la minimización de las pérdidas del día siguiente, semana o mes, considerando las restricciones de voltaje de los nodos del alimentador para una mejor calidad en la energía.

La programación dinámica es una técnica útil en la optimización de problemas que involucran una serie de etapas en la cual la solución óptima está relacionada con las decisiones tomadas en cada etapa.

Mediante la técnica de programación dinámica y con la herramienta de flujos de potencia, se realizan simulaciones de un alimentador en base a un pronóstico de carga para obtener el despacho de capacitores y minimizar las pérdidas totales del sistema en un día.

ABSTRACT

This work shows the element's model found in distribution networks so as to be incorporated to an algorithm of three phase power flow by the backward/forward sweep method and getting the state variables of the system.

The method consist in number all nodes of the network and order them by levels, after that, the voltage in all the nodes becomes equal to the source voltage, the node currents serving by the loads are calculated and a backward sweep is done to calculate all the branch currents in the network. Finally, a forward sweep is done to calculate all the node voltages in the network, this process is repeated until convergence is achieved.

The capacitors are used for giving voltage support, liberating capacity from lines and minimizing electrical lost. The switching capacitors are used for making up for reactive power when the load is variable and his correct operation lets optimizing lost networks.

With the automation of distribution networks the load curves can be obtained from the feeders and with this information makes dispatch capacitors for the lost minimization in the next day, week or month, considering voltage restrictions of the nodes for getting a higher energy quality.

Dynamic programming is a useful technique for solving optimization problems which involves a set of stages in which the optimal solution is relationed whit the decisions taken in each stage.

Applying a dynamic programming and with a power flow tool, feeder simulations are done to apply a load forecast and obtaining the capacitors dispatch to minimize the total lower losses of the system in a day.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIAS	IV
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
ÍNDICE GENERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE TABLAS	XII
GLOSARIO DE TERMINOS	XV
CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	
1.1 Objetivo	1
1.2 Justificación	1
1.3 Estado del arte	2
1.4 Aportaciones	3
1.5 Contenido de la tesis	3
CAPÍTULO 2	5
MODELOS DE ELEMENTOS DE DISTRIBUCIÓN Y FLUJOS DE POTENCIA TRIFÁSICOS POR EL MÉTODO DE BARRIDO REGRESIVO/PROGRESIVO	
2.1 Introducción	5
2.2 Modelo π de la línea	5
2.2.1 Impedancia serie de líneas aéreas y subterráneas	5
2.2.2 Admitancia en derivación de líneas aéreas o subterráneas	6
2.2.3 Modelo π exacto de la línea	6
2.3 Modelos de carga	8

2.3.1 Cargas conectadas en estrella	9
2.3.1.1 Cargas de potencia real y reactiva constante conectadas en estrella (Y-PQ)	9
2.3.1.2 Cargas de impedancia constante conectadas en estrella (Y-Z)	9
2.3.1.3 Cargas de corriente constante conectadas en estrella (Y-I)	10
2.3.2 Cargas conectadas en delta	11
2.3.2.1 Cargas de potencia real y reactiva constante conectadas en delta (D-PQ)	11
2.3.2.2 Cargas de impedancia constante conectadas en delta (D-Z)	12
2.3.2.3 Cargas de corriente constante conectadas en delta (D-I)	12
2.4 Modelos de transformadores	13
2.5 Modelo del interruptor	17
2.6 Modelo de capacitores en derivación	17
2.7 Modelo de reguladores de voltaje	19
2.8 Flujos de potencia trifásicos en sistemas radiales	20
2.8.1 Flujos de potencia trifásicos por el método de barrido regresivo/progresivo	21
CAPÍTULO 3	25
DESPACHO DE CAPACITORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EMPLEANDO PROGRAMACIÓN DINÁMICA	
3.1 Introducción	25
3.2 Formulación del problema	25
3.3 Despacho óptimo de capacitores empleando programación dinámica	28
3.3.1 Localización de trayectorias a través de un diagrama de estado modificado	34
3.3.2 Solución recursiva hacia adelante	39

3.4 Diagrama de bloques del programa	41
3.4.1 Subrutina LEE_DATOS	43
3.4.2 Subrutina CREA_NIVELES	43
3.4.3 Subrutina CONFIGURACION_CONEXION	43
3.4.4 Subrutina DESPACHO	43
3.4.4.1 Subrutina FLUJOS_POTENCIA	43
CAPÍTULO 4	44
PRUEBAS Y RESULTADOS	
4.1 Solución de flujos de potencia del sistema radial de 13 nodos	44
4.2 Solución de flujos de potencia del sistema radial de 123 nodos	46
4.3 Minimización de pérdidas en un alimentador de 33 nodos con restricciones de voltaje	52
CAPÍTULO 5	59
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
5.1 Conclusiones	59
5.2 Aportaciones	60
5.3 Recomendaciones para trabajos futuros	60
REFERENCIAS	61
APÉNDICE A	64
APÉNDICE B	76
APÉNDICE C	81
APÉNDICE D	95

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Modelo π de un segmento de línea	7
Figura 2.2	Carga conectada en estrella	11
Figura 2.3	Carga conectada en delta	13
Figura 2.4	Banco de transformación trifásico	14
Figura 2.5	Banco de capacitores en estrella	17
Figura 2.6	Banco de capacitores en delta	18
Figura 2.7	Numeración de nodos y niveles para una red de distribución radial de 57 nodos	21
Figura 3.1	Alimentador de distribución	27
Figura 3.2	Diagrama de estado de N ($N = 24$) escenarios para los capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 1$ para todos los capacitores	30
Figura 3.3	Diagrama de estados modificados y búsqueda de trayectorias para su solución mediante programación dinámica	31
Figura 3.4	Diagrama de estados modificados para $K_i = 2$ y $C_i = 4$	35
Figura 3.5	Estados modificados que puede alcanzar el estado $X'_{2,17}$ cuando $K_i = 2$ y $C_i = 4$	39
Figura 3.6	Diagrama de flujo del algoritmo de programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores	40
Figura 3.7	Diagrama de boques del programa	42
Figura 4.1	Alimentador de distribución trifásico de 13 nodos	44
Figura 4.2	Alimentador de distribución de 123 nodos	47
Figura 4.3	Alimentador de distribución de 33 nodos	52
Figura A-1	Transformador con relación de transformación 10:1	64
Figura A-2	Autotransformador elevador	64
Figura A-3	Autotransformador reductor	65

Figura A-4	Control de tap del regulador con base en el nivel de voltaje deseado, ancho de banda y tiempo de espera	66
Figura A-5	Circuito compensador de caída de línea	66
Figura A-6	Regulador de voltaje tipo A en posición elevadora	67
Figura A-7	Regulador de voltaje tipo A en posición reductora	68
Figura A-8	Regulador de voltaje tipo B en posición elevadora	68
Figura A-9	Regulador de voltaje tipo B en posición reductora	69
Figura B-1	Principio de optimalidad de Bellman	76
Figura B-2	Sistema de caminos y costos para el problema de la diligencia	77
Figura D-1	Archivo con los resultados obtenidos	129

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 2.1	Códigos de modelos de carga	8
Tabla 2.2	Conexiones comunes de transformadores y sus matrices constantes	15
Tabla 2.3	Susceptancia constante de unidad de capacitor para banco en estrella y delta	18
Tabla 2.4	Corrientes de línea para los bancos de capacitores trifásicos estrella y delta	19
Tabla 3.1	Estados posibles en un escenario dado para los 4 capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 1$ para todos los capacitores	29
Tabla 3.2	Estados posibles para los escenarios $n \geq K_i$ para los 4 capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 2$ para todos los capacitores	33
Tabla 3.3	Elementos de la <i>matriz de trayectorias de escenarios</i> para $K_i = 1$ y $C_i = 4$	35
Tabla 3.4	Elementos de la <i>matriz de trayectorias de escenarios</i> para $K_i = 2$ y $C_i = 4$	36
Tabla 4.1	Perfiles de voltaje del circuito de 13 nodos	45
Tabla 4.2	Entradas y pérdidas por fase del sistema de 13 nodos	46
Tabla 4.3	Perfiles de voltaje del circuito de 123 nodos	48
Tabla 4.4	Entradas y pérdidas por fase del sistema de 123 nodos	51
Tabla 4.5	Pérdidas por escenario cuando los capacitores están conectados y desconectados	53
Tabla 4.6	Despacho de capacitores óptimo y pérdidas en el alimentador para el caso de $K_i = 1$	54
Tabla 4.7	Voltajes en los escenarios 1-8	55
Tabla 4.8	Voltajes en los escenarios 9-16	56
Tabla 4.9	Voltajes en los escenarios 17-24	57
Tabla A-1	Ecuaciones de voltaje y corriente para el regulador de voltaje tipo A	69
Tabla A-2	Ecuaciones de voltaje y corriente para el regulador de voltaje tipo B	70

Tabla A-3	Signo de a_R en reguladores tipo A y B	71
Tabla A-4	Voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado secundario en función de los voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado primario para conexión de reguladores tipo A en estrella	72
Tabla A-5	Voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado secundario en función de los voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado primario para conexión de reguladores tipo B en estrella	72
Tabla B-1	Solución al problema de la diligencia cuando $n = 4$	70
Tabla B-2	Solución al problema de la diligencia cuando $n = 3$	79
Tabla B-3	Solución al problema de la diligencia cuando $n = 2$	79
Tabla B-4	Solución al problema de la diligencia cuando $n = 1$	79
Tabla C-1	Segmentos de línea para el alimentador trifásico de 13 nodos	81
Tabla C-2	Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 13 nodos	81
Tabla C-3	Cargas distribuidas para el alimentador trifásico de 13 nodos	81
Tabla C-4	Datos de transformadores para el alimentador trifásico de 13 nodos	81
Tabla C-5	Datos de capacitores para el alimentador trifásico de 13 nodos	82
Tabla C-6	Datos del regulador de voltaje para el alimentador trifásico de 13 nodos	82
Tabla C-7	Impedancias del alimentador trifásico de 13 nodos	82
Tabla C-8	Segmentos de línea para el alimentador trifásico de 123 nodos	84
Tabla C-9	Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 123 nodos	86
Tabla C-10	Datos de transformadores para el alimentador trifásico de 123 nodos	88
Tabla C-11	Datos de capacitores para el alimentador trifásico de 123 nodos	88
Tabla C-12	Datos de reguladores de voltaje 1 y 2 para el alimentador trifásico de 123 nodos	89
Tabla C-13	Datos de reguladores de voltaje 3 y 4 para el alimentador trifásico de 123 nodos	89
Tabla C-14	Impedancias del alimentador trifásico de 123 nodos	90
Tabla C-15	Parámetros del sistema y potencias demandadas del alimentador de 33	92

	nodos	
Tabla C-16	Datos de capacitores para el alimentador de 33 nodos	93
Tabla C-17	Escenarios de carga para un periodo de 24 horas	94

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Y-PQ	Carga de potencia real y reactiva constante conectada en estrella
Y-I	Carga de corriente constante conectada en estrella
Y-Z	Carga de Impedancia constante conectada en estrella
D-PQ	Carga de potencia real y reactiva constante conectada en delta
D-I	Carga de corriente constante conectada en delta
D-Z	Carga de impedancia constante conectada en delta
$[Z_{abc}]$	Matriz de impedancias de fase
$[Y_{abc}]$	Matriz de admitancias de fase
$[\mathbb{V}_{LG\ abc}]$	Vector de voltajes de fase línea-tierra
$[\mathbb{I}_{abc}]$	Vector de corrientes de línea
$A_L, [B_L]$	Matrices constantes generalizadas de línea
I_{den}	Matriz identidad
\mathbb{V}	Fasor de voltaje
$ \mathbb{V} $	Magnitud de voltaje
\mathbb{I}	Fasor de corriente
$ \mathbb{I} $	Magnitud de corriente
$[A_T], [B_T]$	Matrices constantes generalizadas para transformadores
$[d_T]$	Matriz constante que relaciona las corrientes de línea del lado de baja con las corrientes de línea del lado de alta de un transformador.
n_i	Relación de vueltas del transformador

$[A_R], [B_R]$	Matrices constantes generalizadas para reguladores
$[d_R]$	Matriz constante que relaciona las corrientes de línea del lado de baja con las corrientes de línea del lado de alta de un regulador.
V_{an}, V_{bn}, V_{cn}	Fasores de voltaje línea-neutro de las fases a, b, c
V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}	Fasores de voltaje línea-línea de las fases ab, bc, ca
I_a, I_b, I_c	Fasores de corriente de línea de las fases a, b, c
I_{ab}, I_{bc}, I_{ca}	Fasores de corriente entre las fases ab, bc, ca
P_a, P_b, P_c	Potencia real de las fases a, b, c
Q_a, Q_b, Q_c	Potencia reactiva de las fases a, b, c
$\theta_a, \theta_b, \theta_c$	Factor de potencia de las cargas de las fases a, b, c
$\theta_{ab}, \theta_{bc}, \theta_{ca}$	Factor de potencia de las cargas de las fases ab, bc, ca
$\delta_a, \delta_b, \delta_c$	Ángulos de voltajes de las fases a, b, c
$\alpha_a, \alpha_b, \alpha_c$	Ángulos de corrientes de las fases a, b, c
Zt_a, Zt_b, Zt_c	Impedancias de transformador monofásico referidas al lado de baja
$Zt_{ab}, Zt_{bc}, Zt_{ca}$	Impedancias de transformadores entre las fases ab, bc, ca
$\Delta S_a, \Delta S_b, \Delta S_c$	Errores de potencia en las fases a, b, c
B_{an}, B_{bn}, B_{cn}	Susceptancia capacitiva de las fases a, b, c
B_{ab}, B_{bc}, B_{ca}	Susceptancia capacitiva de las fases ab, bc, ca
C_t	Total de capacitores en la red
C_i	El i -ésimo capacitor instalado en el alimentador
$S_i(n)$	El estado (conectado/desconectado) del capacitor C_i en la hora n

P_{loss}	Pérdidas totales del alimentador sobre un periodo de 24 horas
V_j	Voltaje en el bus j
V^{\min}	Voltaje mínimo
V^{\max}	Voltaje máximo
K_i	Número máximo permitido de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i en un día
\oplus	Operación OR
$X_{n,m}$	El m -ésimo estado del capacitor en el escenario n
$S'_i(n)$	El número total de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i hacia el escenario n
$X'_{n,m}$	El m -ésimo estado modificado en el escenario n
m_n	El número de estados en el escenario n
$X_{i,optimo}$	El estado a través de la trayectoria óptima
mod	Operación modulo
$f X'_{n,m}$	Las pérdidas mínimas acumuladas hacia $X'_{n,m}$
$X'_{n-1,k}$	El grupo de todos los estados factibles que puede alcanzar $X'_{n,m}$
$R X'_{n-1,k}, X'_{n,m}$	Las pérdidas del alimentador del estado $X'_{n,m}$

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de distribución, la aplicación de capacitores se plantea principalmente para el control de voltaje y reducción de pérdidas eléctricas. Los capacitores se instalan en puntos de las líneas o en la subestación, sin embargo, la ubicación de capacitores en las subestaciones no ayuda en la reducción de pérdidas. Las pérdidas eléctricas son originadas como consecuencia de la resistencia que presentan al flujo de la corriente eléctrica los diferentes elementos y equipos que lo constituyen. El consumo de energía generalmente no es constante durante un tiempo considerable, es decir, fluctúa de forma continua describiendo una curva no uniforme, la cual se denomina curva de carga o gráfica de demanda y depende del tipo de carga demandada por el usuario [1].

En los Sistemas Eléctricos el control de voltaje dentro de límites operativos evita que se dañen los equipos y en ocasiones evita el desabasto temporal de energía eléctrica a un número considerable de usuarios conectados al suministro de energía. Es por eso que se emplean metodologías para el control básico en la operación de redes de distribución. Mantener las magnitudes de voltaje de todos los nodos de la red dentro de límites de operación y minimizar las pérdidas es el principal objetivo en este control; un motivo adicional es evitar los daños que los consumidores sufren debido al suministro de potencia con voltajes que difieren de los valores nominales. Este control es visto desde las siguientes dos perspectivas:

1. Condiciones de tiempo-real de la red (Operación)
2. Planeación de la red de distribución

En los sistemas de distribución, se define el control de voltaje como la aplicación de diferentes estrategias suficientes para mantener la magnitud de los voltajes nodales dentro de los límites establecidos, para diferentes condiciones operativas en el sistema [2,3].

1.1 Objetivo

El objetivo de esta tesis es desarrollar un programa computacional para la solución de flujos de potencia trifásicos en sistemas puramente radiales y aplicar este programa empleando la herramienta de programación dinámica para el despacho de capacitores que permita minimizar las pérdidas totales del sistema en un día manteniendo el voltaje de los nodos de la red dentro de un perfil normal.

1.2 Justificación

Hoy en día los sistemas de distribución requieren de técnicas para resolver el problema de minimización de pérdidas y control de voltaje dentro de valores nominales establecidos por algún estatuto. Esto representa uno de los principales problemas a ser resuelto para evitar posibles apagones, daños a equipos y para tener una mejor calidad en la energía.

Históricamente, dentro del ámbito de la industria eléctrica se ha realizado un gran esfuerzo para mejorar la eficiencia de los sistemas de generación y transmisión, dando muy poca atención hacia las redes de distribución. Tradicionalmente, el costo para mejorar la eficiencia de los sistemas de distribución ha superado a los beneficios, sin embargo, debido a la evolución de la tecnología, se han reducido los costos asociados y por ello, en la actualidad las empresas se encuentran en proceso de implantación de diversas aplicaciones orientadas a mejorar la eficiencia de las redes de distribución.

1.3 Estado del arte

Los capacitores son elementos ampliamente utilizados en la red de distribución para minimizar las pérdidas y liberar la capacidad del sistema mejorando de esta forma el perfil de voltaje en el alimentador [4]. Trabajos previos [5-7], tratan el problema de ubicación de capacitores como un problema de planeación de la red. El propósito es determinar el número, localización y capacidad de los capacitores en derivación en el alimentador tal que, las ganancias totales por reducción de pérdidas de energía y la liberación de capacidad menos el costo total de los bancos de capacitores instalados sea maximizado [5]. El límite de voltaje en los alimentadores de distribución normalmente se considera como una restricción del sistema. Existe un gran número de enfoques para la ubicación de capacitores, tales como programación dinámica, programación no lineal y métodos basados en inteligencia artificial [7].

A diferencia de los numerosos trabajos sobre la ubicación de capacitores desde el punto de vista de planeación de redes de distribución, trabajar en el control en tiempo real en la operación de sistemas de distribución es bastante limitado. En la mayoría de estos trabajos las cargas de los alimentadores se asumen que varían proporcionalmente durante el día. Esto puede ser debido a la carencia de datos en tiempo real de los sistemas. Muchas compañías operan los capacitores en los alimentadores de distribución en forma fija (los capacitores están conectados durante las horas de mayor demanda) en una operación diaria. Esta estrategia no ofrece una solución óptima a la minimización de pérdidas eléctricas, ya que las cargas en los nodos, así como la carga total del alimentador varían con la hora del día, día de la semana y estación del año. Sin embargo, el método es aceptable cuando los datos de carga del alimentador no están disponibles para los operadores del sistema [8].

En la literatura, se han desarrollado varias aproximaciones [8-11] para resolver el problema de control de voltaje/potencia reactiva en un sistema de distribución. Primero, las cargas real y reactiva del transformador principal y el voltaje del bus primario son pronosticados para cada hora [9-11]. En [8], el objetivo es lograr un método de despacho de capacitores óptimo sobre el pronóstico de carga por hora del siguiente día mediante programación dinámica, reduciendo las pérdidas totales del sistema sujeta a restricciones de voltaje. En [9] se plantea el problema de control de voltaje y potencia reactiva al coordinar la operación del cambiador de tap bajo carga de la subestación y el capacitor presente en la subestación empleando programación dinámica. En [11] al igual que en [8] y [9] se formula una metodología empleando programación dinámica para resolver el problema de control de voltaje y potencia reactiva en un sistema de distribución operando adecuadamente el

cambiador de tap bajo carga del transformador principal, el capacitor presente en la subestación y los capacitores de los alimentadores, basado en un pronóstico de carga horaria del alimentador.

Trabajos realizados en la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación en Ingeniería Eléctrica abordan el tema de compensación de potencia reactiva en sistemas de distribución. En [12] se desarrolla una metodología para la localización y tamaño de bancos de capacitores empleando la regla de 2/3. El análisis se efectúa para condiciones de demanda máxima y demanda mínima del sistema en estado estable. En [13] se presenta una metodología integral para la compensación de potencia reactiva reduciendo las pérdidas y mejorando el nivel de voltaje de una red.

1.4 Aportaciones

Se desarrolló un programa de flujos de potencia trifásico que emplea el método de barrido regresivo/progresivo para la solución de las redes de distribución en estado estacionario [15], permitiendo conocer las magnitudes y ángulos en los nodos del sistema. El programa de flujos desarrollado tiene la capacidad de manejar varios elementos de una red de distribución. Se presentan resultados de las simulaciones de dos redes (13 y 123 nodos), las cuales son circuitos de prueba de la IEEE [16] para comparar con los resultados obtenidos del programa.

Se implementó la herramienta de programación dinámica utilizando el programa de flujos de potencia para el despacho de capacitores que minimizan las pérdidas totales en un día de una red ante diferentes escenarios de carga.

1.5 Contenido de la tesis

Esta tesis está conformada por cinco capítulos en los que se describe el trabajo realizado y resultados, así como cuatro apéndices que son útiles para una mejor comprensión de este trabajo.

Capítulo 1 Introducción: En este capítulo se presenta una introducción general, el objetivo, justificación y aportaciones del trabajo y se hace una revisión de la bibliografía existente.

Capítulo 2 Modelos de elementos de distribución y flujos de potencia trifásicos por el método de barrido regresivo/progresivo: En este capítulo se describen los modelos de elementos encontrados en las redes de distribución tales como líneas, cargas, transformadores, reguladores y capacitores en derivación, así como la descripción del método de barrido regresivo/progresivo para la solución de flujos de potencia trifásicos en sistemas radiales.

Capítulo 3 Despacho de capacitores en sistemas de distribución para la minimización de pérdidas empleando programación dinámica: En este capítulo se presenta la formulación general del problema de despacho de capacitores en un alimentador de distribución empleando programación dinámica.

Capítulo 4 Pruebas y resultados: En este capítulo se realiza la simulación de dos redes radiales de 13 y 123 nodos para la solución de flujos de potencia por fase, obteniendo la magnitud y ángulo de todos los nodos de las redes. Además, empleando la formulación de despacho de capacitores se realiza la simulación de una red de 33 nodos en la que se considera que los capacitores son conmutables para minimizar las pérdidas totales del sistema.

Capítulo 5 Conclusiones y recomendaciones: En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones y se plantean recomendaciones para trabajos futuros relacionados con este tema.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE ELEMENTOS DE DISTRIBUCIÓN Y FLUJOS DE POTENCIA TRIFÁSICOS POR EL MÉTODO DE BARRIDO REGRESIVO/PROGRESIVO

2.1 Introducción

Una red de distribución está compuesta por diferentes elementos, ya sean estos elementos serie como son segmentos de línea, transformadores y reguladores de voltaje o elementos en derivación como son cargas puntuales, cargas distribuidas y bancos de capacitores. En este capítulo se presentan los modelos de varios elementos encontrados en las redes de distribución, así como, el método de flujos de potencia de barrido regresivo/progresivo para la obtención de las variables de estado del sistema en estado estable.

2.2 Modelo π de la línea

Para poder aproximar el modelo π de la línea de distribución es necesario calcular antes la impedancia serie y la capacitancia en derivación de la línea. En [17] se desarrollan estas aproximaciones de modelos, de las que a continuación se da una descripción.

2.2.1 Impedancia serie de líneas aéreas y subterráneas

Para un análisis de sistemas de distribución se debe determinar la impedancia serie de las líneas ($Z = R + jX$) ya sean estas aéreas o subterráneas. Para estudiar un alimentador de distribución trifásico desbalanceado, se deben aproximar los modelos de segmentos de línea que pueden ser trifásicos, bifásicos y/o monofásicos. La ecuación (2.1) presenta la matriz de impedancia de fase trifásica desarrollada por Kersting en [17] y [18].

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & z_{ab} & z_{ac} \\ z_{ba} & z_{bb} & z_{bc} \\ z_{ca} & z_{cb} & z_{cc} \end{bmatrix} \frac{\Omega}{milla} \quad (2.1)$$

Si el segmento de línea es un segmento bifásico que consiste de las fases a y c, la matriz de impedancia de fase es como se muestra en la ecuación (2.2), llenando con ceros el renglón y la columna que corresponde a la fase b.

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} z_{aa} & 0 & z_{ac} \\ 0 & 0 & 0 \\ z_{ca} & 0 & z_{cc} \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{milla}} \quad (2.2)$$

Si el segmento de línea es monofásico, por ejemplo para una sola fase b, la matriz de impedancia de fase es como la mostrada en la ecuación (2.3).

$$[z_{abc}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{\Omega}{\text{milla}} \quad (2.3)$$

Además de ser un parámetro de la línea, la matriz de impedancias de fase se emplea para determinar las caídas de voltaje en los segmentos de línea de un alimentador de distribución una vez que las corrientes han sido determinadas.

2.2.2 Admitancia en derivación de líneas aéreas o subterráneas

La admitancia en derivación de una línea está compuesta por la conductancia y la susceptancia capacitiva ($Y = G + jB$). La conductancia generalmente se desprecia porque su valor es muy pequeño comparada con el valor de la susceptancia capacitiva. La ecuación (2.4) muestra la matriz de admitancias en derivación trifásica de fase.

$$[y_{abc}] = \begin{bmatrix} y_{aa} & y_{ab} & y_{ac} \\ y_{ba} & y_{bb} & y_{bc} \\ y_{ca} & y_{cb} & y_{cc} \end{bmatrix} \frac{\mu S}{\text{milla}} \quad (2.4)$$

Al igual que con la matriz de impedancia serie de la línea, en el caso de líneas bifásicas ó monofásicas la matriz de admitancia en derivación tendrá elementos iguales a cero en el correspondiente renglón y columna de la ó las fases faltantes.

2.2.3 Modelo π exacto de la línea

La figura 2.1 muestra el modelo exacto de un segmento de línea aérea o subterránea trifásica, bifásica o monofásica recordando que para líneas bifásicas o monofásicas serán cero los elementos del renglón y columna que corresponden a las fases faltantes.

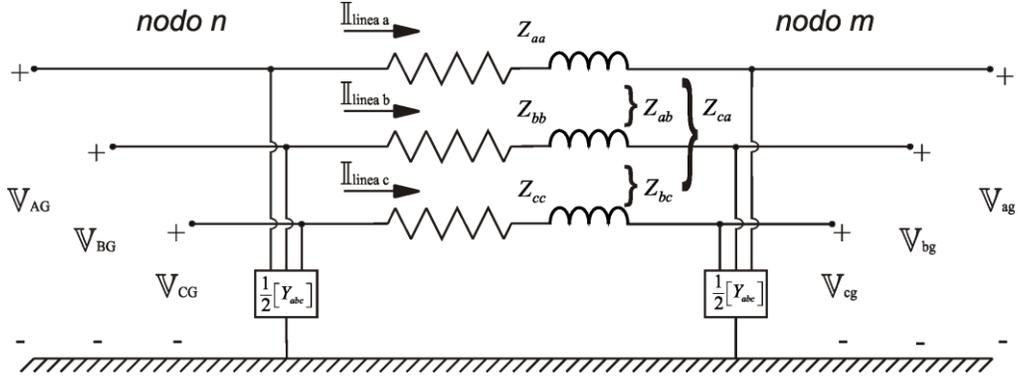


Figura 2.1 Modelo π de un segmento de línea

Los valores de las impedancias y admitancias en la figura 2.1 son el total de la impedancia y admitancia para la línea, es decir, la ecuación (2.1) y la ecuación (2.4) multiplicadas por la longitud del segmento de línea como lo muestran la ecuación (2.5) y la ecuación (2.6).

$$Z_{abc} = [z_{abc}] * longitud = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \Omega \quad (2.5)$$

$$Y_{abc} = [y_{abc}] * longitud = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ba} & Y_{bb} & Y_{bc} \\ Y_{ca} & Y_{cb} & Y_{cc} \end{bmatrix} \mu S \quad (2.6)$$

Para la solución iterativa de flujos de potencia que será desarrollada más adelante es necesario calcular de la figura 2.1 los voltajes línea-tierra en el nodo m como una función de los voltajes línea-tierra en el nodo n y la corriente que circula del nodo n al nodo m . Esta relación se da en la ecuación (2.7).

$$[V_{LG\ abc}]_m = [A_L] \cdot [V_{LG\ ABC}]_n - [B_L] \cdot [I_{abc}]_{nm} \quad (2.7)$$

Donde

$$A_L = \left[I_{den} + \frac{1}{2} Z_{abc} * Y_{abc} \right]^{-1} \quad (2.8)$$

$$[B_L] = [A_L] * [Z_{abc}] \Omega \quad (2.9)$$

$$I_{den} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

En la ecuación (2.7) la notación es tal que las letras mayúsculas A , B y C siempre se referirán al lado *fuentes* (nodo n) del segmento de línea y las letras minúsculas a , b y c siempre se referirán al lado de *carga* (nodo m) del segmento de línea de la figura 2.1

Debido a que el acoplamiento mutuo en cada una de las fases no es igual en un segmento de línea, habrá valores diferentes de caída de tensión para cada una de las fases. Como resultado de esto, los voltajes en un sistema de distribución serán desbalanceados aún cuando las cargas sean balanceadas.

2.3 Modelos de carga

Las cargas en los sistemas de distribución se especifican como la potencia compleja consumida en un nodo particular. Las cargas en los alimentadores pueden ser modeladas como cargas conectadas en estrella o cargas conectadas en delta. Éstas pueden ser trifásicas, bifásicas, o monofásicas y pueden ser balanceadas o desbalanceadas. Las cargas pueden estar conectadas en un nodo (cargas puntuales) o se puede asumir que están uniformemente distribuidas a lo largo de la sección de la línea (cargas distribuidas). Si el tipo de carga es éste último (cargas distribuidas) se puede asumir para la solución de flujos de potencia que toda la carga distribuida está concentrada como carga puntual en un nodo ficticio a la mitad de la sección de la línea, o por otra parte, concentrar la mitad de las cargas distribuidas a los nodos extremos del segmento de línea. Las cargas pueden ser modeladas como cargas de potencia real y potencia reactiva constantes (PQ), cargas de impedancia constante (Z), o cargas de corriente constante (I).

La tabla 2.1 lista los códigos empleados en este trabajo para describir los diferentes tipos de carga [16].

Tabla 2.1 Códigos de modelos de carga

Código	Conexión	Modelo
Y-PQ	Estrella	kW y kVAr constantes
Y-I	Estrella	Corriente constante
Y-Z	Estrella	Impedancia constante
D-PQ	Delta	kW y kVAr constantes
D-I	Delta	Corriente constante
D-Z	Delta	Impedancia constante

2.3.1 Cargas conectadas en estrella

La figura 2.2 muestra el modelo de carga conectado en estrella, de donde, para cada una de las fases se tiene:

$$\text{Fase a: } |S_a| \angle \theta_a = P_a + jQ_a \quad \text{y} \quad |V_{an}| \angle \delta_a \quad (2.11)$$

$$\text{Fase b: } |S_b| \angle \theta_b = P_b + jQ_b \quad \text{y} \quad |V_{bn}| \angle \delta_b \quad (2.12)$$

$$\text{Fase c: } |S_c| \angle \theta_c = P_c + jQ_c \quad \text{y} \quad |V_{cn}| \angle \delta_c \quad (2.13)$$

2.3.1.1 Cargas de potencia real y reactiva constante conectadas en estrella (Y-PQ)

De la figura 2.2, las ecuaciones que definen las corrientes de línea por fase para cargas de potencia real y reactiva constantes conectadas en estrella son:

$$I_a = \left(\frac{S_a}{V_{an}} \right)^* = \frac{|S_a|}{|V_{an}|} \angle (\delta_a - \theta_a) = |I_a| \angle \alpha_a \quad (2.14)$$

$$I_b = \left(\frac{S_b}{V_{bn}} \right)^* = \frac{|S_b|}{|V_{bn}|} \angle (\delta_b - \theta_b) = |I_b| \angle \alpha_b \quad (2.15)$$

$$I_c = \left(\frac{S_c}{V_{cn}} \right)^* = \frac{|S_c|}{|V_{cn}|} \angle (\delta_c - \theta_c) = |I_c| \angle \alpha_c \quad (2.16)$$

En este modelo de carga, los voltajes línea-neutro en un programa de flujos de potencia cambiarán en cada iteración hasta alcanzar la convergencia.

2.3.1.2 Cargas de impedancia constante conectadas en estrella (Y-Z)

La carga de impedancia constante se determina con la potencia compleja especificada y los voltajes línea-neutro nominales.

$$Z_a = \frac{V_{an}^{2 \text{ nom}}}{S_a^*} = \frac{V_{an}^{2 \text{ nom}}}{|S_a|} \angle \theta_a = |Z_a| \angle \theta_a \quad (2.17)$$

$$Z_b = \frac{V_{bn\ nom}^2}{S_b^*} = \frac{V_{bn\ nom}^2}{|S_b|} \angle \theta_b = |Z_b| \angle \theta_b \quad (2.18)$$

$$Z_c = \frac{V_{cn\ nom}^2}{S_c^*} = \frac{V_{cn\ nom}^2}{|S_c|} \angle \theta_c = |Z_c| \angle \theta_c \quad (2.19)$$

Ahora, en un programa de flujos de potencia, las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19) permanecerán constantes para todas las iteraciones hasta que la convergencia se alcance. Las corrientes de carga (corrientes de línea) como función de las impedancias de carga constante están dadas por:

$$I_a = \frac{V_{an}}{Z_a} = \frac{|V_{an}|}{|Z_a|} \angle \delta_a - \theta_a = |I_a| \angle \alpha_a \quad (2.20)$$

$$I_b = \frac{V_{bn}}{Z_b} = \frac{|V_{bn}|}{|Z_b|} \angle \delta_b - \theta_b = |I_b| \angle \alpha_b \quad (2.21)$$

$$I_c = \frac{V_{cn}}{Z_c} = \frac{|V_{cn}|}{|Z_c|} \angle \delta_c - \theta_c = |I_c| \angle \alpha_c \quad (2.22)$$

En este modelo de carga, los voltajes línea-neutro en las ecuaciones (2.20), (2.21) y (2.22) cambiarán en cada iteración hasta alcanzar la convergencia en un programa de flujos de potencia, mientras que las ecuaciones (2.17), (2.18) y (2.19) permanecerán constantes.

2.3.1.3 Cargas de corriente constante conectadas en estrella (Y-I)

En este modelo de carga las magnitudes de las corrientes se calculan con las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.16) asumiendo voltajes nominales, y estas magnitudes de corrientes se mantendrán constantes mientras el ángulo del voltaje (δ) cambia, permaneciendo constante el factor de potencia de la carga (θ). Las ecuaciones que definen este modelo de carga están dadas por:

$$I_a = |I_a| \angle \delta_a - \theta_a \quad (2.23)$$

$$I_b = |I_b| \angle \delta_b - \theta_b \quad (2.24)$$

$$I_c = |I_c| \angle \delta_c - \theta_c \quad (2.25)$$

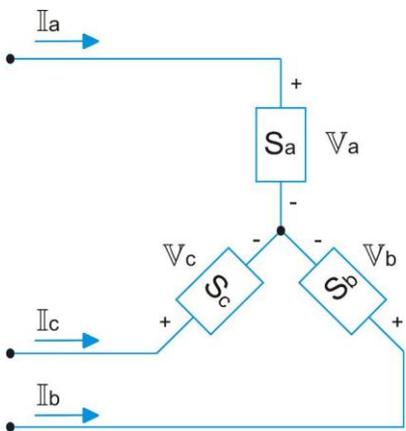


Figura 2.2 Carga conectada en estrella

2.3.2 Cargas conectadas en delta

La figura 2.3 muestra el modelo de carga conectada en delta, de donde, se tiene la siguiente notación:

$$\text{Fase ab: } |S_{ab}| \angle \theta_{ab} = P_{ab} + jQ_{ab} \quad \text{y} \quad |V_{ab}| \angle \delta_{ab} \quad (2.26)$$

$$\text{Fase bc: } |S_{bc}| \angle \theta_{bc} = P_{bc} + jQ_{bc} \quad \text{y} \quad |V_{bc}| \angle \delta_{bc} \quad (2.27)$$

$$\text{Fase ca: } |S_{ca}| \angle \theta_{ca} = P_{ca} + jQ_{ca} \quad \text{y} \quad |V_{ca}| \angle \delta_{ca} \quad (2.28)$$

2.3.2.1 Cargas de potencia real y reactiva constante conectadas en delta (D-PQ)

Las corrientes de las cargas conectadas en delta están definidas por las siguientes ecuaciones:

$$I_{ab} = \left(\frac{S_{ab}}{V_{ab}} \right)^* = \frac{|S_{ab}|}{|V_{ab}|} \angle (\delta_{ab} - \theta_{ab}) = |I_{ab}| \angle \alpha_{ab} \quad (2.29)$$

$$I_{bc} = \left(\frac{S_{bc}}{V_{bc}} \right)^* = \frac{|S_{bc}|}{|V_{bc}|} \angle (\delta_{bc} - \theta_{bc}) = |I_{bc}| \angle \alpha_{bc} \quad (2.30)$$

$$I_{ca} = \left(\frac{S_{ca}}{V_{ca}} \right)^* = \frac{|S_{ca}|}{|V_{ca}|} \angle (\delta_{ca} - \theta_{ca}) = |I_{ca}| \angle \alpha_{ca} \quad (2.31)$$

En este modelo de carga los voltajes línea-línea cambiarán durante cada iteración en un programa de flujos de potencia.

2.3.2.2 Cargas de impedancia constante conectadas en delta (D-Z)

La impedancia de carga constante se determina con la potencia compleja especificada y los voltajes nominales línea-línea.

$$Z_{ab} = \frac{V_{ab}^{2 \text{ nom}}}{S_{ab}^*} = \frac{V_{ab}^{2 \text{ nom}}}{|S_{ab}|} \angle \theta_{ab} = |Z_{ab}| \angle \theta_{ab} \quad (2.32)$$

$$Z_{bc} = \frac{V_{bc}^{2 \text{ nom}}}{S_{bc}^*} = \frac{V_{bc}^{2 \text{ nom}}}{|S_{bc}|} \angle \theta_{bc} = |Z_{bc}| \angle \theta_{bc} \quad (2.33)$$

$$Z_{ca} = \frac{V_{ca}^{2 \text{ nom}}}{S_{ca}^*} = \frac{V_{ca}^{2 \text{ nom}}}{|S_{ca}|} \angle \theta_{ca} = |Z_{ca}| \angle \theta_{ca} \quad (2.34)$$

Ahora, en un programa de flujos de potencia, las ecuaciones (2.32), (2.33) y (2.34) permanecerán constantes para todas las iteraciones hasta que la convergencia se alcance. Las corrientes de carga (corrientes de delta) como función de las impedancias de carga constante están dadas por:

$$I_{ab} = \frac{V_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{|V_{ab}|}{|Z_{ab}|} \angle \delta_{ab} - \theta_{ab} = |I_{ab}| \angle \alpha_{ab} \quad (2.35)$$

$$I_{bc} = \frac{V_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{|V_{bc}|}{|Z_{bc}|} \angle \delta_{bc} - \theta_{bc} = |I_{bc}| \angle \alpha_{bc} \quad (2.36)$$

$$I_{ca} = \frac{V_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{|V_{ca}|}{|Z_{ca}|} \angle \delta_{ca} - \theta_{ca} = |I_{ca}| \angle \alpha_{ca} \quad (2.37)$$

En este modelo de carga, los voltajes línea-línea en las ecuaciones (2.35), (2.36) y (2.37) cambiarán en cada iteración hasta alcanzar la convergencia en un programa de flujos de potencia, mientras que las ecuaciones (2.32), (2.33) y (2.34) permanecerán constantes.

2.3.2.3 Cargas de corriente constante conectadas en delta (D-I)

En este modelo de carga las magnitudes de las corrientes se calculan con las ecuaciones (2.29), (2.30) y (2.31) asumiendo voltajes nominales línea-línea, y estas magnitudes de corrientes se mantendrán constantes mientras el ángulo del voltaje (δ) cambia, permaneciendo constante el factor de potencia de la carga (θ). Las ecuaciones que definen este modelo de carga están dadas por:

$$I_{ab} = |I_{ab}| \angle \delta_{ab} - \theta_{ab} \quad (2.38)$$

$$I_{bc} = |I_{bc}| \angle \delta_{bc} - \theta_{bc} \quad (2.39)$$

$$I_{ca} = |I_{ca}| \angle \delta_{ca} - \theta_{ca} \quad (2.40)$$

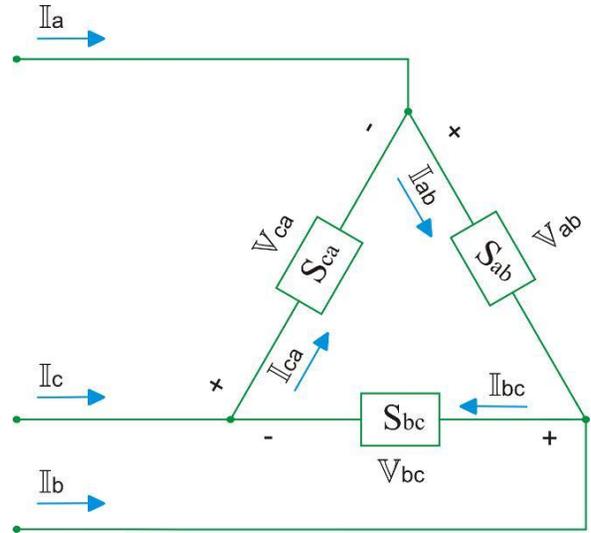


Figura 2.3 Carga conectada en delta

Para el proceso iterativo de flujos de potencia se necesita calcular las corrientes de línea como función de las corrientes de delta, de la figura 2.3 esta relación está dada en la ecuación (2.41)

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

2.4 Modelos de transformadores

Para el análisis de los alimentadores de distribución es necesario modelar correctamente las diferentes conexiones trifásicas de los transformadores de distribución. Estos modelos son desarrollados en [17] y [19] para *conexiones reductoras de voltaje* y se incluyen modelos de bancos trifásicos para las siguientes conexiones.

- Delta – Estrella aterrizada
- Estrella – Delta
- Estrella aterrizada – Estrella Aterrizada
- Delta – Delta
- Estrella Abierta – Delta Abierta

La figura 2.4 muestra la nomenclatura a utilizar. El lado de alta del banco está denominado como nodo n y el lado de baja del banco denominado como nodo m . La notación es tal que las letras mayúsculas A, B, C y N siempre se referirán al lado *fuentes* (nodo n) del banco de transformación y las letras minúsculas a, b, c y n siempre se referirán al lado de *carga* (nodo m) del banco de transformación. Se considera que todas las variaciones de la conexión estrella-delta se conectan conforme a “la Norma Americana de treinta grados” [20].

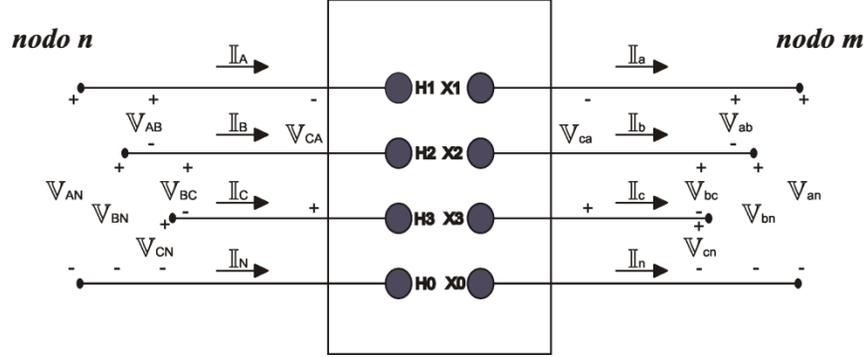


Figura 2.4 Banco de transformación trifásico

Con referencia en la figura 2.4 que muestra un banco de transformación trifásico, se desarrollan *ecuaciones matriciales trifásicas* para calcular los voltajes en el nodo m (lado de baja del banco de transformación) como función de los voltajes en el nodo n (lado de alta del banco de transformación) y las corrientes en el nodo m (corrientes de línea del lado de baja del banco de transformación), la ecuación (2.42) muestra esta relación.

$$\left[\mathbf{V}_{LG\ abc} \right] = \left[\mathbf{A}_T \right] \cdot \left[\mathbf{V}_{LG\ ABC} \right] - \left[\mathbf{B}_T \right] \cdot \left[\mathbf{I}_{abc} \right] \quad (2.42)$$

Donde las matrices \mathbf{A}_T y \mathbf{B}_T son matrices constantes y sus elementos son diferentes para cada tipo de conexión de los bancos de transformación. La ecuación (2.43) calcula la corriente del lado de alta del transformador (nodo n) en función de las corrientes en el nodo m (corrientes de línea del lado de baja)

$$\left[\mathbf{I}_{ABC} \right] = \left[\mathbf{d}_T \right] \left[\mathbf{I}_{abc} \right] \quad (2.43)$$

Donde la matriz \mathbf{d}_T es una matriz constante y sus elementos son diferentes para cada tipo de conexión de los bancos de transformación.

El vector $\mathbf{V}_{LG\ abc}$ y el vector $\mathbf{V}_{LG\ ABC}$ en la ecuación (2.42) representan los *voltajes línea-neutro* para una conexión en estrella ó los *voltajes línea-tierra* para una conexión en estrella aterrizada. Para la conexión en delta, las matrices de voltaje representan voltajes línea-neutro “*equivalentes*”.

En [17] se dan los voltajes línea neutro “*equivalentes*” en función de los voltajes línea-línea y están dados por la ecuación (2.44).

$$\left[\mathbf{V}_{ABC} \right]_{LN} = \left[\mathbf{W} \right] \cdot \left[\mathbf{V}_{ABC} \right]_{LL} \quad (2.44)$$

Donde

$$\mathbf{W} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Los vectores de corriente \mathbf{I}_{ABC} e \mathbf{I}_{abc} en la ecuación (2.43) representan las corrientes de línea sin importar la conexión de los devanados del banco de transformadores. La tabla 2.2 muestra las conexiones comunes de algunos bancos de transformadores trifásicos, así como sus matrices constantes A_T , B_T y d_T .

Tabla 2.2 Conexiones comunes de transformadores y sus matrices constantes

Conexión del Banco			Matrices Constantes	
Primario	Secundario	Relación de vueltas (n_t)	A_T	d_T
			B_T	
Delta	Estrella Aterrizada	$\frac{V_{LL} \text{ nom lado de alta}}{V_{LG} \text{ nom lado de baja}}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
			$\begin{bmatrix} Z_{t_a} & 0 & 0 \\ 0 & Z_{t_b} & 0 \\ 0 & 0 & Z_{t_c} \end{bmatrix}$	
Estrella	Delta	$\frac{V_{LN} \text{ nom lado de alta}}{V_{LL} \text{ nom lado de baja}}$	$\frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ 0 & 2 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ -2 & -1 & 0 \end{bmatrix}$
			$\frac{1}{9} \begin{bmatrix} 2Z_{t_{ab}} + Z_{t_{bc}} & 2Z_{t_{bc}} - 2Z_{t_{ab}} & 0 \\ 2Z_{t_{bc}} - 2Z_{t_{ca}} & 4Z_{t_{bc}} - Z_{t_{ca}} & 0 \\ 2Z_{t_{ab}} - 4Z_{t_{ca}} & -Z_{t_{ab}} - 2Z_{t_{ca}} & 0 \end{bmatrix}$	

Tabla 2.2 (continuación) Conexiones comunes de transformadores y sus matrices constantes

Conexión del Banco			Matrices Constantes	
Primario	Secundario	Relación de vueltas (n_t)	A_T	d_T
			B_T	
Estrella Aterrizada	Estrella Aterrizada	$\frac{V_{LG \text{ nom lado de alta}}}{V_{LG \text{ nom lado de baja}}}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
			$\begin{bmatrix} Zt_a & 0 & 0 \\ 0 & Zt_b & 0 \\ 0 & 0 & Zt_c \end{bmatrix}$	
Delta	Delta	$\frac{V_{LL \text{ nom lado de alta}}}{V_{LL \text{ nom lado de baja}}}$	$\frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
			$\frac{1}{3(Zt_{ab} + Zt_{bc} + Zt_{ca})} \begin{bmatrix} 2Zt_{ab} & Zt_{bc} & 0 \\ 0 & 2Zt_{bc} & Zt_{ca} \\ Zt_{ab} & 0 & 2Zt_{ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Zt_{ca} & -Zt_{bc} & 0 \\ Zt_{ca} & Zt_{ab} + Zt_{ca} & 0 \\ -(Zt_{ab} + Zt_{bc}) & -Zt_{bc} & 0 \end{bmatrix}$	
Estrella Abierta	Delta Abierta	$\frac{V_{LN \text{ nom lado de alta}}}{V_{LL \text{ nom lado de baja}}}$	$\frac{1}{3n_t} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 \\ -1 & 1 & 0 \\ -1 & -2 & 0 \end{bmatrix}$	$\frac{1}{n_t} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$
			$\frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & -Zt_{bc} \\ -Zt_{ab} & 0 & 2Zt_{bc} \end{bmatrix}$	

Donde Zt_a , Zt_b y Zt_c son las impedancias de cada transformador monofásico referidas al lado de baja y Zt_{ab} , Zt_{bc} y Zt_{ca} son las impedancias entre los correspondientes transformadores referidas al lado de baja.

2.5 Modelo de interruptor

El interruptor es un elemento seccionador en las redes de distribución que puede ser modelado como una rama con impedancia cero. Esto significa que no hay caída de voltaje en un segmento de línea que contenga un interruptor. El voltaje en el nodo n es igual al voltaje en el nodo m y no se necesitan ecuaciones matriciales constantes para esta relación.

2.6 Modelo de capacitores en derivación

Los capacitores en derivación se emplean comúnmente para la compensación de potencia reactiva y para dar soporte a la regulación de voltaje en una red de distribución. Los capacitores se modelan como dispositivos de capacitancia constante (susceptancia constante). Al igual que las cargas, los capacitores se conectan tanto en estrella como en delta como se muestran en la figura 2.5 para la conexión trifásica de un banco de capacitores en estrella y en la figura 2.6 para la conexión de un banco de capacitores en delta.

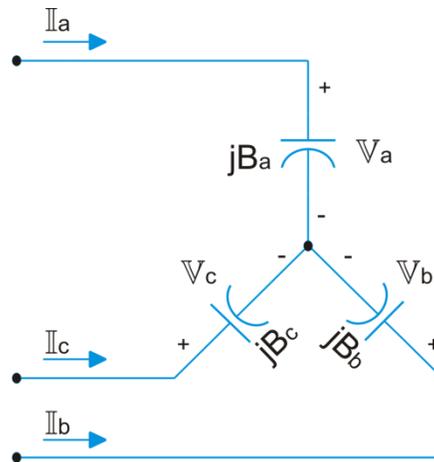


Figura 2.5 Banco de capacitores en estrella

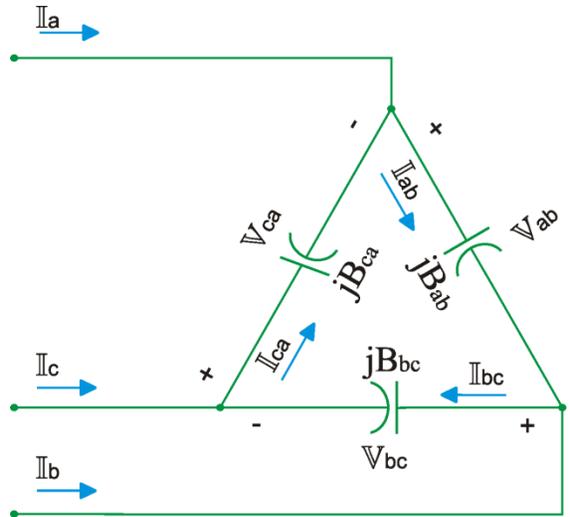


Figura 2.6 Banco de capacitores en delta

Recordando a las cargas de impedancia constante ya sean estrella o delta, los capacitores son tratados como cargas de impedancia constante puramente reactivas. La susceptancia constante de cada unidad de capacitor de los bancos estrella o delta se calcula como lo muestra la tabla 2.3. Los $kVar$ y los kV de la tabla 2.3 son valores nominales y las unidades de la susceptancia constante están en Siemens.

Tabla 2.3 Susceptancia constante de unidad de capacitor para banco en estrella y delta

Conexión del banco	Susceptancia constante
Estrella	$B_i = \frac{kVar_{nom}}{kV_{i nom}^2 * 1000} S$ <p>Donde $i = an, bn$ o cn</p>
Delta	$B_i = \frac{kVar_{nom}}{kV_{i nom}^2 * 1000} S$ <p>Donde $i = ab, bc$ o ca</p>

Con la susceptancia calculada como lo muestra la tabla 2.3 se pueden calcular las corrientes de línea sirviendo a los bancos de capacitores de la figura 2.5 y la figura 2.6 como se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Corrientes de línea para los bancos de capacitores trifásicos estrella y delta

Conexión del Banco	Corriente de línea
Estrella	$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} jB_{an} & 0 & 0 \\ 0 & jB_{bn} & 0 \\ 0 & 0 & jB_{cn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix}$
Delta	$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} jB_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & jB_{bc} & 0 \\ 0 & 0 & jB_{ca} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix}$

2.7 Modelo de reguladores de voltaje

Los reguladores de voltaje son equipos presentes en los sistemas de distribución que son capaces de mantener un nivel de voltaje relativamente constante dentro de ciertos límites deseados. Los bancos de reguladores monofásicos se instalan en las subestaciones eléctricas o en los alimentadores primarios o secundarios del sistema para proporcionar un nivel de voltaje confiable a los consumidores.

La mayoría de los reguladores aumentan o disminuyen el voltaje en un máximo de 10% en pasos de 0.625% cada uno o un total de 16 pasos para incrementar el voltaje y 16 pasos para disminuirlo, ambos en un 10%. Durante el ajuste del nivel de voltaje, cada acción para elevar el voltaje en un paso o para disminuirlo se conoce como un cambio de tap. El apéndice A muestra la modelación del regulador tipo A y tipo B para conexiones de reguladores monofásicos conectados en estrella y delta abierta.

La ecuación (2.46) muestra la relación de los voltajes línea-tierra del lado de carga del regulador en función de los voltajes línea-tierra del lado primario y las corrientes de línea del lado de carga, mientras que la ecuación (2.47) muestra la relación de las corrientes de línea del lado primario en función de las corrientes de línea del lado secundario.

$$\begin{bmatrix} V_{LG\ abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{LG\ ABC} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} B_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

$$\begin{bmatrix} I_{ABC} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{abc} \end{bmatrix} \quad (2.47)$$

Donde las matrices constantes $\begin{bmatrix} A_R \end{bmatrix}$, $\begin{bmatrix} B_R \end{bmatrix}$ y $\begin{bmatrix} d_R \end{bmatrix}$ están dadas en el apéndice A para ambos tipos de reguladores (tipo A y tipo B) en conexiones estrella y delta abierta.

2.8 Flujos de potencia trifásicos en sistemas radiales

El análisis de flujos de potencia de un alimentador de distribución es similar al análisis de los sistemas de transmisión. Lo que se requiere conocer antes de realizar un estudio de flujos de potencia es el voltaje trifásico de la subestación, la potencia compleja de todas las cargas y su modelo (potencia constante, corriente constante, impedancia constante), los bancos de capacitores en derivación presentes en la red, los modelos de cada segmento de la línea (modelo de impedancia y de admitancia), transformadores y reguladores de voltaje.

Un análisis de flujos de potencia de un alimentador puede determinar la siguiente información de la red:

- Magnitudes de voltaje y ángulos de todos los nodos de la red
- Flujos en cada sección de la línea especificados en kW y kVAr, amperes y grados o amperes y factor de potencia
- Pérdidas en cada sección del alimentador
- Entradas totales al alimentador en kW y kVAr
- Pérdidas totales del alimentador

El problema de flujos de potencia ha sido ampliamente estudiado en los sistemas eléctricos durante mucho tiempo. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones se enfocan a los sistemas de transmisión. Los métodos de solución de flujos de potencia para sistemas de transmisión toman en consideración cargas balanceadas, transposición en las líneas, un alto valor de la razón X/R entre otras. En cambio, las redes de distribución presentan características particulares como son topologías radiales, múltiples conexiones (trifásica, bifásica y monofásica), cargas de distinta naturaleza, resistencias y reactancias elevadas, líneas no transpuestas, cargas distribuidas desbalanceadas entre otras. Debido a estas particularidades de los sistemas de distribución es necesario emplear un método para la solución de flujos de potencia que analice el sistema trifásico, a diferencia del equivalente monofásico, de secuencia positiva, empleado para sistemas de transmisión. Además, para un estudio de problemas complejos como desbalance de carga, caída de tensión y compensación capacitiva es necesario estudiar el problema de flujos de potencia trifásicos en sistemas de distribución. El método desarrollado en [15] es el método utilizado en este trabajo para la solución de flujos de potencia, ya que es capaz de resolver problemas de modelación como cargas desbalanceadas puntuales y distribuidas, reguladores de voltaje, capacitores en derivación, transformadores y líneas múltiples (trifásicas, bifásicas y monofásicas). En secciones anteriores de este capítulo se describieron los modelos de impedancia serie de la línea, admitancia en derivación, modelo π de la línea, modelos de carga, modelos de capacitores, modelos de transformadores y modelos de reguladores de voltaje. La modelación de todos estos elementos se desarrolló de tal manera que el algoritmo dado en [15] se modificó para adecuarlo a los modelos de los elementos presentados.

2.8.1 Flujos de potencia trifásicos por el método de barrido regresivo/progresivo

Los alimentadores primarios en sistemas de distribución consisten principalmente de líneas aéreas o subterráneas trifásicas y generalmente en los extremos alejados del alimentador primario de la red consisten de líneas bifásicas o monofásicas. Este algoritmo de flujos de potencia (también llamado flujos de potencia de sistemas radiales por el “método de escalera”) enumera cada nodo de la red con un índice sin importar que el nodo sea una sección de línea trifásica, bifásica o monofásica. Los nodos son numerados de forma ascendente comenzando en el nodo raíz (subestación) y luego se ordena la red radial por capas o niveles, siendo la primera capa o nivel todos los nodos que están a una rama del nodo raíz, y siendo la segunda capa o nivel todos los nodos que están a una rama de la primera capa o nivel (todos los nodos a dos ramas del nodo raíz). La figura 2.7 muestra la numeración de una red radial de 57 nodos y sus niveles.

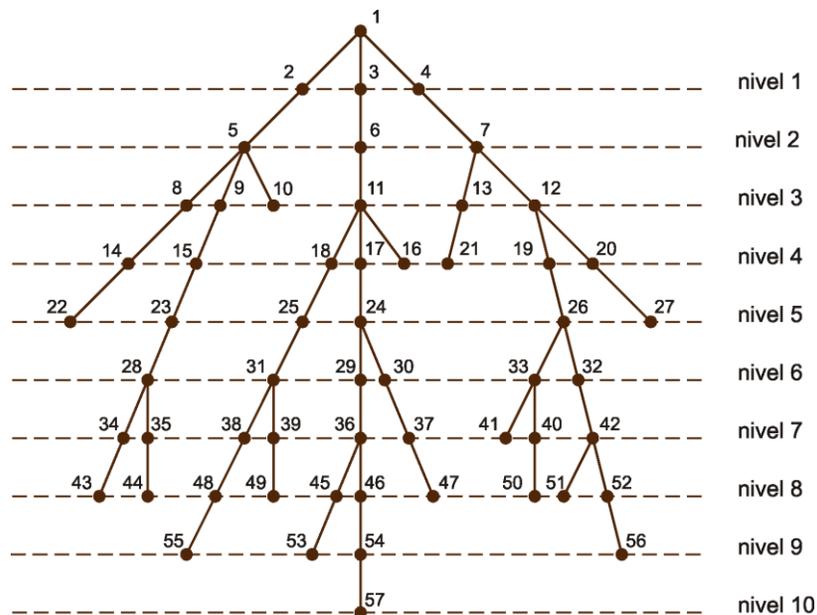


Figura 2.7 Numeración de nodos y niveles para una red de distribución radial de 57 nodos

Como se describió antes, se cuenta con la impedancia de un tramo de la línea en una matriz de 3×3 y su correspondiente modelo π . Si alguna de las fases de la sección de la línea no existe, la correspondiente fila y columna de esa matriz se llenará con ceros. Se deja que el nodo raíz sea el nodo compensador con las magnitudes de voltaje y ángulos ya conocidos. Ahora, el voltaje en todos los nodos de la red se hace igual al voltaje en el nodo compensador. En caso de que alguna rama sea un transformador, el voltaje del lado secundario será la razón entre el voltaje del nodo compensador y la relación de transformación del transformador y todos los nodos que se deriven del lado secundario del transformador tendrán el mismo voltaje secundario. Una vez hecho lo anterior, el algoritmo iterativo para resolver flujos de potencia de sistemas radiales consiste de tres pasos.

Para cada iteración k :

1. **Cálculo de corrientes nodales:** Debido a que las cargas en las redes de distribución son de diferente naturaleza como lo muestra la tabla 2.1 en la sección 2.3, las corrientes inyectadas en todos los nodos debido a su modelo de carga y a los capacitores en derivación se calculan como se desarrolló en la sección 2.3 de modelos de carga. La ecuación (2.48) calcula las corrientes trifásicas demandadas por los nodos.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m^{(k)} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{carga\ m}^{(k)} + \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{derivacion\ m}^{(k)} \quad (2.48)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m^{(k)} \quad \text{Vector de corrientes totales inyectadas en el nodo } m$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{carga\ m}^{(k)} \quad \text{Vector de corrientes debido a cargas en el nodo } m$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{derivacion\ m}^{(k)} \quad \text{Vector de corrientes debido a capacitores en el nodo } m$$

2. **Barrido regresivo:** En cada iteración, a partir de los nodos del último nivel y moviéndose hacia el nodo raíz, la corriente I_{nm} que es la corriente que va del nodo n al nodo m se calcula como:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}_{nm}^{(k)} = [\mathbf{d}] \cdot \left(\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_m^{(k)} + \sum \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}_{mp}^{(k)} \right) \quad (2.49)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}_{nm}^{(k)} \quad \text{Vector de corrientes totales por las líneas } nm \text{ (el nodo } n \text{ está en el nivel } i, \text{ el nodo } m$$

está en el nivel $i + 1$)

$\begin{bmatrix} \mathbf{d} \end{bmatrix}$ Matriz constante que para el segmento nm es una matriz identidad si es un segmento de línea, su valor está dado por la tabla 2.2 si es un transformador, o su valor está dado en el apéndice A si es un regulador de voltaje.

$$\begin{bmatrix} \mathbb{I}_a \\ \mathbb{I}_b \\ \mathbb{I}_c \end{bmatrix}_m^{(k)} \text{ Vector de corrientes totales inyectadas en el nodo } m \text{ (calculadas con la ecuación (2.48))}$$

$$\sum \begin{bmatrix} \mathbb{I}_a \\ \mathbb{I}_b \\ \mathbb{I}_c \end{bmatrix}_{mp}^{(k)} \text{ Sumatoria de vectores de corrientes por las líneas } mp \text{ (siendo } p \text{ todos los nodos que conectan al nodo } m \text{ y que están en el nivel } i+2\text{).}$$

Por ejemplo, para un mejor entendimiento de los tres vectores de la ecuación (2.49), de la figura 2.7, el primer vector puede ser la corriente por fase \mathbb{I}_{6-11} , el nodo n es el nodo 6 que está en el nivel 2 y el nodo m es el nodo 11 que está en el nivel 3, siendo p los nodos 16, 17 y 18 que están en el nivel 4, y la matriz $\begin{bmatrix} \mathbf{d} \end{bmatrix}$ es una matriz identidad debido a que el segmento 6-11 es un segmento de línea.

3. **Barrido progresivo:** Se calculan los voltajes nodales línea-neutro en un barrido hacia adelante a partir del nodo raíz y hasta llegar a los nodos del último nivel.

$$\begin{bmatrix} \mathbb{V}_{LG abc} \end{bmatrix}_m = \begin{bmatrix} \mathbf{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbb{V}_{LG ABC} \end{bmatrix}_n - \begin{bmatrix} \mathbf{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbb{I}_{abc} \end{bmatrix}_{nm} \quad (2.50)$$

Donde las matrices \mathbf{A} y \mathbf{B} son matrices constantes de los elementos serie (segmentos de línea, transformadores y reguladores de voltaje) conectados entre los nodos nm . Para los segmentos de línea, las matrices constantes están dadas por las ecuaciones (2.8) y (2.9), para los diferentes tipos de transformadores las matrices constantes están dadas en la tabla 2.2 y para los reguladores de voltaje las matrices están dadas en el apéndice A.

En la ecuación (2.50) los voltajes son línea-neutro para sistemas en estrella y voltajes línea-neutro “equivalentes” para sistemas en delta. Estos voltajes “equivalentes” se obtienen empleando las ecuaciones (2.44) y (2.45). Hasta este punto es una iteración del método de flujos de potencia de barrido regresivo/progresivo [15].

Después de realizar dos iteraciones del método de flujos descrito, se procede a calcular los errores de potencia por fase entre la iteración k y $k-1$.

$$\begin{aligned}
 \Delta S_a^{(k)} &= \left| \sum_{m=1}^i V_{ma}^{(k)} I_{ma}^{(k)*} - \sum_{m=1}^i V_{ma}^{(k-1)} I_{ma}^{(k-1)*} \right| \\
 \Delta S_b^{(k)} &= \left| \sum_{m=1}^i V_{mb}^{(k)} I_{mb}^{(k)*} - \sum_{m=1}^i V_{mb}^{(k-1)} I_{mb}^{(k-1)*} \right| \\
 \Delta S_c^{(k)} &= \left| \sum_{m=1}^i V_{mc}^{(k)} I_{mc}^{(k)*} - \sum_{m=1}^i V_{mc}^{(k-1)} I_{mc}^{(k-1)*} \right|
 \end{aligned} \tag{2.51}$$

Donde m es el nodo en cuestión, i el total de nodos, los voltajes son línea-neutro en el nodo m y las corrientes son las inyectadas en el nodo m

Los pasos 1-3 del algoritmo de flujos de potencia son repetidos tantas veces hasta que el criterio de convergencia sea mayor a los valores dados por la ecuación (2.51).

CAPÍTULO 3

DESPACHO DE CAPACITORES EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS EMPLEANDO PROGRAMACIÓN DINÁMICA

3.1 Introducción

En el capítulo 2 se realizó el análisis de diferentes elementos encontrados en la red de distribución y se formula la solución de flujos de potencia por el método de barrido regresivo/progresivo. En este capítulo se plantea una formulación al despacho de capacitores, basado en un pronóstico de carga horaria, de tal manera que las pérdidas totales en el alimentador en un día sean minimizadas. Las restricciones que se toman en cuenta en este trabajo son el máximo número de operaciones de conectar/desconectar para los capacitores y los límites de voltaje del alimentador.

Con el desarrollo de la automatización en los sistemas de distribución, las cargas de los alimentadores pueden ser monitoreadas continuamente y almacenadas. Además, los capacitores pueden ser conectados o desconectados con un interruptor controlado remotamente. Con la disponibilidad de los datos de carga del alimentador y la capacidad de operar los capacitores desde los centros de control, es deseable para los operadores del sistema tener una estrategia de despacho de capacitores flexible que minimice las pérdidas eléctricas en la operación diaria del sistema en vez de un método de despacho fijo [8].

En este trabajo, se propone un enfoque empleando programación dinámica para determinar el despacho óptimo de capacitores para las siguientes 24 horas en la operación diaria del sistema. El objetivo es minimizar las pérdidas totales del alimentador en el periodo de 24 horas tomando en cuenta las restricciones de voltaje. Se limita el número de operaciones conectar/desconectar de los capacitores teniendo en mente su expectativa de vida. En este trabajo se asume que las cargas varían proporcionalmente durante el día.

3.2 Formulación del problema

La notación empleada en esta sección es la siguiente:

C_t = Total de capacitores en la red

C_i = El i -ésimo capacitor instalado en el alimentador

n = Escenario u hora actual

$S_i(n)$ = El estado (conectado/desconectado) del capacitor C_i en la hora n

$P_n[S_1(n), S_2(n), S_3(n), \dots, S_{C_i}(n)]$ = Pérdidas del alimentador en la hora n cuando el estado del capacitor C_i en la hora n es $S_i(n)$

P_{loss} = Pérdidas totales del alimentador sobre un periodo de 24 horas

V_j = Voltaje en el bus j

V^{\min} = Voltaje mínimo

V^{\max} = Voltaje máximo

K_i = Número máximo permitido de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i en un día

\oplus = Operación OR

$X_{n,m}$ = El m -ésimo estado del capacitor en el escenario n

$S'_i(n)$ = El número total de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i hacia el escenario n

$X'_{n,m}$ = El m -ésimo estado modificado en el escenario n

m_n = El número de estados en el escenario n

$X_{i,optimo}$ = El estado a través de la trayectoria óptima

mod = Operación módulo

$f X'_{n,m}$ = Las pérdidas mínimas acumuladas hacia $X'_{n,m}$

$X'_{n-1,k}$ = El grupo de todos los estados factibles que puede alcanzar $X'_{n,m}$

$R X'_{n-1,k}, X'_{n,m}$ = Las pérdidas del alimentador del estado $X'_{n,m}$

Para iniciar con la formulación se considera un alimentador de distribución con seis secciones como lo muestra la figura 3.1. Se considera que la carga horaria ($n = 1, 2, \dots, 24$) del alimentador es conocida para el siguiente día. Estas cargas horarias del alimentador se pueden obtener con un pronóstico de carga para las 24 horas del día siguiente.

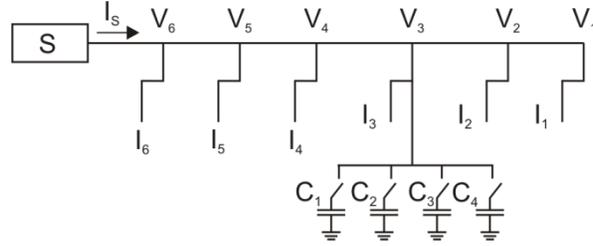


Figura 3.1 Alimentador de distribución

La figura 3.1 muestra que existen cuatro capacitores conmutables C_i ($i = 1, 2, 3, 4$), con capacidades Qc_i ($i = 1, 2, 3, 4$), en el alimentador. En este trabajo se asume que cada capacitor puede ser controlado por separado independientemente de los demás por los operadores en un sistema de control mediante un enlace de comunicación. El problema del despacho de capacitores es determinar un programa de operación conectar/desconectar para cada uno de los capacitores dentro de un periodo de 24 horas tal que, las pérdidas totales del alimentador en este periodo sean minimizadas. Las operaciones frecuentes conectar/desconectar de los bancos de capacitores pueden reducir su expectativa de vida, por ello se limita el número de operaciones de conectar/desconectar de los capacitores en el periodo de 24 horas.

El problema del despacho de capacitores se formula matemáticamente como un problema de optimización.

Sea $S_i(n)$ para ($i = 1, 2, 3, \dots, C_i$) el estado del capacitor C_i en la hora n como:

$S_i(n) = 1$, si el capacitor C_i está conectado en la hora n

$S_i(n) = 0$, si el capacitor C_i está desconectado en la hora n (3.1)

El problema de optimización es determinar el estado óptimo conectar/desconectar de $S_i(n)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, C_i$; $n = 1, 2, \dots, 24$) para cada capacitor C_i en cada hora n , tal que, las pérdidas totales P_{loss} del alimentador sobre un periodo de 24 horas sean minimizadas sujeto a los límites de voltaje y restricciones en la operación conectar/desconectar de los capacitores. La formulación matemática se plantea de la siguiente forma:

$$\text{Minimizar } P_{\text{loss}} = \sum_{n=1}^{24} P_n [S_1(n), S_2(n), S_3(n), \dots, S_{C_t}(n)] \quad (3.2)$$

$$\text{Sujeto a } V^{\min} \leq V_j \leq V^{\max} \quad j = 1, 2, \dots, \text{ total de nodos} \quad (3.3)$$

$$\sum_{n=1}^{24} S_i(n) \oplus S_i(n-1) \leq K_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, C_t \quad (3.4)$$

Donde

$P_n [S_1(n), S_2(n), S_3(n), \dots, S_{C_t}(n)]$ = Pérdidas del alimentador en la hora n cuando el estado del capacitor C_i ($i=1, 2, 3, \dots, C_t$) en la hora n es $S_i(n)$.

V_j = Voltaje en el bus j

V^{\min} = Voltaje mínimo

V^{\max} = Voltaje máximo

K_i = Número máximo permitido de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i en un día

\oplus = Operación OR, [$S_i(n) \oplus S_i(n-1) = 1$] cuando $S_i(n) \neq S_i(n-1)$; [$S_i(n) \oplus S_i(n-1) = 0$] cuando $S_i(n) = S_i(n-1)$

Se observa que en la ecuación (3.4), $S_i(0)$ es el estado del capacitor i en la última hora del día anterior. La constante K_i se debe especificar por los operadores del sistema, tomando en cuenta su experiencia con la operación de capacitores conmutables y las expectativas de vida de estos bancos, armónicos y otras consideraciones prácticas que están relacionadas con la conmutación de los capacitores. El número máximo de operaciones conectar/desconectar para todos los capacitores se asume que sea el mismo.

3.3 Despacho óptimo de capacitores empleando programación dinámica [8]

Para lograr un programa de despacho de capacitores óptimo $S_i(n)$ ($i = 1, 2, 3, \dots, C_t$; $n = 1, 2, \dots, 24$) que satisfaga las ecuaciones (3.2), (3.3) y (3.4), en este trabajo se emplea una aproximación utilizando programación dinámica. En esta aproximación, el periodo de estudio (un día) es dividido en N escenarios ($N = 24$), es decir, un escenario es equivalente a una hora. En cada

escenario son encontrados todos los estados posibles (conectar/desconectar) de los capacitores conmutables del sistema. Para el problema de despacho de capacitores de la figura 3.1, hay 16 diferentes estados de capacitores posibles en cada escenario, asumiendo que el número máximo de operaciones conectar/desconectar de cada capacitor en un día sea igual a uno. La tabla 3.1 muestra estos posibles 16 estados para los 4 capacitores de la figura 3.1 en un escenario dado.

Tabla 3.1 Estados posibles en un escenario dado para los 4 capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 1$ para todos los capacitores

Estados de los capacitores				
	$S_1(n)$	$S_2(n)$	$S_3(n)$	$S_4(n)$
Xn,1	0	0	0	0
Xn,2	0	0	0	1
Xn,3	0	0	1	0
Xn,4	0	0	1	1
Xn,5	0	1	0	0
Xn,6	0	1	0	1
Xn,7	0	1	1	0
Xn,8	0	1	1	1
Xn,9	1	0	0	0
Xn,10	1	0	0	1
Xn,11	1	0	1	0
Xn,12	1	0	1	1
Xn,13	1	1	0	0
Xn,14	1	1	0	1
Xn,15	1	1	1	0
Xn,16	1	1	1	1

El estado de los capacitores en el escenario n ($n = 1, 2, \dots, 24$) se describe como sigue:

$$\begin{aligned}
 X_{n,m} &= [S_1(n), S_2(n), S_3(n), \dots, S_{C_i}(n)] \\
 S_i(n) &= 0 \text{ o } 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, C_i) \\
 m_n &= 1, 2, \dots, 16
 \end{aligned}
 \tag{3.5}$$

La figura 3.2 muestra los estados posibles para los capacitores en cada escenario para 24 escenarios. El estado inicial en el escenario 0 se considera $X_{0,1} = 0, 0, 0, 0$. Es decir, los cuatro capacitores se asumen en estado desconectado en la última hora del día anterior.

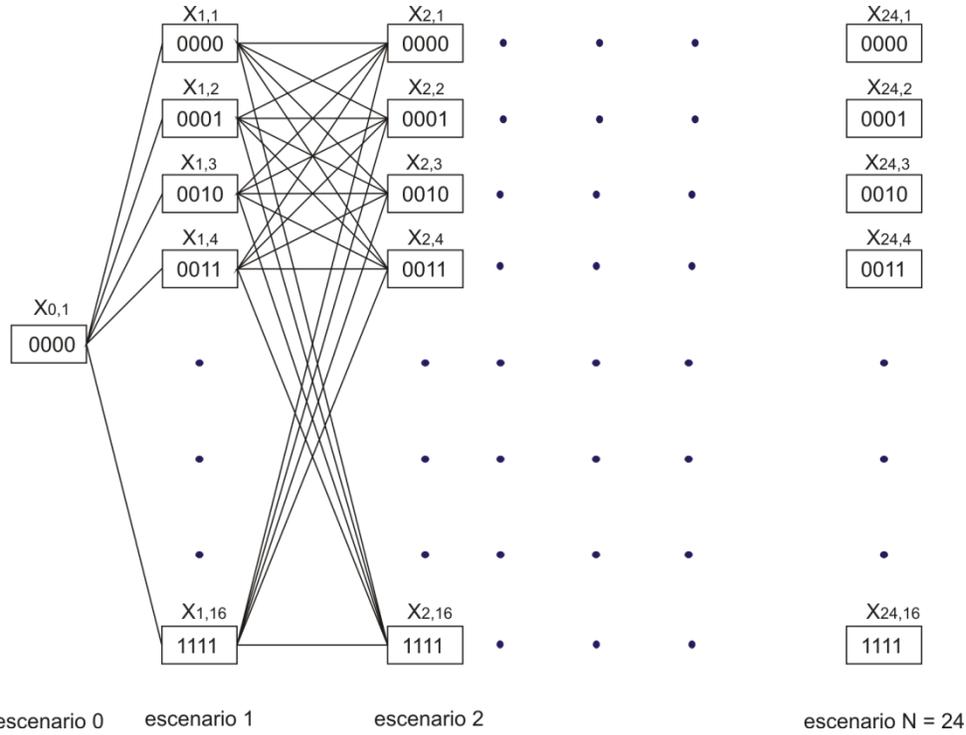


Figura 3.2 Diagrama de estado de N ($N = 24$) escenarios para los capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 1$ para todos los capacitores

De la figura 3.2 se observa que al iniciar del estado fuente $X_{0,1} = 0,0,0,0$ se necesita cruzar y guardar $(2^4)^{24}$ ($\cong 7.9 \times 10^{28}$) trayectorias posibles a través de los estados del sistema en 24 escenarios. El propósito es encontrar una trayectoria factible que satisfaga las restricciones descritas en las ecuaciones (3.3) y (3.4), y de las menores pérdidas del alimentador P_{loss} en el periodo de estudio. Si este problema de despacho de capacitores se trata de resolver empleando el diagrama de estado y las trayectorias mostradas en la figura 3.2, se tendrá la dificultad de excesiva memoria computacional, se viajará a través de trayectorias que violan la restricción del número máximo de operaciones conectar/desconectar para los capacitores, además de tiempos excesivos de ejecución.

Se tiene que comprobar si la restricción en el número de operaciones conectar/desconectar de los capacitores descrita por la ecuación 3.4 se satisface en algún estado. Para hacer esto, se tiene que almacenar no solamente el estado en el escenario actual, sino también su nodo fuente en el escenario anterior. Es decir, la trayectoria óptima de un estado en el escenario actual a los estados en el siguiente escenario dependerá de su nodo fuente (en el escenario anterior) de ese estado. Es decir, las trayectorias entre dos estados en dos escenarios vecinos, así como los nuevos estados se deben almacenar en memoria.

Para reducir la memoria computacional, se propone usar el diagrama de estado modificado y las trayectorias como se muestran en la figura 3.3 [8]. En esta figura los nuevos estados corresponden

al contador de operaciones conectar/desconectar de cada capacitor para los 24 escenarios, con un máximo de operaciones conectar/desconectar para cada capacitor de $K_i = K$

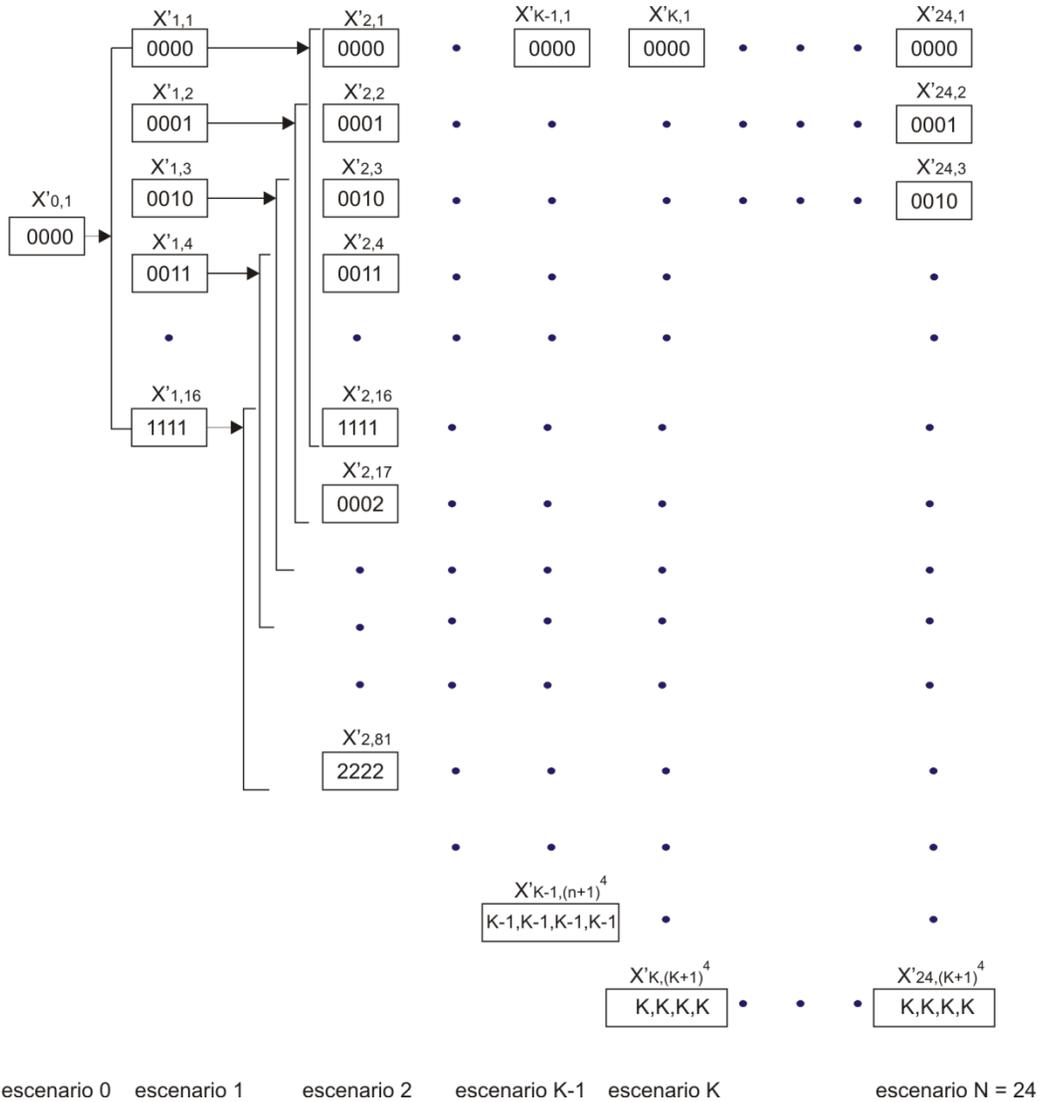


Figura 3.3 Diagrama de estados modificados y búsqueda de trayectorias para su solución mediante programación dinámica

Los estados en el escenario n en la figura 3.3 se redefinen como sigue:

$$X'_{n,m} = [S'_1(n), S'_2(n), S'_3(n), \dots, S'_{C_i}(n)] \quad (3.6)$$

$$n = 1, 2, \dots, 24$$

Donde

$S'_i(n)$ = El número total de operaciones conectar/desconectar del capacitor C_i hacia el escenario n

El número total de estados en el escenario n está dado por:

$$\begin{aligned} m_n &= n+1^{C_t} \text{ para } n < K \\ m_n &= (K+1)^{C_t} \text{ para } n \geq K \end{aligned} \quad (3.7)$$

Las siguientes propiedades se conocen para $S'_i(n)$:

$$\begin{aligned} S'_i(0) &= 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, C_t \\ S'_i(n) - S'_i(n-1) &= 0 \text{ o } 1; \quad i = 1, 2, 3, \dots, C_t; \quad n = 1, 2, \dots, 24 \\ S'_i(n) &\leq n \text{ para } n \leq K \\ S'_i(n) &\leq K \text{ para } n > K \end{aligned} \quad (3.8)$$

Donde K es el número máximo de las operaciones conectar/desconectar para todos los capacitores.

$S'_i(n)$ y $S_i(n)$ de las ecuaciones (3.5) y (3.6) están relacionadas mediante las ecuaciones siguientes:

$$S'_i(n) = \sum_{l=1}^n |S_i(l) - S_i(l-1)| \quad (3.9)$$

$$S_i(n) = S'_i(n) \bmod 2 \oplus S_i(0) \quad (3.10)$$

Donde $S'_i(n) \bmod 2$ es el residuo de la división entera de $S'_i(n)$ por 2.

En la ecuación (3.10), el término $S'_i(n) \bmod 2$ representa el estado del capacitor i en el escenario n y el término $S_i(0)$ representa el estado del capacitor i en la última hora del día anterior, siendo el valor de $S'_i(n) \bmod 2$ igual a cero o uno. La operación $S'_i(n) \bmod 2 \oplus S_i(0)$ será uno cuando $S'_i(n) \bmod 2 \neq S_i(0)$ y será cero cuando $S'_i(n) \bmod 2 = S_i(0)$. Como se observa en la figura 3.3, el estado inicial de todos los capacitores se considera desconectado.

Para una mejor comprensión de la figura 3.3 se toma el estado $X'_{2,81} = [2, 2, 2, 2]$, al aplicar la ecuación (3.10) se tiene que el estado de los capacitores es $X_{2,81} = [0, 0, 0, 0]$, todos los capacitores desconectados.

En la tabla 3.1 se tiene que el número máximo de operaciones conectar/desconectar para los capacitores es $K_i = 1$ para los 4 capacitores en los 24 escenarios, ahora si se tiene que el número máximo de operaciones conectar/desconectar para los capacitores es $K_i = 2$ se tendrán los estados posibles de la tabla 3.2 a partir de los escenarios $n \geq K_i$ con referencia a la figura 3.3.

Tabla 3.2 Estados posibles para los escenarios $n \geq K_i$ para los 4 capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 2$ para todos los capacitores.

Estados de los capacitores									
	$S'_1(n), S'_2(n), S'_3(n), S'_4(n)$					$S'_1(n), S'_2(n), S'_3(n), S'_4(n)$			
X'n,1	0	0	0	0	X'n,30	0	2	1	0
X'n,2	0	0	0	1	X'n,31	0	2	1	1
X'n,3	0	0	1	0	X'n,32	0	2	1	2
X'n,4	0	0	1	1	X'n,33	0	2	2	0
X'n,5	0	1	0	0	X'n,34	0	2	2	1
X'n,6	0	1	0	1	X'n,35	0	2	2	2
X'n,7	0	1	1	0	X'n,36	1	0	0	2
X'n,8	0	1	1	1	X'n,37	1	0	1	2
X'n,9	1	0	0	0	X'n,38	1	0	2	0
X'n,10	1	0	0	1	X'n,39	1	0	2	1
X'n,11	1	0	1	0	X'n,40	1	0	2	2
X'n,12	1	0	1	1	X'n,41	1	1	0	2
X'n,13	1	1	0	0	X'n,42	1	1	1	2
X'n,14	1	1	0	1	X'n,43	1	1	2	0
X'n,15	1	1	1	0	X'n,44	1	1	2	1
X'n,16	1	1	1	1	X'n,45	1	1	2	2
X'n,17	0	0	0	2	X'n,46	1	2	0	0
X'n,18	0	0	1	2	X'n,47	1	2	0	1
X'n,19	0	0	2	0	X'n,48	1	2	0	2
X'n,20	0	0	2	1	X'n,49	1	2	1	0
X'n,21	0	0	2	2	X'n,50	1	2	1	1
X'n,22	0	1	0	2	X'n,51	1	2	1	2
X'n,23	0	1	1	2	X'n,52	1	2	2	0
X'n,24	0	1	2	0	X'n,53	1	2	2	1
X'n,25	0	1	2	1	X'n,54	1	2	2	2
X'n,26	0	1	2	2	X'n,55	2	0	0	0
X'n,27	0	2	0	0	X'n,56	2	0	0	1
X'n,28	0	2	0	1	X'n,57	2	0	0	2
X'n,29	0	2	0	2	X'n,58	2	0	1	0

Tabla 3.2 (continuación) Estados posibles para los escenarios $n \geq K_i$ para los 4 capacitores de la figura 3.1 con $K_i = 2$ para todos los capacitores.

Estados de los capacitores									
	$S'_1(n), S'_2(n), S'_3(n), S'_4(n)$					$S'_1(n), S'_2(n), S'_3(n), S'_4(n)$			
X'n,59	2	0	1	1	X'n,71	2	1	2	1
X'n,60	2	0	1	2	X'n,72	2	1	2	2
X'n,61	2	0	2	0	X'n,73	2	2	0	0
X'n,62	2	0	2	1	X'n,74	2	2	0	1
X'n,63	2	0	2	2	X'n,75	2	2	0	2
X'n,64	2	1	0	0	X'n,76	2	2	1	0
X'n,65	2	1	0	1	X'n,77	2	2	1	1
X'n,66	2	1	0	2	X'n,78	2	2	1	2
X'n,67	2	1	1	0	X'n,79	2	2	2	0
X'n,68	2	1	1	1	X'n,80	2	2	2	1
X'n,69	2	1	1	2	X'n,81	2	2	2	2
X'n,70	2	1	2	0					

3.3.1 Localización de trayectorias a través de un diagrama de estado modificado

Para generar las trayectorias entre el escenario $n-1$ y el escenario n que son factibles, es decir, que cumplen con $[S'_i(n) - S'_i(n-1)] = 1$ o 0 ; $i = 1, 2, 3, \dots, C_t$; $n = 1, 2, \dots, 24$, a través de los estados modificados, se realiza una búsqueda de trayectorias factibles entre los estados modificados del escenario $n = K$ y los estados modificados del escenario $n = K+1$. Estas trayectorias que van de los estados modificados del escenario $n = K$ hacia los estados modificados del escenario $n = K+1$ se almacenan en una matriz de dimensión $\left[(K+1)^{C_t}, 2^{C_t} \right]$ llamada en este trabajo *matriz de trayectorias de escenarios* $M_{Trayectorias}$. Si para los capacitores de la figura 3.1 tenemos que $K_i = 2$, la figura 3.4 muestra los estados modificados para los 24 escenarios.

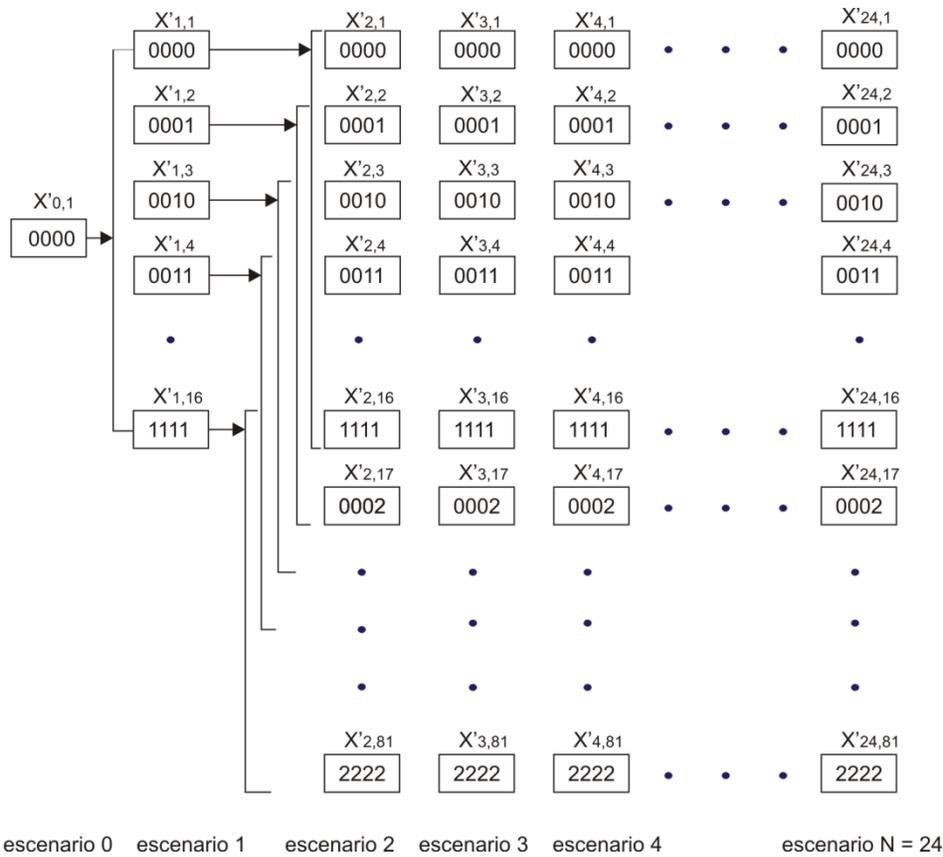


Figura 3.4 Diagrama de estados modificados para $K_i = 2$ y $C_i = 4$

Con lo mencionado anteriormente, la *matriz de trayectorias de escenarios* se genera entre los estados modificados del escenario 2 ($n = K$) y los estados modificados del escenario 3 ($n = K+1$) que cumplan con $[S'_i(n) - S'_i(n-1)] = 1$ o 0 ; $i = 1, 2, 3, \dots, C_i$. La tabla 3.3 muestra los elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 1$ y $C_i = 4$, mientras que la tabla 3.4 los muestra para $K_i = 2$ y $C_i = 4$.

Tabla 3.3 Elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 1$ y $C_i = 4$

Trayectorias del escenario (n-1) al escenario n																
Estados en el escenario (n-1)	Trayectorias factibles que pueden alcanzar los estados del escenario (n-1)															
	← {X'n} →															
$X^{n-1,1}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
$X^{n-1,2}$	2	4	6	8	10	12	14	16								
$X^{n-1,3}$	3	4	7	8	11	12	15	16								
$X^{n-1,4}$	4	8	12	16												
$X^{n-1,5}$	5	6	7	8	13	14	15	16								

Tabla 3.3 (continuación) Elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 1$ y $C_i = 4$

Trayectorias del escenario (n-1) al escenario n													
Estados en el escenario (n-1)	Trayectorias factibles que pueden alcanzar los estados del escenario (n-1)												
	← {X'n} →												
X'n-1,6	6	8	14	16									
X'n-1,7	7	8	15	16									
X'n-1,8	8	16											
X'n-1,9	9	10	11	12	13	14	15	16					
X'n-1,10	10	12	14	16									
X'n-1,11	11	12	15	16									
X'n-1,12	12	16											
X'n-1,13	13	14	15	16									
X'n-1,14	14	16											
X'n-1,15	15	16											
X'n-1,16	16												

Tabla 3.4 Elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 2$ y $C_i = 4$

Trayectorias del escenario (n-1) al escenario n																
Estados en el escenario (n-1)	Trayectorias factibles que pueden alcanzar los estados del escenario (n-1)															
	← {X'n} →															
X'n-1,1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
X'n-1,2	2	4	6	8	10	12	14	16	17	18	22	23	36	37	41	42
X'n-1,3	3	4	7	8	11	12	15	16	19	20	24	25	38	39	43	44
X'n-1,4	4	8	12	16	18	20	21	23	25	26	37	39	40	42	44	45
X'n-1,5	5	6	7	8	13	14	15	16	27	28	30	31	46	47	49	50
X'n-1,6	6	8	14	16	22	23	28	29	31	32	41	42	47	48	50	51
X'n-1,7	7	8	15	16	24	25	30	31	33	34	43	44	49	50	52	53
X'n-1,8	8	16	23	25	26	31	32	34	35	42	44	45	50	51	53	54
X'n-1,9	9	10	11	12	13	14	15	16	55	56	58	59	64	65	67	68
X'n-1,10	10	12	14	16	36	37	41	42	56	57	59	60	65	66	68	69
X'n-1,11	11	12	15	16	38	39	43	44	58	59	61	62	67	68	70	71
X'n-1,12	12	16	37	39	40	42	44	45	59	60	62	63	68	69	71	72
X'n-1,13	13	14	15	16	46	47	49	50	64	65	67	68	73	74	76	77
X'n-1,14	14	16	41	42	47	48	50	51	65	66	68	69	74	75	77	78
X'n-1,15	15	16	43	44	49	50	52	53	67	68	70	71	76	77	79	80
X'n-1,16	16	42	44	45	50	51	53	54	68	69	71	72	77	78	80	81
X'n-1,17	17	18	22	23	36	37	41	42								
X'n-1,18	18	21	23	26	37	40	42	45								

Tabla 3.4 (continuación) Elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 2$ y $C_i = 4$

Trayectorias del escenario (n-1) al escenario n												
Estados en el escenario (n-1)	Trayectorias factibles que pueden alcanzar los estados del escenario (n-1)											
	← {X'n} →											
X'n-1,19	19	20	24	25	38	39	43	44				
X'n-1,20	20	21	25	26	39	40	44	45				
X'n-1,21	21	26	40	45								
X'n-1,22	22	23	29	32	41	42	48	51				
X'n-1,23	23	26	32	35	42	45	51	54				
X'n-1,24	24	25	33	34	43	44	52	53				
X'n-1,25	25	26	34	35	44	45	53	54				
X'n-1,26	26	35	45	54								
X'n-1,27	27	28	30	31	46	47	49	50				
X'n-1,28	28	29	31	32	47	48	50	51				
X'n-1,29	29	32	48	51								
X'n-1,30	30	31	33	34	49	50	52	53				
X'n-1,31	31	32	34	35	50	51	53	54				
X'n-1,32	32	35	51	54								
X'n-1,33	33	34	52	53								
X'n-1,34	34	35	53	54								
X'n-1,35	35	54										
X'n-1,36	36	37	41	42	57	60	66	69				
X'n-1,37	37	40	42	45	60	63	69	72				
X'n-1,38	38	39	43	44	61	62	70	71				
X'n-1,39	39	40	44	45	62	63	71	72				
X'n-1,40	40	45	63	72								
X'n-1,41	41	42	48	51	66	69	75	78				
X'n-1,42	42	45	51	54	69	72	78	81				
X'n-1,43	43	44	52	53	70	71	79	80				
X'n-1,44	44	45	53	54	71	72	80	81				
X'n-1,45	45	54	72	81								
X'n-1,46	46	47	49	50	73	74	76	77				
X'n-1,47	47	48	50	51	74	75	77	78				
X'n-1,48	48	51	75	78								
X'n-1,49	49	50	52	53	76	77	79	80				
X'n-1,50	50	51	53	54	77	78	80	81				
X'n-1,51	51	54	78	81								
X'n-1,52	52	53	79	80								
X'n-1,53	53	54	80	81								

Tabla 3.4 (continuación) Elementos de la *matriz de trayectorias de escenarios* para $K_i = 2$ y $C_i = 4$

Trayectorias del escenario (n-1) al escenario n												
Estados en el escenario (n-1)	Trayectorias factibles que pueden alcanzar los estados del escenario (n-1)											
	← {X'n} →											
X'n-1,54	54	81										
X'n-1,55	55	56	58	59	64	65	67	68				
X'n-1,56	56	57	59	60	65	66	68	69				
X'n-1,57	57	60	66	69								
X'n-1,58	58	59	61	62	67	68	70	71				
X'n-1,59	59	60	62	63	68	69	71	72				
X'n-1,60	60	63	69	72								
X'n-1,61	61	62	70	71								
X'n-1,62	62	63	71	72								
X'n-1,63	63	72										
X'n-1,64	64	65	67	68	73	74	76	77				
X'n-1,65	65	66	68	69	74	75	77	78				
X'n-1,66	66	69	75	78								
X'n-1,67	67	68	70	71	76	77	79	80				
X'n-1,68	68	69	71	72	77	78	80	81				
X'n-1,69	69	72	78	81								
X'n-1,70	70	71	79	80								
X'n-1,71	71	72	80	81								
X'n-1,72	72	81										
X'n-1,73	73	74	76	77								
X'n-1,74	74	75	77	78								
X'n-1,75	75	78										
X'n-1,76	76	77	79	80								
X'n-1,77	77	78	80	81								
X'n-1,78	78	81										
X'n-1,79	79	80										
X'n-1,80	80	81										
X'n-1,81	81											

La *matriz de trayectorias de escenarios* proporciona todos los estados posibles X'_n en el escenario n que puede alcanzar el estado $X'_{n-1,m}$ del escenario $n-1$. Por ejemplo, de la figura 3.4 el estado modificado $X'_{2,17}$ y con referencia a la tabla 3.4, puede alcanzar los estados siguientes $X'_{3,17}, X'_{3,18}, X'_{3,22}, X'_{3,23}, X'_{3,36}, X'_{3,37}, X'_{3,41}, X'_{3,42}$ como lo muestra la figura 3.5.

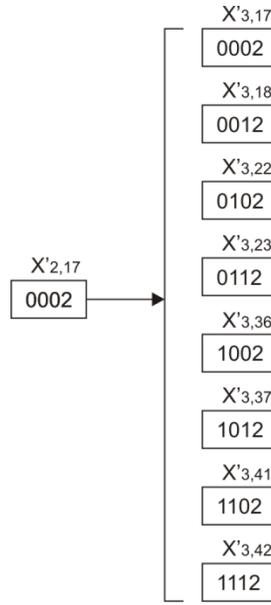


Figura 3.5 Estados modificados que puede alcanzar el estado $X'_{2,17}$ cuando $K_i = 2$ y $C_i = 4$

La ventaja que ofrece la *matriz de trayectorias de escenarios* es que con ella se pueden generar todas las trayectorias que son viables, es decir, todas las trayectorias que van desde el escenario $n = 1$ hasta el escenario $n = 24$ (24 escenarios para este desarrollo) que cumplen con la ecuación 3.8.

3.3.2 Solución recursiva hacia adelante

Usando el diagrama de estado modificado de la figura 3.3, el despacho de capacitores óptimo se puede obtener al resolver la siguiente ecuación recursiva:

$$f' X'_{n,m} = \min_{X'_{n-1,K}} [f(X'_{n-1,K}) + R(X'_{n-1,K}, X'_{n,m})] \quad (3.11)$$

$$n = 1, 2, \dots, 24$$

Donde

$f' X'_{n,m}$ = Las pérdidas mínimas acumuladas hacia el estado $X'_{n,m}$, y $f' X'_{0,1}$ se asume con valor cero.

$X'_{n-1,K}$ = El grupo de todos los estados factibles que llevan a $X'_{n,m}$; la factibilidad se verifica con las propiedades de $S'_i(n)$ dadas por la ecuación 3.8.

$R X'_{n-1,K}, X'_{n,m}$ = Las pérdidas en el alimentador del estado $X'_{n,m}$; si en el estado $X'_{n,m}$ se observan violaciones de voltaje, entonces $R X'_{n-1,K}, X'_{n,m}$ toma un valor infinito.

Al aplicar la fórmula recursiva de la ecuación (3.11), el predecesor del estado $X'_{n,m}$ en el n -ésimo escenario se define como el estado $X'_{n-1,K}$ con las pérdidas del alimentador mínimas acumuladas $f X'_{n-1,K}$ entre todos los estados en el escenario anterior ($n-1$). La fórmula recursiva comienza con $n = 1$, y termina con el valor de $n = 24$. Cuando los cálculos recursivos han sido ejecutados para los estados en todos los escenarios ($n = 1, 2, \dots, 24$), el estado $X_{24, \text{optimo}}$ con las menores pérdidas acumuladas del alimentador $f X_{24, \text{optimo}}$ entre todos los estados en el escenario 24 se escoge como el estado óptimo. Una vez localizado este estado óptimo se debe volver y localizar todos sus predecesores. Las acciones que se deben tomar para el despacho óptimo de los capacitores están definidas por los predecesores que llevan al estado óptimo. La figura 3.6 muestra el diagrama de flujo para resolver la ecuación recursiva dada en la ecuación (3.11).

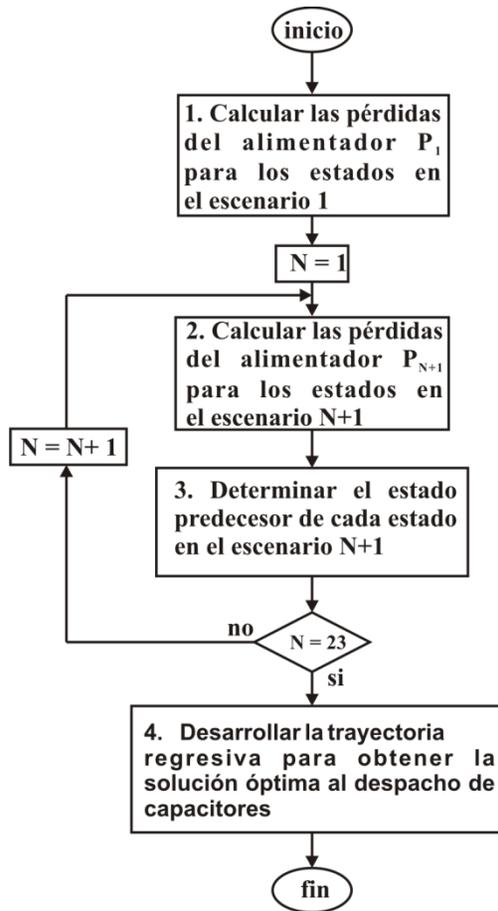


Figura 3.6 Diagrama de flujo del algoritmo de programación dinámica para el despacho óptimo de capacitores.

Este método de solución es eficiente para lograr un despacho de capacitores óptimo y requiere mucho menor memoria computacional que si se hubiese desarrollado con el diagrama de estado de la figura 3.2, sin embargo, aún con el diagrama de estado modificado el número de combinaciones crece exponencialmente en cada escenario, para evitar un desborde de memoria cuando el número de trayectorias ya generadas sobrepase un valor máximo estipulado (v_{max}), se procederá a un ordenamiento burbuja del vector de pérdidas (ordenando de menor a mayor) y se continua con el algoritmo trabajando con las trayectorias con las menores pérdidas cuyo tamaño está definido por v_{max} .

El número de veces que se tiene que ejecutar flujos de potencia para calcular las pérdidas eléctricas del alimentador y los voltajes en los nodos del sistema está determinado por el número total de estados en los 24 escenarios, es decir, se hace un estudio de flujos de potencia por cada estado que existe para conocer el total de las pérdidas del sistema en ese estado. La ecuación 3.12 determina el total de número de estados y en consecuencia el total de veces que se tiene que calcular flujos de potencia en los 24 escenarios.

$$X_{total} = \sum_{n=1}^{K_i-1} n+1 C_t + \sum_{n=K_i}^{24} K_i+1 C_t \quad (3.12)$$

De la ecuación anterior X_{total} es el número total de estados para los 24 escenarios. En cada uno de los estados se realiza una corrida de flujos de potencia que determina las pérdidas totales del alimentador según el estado $S_i(n)$ del capacitor i . La expresión del lado derecho de la ecuación (3.12) calcula el número total de estados a partir del número de operaciones permitidas de los capacitores K_i , el escenario n y el número total de capacitores de la red C_t .

3.4 Diagrama de bloques del programa

En esta sección se describen las subrutinas del programa desarrollado para la solución del despacho de capacitores. La figura 3.7 muestra el diagrama de bloques del programa desarrollado de donde se da una breve descripción de cada uno de los bloques.

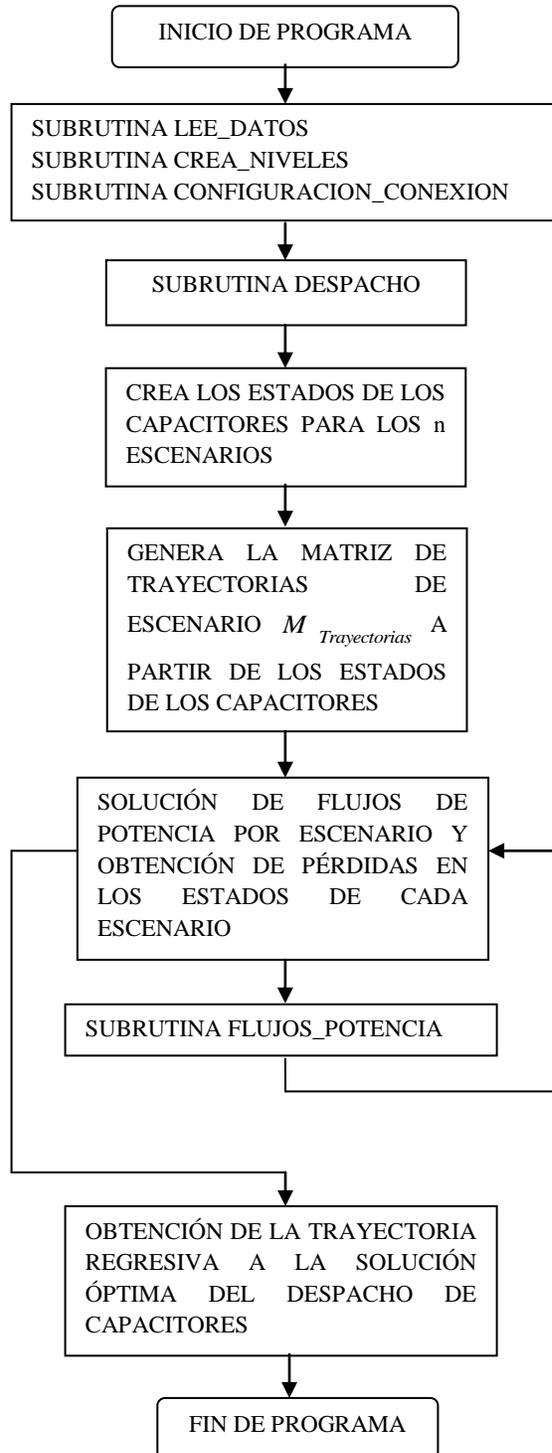


Figura 3.7 Diagrama de bloques del programa

3.4.1 Subrutina LEE_DATOS

La función de esta rutina consiste en leer todos los datos del sistema como son el número de nodos, las conexiones que existen entre los nodos, datos de transformadores, datos de capacitores, los escenarios de carga, el total de cargas fijas y distribuidas así como su correspondiente modelo de carga, impedancias, admitancias, y reguladores de voltaje.

3.4.2 Subrutina CREA_NIVELES

En esta subrutina, en el caso de existir cargas distribuidas entre dos nodos cualquiera, se genera un nodo ficticio entre estos puntos, concentrando en este nodo ficticio las cargas distribuidas como cargas puntuales. Además, se generan nuevos nodos a la salida de los reguladores de voltaje presentes en la red y se determina el nivel en el que están los nodos de la red conforme a lo mencionado en la sección 2.8.1 que es necesario para realizar el barrido regresivo/progresivo del método de flujos de potencia desarrollado en [15].

3.4.3 Subrutina CONFIGURACION_CONEXION

Esta subrutina iguala los voltajes de todos los nodos de la red con el voltaje del nodo compensador. Además, realiza un análisis topológico de la red para localizar reguladores, interruptores y transformadores y realiza un primer cálculo de las corrientes nodales.

3.4.4 Subrutina DESPACHO

En esta subrutina se generan los estados de los capacitores para cada escenario, se crea la matriz $M_{Trayectorias}$ que almacena las trayectorias entre el escenario $n-1$ y el escenario n que son factibles. Mediante la técnica matemática de programación dinámica se resuelve la fórmula recursiva de la ecuación 3.11 para obtener las menores pérdidas del sistema en el periodo de estudio (24 horas) y se obtiene la trayectoria óptima al despacho de capacitores.

3.4.4.1 Subrutina FLUJOS_POTENCIA

En esta subrutina se crean las matrices constantes $[A]$ y $[B]$ para cada rama de la red que relacionan los voltajes línea-neutro del lado de alta y las corrientes de rama con los voltajes línea-neutro del lado de baja.

Dentro de ésta se llama a la subrutina CORRIENTES_RAMAS que calcula las corrientes nodales y corrientes de ramas descritas en la sección 2.8.1. Se procede a aplicar el algoritmo para la solución de flujos de potencia y obtener los voltajes y ángulos así como las pérdidas totales del sistema.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS Y RESULTADOS

Con el objetivo de validar el programa desarrollado de flujos de potencia trifásico por el método de barrido regresivo/progresivo [15] que maneja los elementos de red descritos en el capítulo 2 se realizan las simulaciones de redes de distribución de [16] para obtener los voltajes nodales de la red, potencias de entrada por fase (kW, kVar, kVA), factor de potencia por fase y las pérdidas (kW, kVar, kVA) por fase del alimentador.

4.1 Solución de flujos de potencia del sistema radial de 13 nodos

El sistema radial de 13 nodos mostrado en la figura 4.1 consta de las siguientes características [16]:

1. Alimentador operado a 4.16 kV
2. Un regulador de voltaje en la subestación que consiste de tres reguladores monofásicos conectados en estrella
3. Líneas aéreas y subterráneas
4. Bancos de capacitores en derivación
5. Un transformador 4.16/0.48 estrella aterrizada-estrella aterrizada
6. Cargas puntuales y cargas uniformemente distribuidas desbalanceadas

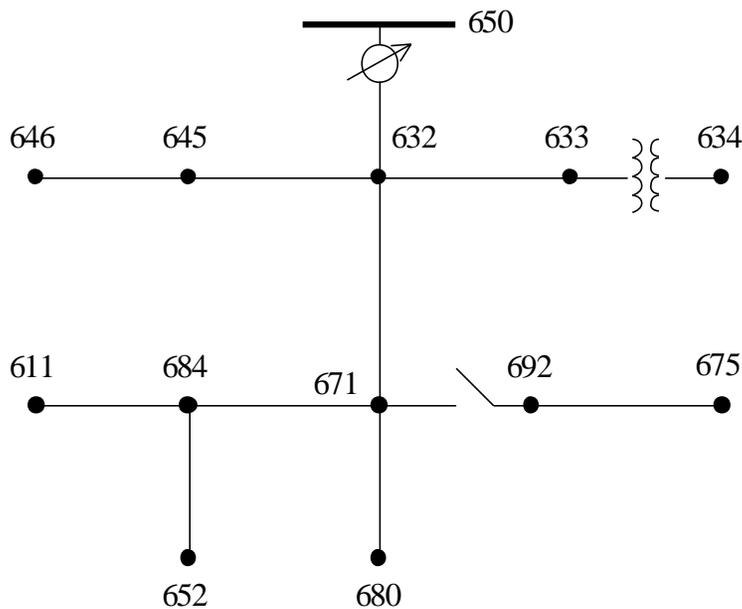


Figura 4.1 Alimentador de distribución trifásico de 13 nodos

Los datos de segmentos de línea (monofásicos, bifásicos o trifásicos), cargas puntuales, cargas distribuidas, datos de transformadores, capacitores, datos del regulador y las impedancias se muestran en las tablas C-1 hasta la C-7 del apéndice C respectivamente.

La tabla C-3 muestra los datos de una carga distribuida entre los nodos 632 y 671, además la figura 4.1 muestra que entre los nodos 650 y 632 existe un regulador de voltaje. El programa desarrollado para la solución de flujos de potencia genera los nodos 693 y 694 mostrados en la tabla 4.1. El nodo 693 es el voltaje de salida del regulador que está conectado a la subestación, mientras que el nodo 694 es generado debido a la existencia de cargas uniformemente distribuidas, las cuales se concentran como cargas puntuales a la mitad de la sección de la línea entre los nodos 632 y 671.

El proceso iterativo de flujos de potencia se realiza para este problema en 15 iteraciones con un error < 0.0001 . La tabla 4.1 muestra los perfiles de voltaje resultado del análisis del alimentador de 13 nodos por el método descrito en la sección 2.8.

Tabla 4.1 Perfiles de voltaje del circuito de 13 nodos

Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)
650	1.0000	0.00	1.0000	-120.00	1.0000	120.00
693	1.0625	0.00	1.0500	-120.00	1.0688	120.00
632	1.0210	-2.49	1.0420	-121.72	1.0175	117.83
645			1.0328	-121.90	1.0155	117.86
633	1.0180	-2.55	1.0401	-121.77	1.0149	117.83
694	1.0058	-3.87	1.0465	-122.03	0.9962	116.85
646			1.0311	-121.98	1.0135	117.90
634	0.9940	-3.23	1.0218	-122.22	0.9961	117.35
671	0.9900	-5.29	1.0529	-122.34	0.9779	116.03
684	0.9881	-5.32			0.9759	115.93
680	0.9900	-5.29	1.0529	-122.34	0.9779	116.03
692	0.9900	-5.29	1.0529	-122.34	0.9779	116.03
652	0.9825	-5.24				
611					0.9739	115.78
675	0.9835	-5.54	1.0553	-122.52	0.9760	116.04

En la tabla 4.1 las celdas vacías indican que no existe la fase respectiva en tal nodo, es decir se trata de un segmento bifásico o monofásico.

La tabla 4.2 muestra un comparativo de las entradas de potencia del sistema y los factores de potencia por fase del alimentador entre los resultados de flujos dados en [16] y los resultados obtenidos.

Tabla 4.2 Entradas y pérdidas por fase del sistema de 13 nodos

Resultados de flujos del alimentador de 13 nodos					Resultados de flujos del alimentador de 13 nodos [16]			
Entradas	Fase a	Fase b	Fase c	Total	Fase a	Fase b	Fase c	Total
kW	1251.3920	977.3304	1348.4780	3577.2000	1251.3980	977.3320	1348.4610	3577.1910
kVar	681.5891	373.4978	669.7041	1724.7910	681.5700	373.4180	669.7840	1724.7720
kVA	1424.9720	1046.2670	1505.6220	3971.3050	1424.9680	1046.2410	1505.6420	3971.2890
fp	0.8782	0.9341	0.8956	0.9008	0.8782	0.9341	0.8956	0.9008
Pérdidas	Fase a	Fase b	Fase c	Total	Fase a	Fase b	Fase c	Total
kW	39.1532	-4.6955	76.5752	111.0329	39.1070	-4.6970	76.6530	111.0630
kVar	152.5946	42.3194	129.8301	324.7441	152.5850	42.2170	129.8500	324.6530
kVA	157.5376	42.5791	150.7303	343.2012	157.5170	42.4780	150.7870	343.1240

En la tabla 4.2 se observan que los resultados obtenidos para el sistema de 13 nodos son idénticos a las entradas y las pérdidas del sistema dadas por [16]. Como se sabe, el análisis de las variables de estado del sistema (magnitudes de voltaje y ángulos de fase) en los sistemas de distribución se realiza mediante un modelado trifásico de los elementos presentes en la red.

4.2 Solución de flujos de potencia del sistema radial de 123 nodos

Con la finalidad de evaluar el programa desarrollado de flujos de potencia trifásico en un alimentador de distribución con una mayor cantidad de elementos de red, se procede con el análisis de un circuito radial de 123 nodos que es mostrado en la figura 4.2 y que consta de las siguientes características [16]:

1. Alimentador operado a 4.16 kV
2. Cuatro reguladores de voltaje
3. Líneas aéreas y subterráneas
4. Bancos de capacitores en derivación
5. Un transformador 4.16/0.48 delta-delta
6. Cargas puntuales desbalanceadas

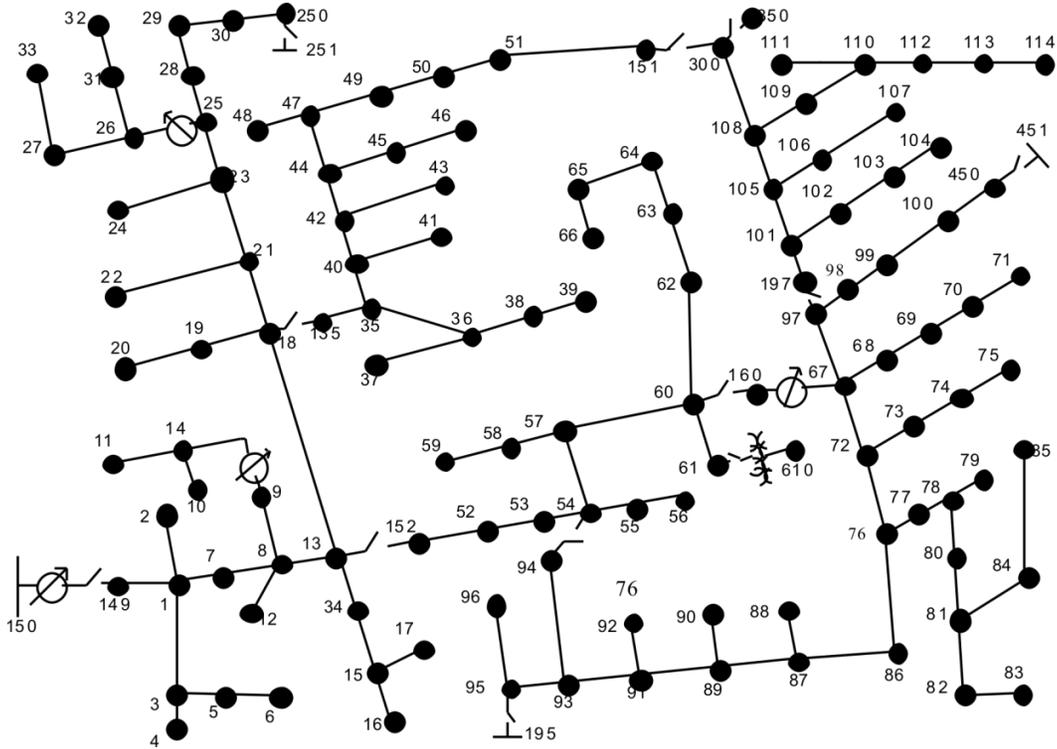


Figura 4.2 Alimentador de distribución de 123 nodos

Los datos de segmentos de línea, cargas puntuales, datos de transformadores, capacitores, datos de reguladores y las impedancias se muestran en las tablas C-8 a C-14 del apéndice C.

El proceso iterativo de flujos de potencia se realiza para este problema en 28 iteraciones con un error < 0.0001 . La tabla 4.3 muestra los perfiles de voltaje para este alimentador. El número de iteraciones crece conforme existan más reguladores de voltaje debido a que se calculan primero los voltajes de salida de cada regulador y con estos voltajes se actualizan todos los demás voltajes aguas abajo del regulador, es decir, se efectúa el proceso iterativo de flujos de potencia para conocer los voltajes de salida del regulador más cercano a la subestación, después realizar con estos voltajes nuevamente una solución de flujos de potencia para conocer los voltajes de salida del regulador más cercano aguas abajo del primer regulador, este proceso de solución de flujos es repetido tantas veces hasta llegar a conocer los voltajes de salida del regulador más alejado de la subestación (el que está en el nivel más alejado) y con estos voltajes ejecutar nuevamente flujos de potencia para conocer los voltajes finales del alimentador.

En la tabla 4.3, los nodos 611 a 614 son nodos generados por el programa de flujos de potencia que indican el voltaje de salida de los reguladores conectados a los nodos 150, 9, 25 y 160 respectivamente.

Tabla 4.3 Perfiles de voltaje del circuito de 123 nodos

Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)
150	1.0000	0.00	1.0000	-120.00	1.0000	120.00
611	1.0438	0.00	1.0438	-120.00	1.0438	120.00
149	1.0438	0.00	1.0438	-120.00	1.0438	120.00
1	1.0313	-0.64	1.0413	-120.31	1.0348	119.63
2			1.0411	-120.31		
3					1.0332	119.59
7	1.0220	-1.10	1.0396	-120.56	1.0291	119.38
4					1.0327	119.59
5					1.0319	119.57
8	1.0160	-1.41	1.0384	-120.72	1.0252	119.21
6					1.0312	119.56
12			1.0381	-120.73		
9	1.0145	-1.44				
13	1.0080	-1.84	1.0362	-120.96	1.0195	118.93
612	1.0018	-1.44				
34					1.0185	118.91
18	0.9990	-2.27	1.0321	-121.20	1.0120	118.86
152	1.0080	-1.84	1.0362	-120.96	1.0195	118.93
14	1.0001	-1.47				
15					1.0182	118.90
19	0.9976	-2.30				
21	0.9984	-2.32	1.0322	-121.20	1.0108	118.84
135	0.9990	-2.27	1.0321	-121.20	1.0120	118.86
52	1.0020	-2.22	1.0350	-121.20	1.0163	118.68
11	0.9995	-1.49				
10	0.9998	-1.48				
16					1.0172	118.88
17					1.0177	118.89
20	0.9968	-2.31				
22			1.0308	-121.23		
23	0.9980	-2.38	1.0326	-121.19	1.0097	118.83
35	0.9964	-2.37	1.0295	-121.29	1.0108	118.81
53	0.9993	-2.39	1.0342	-121.32	1.0147	118.56
24					1.0083	118.80
25	0.9973	-2.43	1.0330	-121.18	1.0088	118.83

Tabla 4.3 (continuación) Perfiles de voltaje del circuito de 123 nodos

Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)
36	0.9954	-2.39	1.0290	-121.33		
40	0.9948	-2.40	1.0283	-121.33	1.0097	118.77
54	0.9977	-2.49	1.0336	-121.39	1.0137	118.47
613	1.0036	-2.43	1.0330	-121.18	1.0025	118.83
28	0.9970	-2.46	1.0332	-121.18	1.0085	118.83
37	0.9946	-2.40				
38			1.0283	-121.35		
41					1.0093	118.76
42	0.9933	-2.44	1.0272	-121.38	1.0088	118.73
55	0.9975	-2.50	1.0336	-121.40	1.0138	118.47
57	0.9946	-2.79	1.0308	-121.59	1.0111	118.26
26	1.0033	-2.46			1.0020	118.82
29	0.9968	-2.48	1.0334	-121.17	1.0080	118.83
39			1.0279	-121.35		
43			1.0259	-121.41		
44	0.9922	-2.47	1.0265	-121.41	1.0079	118.70
56	0.9975	-2.49	1.0334	-121.41	1.0139	118.47
58			1.0302	-121.60		
60	0.9881	-3.47	1.0258	-121.98	1.0051	117.81
27	1.0029	-2.47			1.0020	118.83
31					1.0014	118.81
30	0.9970	-2.48	1.0334	-121.16	1.0076	118.80
45	0.9916	-2.48				
47	0.9911	-2.49	1.0255	-121.44	1.0069	118.66
59			1.0299	-121.61		
61	0.9881	-3.47	1.0258	-121.98	1.0051	117.81
62	0.9873	-3.46	1.0247	-121.95	1.0030	117.79
160	0.9881	-3.47	1.0258	-121.98	1.0051	117.81
33	1.0016	-2.50				
32					1.0010	118.80
250	0.9970	-2.48	1.0334	-121.16	1.0076	118.80
46	0.9912	-2.49				
48	0.9909	-2.50	1.0251	-121.45	1.0067	118.65
49	0.9909	-2.50	1.0249	-121.45	1.0065	118.63
610	0.9881	-3.47	1.0258	-121.98	1.0051	117.81
63	0.9867	-3.45	1.0238	-121.95	1.0020	117.79

Tabla 4.3 (continuación) Perfiles de voltaje del circuito de 123 nodos

Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)
614	1.0313	-3.47	1.0322	-121.98	1.0302	117.81
50	0.9909	-2.51	1.0249	-121.44	1.0062	118.62
64	0.9863	-3.43	1.0219	-121.91	0.9999	117.75
67	1.0294	-3.71	1.0313	-122.16	1.0280	117.67
51	0.9907	-2.52	1.0250	-121.44	1.0062	118.63
65	0.9856	-3.44	1.0216	-121.87	0.9969	117.75
68	1.0278	-3.74				
72	1.0297	-3.81	1.0304	-122.26	1.0278	117.55
97	1.0284	-3.77	1.0308	-122.18	1.0273	117.65
66	0.9859	-3.46	1.0218	-121.84	0.9954	117.75
69	1.0261	-3.78				
73					1.0257	117.51
76	1.0297	-3.87	1.0299	-122.35	1.0284	117.50
98	1.0282	-3.78	1.0306	-122.19	1.0271	117.64
197	1.0284	-3.77	1.0308	-122.18	1.0273	117.65
70	1.0248	-3.80				
74					1.0238	117.48
77	1.0308	-3.94	1.0311	-122.43	1.0293	117.43
86	1.0288	-3.90	1.0282	-122.52	1.0299	117.47
99	1.0284	-3.77	1.0297	-122.20	1.0268	117.60
101	1.0275	-3.81	1.0306	-122.19	1.0268	117.64
71	1.0241	-3.81				
75					1.0228	117.46
78	1.0311	-3.96	1.0315	-122.45	1.0295	117.41
87	1.0282	-3.93	1.0274	-122.61	1.0304	117.45
100	1.0286	-3.77	1.0297	-122.18	1.0264	117.59
102					1.0253	117.62
105	1.0262	-3.85	1.0304	-122.24	1.0270	117.67
79	1.0308	-3.97	1.0316	-122.45	1.0294	117.42
80	1.0332	-4.02	1.0332	-122.51	1.0303	117.30
88	1.0282	-3.96				
89	1.0278	-3.92	1.0271	-122.65	1.0308	117.44
450	1.0286	-3.77	1.0297	-122.18	1.0264	117.59
103					1.0237	117.58
106			1.0292	-122.26		
108	1.0247	-3.92	1.0310	-122.25	1.0269	117.71

Tabla 4.3 (continuación) Perfiles de voltaje del circuito de 123 nodos

Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)	magnitud	ángulo (grados)
81	1.0353	-4.09	1.0355	-122.54	1.0309	117.20
90			1.0270	-122.69		
91	1.0276	-3.92	1.0268	-122.67	1.0310	117.42
104					1.0218	117.55
107			1.0278	-122.29		
109	1.0206	-4.00				
300	1.0247	-3.92	1.0310	-122.25	1.0269	117.71
82	1.0362	-4.13	1.0367	-122.57	1.0316	117.17
84					1.0283	117.15
92					1.0309	117.37
93	1.0273	-3.93	1.0266	-122.68	1.0311	117.43
110	1.0186	-4.04				
83	1.0373	-4.15	1.0378	-122.60	1.0324	117.13
85					1.0271	117.13
94	1.0266	-3.94				
95	1.0272	-3.92	1.0262	-122.70	1.0313	117.43
111	1.0179	-4.05				
112	1.0180	-4.05				
96			1.0260	-122.70		
113	1.0159	-4.09				
114	1.0155	-4.10				

La tabla 4.4 muestra un comparativo de las entradas de potencia del sistema de 123 nodos y los factores de potencia por fase del alimentador entre los resultados de flujos dados en [16] y los resultados obtenidos.

Tabla 4.4 Entradas y pérdidas por fase del sistema de 123 nodos

Resultados de flujos del alimentador de 123 nodos					Resultados de flujos del alimentador de 123 nodos [16]			
Entradas	Fase a	Fase b	Fase c	Total	Fase a	Fase b	Fase c	Total
kW	1461.7350	963.7003	1191.6340	3617.0690	1463.8610	963.4840	1193.1530	3620.4980
kVar	583.5098	343.4598	406.1146	1333.0840	582.1010	343.6870	398.9760	1324.7650
kVA	1573.8980	1023.0750	1258.9360	3854.9060	1575.3510	1022.9470	1258.0920	3855.2570
fp	0.9287	0.9420	0.9465	0.9383	0.9292	0.9419	0.9484	0.9391
Pérdidas	Fase a	Fase b	Fase c	Total	Fase a	Fase b	Fase c	Total
kW	50.3508	10.0828	35.1624	95.5960	50.5400	10.1340	34.9370	95.6110
kVar	101.9872	38.6411	51.8644	192.4927	102.6530	38.8370	52.2370	193.7270
kVA	113.7392	39.9349	62.6603	214.9234	114.4200	40.1370	62.8440	216.0360

En la tabla 4.4 se observa que los resultados obtenidos son muy aproximados a los resultados dados en [16], los alimentadores de 13 y 123 nodos se analizaron con el objetivo de validar el programa en una red con múltiples elementos (123 nodos), los cuales están dados en las tablas C-8 a C-14.

En el capítulo 3 se desarrolla una metodología para la minimización de pérdidas eléctricas con restricciones de voltaje en base a un pronóstico de carga de un alimentador, en la siguiente sección se aplica la metodología desarrollada, considerando que las cargas del alimentador varían proporcionalmente a lo largo del día.

4.3 Minimización de pérdidas en un alimentador de 33 nodos con restricciones de voltaje

El sistema radial de 33 nodos es mostrado en la figura 4.3 [6] y opera a 11 kV, en [14] se resuelve el problema de capacidades y ubicación de los capacitores con un voltaje regulado en la subestación de 1.025 p.u. Estos capacitores se consideran como capacitores conmutables en este ejemplo, con la finalidad de minimizar las pérdidas totales del sistema ante diferentes escenarios de carga, teniendo en cuenta las restricciones de voltaje en los nodos del alimentador para los diferentes escenarios de carga.

Este alimentador de 33 nodos es un caso base para la implementación de la metodología presentada en el capítulo 3 debido a que el sistema está bien regulado.

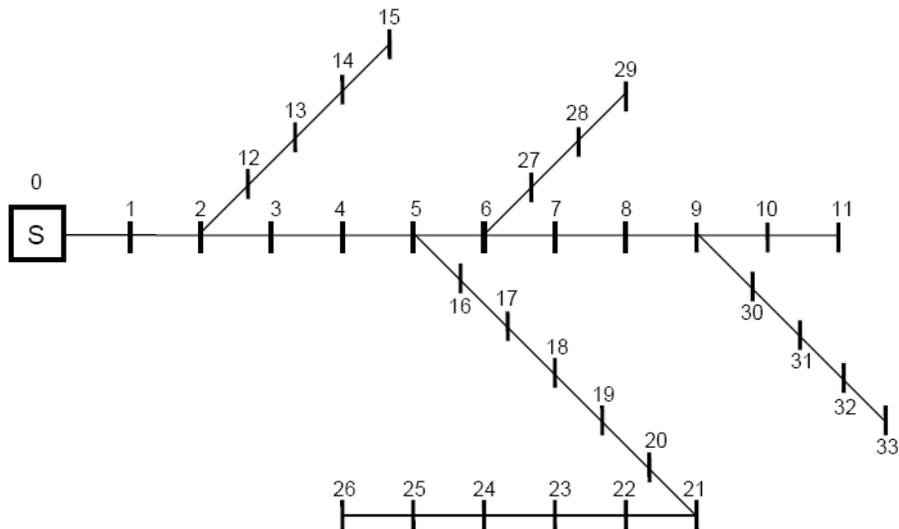


Figura 4.3 Alimentador de distribución de 33 nodos

Los datos de cada sección del alimentador así como las cargas de los nodos se muestran en la tabla C-15 del apéndice C, la tabla C-16 muestra los datos de los capacitores [14] y la tabla C-17 muestra los escenarios de carga para un periodo de 24 horas. Estos escenarios de carga son proporcionales a las cargas del alimentador siendo la hora 18-19 el valor máximo.

En base a estos datos, se pueden calcular las pérdidas del alimentador $P_{n,m}$ para cada estado posible del alimentador $X_{n,m}$ en la hora n . El modelo de las cargas del alimentador es un modelo PQ para esta simulación. Si los 8 capacitores nunca son empleados en el día, el estado de los capacitores en cada escenario será $X_{n,m} = S_1(n), S_2(n), S_3(n), \dots, S_8(n) = (0, 0, 0, \dots, 0)$ para $n = 1, 2, 3, \dots, 24$. El total de pérdidas acumuladas en el alimentador en el día es de 1430.516 kW en este caso. La tabla 4.5 muestra las pérdidas del sistema por escenario para los casos cuando todos los capacitores están en estado conectado y desconectado.

Tabla 4.5 Pérdidas por escenario cuando los capacitores están conectados y desconectados

hora (escenario)	% porcentaje de carga	Pérdidas kW	
		capacitores desconectados (0,0,0,0,0,0,0,0)	capacitores conectados (1,1,1,1,1,1,1,1)
1	40	31.8543	35.5151
2	32	20.2485	31.9497
3	28	15.4504	31.1598
4	25	12.2859	30.9962
5	20	7.8304	31.5328
6	23	10.3814	31.0900
7	30	17.7664	31.4728
8	38	28.7000	34.3737
9	41	33.4958	36.1489
10	48	46.1874	41.7739
11	50	50.2030	43.7658
12	48	46.1874	41.7739
13	43	36.9069	37.5438
14	45	40.4893	39.1073
15	51	52.2770	44.8268
16	60	72.9277	56.3375
17	66	88.7117	66.0025
18	78	125.2448	90.2310
19	100	210.0649	152.2513
20	84	146.0471	104.8477
21	79	128.5924	92.5494
22	70	100.1464	73.3457
23	58	68.0273	53.4718
24	45	40.4894	39.1073
	total	1430.5155	1271.1745

Se puede observar de la tabla anterior que existen escenarios donde las pérdidas con todos los capacitores conectados son mayores a que si estuvieran desconectados, como en el escenario 4, esto se debe a que existe sobrecompensación de potencia reactiva en tales escenarios cuando la demanda de esta no es alta y el exceso de reactivos viaja a través de la red hacia el sistema de subtransmisión conllevado a pérdidas eléctricas en las líneas.

Al aplicar el algoritmo descrito en el capítulo 3 con $K_i = 1$ y las restricciones de voltaje $0.95 \leq V_j \leq 1.05$ se obtienen los resultados mostrados en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Despacho de capacitores óptimo y pérdidas en el alimentador para el caso de $K_i = 1$

hora (escenario)	% porcentaje de carga	Estado $X_{n,m} = [S1(n), S2(n), \dots, S8(n)]$	Pérdidas kW
1	40	0 0 0 0 0 0 0 1	26.9965
2	32	0 0 0 0 0 0 0 1	16.7494
3	28	0 1 0 0 0 0 0 1	11.5647
4	25	0 1 0 0 0 0 0 1	9.2207
5	20	0 1 0 0 0 0 0 1	6.1305
6	23	0 1 0 0 0 0 0 1	7.8626
7	30	0 1 0 1 0 0 0 1	13.1913
8	38	0 1 0 1 0 0 0 1	21.1274
9	41	0 1 0 1 0 1 0 1	24.6234
10	48	0 1 0 1 0 1 0 1	33.6667
11	50	0 1 0 1 0 1 0 1	36.6376
12	48	0 1 0 1 0 1 0 1	33.6667
13	43	0 1 0 1 0 1 0 1	26.9935
14	45	0 1 0 1 0 1 0 1	29.5341
15	51	0 1 1 1 0 1 0 1	38.0698
16	60	0 1 1 1 0 1 0 1	52.9209
17	66	0 1 1 1 0 1 1 1	64.0264
18	78	0 1 1 1 1 1 1 1	90.1329
19	100	0 1 1 1 1 1 1 1	153.8218
20	84	0 1 1 1 1 1 1 1	105.2017
21	79	0 1 1 1 1 1 1 1	92.5269
22	70	0 1 1 1 1 1 1 1	72.6484
23	58	0 1 1 1 1 1 1 1	51.8827
24	45	0 1 1 1 1 1 1 1	36.5611
total			1055.7578

En la tabla 4.6 se observa que al emplear el método de despacho de capacitores las pérdidas disminuyen 215.4167 kW en comparación con las pérdidas obtenidas si todos los capacitores se

dejaran conectados dadas por la tabla 4.5. El número de operaciones conectar/desconectar para este caso es $K_i = 1$ para los capacitores. El método de solución descrito en el capítulo 3 se hace más complejo y emplea mayor memoria computacional cuando el número de capacitores es considerable y la restricción en las operaciones conectar/desconectar (K_i) aumentan.

Las tablas 4.7-4.9 muestran los voltajes de todos los nodos del alimentador en cada uno de los diferentes escenarios de carga.

Tabla 4.7 Voltajes en los escenarios 1-8

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250
1	1.0229	1.0233	1.0237	1.0238	1.0241	1.0240	1.0237	1.0232
2	1.0211	1.0219	1.0225	1.0229	1.0234	1.0231	1.0225	1.0217
3	1.0185	1.0199	1.0209	1.0214	1.0223	1.0218	1.0209	1.0195
12	1.0209	1.0218	1.0224	1.0228	1.0233	1.0230	1.0225	1.0216
4	1.0164	1.0182	1.0195	1.0202	1.0214	1.0207	1.0195	1.0177
13	1.0208	1.0217	1.0224	1.0227	1.0233	1.0229	1.0224	1.0215
5	1.0143	1.0166	1.0183	1.0191	1.0205	1.0197	1.0182	1.0160
14	1.0208	1.0217	1.0223	1.0227	1.0232	1.0229	1.0223	1.0214
6	1.0129	1.0154	1.0174	1.0183	1.0199	1.0190	1.0173	1.0147
16	1.0128	1.0154	1.0172	1.0182	1.0198	1.0188	1.0172	1.0146
15	1.0208	1.0217	1.0223	1.0227	1.0232	1.0229	1.0223	1.0214
7	1.0121	1.0148	1.0169	1.0179	1.0196	1.0186	1.0168	1.0140
27	1.0127	1.0153	1.0173	1.0182	1.0198	1.0189	1.0172	1.0146
17	1.0115	1.0144	1.0163	1.0174	1.0192	1.0181	1.0163	1.0134
8	1.0111	1.0140	1.0162	1.0173	1.0191	1.0181	1.0161	1.0131
28	1.0127	1.0153	1.0172	1.0182	1.0198	1.0188	1.0171	1.0145
18	1.0100	1.0132	1.0154	1.0166	1.0186	1.0174	1.0152	1.0120
9	1.0107	1.0137	1.0159	1.0171	1.0189	1.0178	1.0157	1.0127
29	1.0126	1.0152	1.0172	1.0182	1.0198	1.0188	1.0171	1.0145
19	1.0089	1.0124	1.0146	1.0159	1.0180	1.0168	1.0144	1.0110
10	1.0105	1.0135	1.0158	1.0169	1.0188	1.0177	1.0156	1.0126
30	1.0105	1.0136	1.0158	1.0170	1.0188	1.0177	1.0156	1.0126
20	1.0079	1.0116	1.0140	1.0153	1.0176	1.0163	1.0137	1.0100
11	1.0104	1.0135	1.0158	1.0169	1.0188	1.0177	1.0155	1.0125
31	1.0104	1.0135	1.0158	1.0169	1.0188	1.0176	1.0155	1.0125

Tabla 4.7 (continuación) Tabla 4.7 Voltajes en los escenarios 1-8

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	1	2	3	4	5	6	7	8
21	1.0068	1.0107	1.0132	1.0147	1.0171	1.0157	1.0129	1.0090
32	1.0104	1.0134	1.0157	1.0169	1.0187	1.0176	1.0155	1.0124
22	1.0059	1.0100	1.0126	1.0142	1.0167	1.0152	1.0123	1.0081
33	1.0103	1.0134	1.0157	1.0168	1.0187	1.0176	1.0155	1.0124
23	1.0051	1.0094	1.0121	1.0137	1.0164	1.0148	1.0117	1.0074
24	1.0047	1.0091	1.0119	1.0135	1.0162	1.0146	1.0114	1.0070
25	1.0045	1.0090	1.0118	1.0134	1.0162	1.0145	1.0113	1.0069
26	1.0045	1.0090	1.0117	1.0134	1.0161	1.0145	1.0113	1.0068

Tabla 4.8 Voltajes en los escenarios 9-16

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	9	10	11	12	13	14	15	16
0	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250
1	1.0232	1.0228	1.0227	1.0228	1.0231	1.0230	1.0227	1.0222
2	1.0216	1.0209	1.0207	1.0209	1.0214	1.0212	1.0208	1.0198
3	1.0193	1.0181	1.0178	1.0181	1.0190	1.0187	1.0179	1.0164
12	1.0215	1.0207	1.0205	1.0207	1.0213	1.0210	1.0206	1.0196
4	1.0174	1.0158	1.0153	1.0158	1.0170	1.0165	1.0155	1.0134
13	1.0214	1.0206	1.0203	1.0206	1.0211	1.0209	1.0204	1.0194
5	1.0156	1.0136	1.0131	1.0136	1.0151	1.0145	1.0133	1.0107
14	1.0213	1.0205	1.0203	1.0205	1.0211	1.0209	1.0204	1.0194
6	1.0143	1.0120	1.0114	1.0120	1.0136	1.0130	1.0117	1.0088
16	1.0143	1.0120	1.0113	1.0120	1.0136	1.0130	1.0115	1.0085
15	1.0213	1.0205	1.0203	1.0205	1.0211	1.0209	1.0204	1.0194
7	1.0135	1.0111	1.0104	1.0111	1.0129	1.0122	1.0108	1.0077
27	1.0141	1.0119	1.0112	1.0119	1.0135	1.0128	1.0115	1.0086
17	1.0131	1.0105	1.0098	1.0105	1.0123	1.0116	1.0099	1.0066
8	1.0126	1.0100	1.0093	1.0100	1.0118	1.0111	1.0098	1.0064
28	1.0140	1.0118	1.0111	1.0118	1.0134	1.0127	1.0114	1.0084
18	1.0117	1.0089	1.0081	1.0089	1.0109	1.0101	1.0082	1.0045
9	1.0121	1.0095	1.0087	1.0095	1.0114	1.0106	1.0093	1.0059

Tabla 4.8 (continuación) Voltajes en los escenarios 9-16

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	9	10	11	12	13	14	15	16
29	1.0140	1.0117	1.0110	1.0117	1.0133	1.0127	1.0114	1.0084
19	1.0106	1.0076	1.0067	1.0076	1.0098	1.0089	1.0068	1.0029
10	1.0119	1.0093	1.0085	1.0093	1.0112	1.0104	1.0091	1.0056
30	1.0120	1.0093	1.0085	1.0093	1.0112	1.0105	1.0091	1.0057
20	1.0097	1.0065	1.0056	1.0065	1.0088	1.0079	1.0056	1.0014
11	1.0119	1.0092	1.0084	1.0092	1.0111	1.0103	1.0090	1.0055
31	1.0118	1.0092	1.0084	1.0092	1.0111	1.0103	1.0090	1.0055
21	1.0086	1.0051	1.0041	1.0051	1.0076	1.0066	1.0042	0.9997
32	1.0118	1.0091	1.0083	1.0091	1.0110	1.0102	1.0089	1.0054
22	1.0077	1.0040	1.0030	1.0040	1.0066	1.0056	1.0030	0.9983
33	1.0118	1.0091	1.0083	1.0091	1.0110	1.0102	1.0088	1.0053
23	1.0068	1.0030	1.0019	1.0030	1.0057	1.0047	1.0019	0.9970
24	1.0064	1.0026	1.0014	1.0026	1.0053	1.0042	1.0014	0.9964
25	1.0063	1.0023	1.0012	1.0023	1.0051	1.0040	1.0012	0.9961
26	1.0062	1.0023	1.0011	1.0023	1.0051	1.0040	1.0011	0.9960

Tabla 4.9 Voltajes en los escenarios 17-24

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	17	18	19	20	21	22	23	24
0	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250	1.0250
1	1.0220	1.0214	1.0201	1.0210	1.0210	1.0219	1.0225	1.0233
2	1.0194	1.0183	1.0159	1.0176	1.0176	1.0192	1.0204	1.0218
3	1.0156	1.0138	1.0099	1.0128	1.0128	1.0152	1.0174	1.0196
12	1.0192	1.0180	1.0155	1.0174	1.0174	1.0189	1.0203	1.0217
4	1.0124	1.0100	1.0048	1.0086	1.0086	1.0119	1.0147	1.0178
13	1.0190	1.0178	1.0152	1.0171	1.0171	1.0187	1.0201	1.0215
5	1.0095	1.0065	1.0000	1.0047	1.0047	1.0088	1.0123	1.0160
14	1.0189	1.0177	1.0152	1.0170	1.0170	1.0187	1.0200	1.0215
6	1.0073	1.0039	0.9965	1.0019	1.0019	1.0065	1.0105	1.0147
16	1.0072	1.0038	0.9963	1.0017	1.0017	1.0065	1.0105	1.0147
15	1.0189	1.0177	1.0152	1.0170	1.0170	1.0187	1.0200	1.0215
7	1.0062	1.0025	0.9947	1.0004	1.0004	1.0053	1.0095	1.0139

Tabla 4.9 (continuación) Voltajes en los escenarios 17-24

Voltajes de nodos por escenarios								
Nodos	Escenarios							
	17	18	19	20	21	22	23	24
27	1.0071	1.0036	0.9962	1.0016	1.0016	1.0063	1.0103	1.0145
17	1.0051	1.0014	0.9931	0.9992	0.9992	1.0044	1.0088	1.0136
8	1.0047	1.0008	0.9924	0.9985	0.9985	1.0038	1.0082	1.0130
28	1.0070	1.0035	0.9960	1.0014	1.0014	1.0062	1.0101	1.0144
18	1.0029	0.9988	0.9896	0.9963	0.9963	1.0021	1.0071	1.0123
9	1.0041	1.0000	0.9913	0.9976	0.9976	1.0031	1.0077	1.0126
29	1.0069	1.0034	0.9959	1.0014	1.0014	1.0061	1.0101	1.0144
19	1.0012	0.9967	0.9867	0.9940	0.9940	1.0002	1.0056	1.0112
10	1.0038	0.9996	0.9909	0.9973	0.9973	1.0027	1.0074	1.0124
30	1.0039	0.9997	0.9910	0.9973	0.9973	1.0028	1.0075	1.0124
20	0.9997	0.9948	0.9842	0.9920	0.9920	0.9986	1.0043	1.0103
11	1.0037	0.9995	0.9908	0.9971	0.9971	1.0027	1.0073	1.0123
31	1.0036	0.9994	0.9907	0.9971	0.9971	1.0026	1.0073	1.0123
21	0.9978	0.9926	0.9813	0.9896	0.9896	0.9967	1.0027	1.0092
32	1.0035	0.9993	0.9905	0.9969	0.9969	1.0025	1.0072	1.0122
22	0.9964	0.9908	0.9789	0.9876	0.9876	0.9951	1.0015	1.0083
33	1.0035	0.9993	0.9904	0.9969	0.9969	1.0024	1.0072	1.0122
23	0.9949	0.9891	0.9766	0.9857	0.9857	0.9936	1.0002	1.0073
24	0.9942	0.9883	0.9755	0.9848	0.9848	0.9928	0.9996	1.0069
25	0.9939	0.9879	0.9750	0.9844	0.9844	0.9925	0.9994	1.0067
26	0.9939	0.9878	0.9749	0.9843	0.9843	0.9924	0.9993	1.0066

En las tablas 4.7-4.9 se puede observar que los voltajes en los nodos para todos los escenarios se encuentran dentro de las restricciones ($0.95 \leq V_j \leq 1.05$).

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se obtienen en este trabajo se desglosan a continuación.

5.1 Conclusiones

En este trabajo se desarrollaron las herramientas para obtener los flujos de potencia de entrada por fase, así como las pérdidas eléctricas totales del sistema en dos circuitos de prueba (13 y 123 nodos) con la herramienta computacional desarrollada, estos circuitos de prueba fueron seleccionados por la cantidad de elementos de red presentes en ellos (líneas, transformadores, reguladores de voltaje, cargas puntuales, cargas distribuidas y bancos de capacitores) y empleando el método de barrido regresivo/progresivo se obtienen los voltajes y ángulos de los nodos del sistema.

Se concluye que para realizar el análisis de una red de distribución y obtener las variables de estado del sistema (magnitud y ángulo), es necesario considerar un modelado trifásico de los elementos presentes en la red debido a que este tipo de redes son desbalanceadas.

El método empleado para la solución de flujos de sistemas puramente radiales es un método simple que involucra un proceso iterativo de sólo tres ecuaciones matriciales, dadas en 2.8.1. Estas tres ecuaciones calculan las corrientes inyectadas en los nodos, corrientes de rama y voltajes línea-neutro en los nodos. A partir de los resultados obtenidos se conocen las características del sistema en estado estacionario.

Con el programa de flujos de potencia se efectuó una simulación en un alimentador radial de 33 nodos para minimizar las pérdidas eléctricas totales en un día, mediante la operación conectar/desconectar de capacitores conmutables sujeta a restricciones de voltaje y considerando diferentes escenarios de carga que son proporcionales a la demanda máxima. Para lograr el adecuado despacho de capacitores se emplea una metodología basada en programación dinámica que permite obtener la trayectoria óptima del estado de los capacitores en cada escenario de carga minimizando las pérdidas totales en el periodo de estudio.

Se realizan simulaciones para cada escenario de carga donde se comparan las pérdidas por escenario cuando se tienen todos los capacitores en estado desconectado y en estado conectado, observando que existen escenarios cuyas pérdidas son mayores cuando todos los capacitores están conectados, esto es debido a que en tales escenarios el sistema está sobrecompensado, es decir la potencia reactiva demandada es menor a la potencia compensada por los capacitores y este exceso de potencia viaja desde el punto de compensación hacia el sistema de subtransmisión generando mayores pérdidas.

5.2 Aportaciones

Se desarrolló un programa de flujos de potencia trifásico que emplea el método de barrido regresivo/progresivo para la solución de las redes de distribución en estado estacionario [15], permitiendo conocer las magnitudes y ángulos en los nodos del sistema. El programa de flujos desarrollado tiene la capacidad de manejar varios elementos de una red de distribución. Se presentan resultados de las simulaciones de dos redes (13 y 123 nodos), las cuales son circuitos de prueba de la IEEE [16] para comparar con los resultados obtenidos del programa.

Se implementó la herramienta de programación dinámica utilizando el programa de flujos de potencia para el despacho de capacitores que minimizan las pérdidas totales en un día de una red ante diferentes escenarios de carga.

5.3 Recomendaciones para trabajos futuros

Realizar el despacho de capacitores con datos de un alimentador real basado en su pronóstico de carga.

Realizar estudios económicos en la operación de los capacitores conmutables

Modificar el algoritmo de programación dinámica para poder incrementar el número de operaciones conectar/desconectar de los capacitores.

Realizar la operación coordinada del cambiador de derivación del transformador de la subestación, reguladores de voltaje y los capacitores conmutables presentes en una red para los diferentes escenarios de carga, optimizando la operación de la red.

REFERENCIAS

- [1] Roberto Espinosa y Lara, “*Sistemas de Distribución*”, Limusa, México 1970
- [2] H. L. Willis, “*Power Planning Reference Book*”, Marcel Dekker Inc., New York, 1997
- [3] Turan Gönen, “*Electric Power Distribution System Engineering*”, Boca Raton, Florida, CRC Press 2008.
- [4] Yebra Morón Juan Antonio, “*Compensación de Potencia Reactiva en Sistemas Eléctricos*”, McGraw-Hill, México 1987
- [5] J. J. Grainger and S. Civanlar, “*Volt/Var Control on Distribution Systems with Lateral Branches Using Shunt Capacitors and Voltage Regulators*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No 11, November 1985
- [6] M. M. A. Salama and A. Y. Chikhani, “*A Simplified Network Approach to the Var Control Problem for Radial Distribution Systems*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No 3, July 1993
- [7] Estrada Soria Gabriel, “*Metodología Técnico-económica de Localización de Capacitores en Sistemas de Distribución para la reducción de Pérdidas Eléctricas*”, Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Morelia, PGIIE, Febrero 2003
- [8] Y. Y. Hsu and H. C. Kuo, “*Dispatch of capacitors on distribution system using dynamic programming*”, IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 140, No. 6, November 1993
- [9] F. C. Lu and Y. Y. Hsu, “*Reactive Power/Voltage control in a distribution substation using dynamic programming*”, IEE Proceedings. – Generation, Transmission and Distribution, Vol. 142, No. 6, pp. 639-645, 1995
- [10] F. C. Lu and Y. Y. Hsu, “*Fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation*”, IEEE Trans. Power Systems. Vol. 12, No. 2, pp. 681-688, 1997
- [11] Ruey-Hsun Liang, Chen-Kuo Cheng, “*Dispatch of Main Transformer ULTC and Capacitors in a Distribution System*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, October 2001
- [12] Herrera Pérez Cesar Enrique, “*Compensación de potencia reactiva en redes de distribución y su efecto en los sistemas de transmisión*”, Tesis de Maestría, SEPI/ESIME/IPN, 2001

-
-
- [13] Rojas Hernández Godofredo, “Metodología para la Compensación de Potencia Reactiva en las Redes de Distribución de Energía Eléctrica”, Tesis de Maestría, SEPI/ESIME/IPN, 2002
- [14] Galarza Espín Marco y Riofrío Reyes Carlos, “Localización Óptima de Capacitores en Redes Primarias de Distribución Mediante Técnicas Heurísticas”, Escuela Politécnica Nacional, Jornadas en Ingeniería Eléctrica y Electrónica 2006
- [15] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, “A Three Phase Power Flow Method for Real Time Distribution System Analysis”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 2, May 1995
- [16] IEEE Distribution Planning Working Group Report, “Radial Distribution Test Feeders”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 6, No. 3, August 1991, pp 975-985
- [17] W. H. Kersting, “Distribution System Modelling and Analysis”, Boca Raton, Florida, CRC Press 2002.
- [18] W. H. Kersting and W. Howard Phillips, “Distribution Feeder Line Models”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 4, July/August 1995.
- [19] W. H. Kersting and W. Howard Phillips, “A New Approach to Modeling Three-Phase Transformer Connections”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 35, No. 1, January/February 1999.
- [20] ANSI C84.1-1995, American National Standards for Electric Power Systems and Equipment, Voltage Ratings (60 Hz)
- [21] Cooper Power Systems, “How Step-Voltage Regulators Operate”, Bulletin 77006 February 1993
- [22] T. A. Short, Electric Power Distribution Equipment and Systems, Boca Raton, Florida, CRC Press 2006
- [23] M.T. Bishop, J. D. Foster and D. A. Down, “The Application of Single-Phase Voltage Regulators on Three-Phase Distribution Systems”, IEEE Industry Applications Magazine, July/August 1996
- [24] Bellman E. Richard, “Applied Dynamic Programming”, Princeton University Press 1962
- [25] Robert E. Larson, John L. Casti, “Principles of Dynamic Programming, Basic Analytic and Computational Methods”, M. Dekker, New York 1982
- [26] Stephen P. Bradley, Arnolde C. Hax, Thomas L. Magnanti, “Applied Mathematical Programming”, Addison-Wesley Publishing Company, Inc 1977

-
- [27] Hamdy A. Taha, "Operations Research, an Introduction", 4th edition, Macmillan Publishing Co. 1987
- [28] Frederick S. Hillier, Gerald J. Lieberman, "Introduction to Operation Research", MacGraw-Hill Companies, Inc. 2001

APÉNDICE A

REGULADORES DE VOLTAJE

Un regulador de voltaje mantiene el voltaje dentro de límites predeterminados y asegura el buen funcionamiento de luminarias, aparatos eléctricos y motores [21]. Para entender el funcionamiento del regulador de voltaje primero es necesario entender el funcionamiento del autotransformador. La figura A-1 muestra el diagrama básico de un transformador con una relación de transformación 10:1. Si al devanado primario se le aplican 1000 volts, el voltaje en el devanado secundario tendrá una salida de 100 volts como lo muestra la figura A-1.

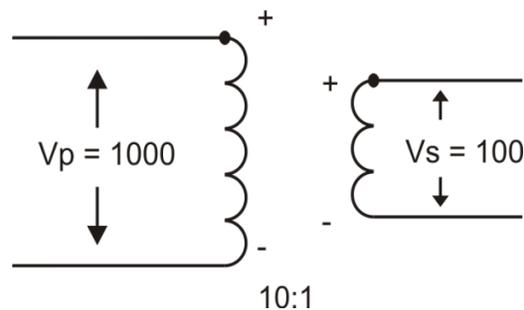


Figura A-1 Transformador con relación de transformación 10:1

Estos dos devanados independientes pueden ser conectados de tal manera que el voltaje del primario se suma con el voltaje del secundario como lo muestra la figura A-2 en una conexión básica de un autotransformador elevador. Debido a que el voltaje del primario es de 1000 volts y el voltaje del secundario de 100 volts, la salida de voltaje para la configuración de autotransformador elevador será de 1100 volts.

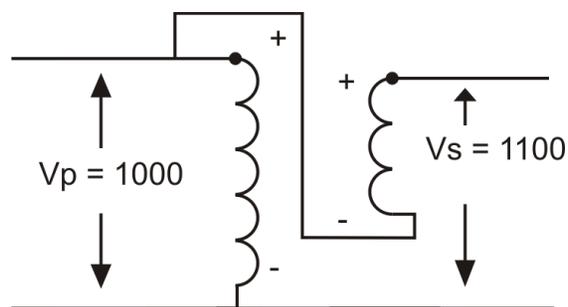


Figura A-2 Autotransformador elevador

La figura A-3 muestra la forma básica de un autotransformador reductor, cuya salida es de 900 volts. El transformador de la figura A-1, con las modificaciones adecuadas se convierte en un autotransformador con la capacidad de elevar el voltaje (figura A-2) o reducirlo (figura A-3) en un

10% para ambos casos. El devanado de bajo voltaje es llamado “devanado serie”, mientras que el devanado de alto voltaje es llamado “devanado shunt”.

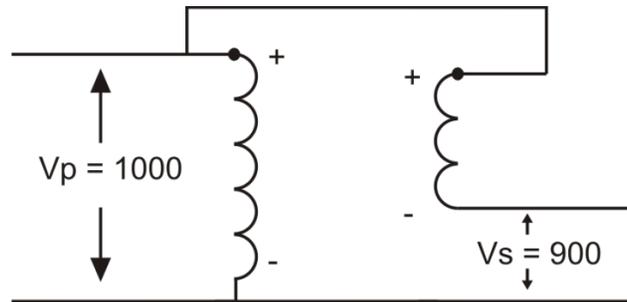


Figura A-3 Autotransformador reductor

A-1 Reguladores de voltaje

Los reguladores de voltaje son autotransformadores con cambiador de tap manual o automático. Los cambios de voltaje se obtienen al variar los taps del devanado serie del autotransformador. Los reguladores mantienen el voltaje dentro de un rango de $\pm 10\%$, en 32 pasos. Sobre una base de 120 volts, cada cambio de posición del tap regula el voltaje 0.75 volts que es equivalente a un $5/8\%$, es decir, sobre la base de 120 volts con un regulador de voltaje estándar de 32 pasos operando a tensión nominal se tendrá un voltaje máximo de $120 + 16(0.75)$ que es igual a 132 volts, y un voltaje mínimo de $120 - 16(0.75)$ que es igual a 108 volts.

Los reguladores tienen un relé regulador de voltaje, el cual cuenta con tres configuraciones que controlan el cambio de tap. La figura A-4 muestra estas tres configuraciones para la decisión de cambio de tap del regulador

- Nivel de voltaje deseado: Es el voltaje deseado a la salida del regulador (sobre una base de 120 V).
- Ancho de banda: Cuando el voltaje medido permanece dentro de la banda (figura A-4) no se realizan cambio de taps. Cuando la diferencia del valor medido de voltaje y del nivel de voltaje deseado excede \pm un medio del ancho de banda se realizan cambio de taps para regresar a la banda de voltajes.
- Tiempo de espera: Es el tiempo que transcurre desde que el voltaje sale de la banda y el controlador inicia un cambio de tap.

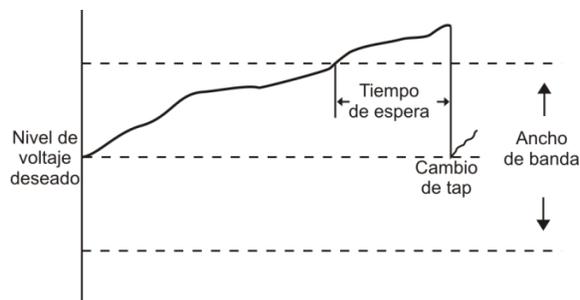


Figura A-4 Control de tap del regulador con base en el nivel de voltaje deseado, ancho de banda y tiempo de espera

A-1.1 Compensador de caída de línea

El cambio de taps en un regulador de voltaje está controlado por un elemento llamado compensador de caída de línea. La figura A-5 muestra este circuito compensador. Una resistencia y una reactancia en el circuito de control se fijan para simular la resistencia y la reactancia de la línea desde el regulador hasta algún punto remoto de la red, llamado centro de carga (punto de regulación). El controlador ajusta los taps tomando en cuenta el voltaje en el relé de voltaje, que es igual, a la diferencia entre el voltaje secundario del transformador de potencial y el voltaje a través del circuito compensador.

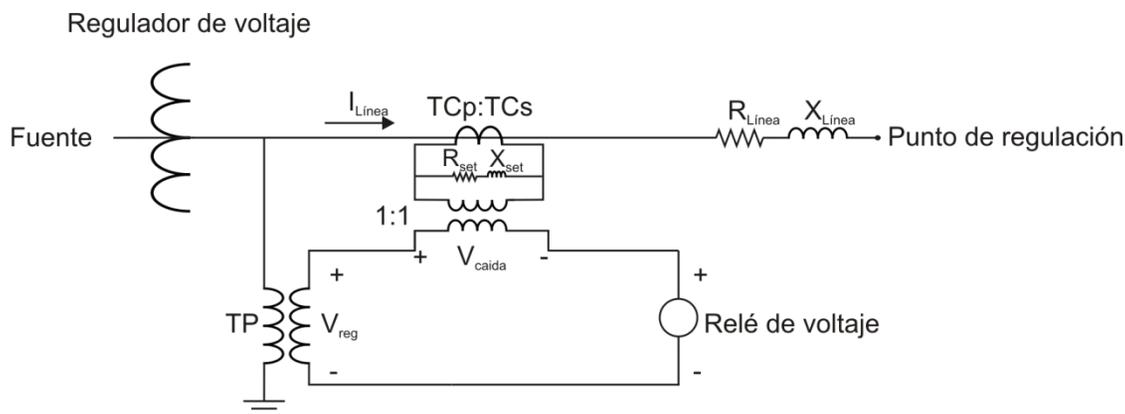


Figura A-5 Circuito compensador de caída de línea

El punto de regulación o centro de carga puede estar localizado hacia el final del alimentador principal después de varios laterales. Como resultado de esto, la corriente medida por el transformador de corriente del circuito compensador no es la corriente que fluye todo el camino desde el regulador hasta el centro de carga. La única forma de determinar el valor de la impedancia equivalente de línea ($R_{Línea}$ y $X_{Línea}$) es resolviendo los flujos de potencia del alimentador en cuestión sin la operación del regulador de voltaje. Las salidas de flujos proporcionarán los voltajes en el nodo del regulador (sin operar) y el punto de regulación. Con estos voltajes, la impedancia equivalente de la línea se puede calcular al dividir la diferencia de voltaje entre el regulador y el punto de regulación entre la corriente de línea.

De la figura A-5, la relación del transformador del transformador de corriente se especifica como $TC_p:TC_s$, donde el valor del primario será la corriente nominal del alimentador. Los valores de R_{set} y X_{set} deben estar dados en volts. Estos valores deben representar la impedancia equivalente del regulador al punto de regulación vista por el circuito compensador. En [17] se dan las ecuaciones que calculan R y X del circuito compensador en ohms como se muestra en la siguiente ecuación.

$$R_{compensador} + jX_{compensador} = (R_{Linea} + jX_{Linea}) \cdot \frac{TC_p}{N_{PT} \cdot TC_s} \Omega \quad (A-1)$$

Donde N_{PT} es la relación de transformación del transformador de potencial. R_{set} y X_{set} en volts se obtiene al multiplicar la ecuación (A-1) por TCs como lo muestra la ecuación (A-2)

$$R_{set} + jX_{set} = (R_{Linea} + jX_{Linea}) \cdot \frac{TC_p}{N_{PT}} V \quad (A-2)$$

Una vez conocida la impedancia equivalente de la línea en Ohms del regulador al centro de carga, los valores requeridos de R_{set} y X_{set} para la configuración del compensador en Volts se determinan con la ecuación (A-2).

A-1.2 Reguladores tipo A y tipo B

Hay dos tipos de reguladores de voltaje [20], estos son los reguladores tipo A y tipo B. La diferencia entre estos reguladores es su conexión interna, ya que la conexión externa y el uso en la red es el mismo. La figura A-6 muestra la conexión de un regulador monofásico tipo A en posición elevadora de acuerdo con [17] y [22].

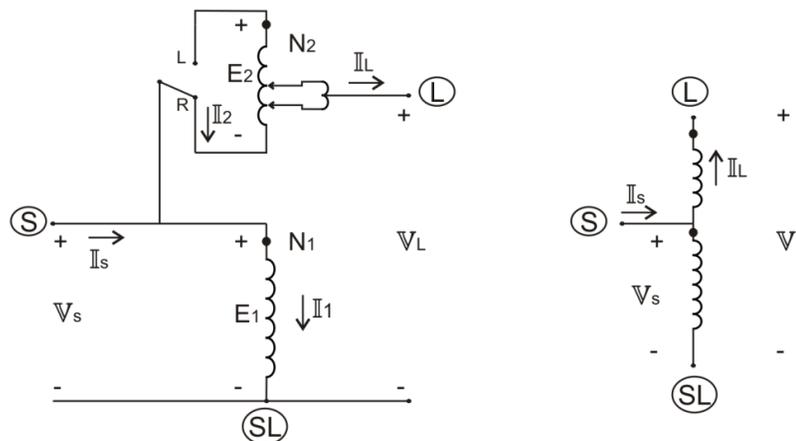


Figura A-6 Regulador de voltaje tipo A en posición elevadora

En la figura A-6 se puede observar un switch reversible en la posición R que indica la posición “raise” o posición elevadora, mientras que la posición L es la posición “lower” o posición reductora

del regulador. La terminal (S) es la fuente que alimenta al regulador, la terminal (L) es el voltaje de carga o voltaje controlado y la terminal (SL) es el lado fuente-carga. La figura A-7 muestra la conexión de un regulador de voltaje tipo A en posición reductora.

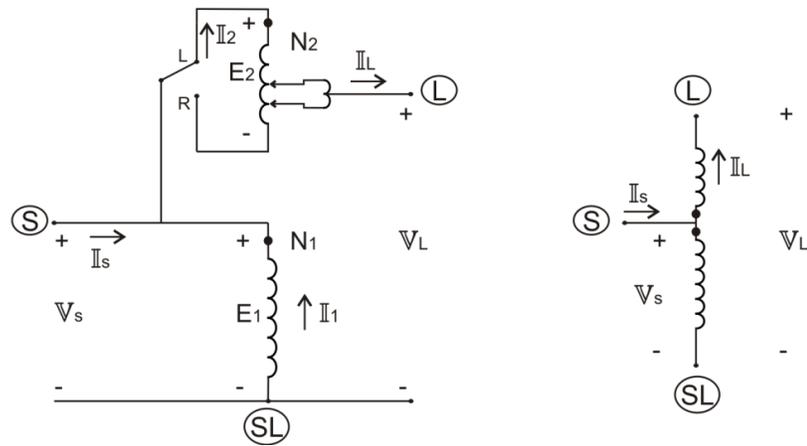


Figura A-7 Regulador de voltaje tipo A en posición reductora

La conexión del regulador tipo B es más común debido a que el circuito primario del sistema (voltaje primario) está conectado vía taps al devanado serie del regulador. El devanado serie se encuentra conectado al devanado shunt y el devanado shunt está conectado directamente al circuito regulado (voltaje secundario). En el regulador tipo B, la excitación es constante debido a que el devanado shunt está conectado a través del circuito regulado. En la figura A-8 se muestra el regulador de voltaje tipo B en una posición elevadora y en la figura A-9 en una posición reductora.

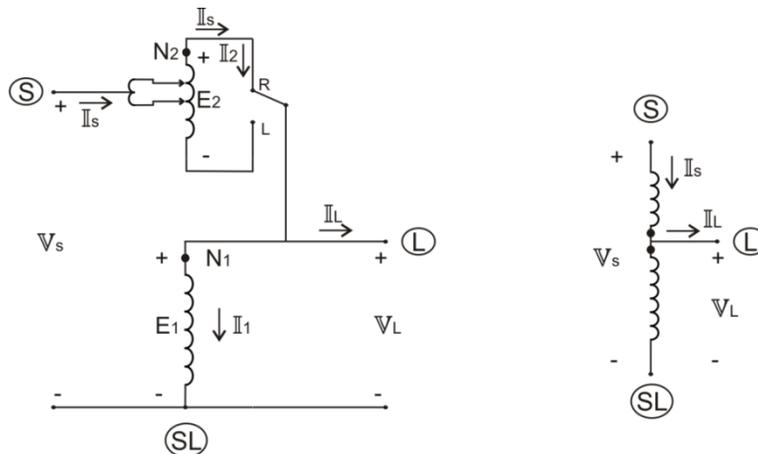


Figura A-8 Regulador de voltaje tipo B en posición elevadora

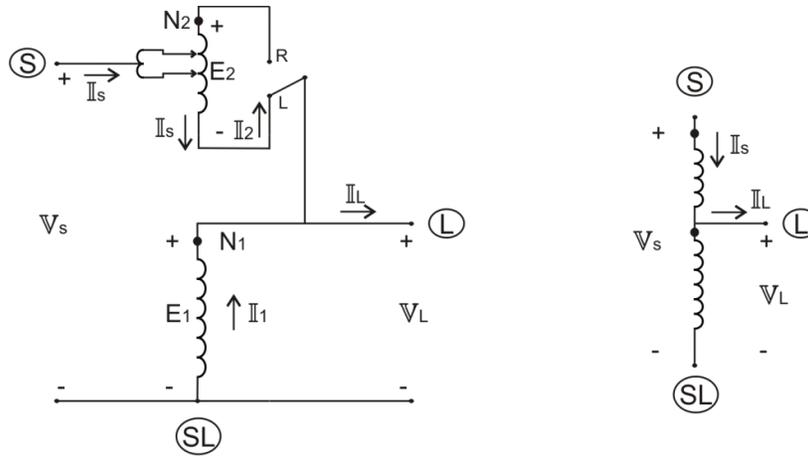


Figura A-9 Regulador de voltaje tipo B en posición reductora

A-2 Modelo matemático para reguladores de voltaje

La tabla A-1 muestra las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes del regulador tipo A en las posiciones reductora y elevadora mostrados en la figura A-6 y figura A-7

Tabla A-1 Ecuaciones de voltaje y corriente para el regulador de voltaje tipo A

Regulador tipo A en posición elevadora		Regulador tipo A en posición reductora		ecuación
Voltajes	Corrientes	Voltajes	Corrientes	
$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$	$N_1 I_1 = N_2 I_2$	$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$	$N_1 I_1 = N_2 I_2$	(A-3)
$V_s = E_1$	$I_L = I_s - I_1$	$V_s = E_1$	$I_L = I_s + I_1$	(A-4)
$E_1 = V_L - E_2$	$I_2 = I_L$	$E_1 = V_L + E_2$	$I_2 = I_L$	(A-5)
$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_s$	$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_L$	$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_s$	$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_L$	(A-6)
$V_L = \left(1 + \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot V_s$	$I_L = \frac{1}{1 + \frac{N_2}{N_1}} \cdot I_s$	$V_L = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot V_s$	$I_L = \frac{1}{1 - \frac{N_2}{N_1}} \cdot I_s$	(A-7)
$V_L = a_R \cdot V_s$	$I_L = \frac{1}{a_R} \cdot I_s$	$V_L = a_R \cdot V_s$	$I_L = \frac{1}{a_R} \cdot I_s$	(A-8)
$a_R = 1 + \frac{N_2}{N_1}$		$a_R = 1 - \frac{N_2}{N_1}$		(A-9)

La tabla A-2 muestra las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes del regulador tipo B en las posiciones reductora y elevadora mostrados en la figura A-8 y figura A-9

Tabla A-2 Ecuaciones de voltaje y corriente para el regulador de voltaje tipo B

Regulador tipo B en posición elevadora		Regulador tipo B en posición reductora		ecuación
Voltajes	Corrientes	Voltajes	Corrientes	
$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$	$N_1 I_1 = N_2 I_2$	$\frac{E_1}{N_1} = \frac{E_2}{N_2}$	$N_1 I_1 = N_2 I_2$	(A-10)
$V_s = E_1 - E_2$	$I_L = I_s - I_1$	$V_s = E_1 + E_2$	$I_L = I_s + I_1$	(A-11)
$V_L = E_1$	$I_2 = I_s$	$V_L = E_1$	$I_2 = I_s$	(A-12)
$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_L$	$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_s$	$E_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot E_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot V_L$	$I_1 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_2 = \frac{N_2}{N_1} \cdot I_s$	(A-13)
$V_L = \frac{1}{\left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right)} \cdot V_s$	$I_L = \left(1 - \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot I_s$	$V_L = \frac{1}{\left(1 + \frac{N_2}{N_1}\right)} \cdot V_s$	$I_L = \left(1 + \frac{N_2}{N_1}\right) \cdot I_s$	(A-14)
$V_L = \frac{1}{a_R} \cdot V_s$	$I_L = a_R \cdot I_s$	$V_L = \frac{1}{a_R} \cdot V_s$	$I_L = a_R \cdot I_s$	(A-15)
$a_R = 1 - \frac{N_2}{N_1}$		$a_R = 1 + \frac{N_2}{N_1}$		(A-16)

La ecuación (A-9) de la tabla A-1 y la ecuación (A-16) de la tabla A-2 dan las relaciones de regulación de voltaje y corriente para los reguladores tipo A y B en función de la razón del número de vueltas del devanado serie (N_2) y el devanado shunt (N_1). El cambio de voltaje en el regulador se obtiene variando el número de vueltas del devanado serie (cambio en la posición del tap) del autotransformador. Cada toma del tap cambia el voltaje un 5/8% o 0.00625 p.u. Así, las ecuaciones (A-9) y (A-16) se pueden modificar para dar la regulación de voltaje y corriente efectiva en función de la posición del tap del devanado serie. La ecuación (A-17) muestra esta relación.

$$a_R = 1 \mp 0.00625 \cdot Tap \quad (A-17)$$

Las ecuaciones (A-18) y (A-19) muestran la relación del voltaje y corriente del lado de la fuente del regulador en función del voltaje y la corriente del lado de carga para el regulador tipo A y B respectivamente.

Conexión tipo A:

$$V_S = \frac{1}{a_R} \cdot V_L \quad I_S = a_R \cdot I_L \quad (\text{A-18})$$

Conexión tipo B:

$$V_S = a_R \cdot V_L \quad I_S = \frac{1}{a_R} \cdot I_L \quad (\text{A-19})$$

Donde a_R se calcula empleando la ecuación (A-17) y el signo de a_R en las ecuaciones (A-18) y (A-19) se muestra en la tabla A-3 para ambos tipos de reguladores.

Tabla A-3 Signo de a_R en reguladores tipo A y B

Posición	Tipo A	Tipo B
Elevadora	+	-
Reductora	-	+

La mayoría de las veces, las compañías suministradoras de energía eléctrica emplean reguladores monofásicos para el control de voltaje de su sistema. De acuerdo con [23] y [17], los reguladores monofásicos pueden conectarse de diferentes formas como son:

- Monofásico línea-tierra
- Estrella abierta (dos reguladores monofásicos línea-tierra)
- Estrella (tres reguladores monofásicos línea-tierra)
- Delta abierta (dos reguladores monofásicos línea-línea)
- Delta (tres reguladores monofásicos conectados línea-línea)

Para propósitos de este trabajo solo los modelos de reguladores conectados en estrella (monofásico, estrella abierta y estrella) y delta abierta son proporcionados en la siguiente sección.

A-2.1 Reguladores conectados en estrella

Las ecuaciones que describen los voltajes línea-tierra y corrientes de línea secundarios en función de los voltajes línea-tierra y corrientes de línea primarios para ambos tipos de reguladores están dadas en las tablas A-4 y A-5.

Tabla A-4 Voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado secundario en función de los voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado primario para conexión de reguladores tipo A en estrella

Regulador tipo A		
Voltajes	Corrientes	ecuación
$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_{LG} = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}_{LG}$	$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Ra}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Rb}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Rc}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$	(A-20)

Tabla A-5 Voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado secundario en función de los voltajes línea-tierra y corrientes de línea del lado primario para conexión de reguladores tipo B en estrella

Regulador tipo B		
Voltajes	Corrientes	ecuación
$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}_{LG} = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Ra}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Rb}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Rc}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix}_{LG}$	$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}$	(A-21)

Donde a_{Ra} , a_{Rb} y a_{Rc} son las relaciones efectivas de transformación para cada regulador monofásico [17]. Si sólo un regulador o dos reguladores monofásicos son conectados en estrella, en las ecuaciones (A-20) y (A-21), los elementos de la diagonal principal que corresponden a reguladores que no están presentes en la conexión estrella serán valores iguales a uno debido a que la línea puede existir pero no estar regulada.

Para analizar los alimentadores de distribución con presencia de reguladores de voltaje por el método descrito en [15], es necesario dejar las ecuaciones (A-20) y (A-21) de la misma forma como se plantearon las ecuaciones (2.7) y (2.42) para voltajes y la ecuación (2.43) para corrientes. Es decir, dejar los voltajes línea-tierra del lado de carga del regulador en función de los voltajes línea-tierra del lado primario y las corrientes de línea del lado de carga, así como, las corrientes de línea del lado primario en función de las corrientes de línea del lado secundario. Las ecuaciones (A-22) y (A-23) muestran estas relaciones.

$$[\mathbf{V}_{LG\ abc}] = [\mathbf{A}_R] \cdot [\mathbf{V}_{LG\ ABC}] - [\mathbf{B}_R] \cdot [\mathbf{I}_{abc}] \quad (\text{A-22})$$

$$[\mathbf{I}_{ABC}] = [\mathbf{d}_R] \cdot [\mathbf{I}_{abc}] \quad (\text{A-23})$$

Donde la matriz constante $[\mathbf{A}_R]$ está dada en las ecuaciones (A-24) y (A-25) para los reguladores A y B respectivamente.

$$[\mathbf{A}_R] = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \quad (\text{A-24})$$

$$[\mathbf{A}_R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Ra}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Rb}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Rc}} \end{bmatrix} \quad (\text{A-25})$$

La matriz constante $[\mathbf{B}_R]$ es una matriz de ceros para ambos tipos de reguladores, mientras que la matriz constante $[\mathbf{d}_R]$ está dada en las ecuaciones (A-26) y (A-27) para los reguladores A y B respectivamente.

$$[\mathbf{d}_R] = \begin{bmatrix} a_{Ra} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rb} & 0 \\ 0 & 0 & a_{Rc} \end{bmatrix} \quad (\text{A-26})$$

$$[d_R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Ra}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Rb}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Rc}} \end{bmatrix} \quad (\text{A-27})$$

A-2.2 Reguladores conectados en delta abierta

Dos reguladores monofásicos pueden conectarse a las fases AB y CB, además de esta conexión, existen otras dos conexiones que son entre las fases BC y AC y entre las fases CA y BA. En esta sección solo se proporcionan las ecuaciones para la conexión entre las fases AB y CB de la misma forma como se describen en las ecuaciones (A-22) y (A-23). Es necesario recordar que el método de flujos de potencia descrito en [15] realiza un barrido progresivo para actualizar los voltajes línea-tierra o línea-neutro. Debido a que los voltajes de este tipo de conexión de reguladores son voltajes línea-línea, será necesario convertirlos a voltajes equivalentes línea-neutro en el proceso iterativo de flujos de potencia empleando la ecuación (2.44) para garantizar la efectividad del método.

De la ecuación (A-22), la matriz constante $[A_R]$ está dada en las ecuaciones (A-28) y (A-29) para los reguladores A y B respectivamente.

$$[A_R] = \begin{bmatrix} a_{Rab} & 0 & 0 \\ 0 & a_{Rcb} & 0 \\ -a_{Rab} & -a_{Rcb} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-28})$$

$$[A_R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Rab}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{a_{Rcb}} & 0 \\ \frac{-1}{a_{Rab}} & \frac{-1}{a_{Rcb}} & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-29})$$

La matriz constante $[B_R]$ en la ecuación (A-22) es una matriz de ceros para ambos tipos de reguladores, mientras que la matriz constante $[d_R]$ en la ecuación (A-23) está dada en las ecuaciones (A-30) y (A-31) para los reguladores A y B respectivamente.

$$[d_R] = \begin{bmatrix} a_{Rab} & 0 & 0 \\ -a_{Rab} & 0 & -a_{Rcb} \\ 0 & 0 & a_{Rcb} \end{bmatrix} \quad (\text{A-30})$$

$$[d_R] = \begin{bmatrix} \frac{1}{a_{Rab}} & 0 & 0 \\ \frac{1}{-a_{Rab}} & 0 & \frac{1}{-a_{Rcb}} \\ 0 & 0 & \frac{1}{a_{Rcb}} \end{bmatrix} \quad (\text{A-31})$$

Donde a_{Rab} y a_{Rcb} son las relaciones efectivas de transformación entre las fases AB y CB para cada regulador.

APÉNDICE B

PROGRAMACIÓN DINÁMICA

B-1 Introducción

La programación dinámica, desarrollada por Richard E. Bellman en la década de los 50 [24], está considerada como una potente herramienta de optimización de carácter muy general. Constituye una disciplina muy importante de las matemáticas aplicadas y la investigación de operaciones, su método estándar se aplica en disciplinas tan dispares como ingeniería, inteligencia artificial, economía, gestión etc.

El objetivo de la programación dinámica es resolver una familia de problemas de optimización con restricciones conocidos como problemas de decisión secuencial o multietapa [25-26]. La principal característica de estos procedimientos es que cualquier decisión realizada en un instante de tiempo se ve afectada por las decisiones predecesoras y afectas a sus sucesoras.

La programación dinámica se basa en el principio de optimalidad de Bellman [24], tal como se ilustra en la figura B-1.

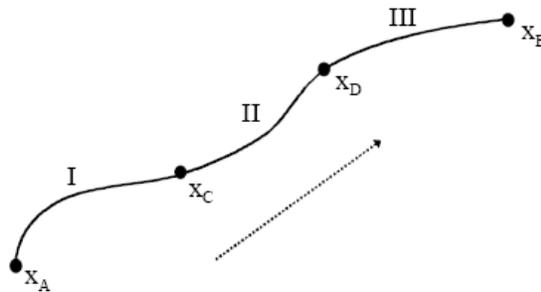


Figura B-1 Principio de optimalidad de Bellman: si I-II-III es la trayectoria óptima desde el estado X_A hasta el estado X_B , de acuerdo a una función de costo dada, entonces II es la trayectoria óptima para el subproblema X_C - X_D .

Para dar solución a un problema el método consiste en ir resolviendo recursivamente subproblemas cada vez mayores hasta que se soluciona el problema completamente.

En contraste con la programación lineal, la programación dinámica no cuenta con una formulación matemática estándar, sino que se trata de un enfoque de tipo general para la solución de problemas, y las ecuaciones específicas que se usan se deben desarrollar para representar cada situación individual [28]. Esta habilidad se puede desarrollar mejor mediante la exposición de un ejemplo de aplicación de programación dinámica y el análisis de las características comunes de esta aplicación.

B-2 Problema de la diligencia [27-28]

Este problema fue desarrollado por Harvey M. Wagner en Stanford University para ilustrar las características e introducir la terminología de la programación dinámica. El problema trata de un viajero que desea ir de Missouri a California en una diligencia. Tiene los puntos de salida y destino conocidos, pero tiene múltiples opciones para viajar a través del territorio. En la figura B-2 se muestran las rutas posibles, en donde cada estado está representado por un círculo con una letra y la dirección del viaje es siempre de izquierda a derecha en el diagrama. En el diagrama se observa que se requieren de cuatro etapas (jornadas en diligencia) para viajar desde el punto de partida en el estado A (Missouri) a su destino en el estado J (California). El costo c_{ij} asociado de ir de un estado a otro también es mostrado en la figura B-2

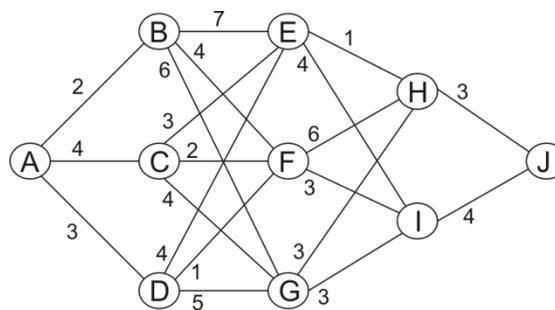


Figura B-2 Sistema de caminos y costos para el problema de la diligencia

Si este problema se resuelve al elegir la ruta con menor costo en cada etapa sucesiva no se conduce a una decisión óptima global. Al seguir esta estrategia se obtiene la ruta $A \rightarrow B \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow J$, con un costo total de 13. Esta ruta no resulta con el menor costo total para ir del territorio A al territorio J a pesar de tomar las rutas con menores costos en las etapas sucesivas ya que, la estrategia $A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow J$ tiene un costo total de 11.

Un enfoque para resolver este problema es el de prueba y error que consiste en calcular el costo total para cada ruta posible. Sin embargo, el número de rutas es grande (18) y el cálculo del costo total para cada ruta no sería una tarea atractiva.

La programación dinámica proporciona una solución con mucho menos esfuerzo que la enumeración exhaustiva. La programación dinámica comienza con una pequeña porción del problema original y encuentra la solución óptima para este problema pequeño. Después agranda gradualmente el problema y encuentra la solución óptima actual a partir de la que le precede, hasta resolver el problema original completo. En el problema de la diligencia, se comienza con el problema sencillo en el que el viajero casi ha llegado al final de su viaje y sólo tiene una etapa más por recorrer. La solución óptima obvia para este problema reducido es ir del estado actual (H o I) a su destino final (estado J). En cada una de las iteraciones siguientes, el problema se aumenta de uno en uno el número de etapas que le quedan por recorrer para completar el viaje. En cada problema

aumentado se puede encontrar la solución óptima del lugar al que debe dirigirse desde cada estado posible tomando en cuenta los resultados obtenidos en la iteración anterior.

B-2.1 Formulación

Sean x_n ($n = 1, 2, 3, 4$) las variables de decisión que representan el destino inmediato de la etapa n (el n -ésimo viaje que se hará en diligencia). Entonces, la ruta seleccionada es $A \rightarrow x_1 \rightarrow x_2 \rightarrow x_3 \rightarrow x_4$, en donde $x_4 = J$.

Sea $f_n(s, x_n)$ el costo total de la mejor política global para las etapas restantes, dado que el viajero se encuentra en el estado s , listo para iniciar la etapa n y elige x_n como destino inmediato. Dados s y n , sea x_n^* el valor de x_n (no necesariamente único) que minimiza $f_n(s, x_n)$, y sea $f_n^*(s)$ el valor mínimo correspondiente de $f_n(s, x_n)$. Entonces,

$$f_n^*(s) = \min_{x_n} f_n(s, x_n) = f_n(s, x_n^*) \quad (\text{B-1})$$

Donde de la ecuación anterior

$$f_n(s, x_n) = c_{s, x_n} + f_{n+1}^*(x_n) \quad (\text{B-2})$$

Los términos de la derecha en la ecuación (B-2) son el costo inmediato (etapa n) y costo futuro mínimo (etapas $n+1$ en adelante).

El valor de c_{s, x_n} es el costo de ir del estado actual en la etapa n a un estado factible de la etapa $n+1$. Como el destino final (estado J) se alcanza al terminar la etapa 4 (A es la etapa 0), $f_5^*(J) = 0$.

El objetivo es encontrar $f_1^*(A)$ y la ruta correspondiente. Empleando programación dinámica se encuentra esta ruta sucesiva $f_4^*(s), f_3^*(s), f_2^*(s)$ para cada uno de los estados posibles s y al último emplear $f_2^*(s)$ para encontrar $f_1^*(A)$.

B-2.2 Solución

Cuando el viajero tiene solo una etapa por recorrer ($n = 4$), su ruta de ahí en adelante está perfectamente determinada por su estado actual s (H o I) y su destino final, $x_4 = J$ de manera que la ruta para esta última jornada en diligencia es $s \rightarrow J$. Como $f_4^*(s) = f_4(s, J) = c_{s, J}$, la solución inmediata al problema para $n = 4$ es como se muestra en la tabla B-1.

Tabla B-1 Solución al problema de la diligencia cuando $n = 4$

x_4	$f_4^*(s) = f_4(s, J) = c_{s,J}$				
s	J			$f_4^*(s)$	x_4^*
H	3			3	J
I	4			4	J

Cuando el viajero tiene dos etapas por recorrer ($n = 3$), si se encuentra en el estado F. Entonces, con referencia en la figura B-2 se debe ir al estado H o al estado I con un costo inmediato de $c_{F,H} = 6$ o $c_{F,I} = 3$, respectivamente. Si se elige ir de F hacia H, el costo adicional mínimo al llegar a este último está dado en la tabla anterior como $f_4^*(H) = 3$, de manera que el costo total de esta decisión es $6+3=9$. Si se decide ir de F hacia I, el costo total es de $3+4 = 7$, que es menor. Por lo tanto, la opción óptima $x_3^* = I$, ya que da el costo mínimo, $f_3^*(F) = 7$. Las tablas B-2, B-3 y B-4 proporcionan las soluciones cuando $n = 3, 2, 1$.

Tabla B-2 Solución al problema de la diligencia cuando $n = 3$

x_3	$f_3(s, x_3) = c_{s,x_3} + f_4^*(x_3)$			
s	H	I	$f_3^*(s)$	x_3^*
E	4	8	4	H
F	9	7	7	I
G	6	7	6	H

Tabla B-3 Solución al problema de la diligencia cuando $n = 2$

x_2	$f_2(s, x_2) = c_{s,x_2} + f_3^*(x_2)$				
s	E	F	G	$f_2^*(s)$	x_2^*
B	11	11	12	11	E o F
C	7	9	10	7	E
D	8	8	11	8	E o F

Tabla B-4 Solución al problema de la diligencia cuando $n = 1$

x_1	$f_1(s, x_1) = c_{s,x_1} + f_2^*(x_1)$				
s	B	C	D	$f_1^*(s)$	x_1^*
A	13	11	11	11	C o D

Se puede identificar una solución óptima a partir de los resultados de las tablas B-1 a B-4. Los resultados del problema para $n = 1$ indican que el viajero debe elegir como primer destino inmediato a partir de A el estado C o el estado D como lo muestra la tabla B-4. Si el viajero elige $x_1^* = C$. Para $n = 2$, el resultado para $s = C$ es $x_2^* = E$ como se muestra en la tabla B-3. Esto

conduce al problema de $n = 3$, que da $x_3^* = H$ para $s = E$ como lo muestra la tabla B-2, y el problema para $n = 4$ indica que $x_4^* = J$ para $s = H$ como lo muestra la tabla B-1. De este modo, una ruta óptima es $A \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow J$. Por otra parte si se elige $x_1^* = D$ se obtienen otras dos rutas óptimas $A \rightarrow D \rightarrow E \rightarrow H \rightarrow J$ y $A \rightarrow D \rightarrow F \rightarrow I \rightarrow J$. Estas tres rutas tienen un costo total de $f_1^*(A) = 11$.

B-3 Características de los problemas de programación dinámica

El problema de la diligencia es un ejemplo diseñado con el propósito de disponer de una interpretación de la estructura de los problemas de programación dinámica. Los siguientes puntos son las características básicas que distinguen a los problemas de programación dinámica [28].

1. El problema se puede dividir en *etapas* que requieren una *política de decisión* en cada una de ellas.
2. Cada etapa tiene cierto número de *estados* asociados con su inicio.
3. El efecto de la *política de decisión* en cada etapa es transformar el estado actual en un estado asociado con el inicio de la siguiente etapa.
4. El procedimiento de solución está diseñado para encontrar una *política óptima* para el problema completo, es decir, una receta para la política de decisión óptima en cada etapa para cada uno de los estados posibles.
5. Dado el estado actual, una política óptima para las etapas restantes es independiente de la política adoptada en etapas anteriores. Por lo tanto, la decisión inmediata óptima depende sólo del estado actual y no de cómo se llegó ahí. Éste es el principio de optimalidad para programación dinámica.
6. El procedimiento de solución se inicia al encontrar la política óptima para la última etapa.
7. Se dispone de una *relación recursiva* que identifica la política óptima para la etapa n , dada la política óptima para la etapa $n+1$.

El procedimiento de solución para este problema de la diligencia se puede desarrollar hacia atrás como en el ejemplo o hacia adelante sin ningún problema.

APÉNDICE C

Tabla C-1 Segmentos de línea para el alimentador trifásico de 13 nodos

Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Impedancia del tramo (Configuración)
632	645	500	603
632	633	500	602
633	634	0	XFM-1
645	646	300	603
650	632	2000	601
684	652	800	607
632	671	2000	601
671	684	300	604
671	680	1000	601
671	692	0	Interruptor
684	611	300	605
692	675	500	606

En la tabla C-1 el término XFM-1 hace referencia a un transformador entre los nodos 633 y 634.

Tabla C-2 Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 13 nodos

Nodo	Carga	Fase-1		Fase-2		Fase-3	
		Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW
634	Y-PQ	160	110	120	90	120	90
645	Y-PQ	0	0	170	125	0	0
646	D-Z	0	0	230	132	0	0
652	Y-Z	128	86	0	0	0	0
671	D-PQ	385	220	385	220	385	220
675	Y-PQ	485	190	68	60	290	212
692	D-I	0	0	0	0	170	151
611	Y-I	0	0	0	0	170	80
TOTAL		1158	606	973	627	1135	753

Tabla C-3 Cargas distribuidas para el alimentador trifásico de 13 nodos

Nodo A	Nodo B	Carga	Fase-1		Fase-2		Fase-3	
			Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW
632	671	Y-PQ	17	10	66	38	117	68

Tabla C-4 Datos de transformadores para el alimentador trifásico de 13 nodos

	kVA	kV-alta	kV-baja	R - %	X - %
Subestación:	5,000	115 - D	4.16 Gr. Y	1	8
XFM -1	500	4.16 - Gr. Y	0.48 - Gr. Y	1.1	2

Tabla C-5 Datos de capacitores para el alimentador trifásico de 13 nodos

Nodo	Fase-A	Fase-B	Fase-C
	kVAr	kVAr	kVAr
675	200	200	200
611			100
Total	200	200	300

Tabla C-6 Datos del regulador de voltaje para el alimentador trifásico de 13 nodos

Número de regulador:	1		
Segmento de línea:	650 - 632		
Localizado en:	650		
Fases:	A - B -C		
Conexión:	3-Ph, Y		
Fases Monitoreadas:	A-B-C		
Ancho de Banda:	2.0 volts		
Relación de Transformador de Potencial:	20		
Nivel de Corriente Primaria del Transformador:	700		
Configuraciones del Compensador:	Ph-A	Ph-B	Ph-C
Configuración R :	3	3	3
Configuración X :	9	9	9
Voltaje deseado:	122	122	122

Tabla C-7 Impedancias del alimentador trifásico de 13 nodos

Configuración 601: Segmento trifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.3465	1.0179	0.1560	0.5017	0.1580	0.4236
		0.3375	1.0478	0.1535	0.3849
			0.3414	1.0348	
B en micro Siemens por milla					
6.2998	-1.9958	-1.2595			
	5.9597	-0.7417			
		5.6386			
Configuración 602: Segmento trifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.7526	1.1814	0.1580	0.4236	0.1560	0.5017
		0.7475	1.1983	0.1535	0.3849
			0.7436	1.2112	
B en micro Siemens por milla					
5.6990	-1.0817	-1.6905			
	5.1795	-0.6588			
		5.4246			
Configuración 603: Segmento bifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		1.3294	1.3471	0.2066	0.4591
				1.3238	1.3569

Tabla C-7 (continuación) Impedancias del alimentador trifásico de 13 nodos

B en micro Siemens por milla					
0.0000	0.0000	0.0000			
	4.7097	-0.8999			
		4.6658			
Configuración 604: Segmento bifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
1.3238	1.3569	0.0000	0.0000	0.2066	0.4591
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
				1.3294	1.3471
B en micro Siemens por milla					
4.6658	0.0000	-0.8999			
	0.0000	0.0000			
		4.7097			
Configuración 605: Segmento monofásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
				1.3292	1.3475
B en micro Siemens por milla					
0.0000	0.0000	0.0000			
	0.0000	0.0000			
		4.5193			
Configuración 606: Segmento trifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.7982	0.4463	0.3192	0.0328	0.2849	-0.0143
		0.7891	0.4041	0.3192	0.0328
				0.7982	0.4463
B en micro Siemens por milla					
96.8897	0.0000	0.0000			
	96.8897	0.0000			
		96.8897			
Configuración 607: Segmento monofásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
1.3425	0.5124	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
				0.0000	0.0000
B en micro Siemens por milla					
88.9912	0.0000	0.0000			
	0.0000	0.0000			
		0.0000			

En la tabla C-7 se proporcionan los elementos triangulares superiores de las matrices de impedancia y admitancia de fase dadas por las ecuaciones (2.1) y (2.4) de la sección 2.2 respectivamente.

Tabla C-8 Segmentos de línea para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Impedancia del tramo (Configuración)	Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Impedancia del tramo (Configuración)
1	2	175	10	60	62	250	12
1	3	250	11	62	63	175	12
1	7	300	1	63	64	350	12
3	4	200	11	64	65	425	12
3	5	325	11	65	66	325	12
5	6	250	11	67	68	200	9
7	8	200	1	67	72	275	3
8	12	225	10	67	97	250	3
8	9	225	9	68	69	275	9
8	13	300	1	69	70	325	9
9	14	425	9	70	71	275	9
13	34	150	11	72	73	275	11
13	18	825	2	72	76	200	3
14	11	250	9	73	74	350	11
14	10	250	9	74	75	400	11
15	16	375	11	76	77	400	6
15	17	350	11	76	86	700	3
18	19	250	9	77	78	100	6
18	21	300	2	78	79	225	6
19	20	325	9	78	80	475	6
21	22	525	10	80	81	475	6
21	23	250	2	81	82	250	6
23	24	550	11	81	84	675	11
23	25	275	2	82	83	250	6
25	26	350	7	84	85	475	11
25	28	200	2	86	87	450	6
26	27	275	7	87	88	175	9
26	31	225	11	87	89	275	6
27	33	500	9	89	90	225	10
28	29	300	2	89	91	225	6
29	30	350	2	91	92	300	11
30	250	200	2	91	93	225	6
31	32	300	11	93	94	275	9

Tabla C-8 (continuación) Segmentos de línea para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Impedancia del tramo (Configuración)	Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Impedancia del tramo (Configuración)
34	15	100	11	93	95	300	6
35	36	650	8	95	96	200	10
35	40	250	1	97	98	275	3
36	37	300	9	98	99	550	3
36	38	250	10	99	100	300	3
38	39	325	10	100	450	800	3
40	41	325	11	101	102	225	11
40	42	250	1	101	105	275	3
42	43	500	10	102	103	325	11
42	44	200	1	103	104	700	11
44	45	200	9	105	106	225	10
44	47	250	1	105	108	325	3
45	46	300	9	106	107	575	10
47	48	150	4	108	109	450	9
47	49	250	4	108	300	1000	3
49	50	250	4	109	110	300	9
50	51	250	4	110	111	575	9
52	53	200	1	110	112	125	9
53	54	125	1	112	113	525	9
54	55	275	1	113	114	325	9
54	57	350	3	135	35	375	4
55	56	275	1	149	1	400	1
57	58	250	10	152	52	400	1
57	60	750	3	160	67	350	6
58	59	250	10	197	101	250	3
60	61	550	5	60	160	0	Interruptor
61	610	0	XFM -1	61	610	0	Interruptor
13	152	0	Interruptor	97	197	0	Interruptor
18	135	0	Interruptor	150	149	0	Interruptor

En la tabla C-8 el término XFM-1 hace referencia a un transformador localizado entre los nodos 61 y 610.

Tabla C-9 Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo	Carga	Fase-1	Fase-1	Fase-2	Fase-2	Fase-3	Fase-3
		Modelo	kW	kVAr	kW	kVAr	kW
1	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
2	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
4	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
5	Y-I	0	0	0	0	20	10
6	Y-Z	0	0	0	0	40	20
7	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
9	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
10	Y-I	20	10	0	0	0	0
11	Y-Z	40	20	0	0	0	0
12	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
16	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
17	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
19	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
20	Y-I	40	20	0	0	0	0
22	Y-Z	0	0	40	20	0	0
24	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
28	Y-I	40	20	0	0	0	0
29	Y-Z	40	20	0	0	0	0
30	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
31	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
32	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
33	Y-I	40	20	0	0	0	0
34	Y-Z	0	0	0	0	40	20
35	D-PQ	40	20	0	0	0	0
37	Y-Z	40	20	0	0	0	0
38	Y-I	0	0	20	10	0	0
39	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
41	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
42	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
43	Y-Z	0	0	40	20	0	0
45	Y-I	20	10	0	0	0	0
46	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
47	Y-I	35	25	35	25	35	25
48	Y-Z	70	50	70	50	70	50

Tabla C-9 (continuación) Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo	Carga	Fase-1	Fase-1	Fase-2	Fase-2	Fase-3	Fase-3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
49	Y-PQ	35	25	70	50	35	25
50	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
51	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
52	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
53	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
55	Y-Z	20	10	0	0	0	0
56	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
58	Y-I	0	0	20	10	0	0
59	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
60	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
62	Y-Z	0	0	0	0	40	20
63	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
64	Y-I	0	0	75	35	0	0
65	D-Z	35	25	35	25	70	50
66	Y-PQ	0	0	0	0	75	35
68	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
69	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
70	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
71	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
73	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
74	Y-Z	0	0	0	0	40	20
75	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
76	D-I	105	80	70	50	70	50
77	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
79	Y-Z	40	20	0	0	0	0
80	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
82	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
83	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
84	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
85	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
86	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
87	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
88	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
90	Y-I	0	0	40	20	0	0

Tabla C-9 (continuación) Cargas puntuales para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo	Carga	Fase-1	Fase-1	Fase-2	Fase-2	Fase-3	Fase-3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
92	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
94	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
95	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
96	Y-PQ	0	0	20	10	0	0
98	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
99	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
100	Y-Z	0	0	0	0	40	20
102	Y-PQ	0	0	0	0	20	10
103	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
104	Y-PQ	0	0	0	0	40	20
106	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
107	Y-PQ	0	0	40	20	0	0
109	Y-PQ	40	20	0	0	0	0
111	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
112	Y-I	20	10	0	0	0	0
113	Y-Z	40	20	0	0	0	0
114	Y-PQ	20	10	0	0	0	0
Total		1420	775	915	515	1155	635

Tabla C-10 Datos de transformadores para el alimentador trifásico de 123 nodos

	kVA	kV-alta	kV-baja	R - %	X - %
Subestación:	5,000	115 - D	4.16 Gr-Y	1	8
XFM -1	150	4.16 - D	.480 - D	1.27	2.72

Tabla C-11 Datos de capacitores para el alimentador trifásico de 123 nodos

Nodo	Fase-A	Fase-B	Fase-C
	kVAr	kVAr	kVAr
83	200	200	200
88	50		
90		50	
92			50
Total	250	250	250

Tabla C-12 Datos de reguladores de voltaje 1 y 2 para el alimentador trifásico de 123 nodos

Número de regulador:	1	Número de regulador:	2
Segmento de línea:	150 - 149	Segmento de línea:	9 - 14
Localizado en:	150	Localizado en:	9
Fases:	A-B-C	Fases:	A
Conexión:	3-Ph, Wye	Conexión:	1-Ph, L- G
Fases Monitoreadas:	A	Fases Monitoreadas:	A
Ancho de Banda:	2.0 volts	Ancho de Banda:	2.0 volts
Relación de Transformador de Potencial:	20	Relación de Transformador de Potencial:	20
Nivel de Corriente Primaria del Transformador:	700	Nivel de Corriente Primaria del Transformador:	50
Configuraciones del Compensador:	Ph-A	Configuraciones del Compensador:	Ph-A
Configuración R :	3	Configuración R :	0.4
Configuración X :	7.5	Configuración X :	0.4
Voltaje deseado:	120	Voltaje deseado:	120

Tabla C-13 Datos de reguladores de voltaje 3 y 4 para el alimentador trifásico de 123 nodos

Número de regulador:	3		Número de regulador:	4		
Segmento de línea:	25 - 26		Segmento de línea:	160 - 67		
Localizado en:	25		Localizado en:	160		
Fases:	A-C		Fases:	A-B-C		
Conexión:	2-Ph,L- G		Conexión:	3-Ph, LG		
Fases Monitoreadas:	A & C		Fases Monitoreadas:	A-B-C		
Ancho de Banda:	1		Ancho de Banda:	2		
Relación de Transformador de Potencial:	20		Relación de Transformador de Potencial:	20		
Nivel de Corriente Primaria del Transformador:	50		Nivel de Corriente Primaria del Transformador:	300		
Configuraciones del Compensador:	Ph-A	Ph- C	Configuraciones del Compensador:	Ph-A	Ph- B	Ph- C
Configuración R :	0.4	0.4	Configuración R :	0.6	1.4	0.2
Configuración X :	0.4	0.4	Configuración X :	1.3	2.6	1.4
Voltaje deseado:	120	120	Voltaje deseado:	124	124	124

Tabla C-14 Impedancias del alimentador trifásico de 123 nodos

Configuración 1: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4576 1.0780 0.1560 0.5017 0.1535 0.3849
 0.4666 1.0482 0.1580 0.4236
 0.4615 1.0651
 B en micro Siemens por milla
 5.6765 -1.8319 -0.6982
 5.9809 -1.1645
 5.3971

Configuración 2: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4666 1.0482 0.1580 0.4236 0.1560 0.5017
 0.4615 1.0651 0.1535 0.3845
 0.4576 1.0780
 B en micro Siemens por milla
 5.9809 -1.1645 -1.8319
 5.3971 -0.6982
 5.6765

Configuración 3: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4615 1.0651 0.1535 0.3849 0.1580 0.4236
 0.4576 1.0780 0.1560 0.5017
 0.4666 1.0482
 B en micro Siemens por milla
 5.3971 -0.6982 -1.1645
 5.6765 -1.8319
 5.9809

Configuración 4: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4615 1.0651 0.1535 0.3849 0.1580 0.4236
 0.4666 1.0482 0.1560 0.5017
 0.4576 1.0780
 B en micro Siemens por milla
 5.3971 -1.1645 -0.6982
 5.9809 -1.8319
 5.6765

Configuración 5: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4666 1.0482 0.1560 0.5017 0.1580 0.4236
 0.4576 1.0780 0.1535 0.3849
 0.4615 1.0651
 B en micro Siemens por milla
 5.9809 -1.8319 -1.1645
 5.6765 -0.6982
 5.3971

Tabla C-14 (continuación) Impedancias del alimentador trifásico de 123 nodos

Configuración 6: Segmento trifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4576 1.0780 0.1535 0.3849 0.1560 0.5017
 0.4615 1.0651 0.1580 0.4236
 0.4666 1.0482

B en micro Siemens por milla
 5.6765 -0.6982 -1.8319
 5.3971 -1.1645
 5.9809

Configuración 7: Segmento bifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4576 1.0780 0.0000 0.0000 0.1535 0.3849
 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 0.4615 1.0651

B en micro Siemens por milla
 5.1154 0.0000 -1.0549
 0.0000 0.0000
 5.1704

Configuración 8: Segmento bifásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.4576 1.0780 0.1535 0.3849 0.0000 0.0000
 0.4615 1.0651 0.0000 0.0000
 0.0000 0.0000

B en micro Siemens por milla
 5.1154 -1.0549 0.0000
 5.1704 0.0000
 0.0000

Configuración 9: Segmento monofásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 1.3292 1.3475 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 0.0000 0.0000

B en micro Siemens por milla
 4.5193 0.0000 0.0000
 0.0000 0.0000
 0.0000

Configuración 10: Segmento monofásico

Z (R +jX) en ohms por milla
 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000
 1.3292 1.3475 0.0000 0.0000
 0.0000 0.0000

B en micro Siemens por milla
 0.0000 0.0000 0.0000
 4.5193 0.0000
 0.0000

Tabla C-14 (continuación) Impedancias del alimentador trifásico de 123 nodos

Configuración 11: Segmento monofásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
		0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
			1.3292	1.3475	
B en micro Siemens por milla					
0.0000	0.0000	0.0000			
	0.0000	0.0000			
			4.5193		
Configuración 12: Segmento trifásico					
Z (R +jX) en ohms por milla					
1.5209	0.7521	0.5198	0.2775	0.4924	0.2157
		1.5329	0.7162	0.5198	0.2775
			1.5209	0.7521	
B en micro Siemens por milla					
67.2242	0.0000	0.0000			
	67.2242	0.0000			
			67.2242		

En la tabla C-14 se proporcionan los elementos triangulares superiores de las matrices de impedancia y admitancia de fase dadas por las ecuaciones (2.1) y (2.4) de la sección 2.2 respectivamente.

Tabla C-15 Parámetros del sistema y potencias demandadas del alimentador de 33 nodos

Tramo		R(Ω)	X(Ω)	P (kW)	Q(kVAR)
0	1	0.117	0.048	230	142.5
1	2	0.1073	0.044	0	0
2	3	0.1645	0.0457	230	142.5
3	4	0.1495	0.0415	230	142.5
4	5	0.1495	0.0415	0	0
5	6	0.3144	0.054	0	0
6	7	0.2096	0.036	230	142.5
7	8	0.3144	0.054	230	142.5
8	9	0.2096	0.036	0	0
9	10	0.131	0.0225	230	142.5
10	11	0.1048	0.018	137	84
2	12	0.1572	0.027	72	45
12	13	0.2096	0.036	72	45
13	14	0.1048	0.018	72	45

Tabla C-15 (continuación) Parámetros del sistema y potencias demandadas del alimentador de 33 nodos

Tramo		R(Ω)	X(Ω)	P (kW)	Q(kVAR)
14	15	0.0524	0.009	13.5	7.5
5	16	0.1794	0.0498	230	142.5
16	17	0.1645	0.0457	230	142.5
17	18	0.2079	0.0473	230	142.5
18	19	0.189	0.043	230	142.5
19	20	0.189	0.043	230	142.5
20	21	0.262	0.045	230	142.5
21	22	0.262	0.045	230	142.5
22	23	0.3144	0.054	230	142.5
23	24	0.2096	0.036	230	142.5
24	25	0.131	0.0225	230	142.5
25	26	0.1048	0.018	137	85
6	27	0.1572	0.027	75	48
27	28	0.1572	0.027	75	48
28	29	0.1572	0.027	75	48
9	30	0.1572	0.027	57	34.5
30	31	0.2096	0.036	57	34.5
31	32	0.1572	0.027	57	34.5
32	33	0.1048	0.018	57	34.5

Tabla C-16 Datos de capacitores para el alimentador de 33 nodos

Capacitor	Nodo	kVAr
C ₁	4	300
C ₂	7	300
C ₃	9	300
C ₄	16	300
C ₅	18	300
C ₆	20	300
C ₇	22	300
C ₈	24	300

Tabla C-17 Escenarios de carga para un periodo de 24 horas

hora	% porcentaje de carga
0-1	40
1-2	32
2-3	28
3-4	25
4-5	20
5-6	23
6-7	30
7-8	38
8-9	41
9-10	48
10-11	50
11-12	48
12-13	43
13-14	45
14-15	51
15-16	60
16-17	66
17-18	78
18-19	100
19-20	84
20-21	79
21-22	70
22-23	58
23-24	45

APÉNDICE D

D-1 Programa

```
!*****
PROGRAM PRINCIPAL

  IMPLICIT NONE

  CHARACTER (len=30) :: ArchDat,ArchRes

  ArchDat = 'salama_34.dat'
  ArchRes = 'res_3lnodos.txt'

  ! designa la unidad 5 como entrada
  OPEN (UNIT= 5, FILE= ArchDat)
  ! designa la unidad 10 como salida
  OPEN (UNIT= 10, FILE= ArchRes)

  ! llamadas a subrutinas

  CALL LEE_DATOS
  CALL CREA_NIVELES
  CALL CONFIGURACION_CONEXION
  CALL DESPACHO

END PROGRAM PRINCIPAL

!*****
!*****

SUBROUTINE LEE_DATOS

  IMPLICIT NONE
  INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150
  !***** CONTADORES *****
  INTEGER:: n,m,a,k
  !***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES
  INTEGER:: ramas,nodos,nodo_raiz(1,2),escenarios,on_off
  REAL:: CONEXION(max,5),porcentaje_de_carga(30)
  !*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
  INTEGER::config_fase
  !***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
  INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
  !***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
  INTEGER:: transformers
  REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
  CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
  !***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
  INTEGER:: capacitors
  REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
  !***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
  INTEGER:: spot_loads
  REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
  !***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
  INTEGER:: distributed_loads
  REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
  !***** VARIABLES PARA LAS IMPEDANCIAS DE LINEA Y ADMINTANCIAS EN DERIVACION ***
  !***** PARA ESTE PROGRAMA LA Zabc y la Yabc ESTAN DADAS EN ohm/milla *****
  !***** Y LAS LONGITUDES DE LINEA EN LA COLUMNA 3 DE LA *****
  !***** VARIABLE CONEXIONES ESTAN DADAS EN ft *****
  COMPLEX::Zabc(max,3)
  REAL::Yabc(max,3)
  !***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
  INTEGER:: voltage_regulators
  REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
  !***** INFORMACION A COMPARTIR EN LAS SUBROUTINAS *****

  COMMON /nom/ nodo_raiz
  COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION
  COMMON /datos2/ config_fase
  COMMON /datos3/ config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
```

```

COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos100/ porcentaje_de_carga
COMMON /despacho1/ on_off,escenarios

VOLTAGE_REGULATORS_DATA = (0.0,0.0)
Zabc = (0.0,0.0)
Yabc = (0.0,0.0)

!!! *****INICIO DE LA SUBROUTINA LECTURA DE DATOS *****
! lee el numero de ramas y nodos del archivo de entrada
READ(5,*)NODOS
RAMAS = NODOS-1
DO m = 1,ramas
    READ(5,*)CONEXION(m,1:4)
END DO
! ** LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LINEA AEREA
READ(5,*)config_linea_O
! ** LEE LAS CONFIGURACIONES DE LA LINEA AEREA
DO m = 1,config_linea_O
    READ(5,*)OVERHEAD_CONFIG(m)
ENDDO
! ** LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LINEA SUBTERRANEA.
READ(5,*)config_linea_U
! ** LEE LAS CONFIGURACIONES DE LA LINEA SUBTERRANEA
DO n = 1,config_linea_U
    READ(5,*)OVERHEAD_CONFIG(m+n-1)
ENDDO
! SACA LOS CODIGOS
DO n = 1,ramas
    IF ( CONEXION(n,4) <= (config_linea_O + config_linea_U) ) THEN
        CONEXION(n,5) = OVERHEAD_CONFIG(CONEXION(n,4))
    ELSE
        CONEXION(n,5) = CONEXION(n,4)
    ENDIF
ENDDO
nodo_raiz(1,1:2) = CONEXION(1,4:5)
! ** LEE EL NUMERO DE TRANSFORMADORES INCLUYENDO LA SUBESTACION.
READ(5,*)transformers
! ** LEE LOS DATOS DE TODOS LOS TRANSFORMADORES (transformers)
! ** NOMBRE kVA kV-high kV-low R% X% configuracion_de_conexion
DO m = 1,transformers
    READ(5,*)NOMBRE(m),TRANSFORMERS_DATA(m,1:7)
ENDDO
! ** LEE EL NUMERO DE CAPACITORES QUE HAY EN LA RED
READ(5,*)capacitors
! ** LEE LOS DATOS DE TODOS LOS CAPACITORES (capacitors)
! ** NODO Ph-A(kVAr) Ph-B(kVAr) Ph-C(kVAr)
DO m = 1,capacitors
    READ(5,*)CAPACITORS_DATA(m,:)
ENDDO
! LEE TOTAL DE OPERACIONES DE SWITCHEO DE CADA CAPACITOR POR DIA.
READ(5,*)on_off
! LEE EL TOTAL DE ESCENARIOS
READ(5,*)escenarios
IF ( escenarios < on_off ) THEN
    WRITE(*,*)'ERROR, EL NUMERO DE OPERACIONES ON_OFF DEBE SER'
    WRITE(*,*)'MENOR O IGUAL AL NUMERO DE ESCENARIOS'
    WRITE(*,*)' CORREGIR ARCHIVO DE DATOS '
    PAUSE ' '
    WRITE(*,*)'ERROR, EL NUMERO DE OPERACIONES ON_OFF DEBE SER'
    WRITE(*,*)'MENOR O IGUAL AL NUMERO DE ESCENARIOS'
    WRITE(*,*)' CORREGIR ARCHIVO DE DATOS '
ENDIF
! LEE EL PORCENTAJE DE CARGA DE CADA ESCENARIO.
DO m = 1,escenarios
    READ(5,*)porcentaje_de_carga(m)
ENDDO
! ** LEE EL NUMERO DE SPOT LOAD DATA ( CARGAS EN LOS NODOS)
READ(5,*)spot_loads
! ** LEE LOS DATOS DE TODAS LAS CARGAS (loads)
! **NODO MODELO(de carga) Ph-1(kW) Ph-1(kVAr) Ph-2(kW) Ph-2(kVAr) Ph-3(kW) Ph-3(kVAr)
DO m = 1,spot_loads

```

```

        READ(5,*) SPOT_LOAD_DATA(m,:)
ENDDO
! ** LEE LOS DATOS DE TODAS LAS CARGAS DISTRIBUIDAS
READ(5,*) distributed_loads
! ** LEE LOS DATOS DE TODAS LAS CARGAS DISTRIBUIDAS (distributed_loads)
! ** NODO MODELO (carga) Ph-1 (kW) Ph-1 (kVAr) Ph-2 (kW) Ph-2 (kVAr) Ph-3 (kW) Ph-3 (kVAr)
DO m = 1, distributed_loads
    READ(5,*) DISTRIBUTED_LOAD_DATA(m,:)
ENDDO
! ** LEE LAS IMPEDANCIAS Y LAS ADMITANCIAS DE FASE DE LAS LINEAS DE CADA CONFIGURACION
! ** [zaa, zab, zac; zba, zbb, zbc; zca, zcb, zcc] y [yaa, yab, yac; yba, ybb, ybc; yca, ycb, ycc] EN OHMS POR
MILLA
n = 0 ! herramientas
a = 0 ! herramientas
DO m = 1, config_linea_0 + config_linea_U ! LEE DE 1 A TOTAL DE CONFIGURACIONES
    DO k = m+n-a, n+3 ! ESTE DO LEE LA
IMPEDANCIA DE FASE Zabc EN OHMS POR MILLA
        IF ( k == n+1) THEN
            READ(5,*) Zabc(k,1), Zabc(k,2), Zabc(k,3)
            Zabc(n+2,1) = Zabc(k,2)
            Zabc(n+3,1) = Zabc(k,3)
        ELSEIF ( k == n+2) THEN
            READ(5,*) Zabc(k,2), Zabc(k,3)
            Zabc(n+3,2) = Zabc(k,3)
        ELSE
            READ(5,*) Zabc(k,3)
        ENDIF
    ENDDO
    DO k = m+n-a, n+3 ! ESTE DO LEE LA
ADMITANCIA DE FASE Yabc EN OHMS POR MILLA
        IF ( k == n+1) THEN
            READ(5,*) Yabc(k,1), Yabc(k,2), Yabc(k,3)
            Yabc(n+2,1) = Yabc(k,2)
            Yabc(n+3,1) = Yabc(k,3)
        ELSEIF ( k == n+2) THEN
            READ(5,*) Yabc(k,2), Yabc(k,3)
            Yabc(n+3,2) = Yabc(k,3)
        ELSE
            READ(5,*) Yabc(k,3)
        ENDIF
    ENDDO
    n = k-1
    a = a+1
ENDDO
! ** MULTIPLICA Yabc Y Zabc POR EL FACTOR DE CONVERSION PARA DEJARLAS SOLO EN OHMS
Zabc = Zabc ! * 1.0 / 5280.0 ! COMO LA COLUMNA 3 DE
CONEXION ESTA EN ft (pies) EL FACTOR ! DE
CONVERSION DEBE ESTAR EN (millas/ft)
Yabc = Yabc ! * 1.0 / 5280.0 * 1.0E-6 ! e1 1.0E-6 ES PORQUE Yabc ESTA EN
microSIEMENS
DO k = 1, n
    IF ( MOD(k,3) == 0) THEN
        ENDDO
    ENDDO
DO k = 1, n
    IF ( MOD(k,3) == 0) THEN
        ENDDO
    ENDDO
! ***** LEE EL NUMERO DE REGULADORES DE VOLTAJE
READ(5,*) voltage_regulators
! ***** LEE LOS DATOS DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE
k = 1 ! avanza en las columnas
DO m = 1, voltage_regulators ! numero de reguladores de voltaje

    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(1,k) ! NUMERO DE REGULADOR
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k:k+1) ! SEGMENTO DE LINEA
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,k) ! NODO DE LOCALIZACION
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,k:k+1) ! CONEXION
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(5,k) ! ANCHO DE BANDA
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(6,k) ! PT Ratio (relacion de transformador de
potencial)
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(7,k) ! Primary CT Raiting
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(8,k:k+2) ! FASES MONITOREADAS
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,k:k+2) ! Arreglo R
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,k:k+2) ! Arreglo X
    READ(5,*) VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11,k:k+2) ! Nivel de Voltaje Deseado

```

```

k = k+3                ! PREPARA PARA LEER OTRO REGULADOR

ENDDO

END SUBROUTINE LEE_DATOS

!*****
!*****

SUBROUTINE CREA_NIVELES

USE NUMERICAL_LIBRARIES
IMPLICIT NONE
INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150
!***** CONTADORES *****
INTEGER:: BANDERA(max), CONTA,n,m,a,k,l,p,o,f,CONTA_,CONTADOR(max),BANDE_CONEXION(1,4)
!***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES      INTEGER::
ramas,nodos
REAL:: CONEXION(max,5)
REAL:: longitud(max)
!*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
INTEGER::config_fase
!***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
!***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
INTEGER:: transformers
REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitores
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
REAL:: SPOT_LOAD_DATA_2(max1,8)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
INTEGER:: distributed_loads
REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
!***** VARIABLES PARA LAS IMPEDANCIAS DE LINEA Y ADMINTANCIAS EN DERIVACION **
!***** PARA ESTE PROGRAMA LA Zabc y la Yabc ESTAN DADAS EN ohm/milla *****
!***** Y LAS LONGITUDES DE LINEA EN LA COLUMNA 3 DE LA *****
!***** VARIABLE CONEXIONES ESTAN DADAS EN ft *****
COMPLEX::Zabc(max,3)
REAL::Yabc(max,3), porcentaje_de_carga
!***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: voltage_regulators
REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
INTEGER:: vector_REGULADORES(5)
INTEGER:: conta_reguladores
!***** VARIABLES PARA LOS NIVELES *****
INTEGER:: NODOS_(max),BANDERA2(max)
INTEGER:: nodo_mayor
INTEGER:: ICOL(max), IFILA(max), ISP(max),NIVEL(max,3)
INTEGER:: conta_config(max,2)

COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION,longitud
COMMON /datos2/ config_fase
COMMON /datos3/ config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitores,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos10/ NODOS_,BANDERA2,nodo_mayor,ICOL,IFILA,ISP,NIVEL,conta_config
COMMON /datos16/ vector_REGULADORES
COMMON /datos100/ porcentaje_de_carga
COMMON /despacho3/SPOT_LOAD_DATA_2

! inicializa arreglos
BANDERA(max) = 0
CONTADOR(max) = 0
ICOL= 0

```

```

IFILA = 0
NIVEL = 0
BANDERA2 = 0
NODOS_ = 0
ISP(max) = 0
conta_config = 0
vector_REGULADORES = 0
conta_reguladores = 0
longitud = 0

NODOS_ = NODOS_*0
CONTA = 0
CONTA_ = 1
DO m = 1,ramas                ! barre los renglones de las conexiones de los nodos
    DO a = 1,2                ! barre las 2 columnas de las conexiones de
las ramas
        l = CONEXION(m,a)
        IF (m == 1 .AND. a == 1) THEN    ! solo para m == 1 y a == 1
            NODOS_(1) = 1
            CONTA = CONTA+1
        END IF
        p = 1                    ! sale de Do a = 1
repetido)
        DO o = 1,CONTA
            CONTA = CONTA_+1
            IF ( l == NODOS_(o) ) THEN
                p = 0
                EXIT            ! Nodo repetido (P = 0) ya no es necesario escribirlo
en el vector
            END IF
            ! NODOS_(NODOS) porque ya esta
        ENDDO
        IF ( p == 1 ) THEN
            NODOS_(CONTA+1) = 1    ! El nodo no esta en el vector NODOS_(NODOS)
            CONTA = CONTA+1        ! Lo escribe en el vector NODOS_(NODOS)
        ENDIF
    ENDDO
ENDDO

!**** SACA EL NODO MAS GRANDE DE LAS CONEXIONES *****
nodo_mayor = NODOS_(IIMAX(nodos, NODOS_, 1))
n = nodo_mayor

! ***** AUUMENTA EL VECTOR NODOS_ SEGUN EL NUMERO DE CARGAS DISTRIBUIDAS *****
DO m = 1,nodos+distributed_loads
    BANDERA2(m) = m
    IF ( m > nodos ) THEN
        NODOS_(m) = nodo_mayor + 1
        nodo_mayor = nodo_mayor + 1
    ENDIF
ENDDO

!***** DESIGNA LOS NUEVOS NODOS DEBIDO A LAS CARGAS DISTRIBUIDAS*****
!***** SERAN NODOS MAYORES QUE EL NODO MAYOR DE LAS CONEXIONES ORIGINALES*****
nodo_mayor = n + 1

DO o = 1, ramas
    ! BUSCA SI ENTRE EL NODO A Y EL NODO B HAY CARGAS DISTRIBUIDAS
    DO a = 1,distributed_loads
        IF ( (INT(CONEXION(o,1)) == INT(DISTRIBUTED_LOAD_DATA(a,1))) .AND.
(INT(CONEXION(o,2)) == INT(DISTRIBUTED_LOAD_DATA(a,2))) ) THEN
            p = CONEXION(o,2)
            CONEXION(o,2) = nodo_mayor                ! DESIGNA EL NUEVO
NODO VIEJO
            CONEXION(o,3) = CONEXION(o,3)/2.0 ! DIBIDE LA DISTANCIA A LA MITAD
            CONEXION(ramas +1,1) = nodo_mayor
            CONEXION(ramas +1,2) = DISTRIBUTED_LOAD_DATA(a,2) ! DESIGNA EL NUEVO
NODO VIEJO
            CONEXION(ramas +1,3) = CONEXION(o,3)
            CONEXION(ramas +1,4) = CONEXION(o,4)
            CONEXION(ramas +1,5) = CONEXION(o,5)
            SPOT_LOAD_DATA(spot_loads +1,1) = nodo_mayor    ! DESIGNA EL NUEVO
NODO VIEJO
            SPOT_LOAD_DATA(spot_loads +1,2:8:1) = DISTRIBUTED_LOAD_DATA(a,3:9:1)
            NODOS_(nodos+1) = nodo_mayor                ! CREA EL NUEVO NODO
VIEJO
            BANDERA2(nodos+1) = BANDERA2(nodos)+1        ! CREA EL NUEVO NODO NUEVO

```

```

        nodo_mayor = nodo_mayor + 1

        ramas = ramas + 1           ! AUMENTA LAS RAMAS
        nodos = nodos + 1           ! AUMENTA LOS NODOS
        spot_loads = spot_loads+1   ! AUMENTA LOS SPOT_LOADS
    ENDIF
ENDDO

! BUSCA SI ENTRE EL NODO A Y EL NODO B HAY REGULADORES DE VOLTAJE
k = 1
DO a = 1, voltage_regulators
    IF ( (INT(CONEXION(o,1)) == INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k))) .AND.
        (INT(CONEXION(o,2)) == INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k+1))) ) THEN
        conta_reguladores = conta_reguladores + 1           ! CONTADOR DE
REGULADORES

        p = CONEXION(o,2)
        CONEXION(ramas +1,1) = nodo_mayor           ! CREA LA NUEVA RAMA
        CONEXION(ramas +1,2) = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k+1)! CREA NODO
        CONEXION(ramas +1,3) = CONEXION(o,3)           !
        CONEXION(ramas +1,4) = CONEXION(o,4)

        CONEXION(ramas +1,5) = CONEXION(o,5)
        CONEXION(o,2) = nodo_mayor           ! DESIGNA EL NUEVO NODO VIEJO
        CONEXION(o,3) = 0           ! NO HAY DISTANCIA
        CONEXION(o,4) = 500           ! CODIGO DE REGULADOR DE VOLTAJE
        CONEXION(o,5) = 500           ! CODIGO DE REGULADOR DE VOLTAJE
        VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k) = CONEXION(o,1)! NODO DE ENVIO
        VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k+1) = nodo_mayor           ! NODO DE RECEPCION
        VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,k) = nodo_mayor ! NODO DE LOCALIZACION DEL
REGULADOR

        NODOS_(nodos+1) = nodo_mayor           ! CREA EL NUEVO NODO
VIEJO

        BANDERA2(nodos+1) = BANDERA2(nodos)+1           ! CREA EL NUEVO NODO NUEVO
        nodo_mayor = nodo_mayor + 1

        ramas = ramas + 1           ! AUMENTA LAS RAMAS
        nodos = nodos + 1           ! AUMENTA LOS NODOS
    ENDIF
    K = K+3
ENDDO

ENDDO
nodo_mayor = BANDERA2(nodos)
!***** REASIGNA LOS NODOS COMENZANDO DE 1 A NODOS EN LAS CONEXIONES *****
DO o = 1, ramas
    DO p = 1, 2
        DO k = 1, nodos
            IF (CONEXION(o,p) == NODOS_(k) ) THEN
                CONEXION(o,p) = k
                EXIT
            ENDIF
        ENDDO
    ENDDO

ENDDO
!***** REASIGNA LOS CAPACITORES CON LOS NODOS RENUMERADOS *****
!*****
DO o = 1, capacitors
    DO k = 1, nodos
        IF (CAPACITORS_DATA(o,1) == NODOS_(k) ) THEN
            CAPACITORS_DATA(o,1) = k
            EXIT
        ENDIF
    ENDDO

ENDDO
DO K = 1, SPOT_LOADS
    DO o = 1, NODOS
        IF ( INT (SPOT_LOAD_DATA(k,1) ) == NODOS_(o) ) THEN
            SPOT_LOAD_DATA(k,1) = o
            EXIT
        ENDIF
    ENDDO

ENDDO
DO o = 1, ramas
    k = 1
    DO a = 1, voltage_regulators
        IF ( (NODOS_(CONEXION(o,1)) == VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k)) .AND.
            (NODOS_(CONEXION(o,2)) == VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k+1)) ) THEN
            VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k) = CONEXION(o,1)
            VOLTAGE_REGULATORS_DATA(2,k+1) = CONEXION(o,2)
            IF ( VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,k) == NODOS_(CONEXION(o,1)) ) THEN

```

```

                                VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,k) = CONEXION(o,1)
ELSE
                                VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,k) = CONEXION(o,2)
ENDIF
                                ENDIF
                                k = k+3
ENDDO
ENDDO
!***** ARMA IFILA, ICOL*****
DO 60 o = 1,nodos
DO 70 p = 1,ramas
IF ( CONEXION(p,1) == o .OR. CONEXION(p,2) == o) THEN
                                CONTADOR(o) = CONTADOR(o) + 1
                                END IF
70 CONTINUE
IF (o == 1) THEN
                                n = CONTADOR(o)
                                ICOL(o) = CONTADOR(o)
                                m = o
                                DO 80 p = 1,ramas
                                        a = 0
                                        IF (CONEXION(p,1) == o) THEN
                                                ICOL(m+1) = CONEXION(p,2)
                                                n = n -1
                                                a = 1
                                                conta_config(m+1,1) = INT(CONEXION(p,4))
                                                conta_config(m+1,2) = INT(CONEXION(p,5))
                                                longitud(m+1) = CONEXION(p,3)
                                        ELSEIF (CONEXION(p,2) == o) THEN
                                                ICOL(m+1) = CONEXION(p,1)
                                                n = n-1
                                                a = 1
                                                conta_config(m+1,1) = INT(CONEXION(p,4))
                                                conta_config(m+1,2) = INT(CONEXION(p,5))
                                                longitud(m+1) = CONEXION(p,3)
                                        END IF
                                        IF (n == 0) THEN
                                                EXIT
                                        ELSEIF (a == 1) THEN
                                                m = m+1
                                        ENDIF
80 CONTINUE
IFILA(o) = o
f = CONTADOR(o) + 2
ENDIF
IF (o > 1) THEN
                                n = CONTADOR(o)
                                ICOL(f) = CONTADOR(o)
                                m = f
                                DO 90 p = 1,ramas
                                        A = 0
                                        IF (CONEXION(p,1) .EQ. o) THEN
                                                ICOL(m+1) = CONEXION(p,2)
                                                n = n -1
                                                a = 1
                                                conta_config(m+1,1) = INT(CONEXION(p,4))
                                                conta_config(m+1,2) = INT(CONEXION(p,5))
                                                longitud(m+1) = CONEXION(p,3)
                                        ELSEIF (CONEXION(p,2) .EQ. o) THEN
                                                ICOL(m+1) = CONEXION(p,1)
                                                n = n-1
                                                a = 1
                                                conta_config(m+1,1) = INT(CONEXION(p,4))
                                                conta_config(m+1,2) = INT(CONEXION(p,5))
                                                longitud(m+1) = CONEXION(p,3)
                                        ENDIF
                                        IF (n == 0) THEN
                                                EXIT
                                        ELSEIF (a == 1) THEN
                                                m = m+1
                                        ENDIF
90 CONTINUE
IFILA(o) = f
f = f +CONTADOR(o)+1
END IF
60 CONTINUE
! *****CALCULA EL NIVEL EN EL QUE ESTAN LOS NODOS*****
m = 1

```

```

NIVEL(m,1) = 0
NIVEL(m,2) = 1 ! LA CAPA DEL NODO RAIZ ES CERO
BANDERA(m) = 1 ! POR SER EL NODO RAIZ (SUBESTACION = 1)
NIVEL(m,3) = 0 ! YA SE VISITO EL UNO
l = 2 ! AYUDA PARA SALTAR EN LOS ARREGLOS
DO a= 1,ramas ! HASTA RAMAS-1 YA QUE LA ULTIMA CONEXION PUEDE ESTAR EN
! EL PENULTIMO NODO
CONTA = ICOL(IFILA(NIVEL(a,2))) !RAMAS CONECTADAS AL NODO ICOL(IFILA(HUESPED(a,2)))
DO o = 1,CONTA
IF (BANDERA((ICOL(IFILA(NIVEL(a,2))+o))).EQ.0) THEN !SI LA BANDERA VALE CERO NO
SE HA VISITADO EL NODO Y ENTRA
NIVEL(l,1) = NIVEL(NIVEL(a,2),3) +1 ! PONE EL NIVEL
NIVEL(l,2) = ICOL(IFILA(NIVEL(a,2))+o) ! PONE EL NODO
NIVEL(ICOL(IFILA(NIVEL(a,2))+o),3) = NIVEL(NIVEL(a,2),3) +1
BANDERA((ICOL(IFILA(NIVEL(a,2))+o))) = 1 ! PONE A UNO LA BANDERA DEL
NODO VISITADO
l = l+1
ENDIF
ENDDO
ENDDO
DO m = 1,spot_loads
SPOT_LOAD_DATA_2(m,1:8) = SPOT_LOAD_DATA(m,1:8)
ENDDO
END SUBROUTINE CREA_NIVELES

!*****
!*****

SUBROUTINE CONFIGURACION_CONEXION
IMPLICIT NONE
INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150, t = 3
!***** CONTADORES *****
INTEGER:: bandera(max),
conta,n,m,k,l,ll,p,h,o,oo,f,conta_,contador(max),bande_conexion(1,4),posicion,volti(2),configuracion
REAL:: w
!***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES
*****
INTEGER:: ramas,nodos,nodo_raiz(1,2)
REAL:: CONEXION(max,5),porcentaje_de_carga
REAL:: longitud(max)
REAL:: longitud2(max)
!*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
INTEGER::config_fase
!***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
!***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
INTEGER:: transformers
REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
REAL:: nt
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitors
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
INTEGER:: distributed_loads
REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
!***** VARIABLES PARA LAS IMPEDANCIAS DE LINEA Y ADMINTANCIAS EN DERIVACION *****
!***** PARA ESTE PROGRAMA LA Zabc y la Yabc ESTAN DADAS EN ohm/milla *****
!***** Y LAS LONGITUDES DE LINEA EN LA COLUMNA 3 DE LA *****
!***** VARIABLE CONEXIONES ESTAN DADAS EN ft *****
COMPLEX::Zabc(max,3)
REAL::Yabc(max,3)
!***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: voltage_regulators
REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
!***** VARIABLES PARA LOS NIVELES *****
INTEGER:: NODOS_(max),BANDERA2(max)
INTEGER:: nodo_mayor
INTEGER:: ICOL(max), IFILA(max), ISP(max),NIVEL(max,3)
INTEGER:: conta_config(max,2)

```

```

***** MATRICES CONSTANTES PARA LINEAS AEREAS, SUBTERRANEAS,
REGULADORES Y CAPACITORES *****
COMPLEX:: c(max1*t,t), A_(max1*t,t)
COMPLEX:: B_(max1*t,t),d(max1*t,t)
INTEGER:: nodo_configuracion(max1,2)
*****CORRIENTES DE LINEA Y VOLTAJES LINEA-TIERRA ( O LINEA NEUTRO ) Y VECTORES
BANDERA *****
COMPLEX:: I_rama(t,max1) ! CORRIENTES DE RAMA (la fase es segun la
configuracion de rama ) max1 > al numero de ramas
COMPLEX:: I_rama_abc(t,max1) ! CORRIENTES DE RAMA ( la fase es abc)
COMPLEX:: V_ground_abc(t,max1) ! VOLTAJES DE NODO LINEA TIERRA ( LA
FASE ES abc )
COMPLEX:: I_conversion(t,1)
COMPLEX:: E_slack(1:t,1) ! VOLTAJE SLACK DEL NODO RAIZ ( LINEA TIERRA )
COMPLEX:: V_ground(t,max1) ! VOLTAJES LINEA TIERRA DE LOS NODOS
COMPLEX:: I_nodo(t,max1) ! CORRIENTES DEMANDADAS POR LOS NODOS
COMPLEX:: V_ground_planos(t,max1) ! VOLTAJES INICIALIZADOS DE TODOS LOS NODOS
COMPLEX:: E_abc(t,1) ! VOLTAJE DEL LADO SECUNDARIO EN SECUENCIA abc
(LINEA-NEUTRO (o tierra))
COMPLEX::E_sorce !
INTEGER:: IFILA_corriente(max1) ! VECTOR BANDERA PARA IR SUMANDO CORRIENTES DE NODO Y RAMA
INTEGER:: CONEXION_ramas(max1,2)
! ***** MATRICES CONSTANTES QUE RELACIONAN CORRIENTES DE DELTA CON CORRIENTES DE LINEA O
! ***** VOLTAJES DE LINEA CON VOLTAJES DE NEUTRO Y ESAS COSAS DEL LIBRO DE KERSTING
*****
COMPLEX:: j = (0,1) ! j complejo
REAL:: pi = 3.14159265 ! VALOR DE pi
INTEGER,PARAMETER:: D_ground_2_line(t,t) = RESHAPE( (/1,0,-1,-1,1,0,0,-1,1/), (/3,3/)) !
RELACIONA Vll = D_ground_2_l*Vln
INTEGER,PARAMETER:: VOLTAGE_MATRIX(7,t) = RESHAPE(
(/1,0,1,1,1,0,0,1,1,0,1,0,1,0,1,1,1,0,0,0,1/), (/7,3/))
REAL:: ANGULO ! FUNCION ANGULO (RETORNA ANGULO EN GRADOS)
COMPLEX:: V_line(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PARA UN NODO ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA
CARGA ESTE EN DELTA )
COMPLEX:: Z_constant(t,1) ! IMPEDANCIA CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
IMPEDANCIA CONSTANTE )
COMPLEX:: I_constant(t,1) ! CORRIENTE CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
CORRIENTE CONSTANTE )
COMPLEX:: V_line_planos(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PLANOS PARA UN NODO ( PARA
CUALQUIER NODO DONDE SE OCUPEN LOS VOLTAJES LINEA PLANOS
INTEGER,PARAMETER:: Iden(t,t)= RESHAPE ( (/1,0,0,0,1,0,0,0,1/), (/3,3/)) !*
matriz identidad
INTEGER,PARAMETER:: Del_Line(t,t) = RESHAPE( (/1,-1,0,0,1,-1,-1,0,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA
Ilinea = Del_Line * Idelta
COMMON /nom/ nodo_raiz
COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION,longitud
COMMON /datos2/ config_fase
COMMON /datos3/ config_linea_O,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos10/ NODOS_BANDERA2,nodo_mayor,ICOL,IFILA,ISP,NIVEL,conta_config
COMMON /datos11/ posicion,E_abc,A_,B_
COMMON /datos12/
I_rama,I_rama_abc,nodo_configuracion,o,CONEXION_ramas,configuracion,I_conversion,
contador,longitud2,bandera
COMMON /datos13/ E_slack,V_ground,nt
COMMON /datos20/ V_ground_abc, V_ground_planos
COMMON /datos100/ porcentaje_de_carga

V_ground = (0.,0.)
I_nodo = (0.,0.)
Z_constant = (0.,0.)
I_constant = (0.,0.)
V_ground_abc = (0.,0.)
bandera = 0 ! bandera(max) se llena con los nodos en barrido
regresivo
contador = 0 ! da la posicion de los nodos en bandera
nodo_configuracion = 0
V_ground(1:t,1) = E_abc(1:t,1) ! PARA LA PRIMERA ITERACION YA QUE SE
INICIALIZAN LOS VOLTAJES ! contador
conta = 1 ! bandera para el llenado de los vectores
posicion = 0
longitud2 = 0

k = INT(TRANSFORMERS_DATA(1,6))

```

```

SELECT CASE (k)
  CASE(101)
    w = TRANSFORMERS_DATA(1,3) ! VOLTAJE L-
L DE BAJA
    E_abc(1,1) = w/sqrt(3.0)*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
    E_abc(2,1) = w/sqrt(3.0) * (cos(-2.0*pi/3.0) + j*sin(-
2.0*pi/3.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7) ! Se multiplica por el factor de incremento
    E_abc(3,1) = w/sqrt(3.0) *
(cos(2.0*pi/3.0)+j*sin(2.0*pi/3.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
  CASE(102)
    !WRITE(*,*)'LA CONEXION DE LA SUBESTACION ES Gr.Y - D'
  CASE(103)
    !WRITE(*,*)'LA CONEXION DE LA SUBESTACION ES Y - D'
  CASE(104)
    !WRITE(*,*)'LA CONEXION DE LA SUBESTACION ES D - Gr.Y'
    w = TRANSFORMERS_DATA(1,3) ! VOLTAJE L-
L DE BAJA
    E_abc(1,1) = w/sqrt(3.0)*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
    E_abc(2,1) = w/sqrt(3.0) * (cos(-2.0*pi/3.0) + j*sin(-
2.0*pi/3.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7) ! Se multiplica por el factor de incremento
    E_abc(3,1) = w/sqrt(3.0) *
(cos(2.0*pi/3.0)+j*sin(2.0*pi/3.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
  CASE(105)
    !WRITE(*,*)'LA CONEXION DE LA SUBESTACION ES D - D'
    w = TRANSFORMERS_DATA(1,3) ! VOLTAJE L-
L DE BAJA
    E_abc(1,1) = w/sqrt(3.0)*(cos(-1.0*pi/6.0) + j*sin(-
1.0*pi/6.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
    E_abc(2,1) = w/sqrt(3.0) * (cos(-5.0*pi/6.0) + j*sin(-
5.0*pi/6.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7) ! Se multiplica por el factor de incremento
    E_abc(3,1) = w/sqrt(3.0) * (cos(pi/2.0)+j*sin(pi/2.0))*TRANSFORMERS_DATA(1,7)
  CASE(106)
    !WRITE(*,*)'LA CONEXION DE LA SUBESTACION ES open Gr.Y - open D'
END SELECT

DO n = 1,nodos
  k = 0 ! AVANZA EN LOS NODOS CONECTADOS AL
NODO n
  volti(1) = NIVEL(n,2) ! asigna el nodo a volti
  DO m = 1, ICOL(IFILA(NIVEL(n,2))) ! ICOL(IFILA(NIVEL(n,2))) SON LOS
NODOS CONECTADOS AL NODO n
    k = k+1
    volti(2) = ICOL(IFILA(NIVEL(n,2))+k)
    DO oo = 1,2
      IF (contador(volti(oo)) == 0 ) THEN
        posicion = posicion + 1
        ! nodo visitado
        contador(volti(oo)) = posicion
        bandera(posicion) = volti(oo)
        ! posicion de los nodos que aparecen en el vector V_ground
        longitud2(posicion) = longitud((IFILA(NIVEL(n,2))+k)
! es la distancia
        nodo_configuracion(posicion,1:2) =
conta_config((IFILA(NIVEL(n,2))+k,1:2) ! ES LA CONFIGURACION QUE TIENE EL
NODO
        L = conta_config((IFILA(NIVEL(n,2))+k,2)
SELECT CASE (L) ! ES LA CONFIGURACION DE LA
CONEXION
      CASE(1:7)
        IF ( volti(1) == 1 ) THEN
          ll = 1
          V_ground_abc(1,posicion) = E_abc(1,1)
          V_ground_abc(2,posicion) = E_abc(2,1)
          V_ground_abc(3,posicion) = E_abc(3,1)
        ELSE
          V_ground_abc(1,posicion) =
! no es el voltaje de la subestacion
          V_ground_abc(2,posicion) =
          V_ground_abc(3,posicion) =
        ENDIF
      CASE(101)

```



```

CONEXION          IF ( ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))) == 1 ) THEN          ! CHECA SI TIENE SOLO UNA
CONEXION          IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1          ! DA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA          IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1          ! DA LA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA          I_rama(1:t,o-1) = I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))          ! LA CORRIENTE EN
ESA RAMA ES IGUAL A LA CORRIENTE INYECTADA POR EL NOSO          CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+1))          !
NODO DE ENVIO          CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)
! NODO DE RECEPCION          ELSE
! TIENE MAS DE UNA CONEXION EN ESE NODO          IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1          ! DA LA
POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA          k = 1
DO h = 1, ICOL(IFILA(NIVEL(o,2)))          !
ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))) = NUMERO DE CONEXIONES DE ESE NODO          IF ( IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k)) /= 0 ) THEN
! SI IFILA_corriente(X) /= 0 SE HA VISITADO          I_rama(1:t,o-1) =
I_rama(1:t,IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))) + I_rama(1:t,o-1)
ELSE          CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))
! NODO DE ENVIO          ENDF
k = k + 1
ENDDO
I_rama(1:t,o-1) = I_rama(1:t,o-1) + I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))
! SUMA LA CORRIENTE DE NODO NIVEL(o,2)          CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)          ! NODO DE
RECEPCION          ENDF
ELSEIF ( (nodo_configuracion(o,2) >= 101) .and. (nodo_configuracion(o,2) <= 106) ) THEN
CONEXION          IF ( ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))) == 1 ) THEN          ! CHECA SI TIENE SOLO UNA
CONEXION          IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1
I_rama(1:t,o-1) = I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))
CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+1))
CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)
ELSE
IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1
k = 1
DO h = 1, ICOL(IFILA(NIVEL(o,2)))
IF ( IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k)) /= 0 ) THEN
! SI IFILA_corriente(X) /= 0 SE HA VISITADO          I_rama(1:t,o-1) =
I_rama(1:t,IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))) + I_rama(1:t,o-1)
ELSE          CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))
! NODO DE ENVIO          ENDF
k = k + 1
ENDDO
I_rama(1:t,o-1) = I_rama(1:t,o-1) + I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))          !
CORRIENTE DE RAMA DEL LADO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR          CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)          ! NODO DE
RECEPCION          ENDF
SELECT CASE (nodo_configuracion(o,2))
CASE (101)          I_rama(1:t,o-1) = (1./nt) * I_rama(1:t,o-1)
CASE (105)          I_rama(1:t,o-1) = (1./nt) * I_rama(1:t,o-1)
END SELECT
ELSEIF ( nodo_configuracion(o,2) == 201) THEN          !***** ES
UN SWITCH          IF ( ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))) == 1 ) THEN          ! CHECA SI TIENE SOLO UNA
CONEXION          IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1          ! DA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA          I_rama(1:t,o-1) = I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))          ! LA CORRIENTE EN
ESA RAMA ES IGUAL A LA CORRIENTE INYECTADA POR EL NODO          CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+1))          !
NODO DE ENVIO          CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)
! NODO DE RECEPCION

```

```

ELSE
  ! TIENE MAS DE UNA CONEXION EN ESE NODO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR
  IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1 ! DA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA
  k = 1
  DO h = 1, ICOL(IFILA(NIVEL(o,2)))
    IF ( IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k)) /= 0 ) THEN
      ! SI IFILA_corriente(X) /= 0 SE HA VISITADO
      I_rama(1:t,o-1) =
I_rama(1:t,IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))) + I_rama(1:t,o-1)
    ELSE
      CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))
    ! NODO DE ENVIO
  ENDIF
  k = k + 1
ENDDO
I_rama(1:t,o-1) = I_rama(1:t,o-1) + I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))
CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2) ! NODO DE
RECEPCION
ENDIF
ELSEIF ( nodo_configuracion(o,2) == 500) THEN ! ES UN REGULADOR
  IF ( ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))) == 1 ) THEN ! CHECA SI TIENE SOLO UNA
CONEXION
  IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1 ! DA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA
  I_rama(1:t,o-1) = I_nodo(1:t,NIVEL(o,2)) ! LA CORRIENTE EN
ESA RAMA ES IGUAL A LA CORRIENTE INYECTADA POR EL NODO
  CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+1)) !
NODO DE ENVIO
  CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2)
! NODO DE RECEPCION
ELSE
  ! TIENE MAS DE UNA CONEXION EN ESE NODO DE BAJA DEL TRANSFORMADOR
  IFILA_corriente(NIVEL(o,2)) = o - 1 ! DA
LA POSICION DE LAS CORRIENTES DE RAMA
  k = 1
  DO h = 1, ICOL(IFILA(NIVEL(o,2)))
    IF ( IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k)) /= 0 ) THEN
      ! SI IFILA_corriente(X) /= 0 SE HA VISITADO
      I_rama(1:t,o-1) =
I_rama(1:t,IFILA_corriente(ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))) + I_rama(1:t,o-1)
    ELSE
      CONEXION_ramas(o-1,1) = (ICOL(IFILA(NIVEL(o,2))+k))
    ! NODO DE ENVIO
  ENDIF
  k = k + 1
ENDDO
I_rama(1:t,o-1) = I_rama(1:t,o-1) + I_nodo(1:t,NIVEL(o,2))
CONEXION_ramas(o-1,2) = NIVEL(o,2) ! NODO DE
RECEPCION
ENDIF
ELSE
ENDIF
ENDDO
END SUBROUTINE CONFIGURACION_CONEXION

```

```

!*****
!*****

```

SUBROUTINE DESPACHO

IMPLICIT NONE

INTEGER, PARAMETER:: max1 = 150

```

INTEGER:: n,m,k,p,l,x,g,h,f,d,s,bande,t
INTEGER::ORDENA(6),MATRIZ_DATOS(8000,300),AB(1,8),BC(1,8),CD(1,8) ! MAXIMO 5 OPERACIONES ON_OFF
por eso es 6 ORDENA
INTEGER:: on_off, escenarios, conta_escenarios(6) ! MAXIMO 5 OPERACIONES ON_OFF por eso es 6
INTEGER::TABLA_DE_ESCENARIOS(20000,260) ! ( 2000 =^ (5+1)^4 y 150 =^ (4*30) 4 capacitores y
maximo 5 operaciones de on_off en el periodo de 24 horas
INTEGER:: TRAYECTORIAS(1000000,25),TRAYECTORIAS1(1000000,25) ! PARA GUARDAR LAS
TRAYECTORIAS Y LAS PERDIDAS TOTALES
REAL:: PERDIDAS1(1000000),PERDIDAS2(1000000)
REAL:: porcentaje_de_carga(30),almacena
REAL:: loss_off, loss_on
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
REAL:: SPOT_LOAD_DATA_2(max1,8)
INTEGER:: AC(1,30)
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitors
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
REAL:: loss,PERDIDAS_X_ESCENARIO(20000,30),loss_anterior
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos100/ porcentaje_de_carga
COMMON /despacho1/ on_off,escenarios
COMMON /despacho2/ AB
COMMON /despacho3/SPOT_LOAD_DATA_2
COMMON /despacho4/ loss

!INICIALIZA VARIABLES

TABLA_DE_ESCENARIOS = 0
MATRIZ_DATOS = 0
AB = 0
BC = 0
conta_escenarios = 0
PERDIDAS1 = 0.0
PERDIDAS2 = 0.0
TRAYECTORIAS = 0
TRAYECTORIAS1 = 0
loss_off = 0.0
loss_on = 0.0

!***** CREA LOS ESTADOS DE LOS CAPACITORES PARA LOS n ESCENARIOS ( n = escenarios )
x = 1
p = (on_off+1)**(capacitors -x )
DO n = capacitors*(on_off)+1,capacitors*(on_off+1),1
  k = 0
  p = (on_off+1)**(capacitors -x )
  DO m = 1,(on_off + 1)**capacitors !EL TOTAL DE ESTADOS PARA LOS on_off en el escenario
escenario + 1
    TABLA_DE_ESCENARIOS(m,n) = k
    l = MOD(m,p)
    IF ( l == 0) THEN
      IF ( k < (on_off) )THEN
        k = k + 1
      ELSE
        k = 0
      ENDIF
    ENDIF
  ENDDO
  x = x + 1
ENDDO

! REACOMODA LOS ESTADOS PARA CREAR LA MATRIZ MATRIZ_DATOS CON MAYOR FACILIDAD
DO x = 0,on_off-1
  ORDENA(x+1) = (x+1)**capacitors ! las lineas que son todos los
numeros iguales.
ENDDO
ORDENA(1) = 0
DO m = 1,(on_off + 1)**capacitors
  p = 1
  x = 1
  DO n = capacitors*(on_off)+1,capacitors*(on_off+1),1
    l = TABLA_DE_ESCENARIOS(m,n)
    IF ( l > x )THEN
      p = 1
      x = l
    ENDIF
  ENDDO

```

```

        ENDDO
        TABLA_DE_ESCENARIOS((ORDENA(p)+1), (capacitors*(on_off-1)+1):capacitors*(on_off)) =
TABLA_DE_ESCENARIOS(m, (capacitors*(on_off)+1):capacitors*(on_off+1))
        ORDENA(p) = ORDENA(p)+1
        IF ( TABLA_DE_ESCENARIOS(m,capacitors*(on_off)+1) > (on_off-1) ) THEN
Rompe si ya es dos
                TABLA_DE_ESCENARIOS(m:((on_off + 1)**capacitors), (capacitors*(on_off-
1)+1):capacitors*(on_off)) = TABLA_DE_ESCENARIOS(m:(on_off +
1)**capacitors, (capacitors*(on_off)+1):capacitors*(on_off+1))
                EXIT ! sale de DO m = 1, (on_off + 1)**capacitors
        ENDIF
    ENDDO
    TABLA_DE_ESCENARIOS(1:(on_off + 1)**capacitors, (capacitors*(on_off)+1):capacitors*(on_off+1)) =
TABLA_DE_ESCENARIOS(1:(on_off + 1)**capacitors, (capacitors*(on_off-1)+1):capacitors*(on_off))

    !***** CREA LOS ESTADOS HASTA EL ESCENARIO N ( N = K+1 )
    !
    DO m = 1, on_off-1
        TABLA_DE_ESCENARIOS(1:(m+1)**capacitors), (capacitors*(m-1)+1):capacitors*(m) =
TABLA_DE_ESCENARIOS(1:(m+1)**capacitors, (capacitors*(on_off-1)+1):capacitors*(on_off))
    ENDDO

    !*****LLENA MATRIZ_DATOS

    l = 2**capacitors ! COLUMNAS CON VALORES DIFERENTES DE CERO
    m = on_off
    DO p = 1, (on_off+1)**capacitors
        d = 0
        DO k = p, (on_off+1)**capacitors
            BC(1,1:capacitors) = TABLA_DE_ESCENARIOS(k,capacitors*(m-1)+1:capacitors*m)
            AB(1,1:capacitors) = TABLA_DE_ESCENARIOS(p,capacitors*(m)+1:capacitors*(m+1))
            CD = BC-AB ! Si en CD hay un elemento -1 o 2 no se puede seguir
ese camino
                DO n = 1,capacitors
                    IF ( ( CD(1,n) == 0 ) .OR. ( CD(1,n) == 1 ) ) THEN
estado
                            h = 1 ! un estado predecesor puede viajar a este
estado
                    ELSE
                            h = 0 ! un estado predecesor no puede viajar a este
estado
                    EXIT
                ENDIF
            ENDDO
            IF ( h == 1 ) THEN
                d = d+1
                MATRIZ_DATOS(p,d) = k
            ENDIF
            IF ( d == 1 ) THEN
                EXIT
            ENDIF
        ENDDO
    ENDDO

    DO m = 1,escenarios ! RESUELVE FLUJOS DE POTENCIA PARA TODOS LOS ESCENARIOS
        DO k = 1,spot_loads ! MULTIPLICA LAS CARGAS POR EL PORCENTAJE DE CARGA.
            SPOT_LOAD_DATA(k,3:8) = SPOT_LOAD_DATA_2(k,3:8) * porcentaje_de_carga(m)/100.0
        ENDDO
        IF ( m >= on_off) THEN
            p = on_off
            g = on_off
        ELSE
            p = m
            g = m
        ENDIF
        DO n = 1, (p+1)**capacitors
            AB(1,1:capacitors) = TABLA_DE_ESCENARIOS(n,capacitors*(g-1)+1:capacitors*g)
            CALL FLUJOS_POTENCIA
            PERDIDAS_X_ESCENARIO(n,m) = loss
        ENDDO
    ENDDO

    DO m = 1,escenarios
        IF ( m >= on_off) THEN
            p = on_off
        ELSE
            p = m
        ENDIF
        DO n = 1, (p+1)**capacitors
            WRITE(*,*) PERDIDAS_X_ESCENARIO(n,m)
        ENDDO
    ENDDO

```

```

        ENDDO

ENDDO

!***** TRAYECTORIA OPTIMA

DO n = 1,2**capacitors
    TRAYECTORIAS1(n,1) = MATRIZ_DATOS(1,n)
    PERDIDAS2(n) = PERDIDAS_X_ESCENARIO(n,1)
ENDDO
TRAYECTORIAS = TRAYECTORIAS1
PERDIDAS1 = PERDIDAS2
f = n-1
g = 2
p = 0
DO g = 2,escenarios
    t = 0
    bande = 0
    DO n = 1,f
        l = TRAYECTORIAS1(n,g-1)
        loss_anterior = PERDIDAS2(n)
        AC(1,1:g-1) = TRAYECTORIAS1(n,1:g-1)
        DO m = 1,2**capacitors
            h = MATRIZ_DATOS(1,m)
            IF (h .NE. 0) THEN
                p = p+1
                AC(1,g) = MATRIZ_DATOS(1,m)
                TRAYECTORIAS(p,1:g) = AC(1,1:g)
                IF ( (AC(1,1) == (2**CAPACITORS)) .AND. (bande == 0) ) THEN
                    bande = 1
                    t = p
                ENDIF
                PERDIDAS1(p) = PERDIDAS_X_ESCENARIO(h,g) + loss_anterior
            ELSE
                EXIT
            ENDIF
        ENDDO
    ENDDO
    IF ( f > 100 ) THEN
        ! SI ES MAYOR A 1000
        ! QUE ORDENE LOS ORDENE DE MENOR A
        MAYOR
        WRITE(*,*)' ORDENAMIENTO BURBUJA'
        DO m = 1,f-1
            ! Y ESCOJA LOS PRIMEROS 1000 CON MENOR VALOR
            DO n = 1,f
                ! compara los elementos adyacentes y los intercambia si el
                primer elemento
                ! es mayor que el segundo */
                IF ( PERDIDAS1(n) > PERDIDAS1(n+1) ) THEN
                    almacena = PERDIDAS1(n)
                    AC(1,1:g) = TRAYECTORIAS(n,1:g)
                    PERDIDAS1(n) = PERDIDAS1(n+1)
                    PERDIDAS1(n+1) = almacena
                    TRAYECTORIAS(n,1:g) = TRAYECTORIAS(n+1,1:g)
                    TRAYECTORIAS(n+1,1:g) = AC(1,1:g)
                ENDIF
            ENDDO
        ENDDO
        f = 100
    ELSE
        f = p
    ENDIF
    WRITE(*,*)'f = ',f,' ESCENARIOS = ',g
    p = 0
    TRAYECTORIAS1 = TRAYECTORIAS
    PERDIDAS2 = PERDIDAS1
ENDDO
loss_anterior = PERDIDAS1(1)
h = 1
DO g = 2,f
    IF ( (PERDIDAS1(g) < loss_anterior) ) THEN
        loss_anterior = PERDIDAS1(g)
        h = g
    ENDIF
ENDDO
! CALCULA LAS PERDIDAS CON TODOS LOS CAPACITORES DESCONECTADOS en todos los escenarios
! y CALCULA LAS PERDIDAS CON TODOS LOS CAPACITORES CONECTADOS en todos los escenarios

DO n = 1,escenarios
    loss_off = PERDIDAS_X_ESCENARIO(1,n) + loss_off

```

```

        loss_on = PERDIDAS_X_ESCENARIO(2**capacitors,n) + loss_on
        write(*,*)n,PERDIDAS_X_ESCENARIO(1,n),PERDIDAS_X_ESCENARIO(2**capacitors,n)
ENDDO

WRITE(*,*)loss_on
WRITE(*,*)'LA TRAYECTORIA CON LAS MENORES PERDIDAS ES:'
WRITE(*,*)TRAYECTORIAS1(h,1:escenarios),PERDIDAS1(h)

DO n = 1,escenarios
    WRITE(*,45)TABLA_DE_ESCENARIOS((TRAYECTORIAS1(h,n)),capacitors*(on_off-
1)+1:capacitors*on_off) !,PERDIDAS_X_ESCENARIO((TRAYECTORIAS1(h,n)),n)
ENDDO

45      format (8I4)

END SUBROUTINE DESPACHO

!*****
!*****

SUBROUTINE FLUJOS_POTENCIA

IMPLICIT NONE
INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150, t = 3
!***** CONTADORES *****
INTEGER:: bandera(max),
conta,n,m,k,l,p,h,o,f,conta_,contador(max),bande_conexion(1,4),posicion,volti(2),configuracion,mm
REAL:: w,potencial, potencia2
INTEGER :: qq, xx,itera, aaa,b
!***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES
*****
INTEGER:: ramas,nodos
REAL:: CONEXION(max,5)
REAL:: longitud2(max)
!*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
INTEGER::config_fase
CHARACTER (len = 10):: PHASE(max1)
!***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
!***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
INTEGER:: transformers
REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
REAL:: nt
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitors
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
INTEGER:: distributed_loads
REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
!***** VARIABLES PARA LAS IMPEDANCIAS DE LINEA Y ADMINTANCIAS EN DERIVACION *****
!***** PARA ESTE PROGRAMA LA Zabc y la Yabc ESTAN DADAS EN ohm/milla *****
!***** Y LAS LONGITUDES DE LINEA EN LA COLUMNA 3 DE LA *****
!***** VARIABLE CONEXIONES ESTAN DADAS EN ft *****
COMPLEX::Zabc(max,3)
REAL::Yabc(max,3)
!***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: voltage_regulators
REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
INTEGER:: vector_REGULADORES(5)
!***** VARIABLES PARA LOS NIVELES *****
INTEGER:: NODOS_(max),BANDERA2(max)
INTEGER:: nodo_mayor
INTEGER:: ICOL(max), IFILA(max), ISP(max),NIVEL(max,3)
INTEGER:: conta_config(max,2)
!***** MATRICES CONSTANTES PARA LINEAS AEREAS, SUBTERRANEAS,
REGULADORES Y CAPACITORES *****
COMPLEX:: B_(max1*t,t),A_(max1*t,t)
complex::AA_(1:t,1:t)
INTEGER:: nodo_configuracion(max1,2)
!*****CORRIENTES DE LINEA Y VOLTAJES LINEA-TIERRA ( O LINEA NEUTRO ) Y
VECTORES BANDERA *****

```

```

COMPLEX:: I_rama(t,max1),I_subestacion(t,1) ! CORRIENTES DE RAMA (la fase
es segun la configuracion de rama ) max1 > al numero de ramas
COMPLEX:: I_rama_abc(t,max1) ! CORRIENTES DE RAMA ( la fase es abc)
COMPLEX:: I_conversion(t,1)
COMPLEX:: E_slack(1:t,1) ! VOLTAJE SLACK DEL NODO RAIZ ( LINEA TIERRA )
COMPLEX:: V_ground(t,max1) ! VOLTAJES LINEA TIERRA DE LOS NODOS
COMPLEX:: V_ground_abc(t,max1) ! VOLTAJES DE NODO LINEA TIERRA ( LA
FASE ES abc )
COMPLEX:: I_nodo(t,max1) ! CORRIENTES DEMANDADAS POR LOS NODOS
COMPLEX:: V_ground_planos(t,max1) ! VOLTAJES INICIALIZADOS DE TODOS LOS NODOS
COMPLEX:: E_abc(t,1) ! VOLTAJE DEL LADO SECUNDARIO EN SECUENCIA abc
(LINEA-NEUTRO (o tierra))
COMPLEX:: E_sorce !
INTEGER:: IFILA_corriente(max1) ! VECTOR BANDERA PARA IR SUMANDO CORRIENTES DE NODO Y RAMA
INTEGER:: CONEXION_ramas(max1,2)
COMPLEX:: perdidas(t,1)
REAL :: loss
! ***** MATRICES CONSTANTES QUE RELACIONAN CORRIENTES DE DELTA CON CORRIENTES DE LINEA o
! ***** VOLTAJES DE LINEA CON VOLTAJES DE NEUTRO Y ESAS COSAS DEL LIBRO DE KERSTING
*****
COMPLEX:: j = (0,1) ! j complejo
REAL:: pi = 3.14159265 ! VALOR DE pi
INTEGER:: D_ground_2_line(t,t) = RESHAPE( (/1,0,-1,-1,1,0,0,-1,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA V11 =
D_ground_2_1*v1n
REAL:: ANGL0 ! FUNCION ANGULO (RETORNA ANGULO EN GRADOS)
COMPLEX:: V_line(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PARA UN NODO ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA
CARGA ESTE EN DELTA )
COMPLEX:: Z_constant(t,1) ! IMPEDANCIA CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
IMPEDANCIA CONSTANTE )
COMPLEX:: I_constant(t,1) ! CORRIENTE CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
CORRIENTE CONSTANTE )
COMPLEX:: V_line_planos(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PLANOS PARA UN NODO ( PARA
CUALQUIER NODO DONDE SE OCUPEN LOS VOLTAJES LINEA PLANOS
REAL,PARAMETER:: Iden(t,t)= RESHAPE ( (/1,0,0,0,1,0,0,0,1/), (/3,3/)) ! *
matriz identidad
INTEGER,PARAMETER:: Del_Line(t,t) = RESHAPE ( (/1,-1,0,0,1,-1,-1,0,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA
Ilinea = Del_Line * Idelta
INTEGER,PARAMETER:: T_delta(t,t) = RESHAPE ( (/ 2, -2, -1, -1, 2, -1, -1, -1, 2/), (/3,3/))
)
real,PARAMETER:: WWW(t,t) = (1.0/3.0)* RESHAPE( (/2,0,1,1,2,0,0,1,2/), (/3,3/)) )
REAL,PARAMETER:: Line_Delta(t,t) = RESHAPE( (/1,1,-2,-1,2,-1,0,0,0/), (/3,3/)) ) *(1.0/3.0)
COMPLEX:: T_DELTA2(t,t)
complex(8):: rere(1:t,1:t)
COMPLEX:: Zt,Z_base,Zt_pu
INTEGER:: TAP_f(3,2)
INTEGER:: TAP(t,2),regulator
REAL:: a_reg(t,t), d_reg(t,t)
COMPLEX:: Scomplex1(t,1),Scomplex2(t,1),delta_Scomplex(t,1)
REAL:: error
INTEGER:: posiciona(max1)
INTEGER:: bandereg
complex(8):: corriente(t,1)
REAL:: Voltajes_pu(3,2)
COMPLEX:: G1(t,t)
INTEGER:: AB

COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION
COMMON /datos2/ config_fase
COMMON /datos3/ config_linea_O,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos10/ NODOS,BANDERA2,nodo_mayor,ICOL,IFILA,ISP,NIVEL,conta_config
COMMON /datos11/ posicion,E_abc
COMMON /datos12/

I_rama,I_rama_abc,nodo_configuracion,o,CONEXION_ramas,configuracion,I_conversion,contador,longitud2,bande
ra

COMMON /datos13/ E_slack,V_ground
COMMON /datos16/ vector_REGULADORES
COMMON /datos20/ V_ground_abc, V_ground_planos
common /datos25/ a_reg,d_reg
COMMON /datos30/ TAP_f,TAP, posiciona,regulator,mm,b
COMMON /datos40/ A,B
COMMON /datos50/ perdidas
COMMON /datos1000/ I_nodo
COMMON /despacho4/ loss

```

```

!***** ESTA PARTE CREA LAS MATRICES A_ Y B_ PARA LOS CALCULOS *****
I_subestacion = (0.,0.)
a_reg = RESHAPE ( (/1.0,0.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.0,1.0/), (/3,3/)) !Matriz Identidad
d_reg = RESHAPE ( (/1.0,0.0,0.0,0.0,1.0,0.0,0.0,0.0,1.0/), (/3,3/)) !Matriz Identidad
T_DELTA2(t,t) = (0.,0.) ! ¿que hace ?
qq = 0
posiciona = 0
regulator = 0
TAP = 0
TAP_f = 0
mm = 1 ! ES PARA ENTRAR AL REGULADOR UNO y asi sucesivamente
A_ = (0.,0.) !
B_ = (0.,0.)
!***** CALCULA LAS MATRICES A_ Y B_ PARA LA SOLUCION DE FLUJOS POR EL METODO DE BARRIDO *****
DO k = 1,ramas
SELECT CASE ( nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),2) )
CASE (1) ! ABCN o ACBN o BCAN o BACN o CABN o CBAN
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc ! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) *(longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2)))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINGC(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matriz
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(AA_(1:t,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE (2) ! BCN o CBN , falta la fase A
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc ! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) *(longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2)))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINGC(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matriz
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(AA_(1:t,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE (3) ! CAN o ACN , falta la fase B
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc ! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) *(longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2)))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINGC(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matriz
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(AA_(1:t,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE (4) ! ABN o BAN , falta la fase C
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc ! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) *(longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2)))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINGC(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matriz
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(AA_(1:t,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE (5) ! AN , faltan las fases B y C
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc ! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) *(longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2)))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINGC(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matriz
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)

```

```

B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(A_(k+qq:k+qq+2,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE(6) ! BN , faltan las fases A y C
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc
! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) * (longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINCG(t,AA_,t,AA_,t) ! invierte la matri
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(A_(k+qq:k+qq+2,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE(7) ! CN , faltan las fases A y B
xx = nodo_configuracion(contador(CONEXION_ramas(K,2)),1) ! da
la posicion en Zabc y Yabc
! calcula la matriz constante A de libro de kersting para
lineas
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t) + ((0.5)*
MATMUL(Zabc(xx*3-2:xx*3,1:t), (Yabc(xx*3-2:xx*3,1:t)*j)) * (longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))**2))
AA_(1:t,1:t) = A_(k+qq:k+qq+2,1:t)
CALL LINCG(t,AA_,t,AA_,t)
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = AA_(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = MATMUL(A_(k+qq:k+qq+2,1:t),Zabc(xx*3-
2:xx*3,1:t)*longitud2(contador(CONEXION_ramas(k,2))))
CASE(101) ! TRANSFORMADOR Gr. Y Gr. Y
nt = TRANSFORMERS_DATA(2,2)/TRANSFORMERS_DATA(2,3) !
RELACION DE TRANSFORMACION
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = (1.0/nt)*Iden(1:t,1:t)
Zt_pu = (TRANSFORMERS_DATA(2,4)+TRANSFORMERS_DATA(2,5)*j)/100.0
Z_base =
(((TRANSFORMERS_DATA(2,3)*1000/sqrt(3.0))**2)/(TRANSFORMERS_DATA(2,1)*1000/3.0)
Zt = Zt_pu*Z_base
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = RESHAPE(
(/Zt, (0.,0.), (0.,0.), (0.,0.), Zt, (0.,0.), (0.,0.), (0.,0.), Zt/), (/3,3/))*nt
CASE(105) ! TRANSFORMADOR D - D
nt = TRANSFORMERS_DATA(2,2)/TRANSFORMERS_DATA(2,3) !
RELACION DE TRANSFORMACION
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = (1.0/(3.0*nt))*RESHAPE( (/2.0,-1.0,-1.0,-
1.0,2.0,-1.0,-1.0,-1.0,2.0/), (/3,3/))
Zt_pu = (TRANSFORMERS_DATA(2,4)+TRANSFORMERS_DATA(2,5)*j)/100.0
Z_base =
(((TRANSFORMERS_DATA(2,3)*1000/sqrt(3.0))**2)/(TRANSFORMERS_DATA(2,1)*1000/3.0)
Zt = Zt_pu*Z_base
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = RESHAPE(
(/Zt, (0.,0.), (0.,0.), (0.,0.), Zt, (0.,0.), (0.,0.), (0.,0.), Zt/), (/3,3/))
G1 = (1.0/(Zt+Zt+Zt))*RESHAPE( (/Zt,Zt,-2*Zt,-Zt,2*Zt,-
Zt, (0.,0.), (0.,0.), (0.,0.)/), (/3,3/))
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) =
MATMUL(WWWW,MATMUL(B_(k+qq:k+qq+2,1:t),G1))*nt
CASE(201) ! SWICHTH
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = 0.0
CASE(500) ! REGULADOR DE VOLTAJE
A_(k+qq:k+qq+2,1:t) = Iden(1:t,1:t)
B_(k+qq:k+qq+2,1:t) = (0.0,0.0)
regulator = regulator + 1 ! HAY REGULADORES DE
VOLTAJE
posiciona(CONEXION_ramas(K,2)) = k ! POSICION EN LA
MATRIZ A_
END SELECT
qq = qq + 2
ENDDO
! ***** RUTINA DE FLUJOS DE POTENCIA POR EL METODO DE LA ESCALERA *****
!*****
te: DO itera = 1,500
potencial = 0.0
DO k = 1,t
potencial = abs(V_ground_abc(k,1)*CONJG(I_subestacion(k,1))) +
potencial
ENDDO
! ACTUALIZA VOLTAJES AGUAS ABAJO EN TODOS LOS NODOS PARTIENDO DEL NODO RAIZ
(SUBESTACION) *****
DO k = 1,ramas
IF ( CONEXION_ramas(K,1) == 1 ) THEN !
LOS NODOS CONECTADOS A LA SUBESTACION USAN EL VOLTAJE SLACK

```

```

UTILIZA EL VOLTAJE SLACK
! **** PARA UN NODO AGUAS ABAJO DEL NODO RAIZ SE
V_ground_abc(1:t,contador(CONEXION_ ramas(k,2))) =
MATMUL(A_(k*3-2:k*3,1:t),E_abc(1:t,1)) - MATMUL(B_(k*3-2:k*3,1:t),I_rama(1:t,k)/1000.0)
! kV + volts/1000
ELSEIF ( nodo_configuracion(contador(CONEXION_ ramas(k,2)),2) ==
201 ) THEN
! ES UN SWITCH Y EL VOLTAJE ES EL MISMO QUE EL NODO
ANTERIOR EN SECUENCIA ABC
V_ground_abc(1:t,contador(CONEXION_ ramas(k,1)))
ELSE
! TODO TIENE QUE ESTAR EN ABC
V_ground_abc(1:t,contador(CONEXION_ ramas(k,2))) =
MATMUL(A_(k*3-2:k*3,1:t),V_ground_abc(1:t,contador(CONEXION_ ramas(k,1)))) - (MATMUL(B_(k*3-
2:k*3,1:t),I_rama(1:t,k)/1000.0)
! kV + volts/1000
ENDIF
ENDDO
!***** CALCULA LAS CORRIENTES DE RAMA, COMENZANCO DEL ULTIMO
NIVEL *****
! ***** HACIA EL NODO RAIZ
*****
CALL CORRIENTE_ ramas
I_subestacion(1:t,1) = I_rama(1:t,1) + I_nodo(1:t,1) ! LA
corriente total saliendo de la subestacion
! ***** CALCULA EL ERROR *****
! *****
potencia2 = 0.0
DO k = 1,t
potencia2 = abs(V_ground_abc(k,1)*CONJG(I_subestacion(k,1))) +
potencia2
ENDDO
error = abs(potencia2 - potencial)
IF ( error < 0.001 ) THEN ! criterio de convergencia
IF (regulator /= 0 ) THEN
CALL REGULADOR
regulator = regulator - 1
ELSE
EXIT
ENDIF
ENDIF
ENDDO
!***** CALCULA LAS PERDIDAS *****
!*****
DO m = 1,t
Scomplex1(m,1) = V_ground_abc(m,1)*CONJG(I_subestacion(m,1))
ENDDO
perdidas(1:t,1) = Scomplex1(1:t,1) - perdidas(1:t,1) !
las perdidas son igual a la demanda del sistema menos las potencias de las cargas

SELECT CASE ( INT(TRANSFORMERS_DATA(1,6)) )
CASE (104)
!WRITE(*,*)'*****VOLTAJES DE NODO abc***** VOLTAJES LINEA - TIERRA '
w = 1.0
CASE (105)
!WRITE(*,*)'*****VOLTAJES DE NODO abc***** VOLTAJES LINEA - LINEA '
DO h = 1,nodos
V_ground_abc(1:t,h) =
MATMUL(D_ground_2_line(1:t,1:t),V_ground_abc(1:t,h)) ! CALCULA LOS VOLTAJES LINEA - LINEA
ENDDO
w = SQRT(3.0)
ENDSELECT

!***** IMPRIME LOS TAPS DE LOS REGULADORES DE VOLTAJE SI EXISTEN *****
!*****
IF ( voltage_regulators >= 1 ) THEN ! CHECA SI EXISTEN
REGULADORES DE VOLTAJE
m = 0
DO h = 1,voltage_regulators
WRITE(*,*)' '
WRITE(*,*)' '
WRITE(*,*)'TAPS del regulador',INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(1,h+m)) ! del
nodo',NODOS_(INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,h+m)))
WRITE(*,*)' '
WRITE(*,*)INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,h+m))
WRITE(*,*)INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,h+m+1))
WRITE(*,*)INT(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,h+m+2))

```

```

                m = m+2
            ENDDO
ENDIF
loss = REAL(perdidas(1,1))+REAL(perdidas(2,1))+REAL(perdidas(3,1))
V_ground_abc = V_ground_planos
I_nodo = (0.0,0.0)
I_rama = (0.0,0.0)
I_rama_abc = (0.0,0.0)

END SUBROUTINE FLUJOS_POTENCIA

!*****
!*****

SUBROUTINE CORRIENTE_ramas

IMPLICIT NONE

INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150, t = 3
!***** CONTADORES *****
INTEGER:: bandera(max),
conta,n,m,k,l,p,h,o,f,conta_,contador(max),bande_conexion(1,4),posicion,volti(2),configuracion,mm,b
REAL:: w,uu
!***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES *****
*****
INTEGER:: ramas,nodos
REAL:: CONEXION(max,5), porcentaje_de_carga
REAL:: longitud(max)
REAL:: longitud2(max)
!*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
INTEGER::config_fase
!***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
!***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
INTEGER:: transformers
REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
REAL:: nt
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitores
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
INTEGER:: distributed_loads
REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
!***** VARIABLES PARA LAS IMPEDANCIAS DE LINEA Y ADMINTANCIAS EN DERIVACION *****
!***** PARA ESTE PROGRAMA LA Zabc y la Yabc ESTAN DADAS EN ohm/milla *****
!***** Y LAS LONGITUDES DE LINEA EN LA COLUMNA 3 DE LA *****
!***** VARIABLE CONEXIONES ESTAN DADAS EN ft *****
COMPLEX::Zabc(max,3)
REAL::Yabc(max,3)
!***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: voltage_regulators
REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
!***** VARIABLES PARA LOS NIVELES *****
INTEGER:: NODOS_(max),BANDERA2(max)
INTEGER:: nodo_mayor
INTEGER:: ICOL(max), IFILA(max), ISP(max),NIVEL(max,3)
INTEGER:: conta_config(max,2)
!***** MATRICES CONSTANTES PARA LINEAS AEREAS, SUBTERRANEAS,
REGULADORES Y CAPACITORES *****
COMPLEX:: B_(max1*t,t),A_(max1*t,t)
INTEGER:: nodo_configuracion(max1,2)
!*****CORRIENTES DE LINEA Y VOLTAJES LINEA-TIERRA ( O LINEA NEUTRO ) Y VECTORES
BANDERA *****
COMPLEX:: I_rama(t,max1) ! CORRIENTES DE RAMA (la fase es segun la
configuracion de rama ) max1 > al numero de ramas
COMPLEX:: I_rama_abc(t,max1) ! CORRIENTES DE RAMA ( la fase es abc)
COMPLEX:: V_ground_abc(t,max1) ! VOLTAJES DE NODO LINEA TIERRA ( LA
FASE ES abc )
COMPLEX:: I_conversion(t,1)
COMPLEX:: E_slack(1:t,1) ! VOLTAJE SLACK DEL NODO RAIZ ( LINEA TIERRA )
COMPLEX:: V_ground(t,max1) ! VOLTAJES LINEA TIERRA DE LOS NODOS
COMPLEX:: I_nodo(t,max1) ! CORRIENTES DEMANDADAS POR LOS NODOS

```

```

COMPLEX:: V_ground_planos(t,max1) ! VOLTAJES INICIALIZADOS DE TODOS LOS NODOS
COMPLEX:: E_abc(t,1) ! VOLTAJE DEL LADO SECUNDARIO EN SECUENCIA abc
(LINEA-NEUTRO (o tierra))
COMPLEX::E_sorce !
INTEGER:: IFILA_corriente(max1) ! VECTOR BANDERA PARA IR SUMANDO CORRIENTES DE NODO Y RAMA
INTEGER:: CONEXION_ramas(max1,2)
! ***** MATRICES CONSTANTES QUE RELACIONAN CORRIENTES DE DELTA CON CORRIENTES DE LINEA o
! ***** VOLTAJES DE LINEA CON VOLTAJES DE NEUTRO Y ESAS COSAS DEL LIBRO DE KERSTING
*****
COMPLEX:: j = (0,1) ! j complejo
REAL:: pi = 3.14159265 ! VALOR DE pi
REAL,PARAMETER:: D_ground_2_line(t,t) = RESHAPE( (/1,0,-1,-1,1,0,0,-1,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA
Vll = D_ground_2_l*Vln
REAL:: ANGULO ! FUNCION ANGULO (RETORNA ANGULO EN GRADOS)
COMPLEX:: V_line(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PARA UN NODO ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA
CARGA ESTE EN DELTA )
COMPLEX:: Z_constant(t,1) ! IMPEDANCIA CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
IMPEDANCIA CONSTANTE )
COMPLEX:: I_constant(t,1) ! CORRIENTE CONSTANTE ( PARA CUALQUIER NODO DONDE LA CARGA SEA
CORRIENTE CONSTANTE )
COMPLEX:: I_capacitor(t,1)
COMPLEX:: perdidas(t,1)
COMPLEX:: V_line_planos(t,1) ! VOLTAJE DE LINEA PLANOS PARA UN NODO ( PARA
CUALQUIER NODO DONDE SE OCUPEN LOS VOLTAJES LINEA PLANOS
REAL,PARAMETER:: Iden(t,t)= RESHAPE ( (/1,0,0,0,1,0,0,0,1/), (/3,3/)) !*
matriz identidad
REAL,PARAMETER:: Del_Line(t,t) = RESHAPE ( (/1,-1,0,0,1,-1,-1,0,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA Ilinea =
Del_Line * Idelta
INTEGER:: TAP_f(3,2)
INTEGER:: TAP(t,2)
REAL:: a_reg(t,t), d_reg(t,t)
INTEGER::posiciona(max1),regulator
INTEGER::AB(1,8)

COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION,longitud
COMMON /datos2/ config_fase
COMMON /datos3/ config_linea_U,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos10/ NODOS_,BANDERA2,nodo_mayor,ICOL,IFILA,ISP,NIVEL,conta_config
COMMON /datos11/ posicion,E_abc
COMMON /datos12/
I_rama,I_rama_abc,nodo_configuracion,o,CONEXION_ramas,configuracion,I_conversion,
contador,longitud2,bandera
COMMON /datos13/ E_slack,V_ground,nt
COMMON /datos20/ V_ground_abc,V_ground_planos
common / datos25/ a_reg,d_reg
COMMON / datos30/ TAP_f,TAP,posiciona,regulator,mm,b
COMMON /datos40/ A_,B_
COMMON /datos50/ perdidas
COMMON /datos100/ porcentaje_de_carga
COMMON /datos1000/ I_nodo
COMMON /despacho2/ AB

I_nodo = (0.,0.)
I_rama = (0.0,0.0)
perdidas = (0.,0.)

Do o = 1,spot_loads ! HASTA NUMERO DE CARGAS SPOT
conta = 0
l = INT(SPOT_LOAD_DATA(o,2)) ! SACA EL MODELO DE LA CARGA
n = INT(SPOT_LOAD_DATA(o,1)) ! ME DICE QUE NODO ES
m = contador(INT(SPOT_LOAD_DATA(o,1))) ! ME DICE LA POSICION DEL VOLTAJE DEL NODO n
Z_constant = (0.,0.)
I_constant = (0.,0.)
SELECT CASE (L) ! CHECA LA CONFIGURACION DE LA
! ** CARGA CONECTADA EN Y P-Q
CASE (1)
!WRITE(*,*)'CARGA CONECTADA EN Y P-Q'
DO h = 1,t
IF( SPOT_LOAD_DATA(o,3+conta) /= 0. .OR.
SPOT_LOAD_DATA(o,4+conta) /= 0. ) THEN
I_nodo(h,n) = CONJG(
(SPOT_LOAD_DATA(o,3+conta)+j*SPOT_LOAD_DATA(o,4+conta) )/V_ground_abc(h,m) )
ENDIF

```



```

                                ENDDO
                                !**** AHORA OBTENGO LAS CORRIENTES DE LINEA QUE SON LAS QUE QUIERO
                                I_nodo(1:t,n) = MATMUL(Del_Line,I_nodo(1:t,n))
                                END SELECT
                                perdidas(1:t,1) = V_ground_abc(1:t,m)*CONJG(I_nodo(1:t,n)) + perdidas(1:t,1)
                                ENDDO

                                !***** CORRIENTES INYECTADAS EN LOS NODOS POR LOS CAPACITORES *****
                                !***** CALCULA LAS CORRIENTES INYECTADAS EN LOS NODOS POR LOS CAPACITORES *****
                                !**** CONSIDERA SOLO CAPACITORES CONECTADOS EN ESTRELLA PARA LOS CAPACITORES EN DELTA*****
                                !**** SE NECESITA MODIFICAR ESTA RUTINA PONIENDOLE UN CASE PARA SABER QUE CONECCION TIENE****

                                Do o = 1,capacitors                                ! HASTA NUMERO DE CAPACITORES
                                conta = 0
                                I_capacitor = (0.,0.)
                                n = INT(CAPACITORS_DATA(o,1)) ! ME DICE QUE NODO ES
                                m = contador(INT(CAPACITORS_DATA(o,1))) ! ME DICE LA POSICION DEL
                                VOLTAJE DEL NODO n
                                h = INT(CAPACITORS_DATA(o,2))
                                SELECT CASE (h)
                                CASE(1)                                ! capacitores
                                conectados en Y
                                DO f = 1,t
                                IF( CAPACITORS_DATA(o,3+conta) /= 0. ) THEN
                                w = ABS(V_ground_planos(f,m))                                !
                                volaje nominal
                                I_capacitor(f,1) = (( j*(
                                CAPACITORS_DATA(o,3+conta)/(w*w) )*V_ground_abc(f,m) ))
                                ENDF
                                conta = conta + 1                                ! SIGUIENTE POSICION DE
                                CAPACITORS_DATA(o,2+conta)
                                ENDDO
                                CASE(2)
                                WRITE(*,*)'CAPACITOR CONECTADO EN D, falta modelar'
                                END SELECT
                                I_capacitor(1:t,1) = I_capacitor(1:t,1)* MOD(AB(1,o),2)
                                I_nodo(1:t,n) = I_capacitor(1:t,1) + I_nodo(1:t,n)
                                !pause 'capacitor '
                                perdidas(1:t,1) = V_ground_abc(1:t,m)*CONJG(I_capacitor(1:t,1)) + perdidas(1:t,1)
                                ENDDO

                                !***** CALCULA LAS CORRIENTES DE RAMA *****
                                !***** *****
                                !*****COMENZANDO DESDE EL ULTIMO NIVEL, HACIA EL NODO RAIZ *****
                                !***** *****

                                IFILA_corriente = 0
                                BANDE_CONEXION = 0
                                I_rama = (0.,0.)
                                I_rama_abc = I_nodo
                                !*** BARRE DE LOS NODOS DEL ULTIMO NIVEL AL PRIMER NIVEL
                                l = 2
                                DO o = nodos,1,-1
                                m = CONEXION_RAMAS(o-1,2)
                                n = CONEXION_RAMAS(o-1,1)
                                IF ((nodo_configuracion(o,2) >= 1) .and. (nodo_configuracion(o,2) <= 7)) )
                                THEN !( l <= nodo_configuracion(o) <= 7 ) THEN
                                I_rama(1:t,o-1) = I_rama_abc(1:t,m)
                                I_rama_abc(1:t,n) = I_rama_abc(1:t,n) + I_rama(1:t,o-1)
                                !**** CHECA SI ES TRANSFORMADOR *****
                                ELSEIF ( (nodo_configuracion(o,2) >= 101) .and. (nodo_configuracion(o,2) <= 106) ) THEN
                                ! QUE TIPO DE TRANSFORMADOR ES
                                SELECT CASE (nodo_configuracion(o,2))
                                CASE(101)                                ! SE PUEDEN PONER MAS SELECT PARA
                                OTROS TRANSFORMADORES, ESTE PROGRAMA SOLO CONSIDERA                                ! UN TRANSFORMADOR EN EL CIRCUITO
                                RADIAL
                                !WRITE(*,*)'Gr. Y - Gr. Y'
                                I_rama(1:t,o-1) = (1./nt) * I_rama_abc(1:t,m)
                                CASE(105)
                                !WRITE(*,*)'D - D
                                I_rama(1:t,o-1) = (1./nt) * I_rama_abc(1:t,m)
                                END SELECT
                                I_rama_abc(1:t,n) = I_rama_abc(1:t,n) + I_rama(1:t,o-1)
                                ! CHECA SI ES SWITCH
                                ELSEIF (nodo_configuracion(o,2) == 201) THEN
                                I_rama(1:t,o-1) = I_rama_abc(1:t,m)

```

```

        I_rama_abc(1:t,n) = I_rama_abc(1:t,n) + I_rama(1:t,o-1)
        ! CHECA SI ES REGULADOR
        ELSEIF ( nodo_configuracion(o,2) == 500) THEN                                ! ES UN REGULADOR
        ! Cuando sea el reg de 37 nodos quitar y si no poner
        d_reg = A_(posiciona(bandera(o))*3-2:posiciona(bandera(o))*3,1:t)
        !E_(o*3-2:o*3,1:t) = d_reg(1:t,1:t)
        I_rama(1:t,o-1) = MATMUL(d_reg,I_rama_abc(1:t,m))
        I_rama_abc(1:t,n) = I_rama_abc(1:t,n) + I_rama(1:t,o-1)
    ELSE
        WRITE(*,*)'ERROR'
    ENDIF
ENDDO

END SUBROUTINE CORRIENTE_ramas

!*****
!*****

SUBROUTINE REGULADOR
IMPLICIT NONE
INTEGER, PARAMETER:: max = 400, max1 = 150, t = 3
!***** CONTADORES *****
INTEGER:: bandera(max),
conta,n,m,k,l,p,o,f,conta_,contador(max),bande_conexion(1,4),posicion,ee,configuracion,mm,b
REAL:: w, pp
!***** NUMERO DE RAMAS , NODOS Y VARIABLE PARA LAS CONEXIONES *****
INTEGER:: ramas,nodos
REAL:: CONEXION(max,5)
REAL:: longitud2(max)
!*** VARIABLES QUE LEE EL NUMERO DE CONFIGURACIONES DE LAS FASES DE LINEA *****
INTEGER::config_fase
!***** CONFIGURACIONES DE LINEAS AEREAS Y SUBTERRANEAS *****
INTEGER:: config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG(max),UNDERG_CONFIG(max)
!***** VARIABLES PARA TRANSFORMADORES *****
INTEGER:: transformers
REAL:: TRANSFORMERS_DATA(max1,7)
CHARACTER (len = 10)::NOMBRE(max1)
!***** VARIABLES PARA CAPACITORES *****
INTEGER:: capacitores
REAL:: CAPACITORS_DATA(10,5)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS *****
INTEGER:: spot_loads
REAL:: SPOT_LOAD_DATA(max1,8)
!***** VARIABLES PARA LAS CARGAS DISTRIBUIDAS *****
INTEGER:: distributed_loads
REAL:: DISTRIBUTED_LOAD_DATA(max1,9)
COMPLEX::Zabc(max,3)
REAL::Yabc(max,3)
!***** VARIABLES PARA LOS REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: voltage_regulators
REAL:: VOLTAGE_REGULATORS_DATA(13,max1)
!***** VARIABLES PARA LOS NIVELES *****
INTEGER:: NODOS_(max),BANDERA2(max)
INTEGER:: nodo_mayor
INTEGER:: ICOL(max), IFILA(max), ISP(max),NIVEL(max,3)
INTEGER:: conta_config(max,2)
!***** MATRICES CONSTANTES PARA LINEAS AEREAS, SUBTERRANEAS,
REGULADORES Y CAPACITORES *****
COMPLEX:: B_(max1*t,t),A_(max1*t,t)
INTEGER:: nodo_configuracion(max1,2)
!*****CORRIENTES DE LINEA Y VOLTAJES LINEA-TIERRA ( O LINEA NEUTRO
)*****
COMPLEX:: I_rama(t,max1), V_ground(t,max1)                                ! VOLTAJES EN NODOS Y CORRIENTES EN
LAS RAMAS
COMPLEX:: E_abc(t,1)                                                        ! VOLTAJE DEL LADO
SECUNDARIO EN SECUENCIA abc (LINEA-NEUTRO (o tierra))
COMPLEX:: V_ground_abc(t,max1)                                            ! VOLTAJES DE NODO LINEA TIERRA ( LA
FASE ES abc )
COMPLEX:: I_rama_abc(t,max1)        ! CORRIENTES DE RAMA ( la fase es abc)
COMPLEX:: E_sorce                                                            !
COMPLEX:: E_slack(1:t,1)
COMPLEX:: I_conversion(t,1)
INTEGER:: CONEXION_ramas(max1,2)

! ***** MATRICES CONSTANTES QUE RELACIONAN CORRIENTES DE DELTA CON CORRIENTES DE LINEA O

```

```

***** VOLTAJES DE LINEA CON NEUTRO Y ESAS COSAS DEL LIBRO DE KERSTING *****
REAL:: pi = 3.14159265
COMPLEX:: j = (0,1) ! j complejo
REAL:: angulo

INTEGER, PARAMETER:: Iden(1:t,1:t) = RESHAPE ( (/1,0,0,0,1,0,0,0,1/), (/3,3/)) !* matriz
identidad
INTEGER:: D_ground_2_line(t,t) = RESHAPE( (/1,0,-1,-1,1,0,0,-1,1/), (/3,3/)) ! RELACIONA V11 =
D_ground_2_1*V1n

***** VARIABLES DE RUTINA INTERNA DE REGULADORES DE VOLTAJE *****
INTEGER:: posiciona(max1)
REAL:: Npt
REAL:: CT
REAL:: voltage_level
REAL:: bandwidth
COMPLEX:: Z_r,Z_r1,Z_r2,Z_r3
COMPLEX:: Z_reg(1:t,1:t)
COMPLEX:: V_regulador(1:t,1)
COMPLEX:: I_compensador(1:t,1)
COMPLEX:: V_relay(1:t,1)
INTEGER:: TAP(t,2),TAP_f(3,2)
REAL:: a_reg(t,t), d_reg(t,t)
REAL:: AA_(t,t)
INTEGER:: bandereg,regulator
real,PARAMETER:: WWW(t,t) = (1.0/3.0)*RESHAPE( (/2,0,1,1,2,0,0,1,2/), (/3,3/))

COMMON /datos1/ ramas,nodos,CONEXION
COMMON /datos2/ config_fase
COMMON /datos3/ config_linea_0,config_linea_U,OVERHEAD_CONFIG,UNDERG_CONFIG
COMMON /datos4/ transformers,TRANSFORMERS_DATA,NOMBRE
COMMON /datos5/ capacitors,CAPACITORS_DATA
COMMON /datos6/ spot_loads,SPOT_LOAD_DATA
COMMON /datos7/ distributed_loads,DISTRIBUTED_LOAD_DATA
COMMON /datos8/ Zabc,Yabc
COMMON /datos9/ voltage_regulators,VOLTAGE_REGULATORS_DATA
COMMON /datos10/ NODOS_,BANDERA2,nodo_mayor,ICOL,IFILA,ISP,NIVEL,conta_config
COMMON /datos11/ posicion,E_abc
COMMON /datos12/
I_rama,I_rama_abc,nodo_configuracion,o,CONEXION_ramas,configuracion,I_conversion,contador,longitud2
COMMON /datos13/ E_slack,V_ground
COMMON /datos20/ V_ground_abc
common / datos25/ a_reg,d_reg
COMMON / datos30/ TAP_f,TAP,posiciona,regulator,mm,b
COMMON /datos40/ A_,B_

!* INICIALIZA VARIABLES

Z_r1 = (0.,0.)
Z_r1 = (0.,0.)
Z_r1 = (0.,0.)
V_regulador = (0.,0.)
I_compensador = (0.,0.)
V_relay = (0.,0.)
! para recorrer los reguladores de voltaje por columna
Npt = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(6,mm)
CT = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(7,mm)
bandwidth = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(5,mm)
SELECT CASE (int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,mm))) ! CHECA LA CONEXION DE LOS
REGULADORES

CASE (1) ! REGULADORES CONECTADOS EN ESTRELLA
n = int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,mm+1)) ! CHECA SI
ES CONEXION Y normal ó Y ganged (normal los taps cambian por separado, ganged los taps son los mismos
para las fases existentes )
IF ( n == 0 ) THEN
! CONEXION ESTRELLA NORMAL
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm)*j))
Z_r1 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm) +
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm+1)*j))
Z_r2 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm+1) +
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm+2)*j))
Z_r3 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm+2) +
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm+2)*j))
Z_reg = RESHAPE(
(/Z_r1,(0.,0.), (0.,0.), (0.,0.),Z_r2,(0.,0.), (0.,0.), (0.,0.),Z_r3/), (/3,3/))
V_regulador(1:t,1) =
V_ground_abc(1:t,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm)))*1000/Npt
!(V_ground_abc(1:t,contador(CONEXION_ramas(posicion+1,2)))/ Npt )*1000 ! los 1000 es por los kV

```

```

I_rama(1:t,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm)))/ (CT)
V_relay = V_regulador - MATMUL(Z_reg,I_compensador)

!*****CALCULA LOS

TAPS*****

Do ee = 1,t
IF ( int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(8,mm+ee-1))
/= 0 ) THEN      ! CHECA SI EXISTE LA FASE

VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11,mm+ee-1)
abs(V_relay(ee,1))/0.75
      ! REDONDEA EL TAP

      ! TAP NEUTRAL

TAP PARA ELEVAR VOLTAJE

TAP PARA REDUCIR VOLTAJE

REGULADA

ELSE
      ! CONEXION ESTRELLA ganged

      Z_r1 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm+n-1) +
V_regulador(n,1) =
V_ground_abc(n,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm)))*1000/Npt
I_compensador(n,1) =
I_rama(n,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm)))/ (CT)
V_relay(n,1) = V_regulador(n,1) -
      !*****CALCULA LOS TAPS DE REGULADOR Y
ganged *****

voltage_level = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11,mm+n-1)
pp = ((voltage_level) - abs(V_relay(n,1)))/0.75
TAP(n,1) = NINT(pp)      ! REDONDEA

EL TAP
IF ( TAP(n,1) == 0 ) THEN
      TAP(n,2) = 0      !

TAP NEUTRAL
ELSEIF ( TAP(n,1) > 0 ) THEN      ! TAP PARA ELEVAR
      TAP(n,2) = 1
ELSE
      TAP(n,1) = -1*TAP(n,1)      ! TAP PARA REDUCIR
VOLTAJE
      TAP(n,2) = -1
ENDIF
DO ee = 1,t
IF ( (n /= ee) .AND. (
THEN
TAP(ee,1) = TAP(n,1)
TAP(ee,2) = TAP(n,2)
ENDIF
      ENDDO
ENDIF
CASE(2)      ! REGULADORES CONECTADOS EN DELTA
CASE(3)      ! REGULADORES CONECTADOS EN DELTA ABIERTA.
      !n = int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,mm+1))      ! CHECA QUE FASES
ESTAN CONECTADAS A LOS DOS REGULADORES.
      a_reg = 0.0
      d_reg = 0.0
      Z_r1 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm) +
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm)*j))
      Z_r2 = ((VOLTAGE_REGULATORS_DATA(9,mm+1) +
VOLTAGE_REGULATORS_DATA(10,mm+1)*j))

```

```

V_regulador(1:t,1) =
MATMUL(D_ground_2_line(1:t,1:t),V_ground_abc(1:t,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm))))*1000/Npt !
Voltaje linea-linea ! los 1000 es por los kV
V_regulador(2,1) = -1.0*V_regulador(2,1)
I_compensador(1:t,1) =
I_rama(1:t,contador(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm)))/ (CT)
V_relay(1,1) = V_regulador(1,1) - (Z_r1*I_compensador(1,1))
V_relay(2,1) = V_regulador(2,1) - (Z_r2*I_compensador(3,1))
Do ee = 1,2
IF ( int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(8,mm+ee-1)) /= 0 ) THEN !
CHECA SI EXISTE LA FASE
voltage_level = VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11,mm+ee-1)
pp = ((voltage_level ) - abs(V_relay(ee,1)))/0.75
TAP(ee,1) = NINT(pp) !
REDONDEA EL TAP
IF ( TAP(ee,1) == 0 ) THEN
TAP(ee,2) = 0
ELSEIF ( TAP(ee,1) > 0 ) THEN ! TAP PARA
TAP(ee,2) = 1
ELSE
TAP(ee,1) = -1*TAP(ee,1) ! TAP PARA
TAP(ee,2) = -1
ENDIF
ELSE
! LA FASE NO EXISTE O NO ESTA REGULADA
TAP(ee,1) = 0
TAP(ee,2) = 0
ENDIF
ENDDO
ENDSELECT
!***** Calcula las constantes generalizadas de los reguladores
*****
!*****
*****
IF ( int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,mm)) == 3 ) THEN
IF ( TAP(1,2) == 1 ) THEN ! posicion elevadora
a_reg(1,1) = (1.0+0.00625*TAP(1,1))
a_reg(3,1) = -(1.0+0.00625*TAP(1,1))
d_reg(1,1) = a_reg(1,1)
d_reg(2,1) = -a_reg(1,1)
ENDIF
IF ( a_reg(1,1) > 1.1 ) THEN
a_reg(1,1) = 1.1
a_reg(3,1) = -1.1
TAP(1,1) = 16
TAP(1,2) = 1
! INDICA POSICIONE ELEVADORA
d_reg(1,1) = 1.0/a_reg(1,1)
d_reg(2,1) = -1.0/a_reg(1,1)
ENDIF
IF( TAP(1,2) == -1 ) THEN ! posicion reductora
a_reg(1,1) = 1.0/(1.0-0.00625*TAP(1,1))
a_reg(3,1) = -1.0/(1.0-0.00625*TAP(1,1))
ENDIF
IF ( a_reg(1,1) > 10.0/9.0 ) THEN
a_reg(1,1) = 10.0/9.0
a_reg(3,1) = -10.0/9.0
TAP(1,1) = 16
TAP(1,2) = -1 ! INDICA POSICION REDUCTORA
d_reg(1,1) = 1.0/a_reg(1,1)
d_reg(2,1) = -1.0/a_reg(1,1)
ENDIF
IF ( TAP(2,2) == 1 ) THEN ! posicion elevadora
a_reg(2,2) = (1.0+0.00625*TAP(2,1))
a_reg(3,2) = -(1.0+0.00625*TAP(2,1))
d_reg(2,3) = -a_reg(2,2)
d_reg(3,3) = a_reg(2,2)
ENDIF
IF ( a_reg(2,2) < (10.0/11.0) ) THEN
a_reg(2,2) = 10.0/11.0
a_reg(3,2) = -10.0/11.0
TAP(2,1) = 16
TAP(2,2) = 1
! INDICA POSICIONE ELEVADORA

```

```

                d_reg(2,3) = -1.0/a_reg(2,2)
                d_reg(3,3) = 1.0/a_reg(2,2)
            ENDIF
            IF( TAP(2,2) == -1 ) THEN                                ! posicion reductora
                a_reg(2,2) = 1.0/(1.0-0.00625*TAP(2,1))
                a_reg(3,2) = -1.0/(1.0-0.00625*TAP(2,1))
            ENDIF
            IF ( a_reg(2,2) > 10.0/9.0 ) THEN
                a_reg(2,2) = 10.0/9.0
                a_reg(3,2) = -10.0/9.0
                TAP(2,1) = 16
                TAP(2,2) = -1                                    ! INDICA POSICION REDUCTORA
                d_reg(2,3) = 1.0/a_reg(2,2)
                d_reg(3,3) = -1.0/a_reg(2,2)
            ENDIF
            a_reg = MATMUL(www,MATMUL(a_reg,D_ground_2_line))
            AA_ = a_reg
            A_( posiciona(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm))*3-
2:posiciona(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm))*3,1:t) = AA_(1:t,1:t)    !POSICIONA LA MATRIZ DE
REGULADOR DE VOLTAJE
            ENDIF
            IF ( int(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(4,mm)) == 1 ) THEN
                DO ee = 1,t
                    IF ( TAP(ee,2) == 1 ) THEN                                ! posicion
elevadora
                        a_reg(ee,ee) = 1.0/(1.0+0.00625*TAP(ee,1))
                        IF ( a_reg(ee,ee) < 0.9 ) THEN
                            a_reg(ee,ee) = 10.0/11.0
                            TAP(ee,1) = 16
                            TAP(ee,2) = 1
                            ! INDICA POSICIONE ELEVADORA
                        ENDIF
                        d_reg(ee,ee) = (a_reg(ee,ee))
                    ELSEIF( TAP(ee,2) == -1 ) THEN                                ! posicion
reductora
                        a_reg(ee,ee) = 1.0/(1.0-0.00625*TAP(ee,1))
                        IF ( a_reg(ee,ee) > 1.1 ) THEN
                            a_reg(ee,ee) = 10.0/9.0
                            TAP(ee,1) = 16
                            TAP(ee,2) = -1                                ! INDICA POSICION
REDUCTORA
                        endIF
                        d_reg(ee,ee) = (a_reg(ee,ee))
                    ELSE
                        a_reg(ee,ee) = 1.0                                ! neutral
                        d_reg(ee,ee) = 1.0
                    ENDIF
                ENDDO
                AA_ = a_reg
                CALL LINRG (t, AA_, t, AA_, t)
                A_( posiciona(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm))*3-
2:posiciona(VOLTAGE_REGULATORS_DATA(3,mm))*3,1:t) = AA_(1:t,1:t)    !POSICIONA LA MATRIZ DE
REGULADOR DE VOLTAJE
                d_reg = AA_
            ENDIF
            VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,mm) = TAP(1,1:2)
            VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,mm+1) =TAP(2,1:2)
            VOLTAGE_REGULATORS_DATA(11:12,mm+2) = TAP(3,1:2)
            mm = mm+3

```

END SUBROUTINE REGULADOR

```

!!*****
!!*****

```

REAL FUNCTION ANGULO(complejo)

```

    ! Funcion que calcula el angulo de un numero complejo en grados
    IMPLICIT NONE
    COMPLEX:: complejo
    ANGULO = ATAN2D(AIMAG(complejo), REAL(complejo))

```

END FUNCTION ANGULO

D-2 Archivo de datos de entrada

A continuación se muestra el archivo de entrada para la solución de minimización de pérdidas eléctricas resuelto en la sección 4-3.

Los comentarios de los datos mostrados abajo no son parte del programa, sólo se tratan de etiquetas de los datos para comprensión de los mismos.

```
34          ! NUMERO TOTAL DE NODOS

!NODO DE ENVIO      NODO DE RECEPCION      LONGITUD      CONFIGURACION DE IMPEDANCIA DEL TRAMO

0      1      1      1      ! LA LONGITUD ES 1 PARA TODOS LOS TRAMOS DE LAS LINEAS DEBIDO A QUE
1      2      1      2      ! LAS IMPEDANCIAS YA ESTAN EN METROS
2      3      1      3
3      4      1      4
4      5      1      4
5      6      1      5
6      7      1      6
7      8      1      5
8      9      1      6
9      10     1      7
10     11     1      8
2      12     1      9
12     13     1      6
13     14     1      8
14     15     1      10
5      16     1      11
16     17     1      12
17     18     1      13
18     19     1      14
19     20     1      14
20     21     1      15
21     22     1      15
22     23     1      5
23     24     1      6
24     25     1      7
25     26     1      8
6      27     1      9
27     28     1      9
28     29     1      9
9      30     1      9
30     31     1      6
31     32     1      9
32     33     1      8

1          ! NUMERO DE TRANSFORMADORES (EL DE LA SUBESTACION Y OTROS)

!NOMBRE,      kV-high(L-L), kV-low(L-L),      factor de aumento de voltaje en la subestacion

Substation      115      11      1.025

8          ! NUMERO DE BANCOS DE CAPACITORES

!Nodo      Modelo      Fase-A      Fase-B      Fase-C
!          kVAr      kVAr      kVAr

4      1      100      100      100
7      1      100      100      100
9      1      100      100      100
16     1      100      100      100
18     1      100      100      100
20     1      100      100      100
22     1      100      100      100
24     1      100      100      100

1          ! TOTAL DE OPERACIONES DE SWITCHEO DE CADA CAPACITOR POR DIA.
```

24
40
32
28
25
20
23
30
38
41
48
50
48
43
45
51
60
66
78
100
84
79
70
58
45

! NUMERO DE ESCENARIOS

! PORCENTAJES DE CARGA POR ESCENARIO

! PORCENTAJES DE CARGA POR ESCENARIO

29

! DATOS DE CARGA DE LOS NODOS

! NODO	MODELO(de carga)	Ph-1(kW)	Ph-1(kVAr)	Ph-2(kW)	Ph-2(kVAr)	Ph-3(kW)	Ph-3(kVAr)
1	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
3	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
4	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
7	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
8	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
10	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
11	1	45.6666	28.00	45.6666	28.00	45.6666	28.00
12	1	24.00	15.00	24.00	15.00	24.00	15.00
13	1	24.00	15.00	24.00	15.00	24.00	15.00
14	1	24.00	15.00	24.00	15.00	24.00	15.00
15	1	4.50	2.50	4.50	2.50	4.50	2.50
16	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
17	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
18	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
19	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
20	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
21	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
22	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
23	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
24	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
25	1	76.6666	47.5	76.6666	47.5	76.6666	47.5
26	1	45.6666	28.3333	45.6666	28.3333	45.6666	28.3333
27	1	25.00	16.00	25.00	16.00	25.00	16.00
28	1	25.00	16.00	25.00	16.00	25.00	16.00
29	1	25.00	16.00	25.00	16.00	25.00	16.00
30	1	19.00	11.50	19.00	11.50	19.00	11.50
31	1	19.00	11.50	19.00	11.50	19.00	11.50
32	1	19.00	11.50	19.00	11.50	19.00	11.50
33	1	19.00	11.50	19.00	11.50	19.00	11.50

! En estos últimos datos de arriba en la columna modelos de carga las relaciones son las siguientes
! Y-PQ = 1
! Y-I = 2
! Y-Z = 3
! D-PQ = 4
! D-I = 5
! D-Z = 6

0

! DATOS DE CARGA DISTRIBUIDA

! CONFIGURACIONES DE IMPEDANCIA

(0.1170,0.0480)	(0.0,0.0) (0.1170,0.0480)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1170,0.0480)	! CONFIGURACION 1 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemens
(0.1073,0.0440)	(0.0,0.0) (0.1073,0.044)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1073,0.044)	! CONFIGURACION 2 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemens
(0.1645,0.0457)	(0.0,0.0) (0.1645,0.0457)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1645,0.0457)	! CONFIGURACION 3 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemens
(0.1495,0.0415)	(0.0,0.0) (0.1495,0.0415)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1495,0.0415)	! CONFIGURACION 4 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemens
(0.3144,0.0540)	(0.0,0.0) (0.3144,0.0540)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.3144,0.0540)	! CONFIGURACION 5 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemens
(0.2096,0.0360)	(0.0,0.0) (0.2096,0.0360)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.2096,0.0360)	! CONFIGURACION 6 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemen
(0.1310,0.0225)	(0.0,0.0) (0.1310,0.0225)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1310,0.0225)	! CONFIGURACION 7 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemen
(0.1048,0.0180)	(0.0,0.0) (0.1048,0.0180)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1048,0.0180)	! CONFIGURACION 8 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemen
(0.1572,0.0270)	(0.0,0.0) (0.1572,0.0270)	(0.0,0.0) (0.0,0.0) (0.1572,0.0270)	! CONFIGURACION 9 !Z (R +jX) in ohms
0.0	0.0 0.0 0.0		! B in micro Siemen

```

(0.0524,0.0090) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 10
(0.0524,0.0090) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.0524,0.0090)

0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

(0.1794,0.0498) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 11
(0.1794,0.0498) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.1794,0.0498)

0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

(0.1645,0.0457) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 12
(0.1645,0.0457) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.1645,0.0457)

0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

(0.2079,0.0473) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 13
(0.2079,0.0473) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.2079,0.0473)

0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

(0.1890,0.0430) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 14
(0.1890,0.0430) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.1890,0.0430)

0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

(0.2620,0.0450) (0.0,0.0) (0.0,0.0) ! CONFIGURACION 15
(0.2620,0.0450) (0.0,0.0) !Z (R +jX) in ohms
(0.2620,0.0450)

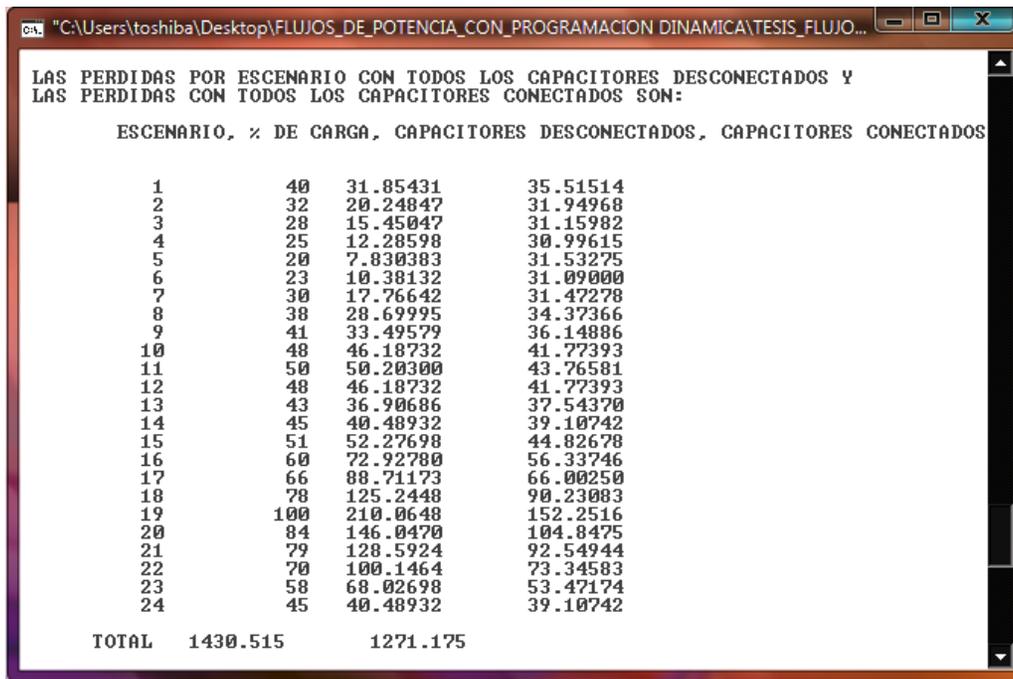
0.0 0.0 0.0 ! B in micro Siemen
0.0 0.0
0.0

0 ! Numero de Reguladores de Voltaje

```

D-3 Archivo de datos de salida

El archivo de salida con los resultados obtenidos del programa desarrollado se muestra en la figura D-1



The screenshot shows a text file window with the following content:

```
"C:\Users\toshiba\Desktop\FLUJOS_DE_POTENCIA_CON_PROGRAMACION DINAMICA\TESIS_FLUJO...
LAS PERDIDAS POR ESCENARIO CON TODOS LOS CAPACITORES DESCONECTADOS Y
LAS PERDIDAS CON TODOS LOS CAPACITORES CONECTADOS SON:
ESENARIO, % DE CARGA, CAPACITORES DESCONECTADOS, CAPACITORES CONECTADOS
1 40 31.85431 35.51514
2 32 20.24847 31.94968
3 28 15.45047 31.15982
4 25 12.28598 30.99615
5 20 7.830383 31.53275
6 23 10.38132 31.09000
7 30 17.76642 31.47278
8 38 28.69995 34.37366
9 41 33.49579 36.14886
10 48 46.18732 41.77393
11 50 50.20300 43.76581
12 48 46.18732 41.77393
13 43 36.90686 37.54370
14 45 40.48932 39.10742
15 51 52.27698 44.82678
16 60 72.92780 56.33746
17 66 88.71173 66.00250
18 78 125.2448 90.23083
19 100 210.0648 152.2516
20 84 146.0470 104.8475
21 79 128.5924 92.54944
22 70 100.1464 73.34583
23 58 68.02698 53.47174
24 45 40.48932 39.10742
TOTAL 1430.515 1271.175
```

Figura D-1 Archivo con los resultados obtenidos

```

C:\Users\toshiba\Desktop\FLUJOS_DE_POTENCIA_CON_PROGRAMACION DINAMICA\TESIS_FLUJO...
LA TRAYECTORIA CON LAS MENORES PERDIDAS ES:
      2      2      66      66      66      66
      82      82      86      86      86      86
      86      86      118     118     120     128
      128     128     128     128     128     128

ESENARIO, % DE CARGA, ESTADOS DE LOS CAPACITORES, PERDIDAS POR ESCENARIO
 1  40  0  0  0  0  0  0  0  1  26.99652
 2  32  0  0  0  0  0  0  0  1  16.74930
 3  28  0  1  0  0  0  0  0  1  11.56467
 4  25  0  1  0  0  0  0  0  1  9.22070
 5  20  0  1  0  0  0  0  0  1  6.13046
 6  23  0  1  0  0  0  0  0  1  7.86264
 7  30  0  1  0  1  0  0  0  1  13.19125
 8  38  0  1  0  1  0  0  0  1  21.12738
 9  41  0  1  0  1  0  1  0  1  24.62341
10  48  0  1  0  1  0  1  0  1  33.66669
11  50  0  1  0  1  0  1  0  1  36.63751
12  48  0  1  0  1  0  1  0  1  33.66669
13  43  0  1  0  1  0  1  0  1  26.99353
14  45  0  1  0  1  0  1  0  1  29.53400
15  51  0  1  1  1  0  1  0  1  38.06964
16  60  0  1  1  1  0  1  0  1  52.92065
17  66  0  1  1  1  0  1  1  1  64.02643
18  78  0  1  1  1  1  1  1  1  90.13293
19 100  0  1  1  1  1  1  1  1  153.82166
20  84  0  1  1  1  1  1  1  1  105.20166
21  79  0  1  1  1  1  1  1  1  92.52686
22  70  0  1  1  1  1  1  1  1  72.64844
23  58  0  1  1  1  1  1  1  1  51.88263
24  45  0  1  1  1  1  1  1  1  36.56110

TOTAL 1055.757

CON LA TRAYECTORIA OBTENIDA EL TOTAL DE PERDIDAS ES: 1055.757
Press any key to continue_

```

Figura D-1 (continuación) Archivo con los resultados obtenidos