



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

**“METODOLOGÍA DE COBRO PARA
PORTEO DE ELECTRICIDAD CON BASE EN
TÉCNICAS DE RASTREO”**

TESIS

Que para obtener el grado de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

Presenta
Ricardo Ballesteros Martínez

Director de Tesis
Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel

MORELIA, MICHOACÁN

AGOSTO DE 2016.



**METODOLOGÍA DE COBRO PARA PORTEO DE
ELECTRICIDAD CON BASE EN TÉCNICAS DE
RASTREO**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

presenta

Ricardo Ballesteros Martínez

Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel

Director de Tesis

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Agosto 2015

Dedicatoria

Dedicado a:

A mis padres Rodrigo Ballesteros Rodríguez y Ma. Ventura Martínez Vargas por brindarme su amor y su apoyo en todo momento de manera incondicional.

A mis hermanos Diego Roberto Ballesteros Martínez y Miriam Lizbeth Ballesteros Martínez.

A mi novia Violeta Maricruz García Orozco por su amor.

A la UMSNH y a todos los docentes del Posgrado de Ingeniería Eléctrica, en especial a el Dr. Claudio Rubén Fuerte Esquivel por sus conocimientos y consejos que hicieron posible el desarrollo de esta tesis.

Resumen

En esta tesis se propone una metodología para el rastreo de flujos de potencia que permite determinar la cantidad de potencia activa y reactiva que aporta cada unidad generadora al consumo total de potencia de cada uno de los centros de carga y a los flujos totales de potencia en cada uno de los elementos de transmisión. Este rastreo se basa en una solución de flujos de potencia de un sistema eléctrico y permite rastrear los flujos de potencia cuando existe el fenómeno de flujos circulantes de potencia o lazos de flujo, el fenómeno de los flujos circulantes es la circulación de potencia a través de algunos elementos de transmisión en un lazo cerrado de tal manera que el flujo de potencia circula de forma cíclica y sin satisfacer ninguna carga de potencia eléctrica del sistema. Asimismo, se propone una metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia (activa/reactiva) partiendo desde cada centro de carga hacia los generadores, de tal manera que se obtiene la contribución de cada carga activa (carga reactiva) a los flujos de potencia activa (potencia reactiva) a través de cada uno de los elementos de transmisión, y por lo tanto la contribución a la pérdida y absorción de potencia en estos elementos. La veracidad y la simplicidad del método se demuestran mediante la aplicación del algoritmo en siete sistemas eléctricos de diferentes dimensiones.

El algoritmo desarrollado en esta tesis es aplicado para asignar pagos por uso de los elementos de transmisión de una manera muy transparente ya que cada uno de los participantes del mercado eléctrico podrá disponer de la información detallada del rastreo de flujos de potencia así como los cargos que cada cual deberá pagar.

Palabras clave: rastreo de flujos, flujos circulantes, peaje, pérdidas de transmisión, flujos de potencia.

Abstract

In this thesis a methodology to the power flow tracking is presented, this methodology is capable of determinate the active and reactive power flow provided by each generating unit, to each load centers, and the power flows through transmission elements are also determined. This tracking is based on the solution of power when circulating power flows also known as loop flow phenomena is present, the phenomenon of circulating flows is the flow of power through transmission elements in a loop flow that circulates cyclically without meet the demands of any electric power load of system. Also, a methodology to track the active and reactive power flows from load centers to each generating unit is presented, obtaining the active and reactive power contribution of load centers to both active and reactive power flows, and so, the contribution of each load to the loss and absorption of power in transmission elements. The accuracy and simplicity of this approach is proved by the application of the algorithm on seven different power systems.

The algorithm developed and presented in this thesis is used to assign costs by the use of transmission elements in a transparent way, because this way, all the energy market participants will be able to access to detail information of the power flows tracking as well as their respective charges and retributions.

Contenido

Dedicatoria	III
Resumen	V
Abstract	VII
Contenido	IX
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XV
Lista de Símbolos	XIX
1. Introducción.	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Planteamiento del Problema.	2
1.3. Antecedentes.	3
1.4. Objetivo de la Tesis.	8
1.4.1. Objetivo general	8
1.4.2. Objetivos particulares	8
1.5. Contribuciones.	8
1.6. Justificación	10
1.7. Metodología	10
1.8. Descripción de Capítulos.	11
2. Metodología de rastreo de flujos de potencia aparente.	13
2.1. Introducción.	13
2.2. Estudio de flujos de potencia.	14
2.2.1. Formulación del problema de flujos de potencia.	14
2.3. Método de rastreo de flujos de potencia aparente.	17
2.3.1. Dominio de las fuentes de potencia aparente.	18
2.3.2. Dominio de las cargas.	19
2.3.3. Principio de proporcionalidad.	22
2.4. Contribución de las fuentes a los flujos de potencia aparente.	23
2.5. Contribución de las cargas a los flujos de potencia aparente.	28
3. Método de rastreo de flujos de potencia activa.	31
3.1. Introducción.	31
3.2. Contribución de los generadores a los flujos de potencia activa.	32

3.2.1.	Contribución a los flujos de potencia activa en los elementos de transmisión.	32
3.2.2.	Contribución a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.	34
3.2.3.	Contribución a las cargas de potencia activa en los nodos del sistema.	35
3.3.	Contribución de las cargas a los flujos de potencia activa.	37
3.3.1.	Contribución a los flujos de potencia activa en los elementos de transmisión.	37
3.3.2.	Contribución a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.	39
3.4.	Rastreo de flujos de potencia activa del sistema de 4 nodos.	39
3.5.	Flujos circulantes de potencia activa.	43
3.5.1.	Condiciones necesarias para la existencia de flujos circulantes de potencia activa.	43
3.5.2.	Rastreo hacia las cargas en sistemas con flujos circulantes de potencia activa.	44
4.	Método de rastreo de flujos de potencia reactiva.	49
4.1.	Introducción.	49
4.2.	Rastreo hacia las cargas de la potencia reactiva.	50
4.2.1.	Tipos de elementos de transmisión.	50
4.2.2.	Dominio de las fuentes de potencia reactiva.	60
4.2.3.	Contribución de los generadores a la absorción de potencia reactiva por la red de transmisión.	61
4.2.4.	Contribución de los generadores a las cargas de potencia reactiva en los nodos del sistema.	62
4.3.	Rastreo hacia los generadores de la potencia reactiva.	63
4.3.1.	Dominio de las cargas de potencia reactiva.	65
4.3.2.	Contribución de las cargas a la absorción de potencia reactiva por la red de transmisión.	65
4.4.	Rastreo de flujos de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.	66
4.5.	Flujos circulantes de potencia reactiva.	71
4.5.1.	Condiciones necesarias para la existencia de flujos circulantes de potencia reactiva.	71
4.5.2.	Rastreo hacia las cargas en sistemas con flujos circulantes de potencia reactiva.	72
5.	Método para la asignación de costos.	75
5.1.	Introducción.	75
5.2.	Costo de producción de potencia eléctrica.	76
5.3.	Asignación de costos de generación, consumo y pérdidas de potencia	77
5.4.	Cobro por el uso de la red de transmisión.	79
5.5.	Método Modular vs Método de la Estampilla Postal.	82
5.6.	Comparación del método propuesto para el pago de peaje de potencia reactiva.	86

6. Conclusiones.	91
6.1. Conclusiones Generales.	91
6.2. Trabajos Futuros.	92
A. Diagramas de flujo	95
B. Datos generales de las redes analizadas	105
B.1. Sistema de 4 nodos.	105
B.2. Sistema de 5 nodos.	106
B.3. Sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.	107
B.4. Sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.	108
B.5. Sistema de 14 nodos.	109
B.6. Sistema de 30 nodos.	111
Referencias	115

Lista de Figuras

2.1.	Solución estacionaria del sistema de 4 nodos.	20
2.2.	Dominio de potencia aparente del generador conectado en el nodo 1.	20
2.3.	Dominio de potencia aparente del generador conectado en el nodo 2.	20
2.4.	Dominio de potencia aparente de la carga conectada en el nodo 3.	21
2.5.	Dominio de potencia aparente de la carga conectada en el nodo 4.	22
2.6.	Principio de proporcionalidad.	23
2.7.	Flujos de potencia aparente que transitan por el nodo i	24
2.8.	Flujos de potencia aparente conglomerada que transitan por el nodo i	24
2.9.	Flujos de potencia aparente conglomerada que transitan por el nodo i , con las impedancias equivalentes de rama a tierra.	25
2.10.	Flujos de potencia aparente que transitan por el nodo j	28
3.1.	Contribución de los generadores al flujo de potencia activa en la rama localizada entre el nodo i y el nodo j	34
3.2.	Contribución de los generadores a la carga conectada en el nodo i	36
3.3.	Contribución de las cargas al flujo de potencia activa en la rama localizada entre el nodo i , y el nodo j	38
3.4.	Sistema de 6 nodos con flujo circulante.	45
3.5.	Supernodo formado por los nodos 1, 2 y 4 del sistema de 6 nodos con flujo circulante.	45
3.6.	Sistema de 6 nodos con flujo circulante, simplificado con el concepto de supernodo.	46
4.1.	Modelo π de la línea de transmisión.	50
4.2.	Direcciones posibles del flujo de potencia reactiva en las secciones del modelo π de la línea.	51
4.3.	Línea tipo 1. Contribución de los generadores al flujo de potencia reactiva en la rama localizada entre el nodo i y el nodo j	52
4.4.	Línea tipo 2 (absorbente).	54
4.5.	Línea tipo 3a (transformador porteador).	55
4.6.	Línea tipo 3b (transformador porteador).	56
4.7.	Línea tipo 4 (transformador absorbente-generador).	57
4.8.	Línea tipo 5a (porteadora-generadora).	58

4.9. Línea tipo 5b (transformador porteador-generador).	58
4.10. Línea tipo 6 (generadora).	59
4.11. Línea tipo 7 [(a) transformador absorbente-porteador ó (b) transformador porteador-absorbente].	59
4.12. Línea tipo 8 [transformador porteador-porteador) (a) con admitancia inductiva en el nodo receptor ó (b) con admitancia inductiva en el nodo de envío].	60
4.13. Contribución de las fuentes de potencia reactiva a la carga Q_{Li}	62
4.14. Contribución de las cargas al flujo de potencia reactiva de la rama entre el nodo i y el nodo j	63
4.15. Flujos de potencia reactiva para el sistema de 4 nodos.	66
4.16. Dominio de la potencia reactiva del generador conectado en el nodo 1 para el sistema de 4 nodos.	67
4.17. Dominio de la potencia reactiva del generador conectado en el nodo 2 para el sistema de 4 nodos.	67
4.18. Dominio de la potencia reactiva de la carga en el nodo 3 para el sistema de 4 nodos.	69
4.19. Dominio de la potencia reactiva de la carga en el nodo 4 para el sistema de 4 nodos.	69
4.20. Sistema de 6 nodos con flujo circulante de potencia reactiva.	73
5.1. Determinación del flujo de potencia a través del elemento de transmisión j .	82
A.1. Diagrama de flujo para obtener los dominios de nodos por medio del rastreo hacia las cargas de flujos de potencia activa.	96
A.2. Diagrama de flujo para obtener los dominios por medio del rastreo hacia los generadores de flujos de potencia activa.	97
A.3. Diagrama de flujo utilizado para identificar los tipos de líneas del sistema. .	98
A.4. Diagrama de flujo para obtener los dominios mediante el rastreo hacia las cargas de flujos de potencia reactiva.	100
A.5. Diagrama de flujo para obtener los dominios mediante el rastreo hacia los generadores de flujos de potencia reactiva.	101
A.6. Diagrama de flujo para detectar flujos circulantes de potencia activa.	102
A.7. Diagrama de flujo para detectar flujos circulantes de potencia reactiva.	103

Lista de Tablas

1.1. Comparación de las diferentes metodologías para el rastreo de flujos de potencia.	6
3.1. Dominio de los generadores de potencia activa.	39
3.2. Contribución de los generadores a los flujos de envío de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	40
3.3. Contribución de los generadores a los flujos de recepción de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	40
3.4. Contribución de los generadores a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	40
3.5. Dominio de las cargas de potencia activa.	41
3.6. Contribución de las cargas a los flujos de envío de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	41
3.7. Contribución de las cargas a los flujos de recepción de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	41
3.8. Contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.	42
3.9. Contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa del sistema, identificando las fuentes de potencia activa.	42
3.10. Contribución de los generadores a las cargas de potencia activa del sistema.	43
3.11. Dominio de los generadores de potencia activa.	46
3.12. Contribución en MW de los generadores a los flujos de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	47
3.13. Contribución en MW de los generadores a las pérdidas de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	47
3.14. Contribución en MW de los generadores a las cargas de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	48
4.1. Flujos de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.	66
4.2. Contribución de las fuentes a los flujos de potencia reactiva del sistema.	68
4.3. Contribución de las fuentes a los flujos de potencia reactiva del sistema.	68
4.4. Contribución de las fuentes a la absorción de potencia reactiva del sistema.	68
4.5. Contribución de las cargas a los flujos de envío de potencia reactiva del sistema.	70

4.6. Contribución de las cargas a los flujos de recepción de potencia reactiva del sistema.	70
4.7. Contribución de las cargas a la absorción de potencia reactiva del sistema. .	70
4.8. Contribución en MVar de las cargas a la absorción de potencia reactiva del sistema, identificando las fuentes de potencia.	71
4.9. Contribución de las fuentes de potencia reactiva a las cargas del sistema. . .	71
4.10. Dominio de los generadores de potencia reactiva.	73
4.11. Contribución en MVar de las fuentes a los flujos de potencia reactiva de envío para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	73
4.12. Contribución en MVar de las fuentes a los flujos de potencia reactiva de recepción para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	74
4.13. Contribución en MVar de las fuentes a la absorción de potencia reactiva para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	74
4.14. Contribución de las fuentes a las cargas de potencia reactiva para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.	74
5.1. Costo de la potencia activa y potencia reactiva generada en el sistema de 4 nodos.	78
5.2. Pagos por el consumo y pérdidas de potencia activa del sistema de 4 nodos.	79
5.3. Pagos por el consumo y absorción de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.	79
5.4. Costo por el uso de cada línea expresado en pu.	83
5.5. Fracciones de contribución de los generadores a las pérdidas de potencia activa.	83
5.6. Fracciones de contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa. .	84
5.7. Pago que deberán realizar los generadores por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa (Método Modular).	84
5.8. Pago que deberán realizar las cargas por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa (Método Modular).	85
5.9. Pago que deberán realizar las cargas y generadores por el peaje de potencia activa (Método de la Estampilla Postal).	85
5.10. Flujos de potencia del sistema de 4 nodos reportados en [Bialek, 1998]. . . .	86
5.11. Potencia consumida y generada reportada en [Bialek, 1998] para el sistema de 4 nodos.	86
5.12. Costos del peaje de potencia activa y reactiva [Bialek, 1998].	87
5.13. Asignación del costo C^q para cargas de potencia reactiva obtenido por [Bialek, 1998].	88
5.14. Contribución de las cargas a los flujos de potencia reactiva.	89
5.15. Asignación del costo C^q para cargas de potencia reactiva, obtenido por el rastreo de flujos de potencia reactiva, implementado en esta tesis.	89
B.1. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 4 nodos. . . .	106
B.2. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 4 nodos.	106
B.3. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 5 nodos. . . .	106
B.4. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 5 nodos.	107
B.5. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.	107

B.6. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.	108
B.7. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.	108
B.8. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.	109
B.9. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 14 nodos.	110
B.10. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 14 nodos.	110
B.11. Datos en p.u. de los transformadores del sistema de 14 nodos.	111
B.12. Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 30 nodos.	112
B.13. Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 30 nodos.	113
B.14. Datos en p.u. de los transformadores del sistema de 30 nodos.	114

Lista de Símbolos

Z_{eq}	—	Impedancia equivalente.
I_T	—	Corriente total.
V_i	—	Voltaje en el nodo i .
S_{D1}	—	Fuente de potencia aparente que conforma al dominio 1.
S_{Dd}	—	Conglomerado de las fuentes de potencia aparente que conforman a los dominios desde la fuente 2 hasta la fuente f .
S_{ij}	—	Flujo de potencia aparente que transita por la línea conectada entre los nodos i y j .
S_{ir}	—	Conglomerado de los flujos de potencia aparente que transita por las ramas con flujos salientes del nodo i , que conforman las líneas desde la $j + 1$ hasta la n .
S_{D1-ij}	—	Flujo de potencia aparente saliente del nodo i hacia el nodo j causado por el flujo entrante S_{D1} .
S_{D1-ir}	—	Flujo de potencia aparente saliente del nodo i hacia el nodo r causado por el flujo entrante S_{D1} .
P_{ij}	—	Potencia activa total saliente del nodo i hacia el nodo j (flujo de envío).
Q_{ij}	—	Potencia reactiva total saliente del nodo i hacia el nodo j (flujo de envío).
P_{Dk-ij}	—	Potencia activa saliente del nodo i hacia el nodo j debida al dominio del generador k .
Q_{Dk-ij}	—	Potencia reactiva saliente del nodo i hacia el nodo j debida al dominio del generador k .
C_{ij}^p	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para el flujo de potencia activa en el nodo de envío i .
C_{ij}^{Lp}	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia los generadores para el flujo de potencia activa en el nodo de envío i .
C_{ij}^q	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para el flujo de potencia reactiva en el nodo de envío i .
C_{ij}^{Lq}	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia los generadores para el flujo de potencia reactiva en el nodo de envío i .
C_{Li}^p	—	Factor de proporcionalidad de la carga de potencia activa conectada en el nodo i .
P'_{ij}	—	Potencia activa total entrante al nodo j proveniente del nodo i (flujo de recepción).

Q'_{ij}	—	Potencia reactiva total entrante al nodo j proveniente del nodo i (flujo de recepción).
P'_{Dk-ij}	—	Potencia activa entrante al nodo j proveniente del nodo i debida al dominio del generador k .
Q'_{Dk-ij}	—	Potencia reactiva entrante al nodo j proveniente del nodo i debida al dominio del generador k .
$C'_{ij}{}^p$	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para el flujo de potencia activa en el nodo de recepción j .
$C'_{ij}{}^{Lp}$	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia los generadores para el flujo de potencia activa en el nodo de recepción j .
$C'_{ij}{}^q$	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para el flujo de potencia reactiva en el nodo de recepción j .
$C'_{ij}{}^{Lq}$	—	Factor de proporcionalidad en el rastreo hacia los generadores para el flujo de potencia reactiva en el nodo de recepción j .
$C_{Li}{}^q$	—	Factor de proporcionalidad de la carga de potencia reactiva conectada en el nodo i .
Q_{Lsj}	—	Potencia reactiva total absorbida por el sistema en el nodo j , considerada como carga adicional a la ya conectada al nodo j .
R	—	Resistencia efectiva del conductor.
X_L	—	Reactancia del elemento de transmisión.
B_c	—	Susceptancia en derivación del elemento de transmisión.
P_l	—	Pérdidas de potencia activa en el conductor.
P_{lDk}	—	Contribución total del generador k a las pérdidas de potencia activa en el sistema.
P_{lDLk}	—	Contribución total de la carga k a las pérdidas de potencia activa en el sistema.
P_{lDk-ij}	—	Contribución del generador k a las pérdidas de potencia activa en la línea $i - j$.
$P_{lDLk-ij}$	—	Contribución de la carga k a las pérdidas de potencia activa en la línea $i - j$.
Q_l	—	Absorción de potencia reactiva en el conductor.
Q_{lDk-ij}	—	Contribución del generador k a la absorción de potencia reactiva en el conductor.
Q_{ls-ij}	—	Contribución de la potencia reactiva generada del sistema a la absorción de potencia reactiva en el conductor.
$Q_{lDLk-ij}$	—	Contribución de la carga k a la absorción de potencia reactiva en el conductor.
$Q_{lLsj-ij}$	—	Contribución de las líneas consideradas como carga a la absorción de potencia reactiva en el conductor.
F_{SDk-j}	—	Fracción de contribución del k -ésimo generador a las pérdidas y absorciones de potencia en la rama j .
I	—	Valor rms de la corriente que pasa por el conductor.
F_{PDk-ij}	—	Fracción de contribución del k -ésimo generador a las pérdidas de potencia activa en la línea $i - j$.

F_{PDk-Li}	—	Fracción de contribución del k -ésimo generador a la carga de potencia activa P_{Li} .
F_{QDk-ij}	—	Fracción de contribución del k -ésimo generador a la absorción de potencia reactiva en la línea $i - j$.
F_{QDk-Li}	—	Fracción de contribución del k -ésimo generador a la carga de potencia reactiva Q_{Li} .
$F_{QDLk-ij}$	—	Fracción de contribución de la k -ésima carga a la absorción de potencia reactiva en la línea $i - j$.
$F_{QDLsj-ij}$	—	Fracción de contribución de la carga Q_{Lsj} a la absorción de potencia reactiva en la línea $i - j$.
$ V_i $	—	Magnitud de voltaje en el nodo i .
δ_i	—	Ángulo de voltaje en el nodo i .
P_{Gi}	—	Potencia activa total generada en el nodo i .
Q_{Gi}	—	Potencia reactiva total generada en el nodo i .
Q_{Gs}	—	Potencia reactiva total generada por el sistema debido al efecto capacitivo de las líneas.
P_{Li}	—	Potencia activa total de la carga conectada en el nodo i .
Q_{Li}	—	Potencia reactiva total de la carga conectada en el nodo i .
Y_{ij}	—	Admitancia mutua de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j .
θ_{ij}	—	Ángulo de la admitancia mutua de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j .
$ Y_{ij} $	—	Magnitud de la admitancia mutua de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j .
G_{ij}	—	Conductancia de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j .
B_{ij}	—	Susceptancia de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j .

Lista de Abreviaturas.

NE	—	Nodo de envío.
NR	—	Nodo de recepción.
SEP	—	Sistema eléctrico de potencia.
pu	—	Por unidad.
GMTs	—	Generadores de micro turbina.
DV	—	Derecho de vía.
MW	—	Mega watts.
MVAr	—	Mega volt amper reactivos.
MEM	—	Mercado Eléctrico Mayorista.
SIFLETCA	—	Sistemas flexibles de transmisión en corriente alterna.

Capítulo 1

Introducción.

1.1. Introducción.

La privatización del sector eléctrico en México ha provocado la desregulación del monopolio de las empresas verticalmente integradas (en este caso la Comisión Federal de Electricidad (CFE)), similar a lo que ocurrido en otros países como Reino Unido, Estados Unidos, España, Japón, Brasil, etc. Esta desregulación ha llevado a que el consumidor (cliente) pueda acceder a un mercado de energía para elegir a su proveedor (vendedor).

En esta tesis se propone un algoritmo para el rastreo de potencia activa y reactiva tomando como punto de partida cada fuente de generación y como punto final las cargas que consumen la potencia de dicha fuente, lo cual será referido en esta tesis como rastreo hacia las cargas. Así mismo, se propone una metodología para el rastreo de potencia partiendo de cada carga hasta las fuentes que las alimentan, a lo cual se le denominará rastreo hacia los generadores. Con el rastreo hacia las cargas se determinan las contribuciones de las fuentes a los flujos de potencia del sistema, y con ello las contribuciones a las pérdidas de potencia en la red y a la cantidad de potencia que aportan a cada carga. Por el contrario, con el rastreo hacia los generadores se determinan las contribuciones de cada carga a los flujos de potencia del sistema, y por lo tanto su contribución a las pérdidas de potencia en la red eléctrica.

En los sistemas eléctricos de potencia puede ocurrir un fenómeno conocido como flujo circulante (circulating power o loop flow), el cual se produce cuando la potencia real o reactiva fluye en una malla conformada por varios elementos de transmisión en lugar de fluir desde una fuente hacia una carga. Las compañías de transmisión no desean que existan estos flujos circulantes dentro de su red debido a que tal fenómeno solo provoca pérdidas en la red de transmisión sin satisfacer ninguna demanda de potencia eléctrica por parte de los usuarios. Los flujos circulantes de potencia reactiva son más comunes que los flujos circulantes de potencia activa debido a que son provocados por transformadores en paralelo y es muy común encontrar este tipo de arreglos estructural en las redes de transmisión. Los flujos circulantes de potencia activa aunque son un fenómeno que no ocurre muy a menudo, se pueden producir por dispositivos que cambian el ángulo de fase como transformadores delta-estrella, transformadores desfasadores y dispositivos controladores.

Para el rastreo de flujos de potencia los flujos circulantes representan un problema debido a su característica de fluir por algunos elementos de transmisión dentro de un ciclo de manera infinita, por tal motivo, en esta tesis se desarrolla una metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva en sistemas eléctricos en los cuales existe la presencia de flujos circulantes. Esta metodología se detalla al final de los capítulos 3 y 4 para el rastreo de flujos de potencia activa y flujos de potencia reactiva, respectivamente.

1.2. Planteamiento del Problema.

En la presente tesis se propone una metodología para el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva, considerando la existencia de flujos circulantes, para determinar la contribución de la potencia producida por cada generador a la potencia consumida por cada una de las cargas conectadas al sistema, a los flujos de potencia que circulan a través

de cada elemento de transmisión del sistema eléctrico de potencia, así como a las pérdidas y absorción de potencia. Una metodología similar es también propuesta para el rastreo de potencia desde cada una de las cargas hasta las fuentes de generación.

En el contexto de operación del mercado eléctrico es necesario que los dueños del sistema de transmisión recuperen sus costos de inversión, operación y mantenimiento, es por ello que se han reportado diferentes metodologías para realizar el cobro por el uso de la red eléctrica, las cuales se reportan en la siguiente sección.

1.3. Antecedentes.

La utilidad del método de rastreo de la electricidad radica en la precisión con la que calculan las fracciones de contribución de los dominios de los generadores, y las fuentes de potencia en general, a los flujos de potencia activa y reactiva dentro de los sistemas de transmisión de potencia eléctrica. En antaño se argumentó que la complejidad topológica de los sistemas de transmisión de potencia eléctrica hacía prácticamente imposible responder a la pregunta: “¿Cuánta potencia (activa y/o reactiva) aporta cada generador a las pérdidas/absorciones de potencia en los elementos de transmisión y a las cargas en los nodos que pertenecen al sistema de transmisión?”. Con el desarrollo de la computadora personal y el advenimiento de la era cibernética, ésta pregunta tiene finalmente una respuesta válida, precisa y prácticamente en tiempo real, a partir de los resultados que arroja un programa que resuelve flujos de potencia.

Cronológicamente, en 1995 J. W. Marangon Lima expone una interpretación económica de la asignación de los costos fijos en la transmisión de potencia activa, pero utilizando como partida los resultados de métodos incrementales basados en sensibilidades, en donde se maneja el concepto de contraflujos [Marangon, 1995], mismo que no se presenta al utilizar una metodología de rastreo de la electricidad, dada la naturaleza topológica del dominio de una fuente. En 1997 D. Kirschen, R. Allan y G. Strbac publican un trabajo en el que

presentan un algoritmo para calcular las aportaciones de los generadores a los flujos y las cargas de potencia activa, utilizando conceptos como ‘común’ (que es el conjunto de nodos contiguos abastecidos por los mismos generadores), ‘lazo’ (definido como el conjunto de ramas externas que conectan a los mismos comunes), ‘rama externa’ (que conecta a dos nodos que pertenecen a comunes diferentes) y ‘gráfica de estado’ (si los comunes se representan como nodos y los lazos como ramas, el estado del sistema puede ser representado por una gráfica directa y acíclica) [Kirshen, et al., 1997]. En 1996, 1997, y 1998 J. Bialek divulga trabajos [Bialek, 1996a]-[Bialek, 1998] en los cuales expuso una metodología para determinar las aportaciones a los flujos de potencia por parte de los generadores basándose en el rastreo de la electricidad y utilizando conceptos como el ‘principio de proporcionalidad’, los algoritmos de ‘observación ascendente’ y de ‘observación descendente’, y el ‘flujo grueso/total de potencia’, aplicable para una solución de flujos de carga sin pérdidas. Además, para justificar el cálculo de las aportaciones de las fuentes en los flujos de reactivos dentro del sistema, Bialek se auxilia de un concepto al que llama ‘nodos ficticios interlineales’, que bien pueden actuar como fuentes o como sumideros para lograr el balance de flujos de reactivos en los elementos del sistema. En [Bialek, 1996b] Bialek propone el método de flujos medios, en el cual elimina las pérdidas de potencia activa del sistema considerando que los flujos a través de las líneas son un promedio de la potencia inyectada y la potencia retirada de una rama, mientras que las pérdidas del sistema las reparte entre las cargas y los generadores en partes iguales. En 1998 G. Strbac, D. Kirschen y S Ahmed publicaron un artículo [Strbac, et al., 1998] en el que, utilizando el mismo algoritmo que en [Kirshen, et al., 1997], asignan la proporción en el uso del sistema de transmisión con base en el rastreo de potencia, incluso en condiciones de congestión de flujos en los elementos de transmisión, pero sólo en lo que a potencia activa concierne. Ese mismo año R. Shoults y L. D. Swift publicaron un trabajo relativo a los métodos basados en teoría de circuitos [Shoults, et al., 1997], que cuestionaba la validez de los métodos basados en flujos compartidos proporcionalmente (rastreo) anteriormente mencionados y desarrollados en el Reino Unido, bajo el supuesto de que el método correcto debe de estar fundamentado en la teoría de circuitos establecida. En 1998 J. Yang y M. D. Anderson expusieron un procedimiento al que llamaron ‘Método de Comparación de Flujos de Potencia’ [Yang and Anderson, 1999],

en oposición a los métodos de rastreo basados en el principio de proporcionalidad, y que básicamente es un método de superposición, en el que la transacción por analizar entre un generador dado y una carga específica es retirada del sistema para volver a obtener resultados de un nuevo estudio de flujos de potencia en la que el generador excluido se considera el generador compensador; al final la diferencia de flujos en cada elemento de transmisión determina la aportación de dicha transacción a los flujos en dicha rama. Ese mismo año, E. Acha, H. Ambriz y C. R. Fuerte-Esquivel propusieron un método de rastreo de la potencia activa relativamente sencillo, basado en el análisis retrospectivo de los dominios de cada generador [Fuerte, 1997]. En 2000 H. Sun, D. C. Yu y Q. Zheng publicaron un artículo [Sun, et al., 2000] en el cual justifica el rastreo de potencia aparente manipulando números complejos, y además demuestran la validez del principio de proporcionalidad. Ese mismo año Janusz W. Bialek publicó un artículo [Bialek, 2000] en el que separa el flujo circulante del flujo de potencia del sistema y de esta manera hacen el rastreo de potencia utilizando el mismo algoritmo que en [Bialek, 1998]. En 2001 Z. Q. Wu y G. Z. Chen, publicaron un artículo en el que desarrollan una metodología de rastreo de potencia aparente ‘S’ (manipulación de números complejos), argumentando que los métodos de asignación de pérdidas por descomposición de la potencia aparente en potencia activa y reactiva no son correctos, dada la interrelación entre las potencias activa y reactiva; luego introducen un nodo ficticio interlineal para realizar el análisis sin considerar pérdidas en las ramas para aplicarla en el análisis de los mercados de energía eléctrica, pero no realizan la distinción entre los tipos de líneas que se pueden definir con base en los flujos de reactivos, definiciones que son útiles para conformar y delimitar los dominios de cada generador [Wu and Chen, 2001]. En 2001 R. Laguna, C. R. Fuerte-Esquivel, E. Acha y H. Ambriz-Peréz, utilizando el modelo π nominal de la línea de transmisión proponen una clasificación de tipos de líneas para el rastreo de flujos de potencia reactiva, en el cual incluye las aportaciones de potencia reactiva del sistema debido al efecto capacitivo [Laguna, et al., 2001]. En 2009 S. M. Abdelkader publicó un artículo [Abdelkader, 2009] en el que desarrolla una nueva metodología para el rastreo de flujos y la cual aplica también para sistemas con flujos circulantes, en él presenta un modelo generalizado de la línea de transmisión con propiedades de equivalencia serie y paralelo similares al modelo de dos puertos ABCD de una línea de transmisión. En la Tabla

1.1 se muestra el resumen y comparación de las metodologías implementadas por algunos investigadores para el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva.

Tabla 1.1: Comparación de las diferentes metodologías para el rastreo de flujos de potencia.

Artículo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Bialek, 1996a	Utiliza el principio de proporcionalidad para determinar la contribución de las fuentes o cargas a los flujos a través de las líneas de transmisión.	Se puede realizar el rastreo de flujos de potencia desde las fuentes hacia las cargas o viceversa.	Se aplica solamente a sistemas sin pérdidas de potencia. No se puede aplicar en sistemas con flujos circulantes. No distingue los distintos tipos de líneas que se pueden definir con base en los flujos de reactivos.
Bialek and Tam, 1996	Utiliza el principio de proporcionalidad para el rastreo de flujos. Para realizar el rastreo de flujos de potencia en sistemas eléctricos con pérdidas utiliza nodos ficticios los cuales sirven para representar las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión como sumideros y la inyección de potencia reactiva de las líneas como fuentes.	EL metodo se puede aplicar tanto para el rastreo de potencia activa como potencia reactiva en sistemas eléctricos con pérdidas de potencia.	No se puede aplicar en sistemas con flujos circulantes. No distingue los distintos tipos de líneas que se pueden definir con base en los flujos de reactivos.
Bialek, 1996b	Utiliza el principio de proporcionalidad para determinar la contribución de las fuentes o cargas a los flujos a través de las líneas de transmisión. En este rastreo se utilizan flujos promedios en las líneas de transmisión y las pérdidas de potencia las reparten equitativamente en los nodos de los extremos de la línea.	Reparte las pérdidas de potencia entre cargas y generadores. Se puede realizar el rastreo de flujos de potencia desde las fuentes hacia las cargas o viceversa.	No determina la contribución real de las fuentes/cargas a las pérdidas de potencia. No se puede aplicar en sistemas con flujos circulantes. No distingue los distintos tipos de líneas que se pueden definir con base en los flujos de reactivos.
Kirshen, et al., 1997	Se determina el dominio de las fuentes de generación y se utiliza como un grafo dirigido con el cual se van determinando sus contribuciones a los flujos a través de las líneas hasta llegar a las cargas.	EL metodo se puede aplicar tanto para el rastreo de potencia activa como potencia reactiva.	No determina las contribuciones de las cargas a los flujos de las líneas. No se puede aplicar en sistemas con flujos circulantes. No distingue los distintos tipos de líneas que se pueden definir con base en los flujos de reactivos.

Continúa en la siguiente página

Es importante conocer las metodologías que se siguen en las diferentes redes de transmisión del mundo para definir pérdidas de transmisión. A continuación se presentan las prácticas internacionales de algunos países para hacer el cobro por las pérdidas de

Artículo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Laguna, et al., 2001	Realiza el rastreo de flujos de potencia desde las fuentes hacia las cargas del sistema utilizando el principio de proporcionalidad. Utiliza el modelo π nominal para clasificar los distintos tipos de líneas según las diferentes combinaciones de los flujos de potencia reactiva.	El metodo se puede aplicar tanto para el rastreo de potencia activa como potencia reactiva en sistemas eléctricos con pérdidas de potencia. Distingue los diferentes tipos de líneas con base en los flujos de reactivos. Considera la aportacion del sistema a los flujos de potencia reactiva.	No determina la contribución de las cargas a los flujos de potencia en las líneas de transmisión. No se puede aplicar en sistemas con flujos circulantes.
Abdelkader, 2009	Realiza el rastreo de potencia compleja, utiliza el concepto de factor de extracción el cual es equivalente al modelo de dos puertos ABCD de una línea de transmisión.	Realiza el rastreo de potencia activa y reactiva de manera simultanea. Los factores de extracción tienen propiedades similares en serie y paralelo a los diagramas de bloques, que pueden ser reducidos.	En sistemas con flujos circulantes los resultados obtenidos no satisfacen los balances de energia. No determina la contribución de las fuentes a los flujos de potencia en las líneas de transmisión.

transmisión:

- En países del norte de Europa (Dinamarca, Finlandia, Suecia, entre otros) los generadores y consumidores pagan una cuota por cada KWh inyectado ó extraído.
- En Irlanda los costos de transmisión se recuperan con el método de la estampilla postal asignándole el 30 % del costo a los generadores y el otro 70 % a las cargas.
- En países del sur de África (Botsuana, Namibia y Sudáfrica) antes del 2003 utilizaban el método de la estampilla postal, y después de esta fecha adaptaron el método de flujos de carga MW-Km.
- En Gran Bretaña se utilizan los precios nodales para hacer los cargos por transmisión a los generadores y cargas con el 27 % y 73 %, respectivamente.
- En México actualmente se utiliza el método de la estampilla postal asignando el 30 %

del costo de transmisión a los generadores y el 70 % a las cargas.

1.4. Objetivo de la Tesis.

1.4.1. Objetivo general

El principal objetivo de ésta tesis es presentar una metodología simple y general para rastrear las salidas de potencia de cada generador, en una base individual, a través de la red de potencia eléctrica, y sus aplicaciones para cobrar a cada centro de carga por el consumo de potencia procedente de cada unidad generadora, así como el cobro a los generadores por el uso de cualquier instalación de transmisión. Esta metodología se enfocará al caso básico cuando no hay flujos circulantes así como el caso particular cuando hay flujos circulantes en el sistema eléctrico de potencia.

1.4.2. Objetivos particulares

- Determinar la contribución precisa de cada generador a los flujos de potencia activa y reactiva en cada elemento de transmisión del sistema eléctrico de potencia.
- Determinar la potencia eléctrica con que cada generador abastece a cada carga del sistema eléctrico de potencia para determinar el cobro a los centros de carga.
- Proponer una metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia con la presencia de flujos circulantes en la red de transmisión, tanto para la potencia activa como para la potencia reactiva.
- Proponer un método basado en el rastreo de flujos para asignar cobros de transmisión de potencia activa y reactiva en la red eléctrica.

1.5. Contribuciones.

La contribución más sustancial obtenida de ésta tesis es la propuesta de una metodología simple y general que permite el rastreo de flujos de potencia en sistemas eléctricos

con la presencia de flujos circulantes, tanto para la potencia activa como para la potencia reactiva utilizando el concepto de supernodo.

Las contribuciones específicas de esta tesis se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Se propone una nueva metodología donde se utiliza el concepto de “supernodo” para realizar el rastreo hacia las cargas de potencia activa y reactiva en sistemas eléctricos de potencia con flujos circulantes. En sistemas con este fenómeno particular, como ya se menciona en la Tabla 1.1, la mayoría de las metodologías implementadas hasta el día de hoy fracasan en el rastreo de flujos de potencia. La desventaja de utilizar el “supernodo” es que en sistemas eléctricos de potencia con múltiples flujos circulantes puede llegar a quedar supernodos intersectados o algún supernodo puede quedar dentro de otro supernodo.
- La utilización de la clasificación de los tipos de líneas propuestos en [Laguna, et al., 2001] para el rastreo de flujos de potencia reactiva hacia las cargas, donde parten del modelo π de la línea de transmisión. Además, se propone una metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia reactiva hacia los generadores considerando las diferentes direcciones de flujo de potencia reactiva dentro del modelo π nominal de la línea de transmisión.
- Se propone una alternativa para repartir las pérdidas de potencia entre los generadores y las cargas del sistema en función del uso real de la red eléctrica de transmisión, mediante la aplicación del rastreo de flujos de potencia hacia las cargas y hacia los generadores. Esta metodología para asignar las pérdidas de potencia entre generadores y cargas resulta más clara y precisa que la implementada en [Bialek, 1996b].
- Debido a la sencillez y a la manera de obtener el dominio de las fuentes y cargas del sistema eléctrico (necesarios para hacer el rastreo de flujos de potencia hacia las cargas y hacia los generadores). Esta metodología sirve para determinar el dominio de las fuentes/cargas en sistemas eléctricos de potencia donde existen flujos circulantes.

1.6. Justificación

Derivado de la desregulación del sector eléctrico y el libre acceso a la red de transmisión se han desarrollado diversas metodologías para la asignación de cargos por el uso de la red transmisión. Estos cargos tienen como finalidad recuperar los costos de inversión, operación, mantenimiento y expansión de la red eléctrica que están vinculados con la función de brindar un servicio seguro, continuo, confiable y de calidad.

En las últimas décadas el rastreo de flujos de potencia activa ha tenido un gran auge y se ha aplicado para determinar la contribución de los usuarios de la red a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión, de igual forma este tipo de rastreo se ha implementado para asignar cargos por porteo de energía.

En esta tesis se propone un algoritmo para realizar el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva en sistemas eléctricos de potencia con y sin la presencia del fenómeno de flujos circulantes, con este rastreo se determina la proporción que cada usuario debe pagar por el uso de la red de transmisión, y asimismo se determina la proporción de la potencia que entrega cada generador a cada una de las cargas del sistema.

1.7. Metodología

Con el fin de lograr los objetivos propuestos en esta tesis se aplicó la siguiente metodología:

- Revisión de las investigaciones más recientes y con mayor relevancia referentes a las técnicas y metodologías utilizadas para el rastreo de flujos de potencia en los sistemas eléctricos, así como también la manera con la que han trabajado el problema del rastreo de flujos de potencia en sistemas con flujos circulantes.
- Implementación, planteamiento y desarrollo de una metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva.

- Utilización del concepto del “supernodo” como un equivalente para los elementos que integran el flujo circulante y simplificar el rastreo de flujos de potencia en sistemas eléctricos con flujo circulante.
- Implementación y validación de la metodología para el rastreo de flujos de potencia en sistemas eléctricos con flujo circulante.

1.8. Descripción de Capítulos.

Esta tesis está compuesta por 6 capítulos. A continuación se describen brevemente cada uno de ellos.

Capítulo 2. En este capítulo se describe la metodología para el rastreo de flujos de potencia aparente. Inicia con la formulación matemática del estudio de flujos de potencia, para seguir con la técnica empleada para el rastreo de flujos de potencia aparente. Este capítulo sirve como base para los capítulos 3 y 4 donde se analizan los rastreos de flujos de potencia activa y reactiva, respectivamente.

Capítulo 3 Este capítulo presenta de manera puntual el procedimiento para efectuar el rastreo de flujos de potencia activa hacia las cargas y hacia los generadores, corroborando con un ejemplo la validez de tales procedimientos. Al final del capítulo se describe la metodología para el rastreo de flujos de potencia activa en sistemas con flujo circulante de dicha potencia.

Capítulo 4 Aquí se muestra la metodología para realizar el rastreo de flujos de potencia reactiva hacia las cargas y hacia los generadores, se describen los tipos de líneas de transmisión con base a la dirección y magnitud del flujo de potencia reactiva en sus termi-

nales partiendo del modelo π . Posteriormente expone los resultados numéricos del rastreo de flujos de potencia reactiva hacia las cargas y hacia los generadores de un pequeño sistema de 4 nodos. Por último se describe el procedimiento para efectuar el rastreo de flujos de potencia reactiva en sistemas donde existe flujo circulante de potencia reactiva.

Capítulo 5 En este capítulo se analiza la metodología propuesta para calcular los costos por la generación, consumo y pérdidas de potencia activa y reactiva. Se compara el método propuesto en este trabajo con el método utilizado para el cobro por porteo de potencia activa en el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) en México.

Capítulo 6 Se aportan las principales conclusiones de la investigación reportada en esta tesis y proponen algunos de los trabajos de investigación futuros.

Capítulo 2

Metodología de rastreo de flujos de potencia aparente.

2.1. Introducción.

Varios trabajos han demostrado que es posible realizar el rastreo del flujo de potencia, utilizando leyes básicas de los circuitos eléctricos, como son las leyes de Ohm y Kirchhoff. Entre estos trabajos se encuentran las aportaciones de J. Bialek [Bialek and Tam, 1996, Bialek, 1996b] y D. Kirshen [Kirshen, et al., 1997, Strbac, et al., 1998] para el rastreo de potencia activa, y en el rastreo de potencia reactiva destacan los trabajos de J. Bialek [Bialek and Tam, 1996, Bialek, 1996b] y R. Laguna [Laguna, et al., 2001].

En éste capítulo se describe la metodología de rastreo de flujo de potencia aparente partiendo del resultado obtenido de un estudio de flujos de potencia. El rastreo de flujos de potencia se puede hacer de dos maneras: la primera es partiendo de una fuente de generación hasta llegar a las cargas del sistema que reciben suministro de potencia de esa fuente de generación, este rastreo es conocido como rastreo de flujos de potencia hacia las cargas; la segunda es partiendo de una carga o sumidero hasta llegar a las fuentes de generación del sistema desde las cuales recibe un suministro de potencia, este rastreo es conocido como rastreo de flujos de potencia hacia los generadores. Cabe mencionar que la metodología

descrita en este capítulo sirve como base para el análisis del rastreo de potencias activa y reactiva, los cuales se describen en los Capítulos 3 y 4, respectivamente.

2.2. Estudio de flujos de potencia.

Los estudios de flujos de potencia son utilizados ampliamente en la industria eléctrica para diferentes aplicaciones, como evaluar el comportamiento del sistema ante un escenario de operación, estudiar alternativas para la planificación de la ampliación del sistema y estudiar la estabilidad del sistema, etc. La información que se obtiene generalmente de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y ángulo de fase de los voltajes nodales y las inyecciones de potencia activa y reactiva en terminales de cada elemento eléctrico que conforma la red de transmisión.

2.2.1. Formulación del problema de flujos de potencia.

La formulación del problema de estudio de flujos de potencia se basa en el planteamiento de un balance de potencia nodal de acuerdo a la estructura topológica del sistema de transmisión, la cual es definida por las admitancias mutuas y propias que componen la matriz de admitancia nodal, Y_{bus} . Los elementos de esta matriz son calculados con los valores de la impedancia serie y la admitancia total de carga de un componente de la red de transmisión, tal que un elemento de la matriz de admitancia nodal Y_{ij} tiene la forma [Grainger and Stevenson, 1994]

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \sin \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (2.1)$$

donde:

θ_{ij} = Es el ángulo de la admitancia mutua entre el nodo i y el nodo j .

$|Y_{ij}|$ = Es la magnitud de la admitancia mutua entre el nodo i y el nodo j .

G_{ij} = Es la conductancia entre el nodo i y el nodo j .

B_{ij} = Es la susceptancia entre el nodo i y el nodo j .

El fasor de voltaje en el i -ésimo nodo de la red de transmisión está dado en coordenadas polares y rectangulares por:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \sin \delta_i) \quad (2.2)$$

y el voltaje en cualquier otro nodo j se escribe de manera similar unicamente cambiando los subíndices i por j . La corriente total que se inyecta en la red a través del nodo i en términos de los elementos de la matriz de admitancia nodal, está dada por la sumatoria

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \cdots + Y_{iN}V_N = \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (2.3)$$

Cuando no existe una interconexión física entre el nodo i -ésimo y algun otro nodo del sistema eléctrico, el elemento correspondiente de la admitancia nodal es cero. Considerando la definición de potencia compleja, las potencias real y reactiva (P_i y Q_i) totales que entran a la red a través del nodo i son obtenidas mediante la siguiente ecuación:

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in}V_n \quad (2.4)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (2.1) y (2.2) en la Ecuación (2.4), se obtiene

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.5)$$

al expandir la Ecuación (2.5) e igualar las partes real e imaginaria, se obtiene

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \cos (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.6)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in}V_iV_n| \sin (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (2.7)$$

Las Ecuaciones (2.6) y (2.7) permiten calcular el valor total de potencia real P_i y potencia reactiva Q_i inyectada a la red a través del nodo i , tal que estos términos pueden ser expresados como $P_i = P_{i,cal}$ y $Q_i = Q_{i,cal}$. Con base a la potencia programada que se está generando y la potencia programada que demanda la carga en el nodo i , P_{gi} y P_{di} , respectivamente, es posible calcular la potencia programada total que está siendo inyectada dentro de la red en el nodo i por la expresión

$$P_{i,prog} = P_{gi} - P_{di} \quad (2.8)$$

Si se define el error ΔP_i como el valor programado $P_{i,prog}$ menos el valor calculado $P_{i,cal}$,

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,cal} = P_{gi} - P_{di} - P_{i,cal} \quad (2.9)$$

De la misma forma, para la potencia reactiva en el nodo i se tiene

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,cal} = Q_{gi} - Q_{di} - Q_{i,cal} \quad (2.10)$$

Las Ecuaciones (2.9) y (2.10) representan el balance de potencia que debe existir en cada uno de los nodos de la red de transmisión para que el sistema eléctrico opere en un estado estacionario. De igual manera, la pérdida de potencia real que representa las pérdidas totales en las líneas de transmisión y transformadores de la red está dada por

$$P_{IT} = \sum_{i=1}^N P_{gi} - \sum_{i=1}^N P_{di} \quad (2.11)$$

Asimismo, la diferencia entre los megavars totales suministrados por los generadores del sistema y los megavars recibidos por las cargas está dada por

$$Q_{IT} = \sum_{i=1}^N Q_{gi} - \sum_{i=1}^N Q_{di} \quad (2.12)$$

En los estudios de flujos de potencia se pueden identificar tres tipos de nodos en la red. En cada nodo i se deben especificar dos de las cuatro cantidades siguientes: δ_i , $|V_i|$, P_i y Q_i , y se deben calcular las dos restantes. Las cantidades especificadas se determinan de acuerdo al tipo de nodo que se trate [Grainger and Stevenson, 1994]:

Nodos de carga. Se considera nodo de carga, todo nodo que no tenga potencia de generación $P_{gi} = 0$ y $Q_{gi} = 0$, y la potencia real P_{di} y potencia reactiva Q_{di} son tomadas del sistema por la carga. A este tipo de nodo también se le llama nodo P-Q porque los valores programados $P_{i,prog}$ y $Q_{i,prog}$ son conocidos y los errores ΔP_i y ΔQ_i pueden definirse. Entonces para este nodo los valores conocidos son las potencias programadas, y los valores desconocidos que van a ser determinados son δ_i y $|V_i|$.

Nodos de voltaje controlado. Cualquier nodo del sistema en el que se mantiene constante la magnitud del voltaje se conoce como nodo de voltaje controlado. En cada nodo con

generador se puede especificar apropiadamente P_{gi} y $|V_i|$, ya que se puede controlar la generación de megawatts por medio de la fuente de energía mecánica y la magnitud del voltaje puede ser controlada al ajustar la excitación del generador. Se puede definir el error ΔP_i , con la potencia P_{di} también conocida, por medio de la Ecuación (2.9). La potencia reactiva del generador Q_{gi} que se requiere para mantener el voltaje programado $|V_i|$ no se puede conocer por anticipado y, por lo tanto, ΔQ_i no puede ser definida. En los nodos de voltaje controlado o nodos PV se conoce los valores P_i y $|V_i|$ y los valores desconocidos son Q_i y δ_i .

Nodo de compensación. En este tipo de nodo también conocido como nodo slack se especifican δ_i y $|V_i|$. El ángulo de voltaje en el nodo de compensación sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes nodales. El ángulo particular que se asigne al voltaje del nodo de compensación no es de importancia porque las diferencias de ángulo de voltaje determinan los valores calculados de P_i y Q_i en las Ecuaciones (2.6) y (2.7). En este tipo de nodo se calcula la potencia activa y reactiva inyectada por el generador al final del proceso iterativo.

Las Ecuaciones (2.6) y (2.7) son funciones no lineales de las variables δ_i y $|V_i|$, así que deben ser resueltas empleando métodos iterativos, como lo son los métodos de Gauss-Seidel y de Newton-Raphson.

2.3. Método de rastreo de flujos de potencia aparente.

Para el rastreo de flujos de potencia hacia las cargas y el rastreo hacia los generadores se determina el dominio de las fuentes y el dominio de las cargas, respectivamente, tal como se detalla en las siguientes secciones. Para las ramas que pertenezcan a dos o más dominios, se utiliza el principio de proporcionalidad para determinar la contribución de cada dominio a los flujos de la rama en común. Este principio también se aplica para las cargas que son abastecidas por más de una fuente de generación.

La metodología para el rastreo de flujos de potencia aparente hacia las cargas, resumida en términos generales es la siguiente:

1. Se calculan los flujos de potencia a través del sistema de transmisión para una condición operativa determinada por los niveles de generación y demanda de energía eléctrica.
2. Con base a la solución de flujos de potencia, se determinan los dominios de cada uno de los generadores.
3. Se encuentran las ramas que pertenecen a más de un dominio, denominadas ramas comunes.
4. Para cada rama se determina la contribución de potencia del dominio pertinente, y/o fuente local, a los flujos totales en la rama y a las pérdidas de potencia.
5. Para cada nodo se calcula la contribución de potencia del dominio pertinente, y/o fuente local, a la carga en el nodo.

Esta metodología se puede aplicar para el rastreo hacia las cargas de potencia activa y potencia reactiva, destacandose que para este ultimo caso es necesario considerar las contribuciones a la absorción de reactivos en las líneas de transmisión y cuantificar las contribuciones por parte del sistema debidas al efecto capacitivo de éstas mismas líneas. Para el rastreo de flujos de potencia hacia los generadores la metodología es similar, aclarando que en el segundo punto se determinan los dominios de las cargas en lugar del dominio de los generadores.

2.3.1. Dominio de las fuentes de potencia aparente.

Para poder determinar la contribución de cada fuente de potencia aparente a los flujos y cargas del sistema, primeramente se determina su dominio. El dominio de una fuente es el conjunto de elementos de transmisión y cargas del sistema eléctrico por el cual fluye la energía eléctrica proveniente de la fuente bajo análisis. Este dominio puede ser visto como un grafo dirigido, donde las direcciones de los elementos de transmisión ó ramas están

determinadas por la solución de flujos de potencia.

La metodología para determinar el dominio de las fuentes de potencia aparente es la siguiente:

1. Se analizan todos los nodos del sistema, de tal manera que las ramas conectadas al nodo bajo análisis por las cuales el flujo de potencia aparente sale de él son incluidas dentro del dominio de dicho nodo.
2. Una vez analizados todos los nodos se examinan todas las ramas del sistema, de tal manera que el dominio del nodo de recepción de la rama bajo análisis pasa a ser parte del dominio del nodo de envío de dicha rama.
3. Una vez terminado este proceso se seleccionan únicamente los dominios de los nodos que tienen generación de potencia aparente. Estos dominios seleccionados muestran grafos dirigidos del flujo de potencia aparente desde la fuente de generación hasta las cargas.

Para ilustrar la metodología anterior, se presenta un pequeño ejemplo para obtener los dominios de las fuentes de potencia aparente de un sistema de 4 nodos, 5 líneas, 2 generadores y 2 cargas. La Figura 2.1 muestra los flujos de potencia de este sistema, los valores de la potencia activa y potencia reactiva están expresados en MW y MVar, respectivamente. Con estos flujos se determinan los dominios de potencia aparente de los 2 generadores, tales dominios se muestran en las Figuras 2.2 y 2.3.

2.3.2. Dominio de las cargas.

El dominio de una carga está compuesto de todos los elementos de transmisión por los cuales circula la energía que consume la carga bajo análisis. La metodología para determinar el dominio de las cargas de potencia aparente es la siguiente:

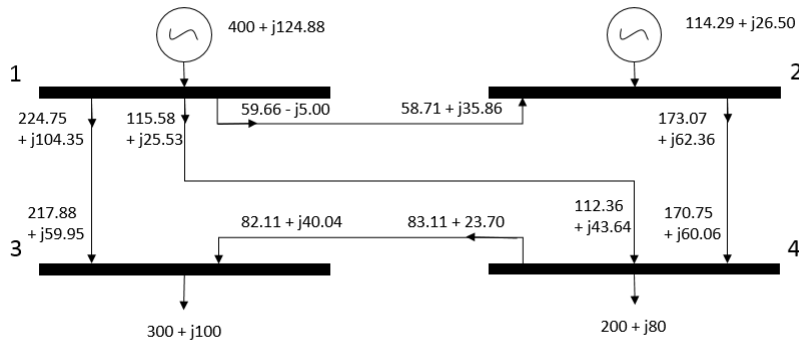


Figura 2.1: Solución estacionaria del sistema de 4 nodos.

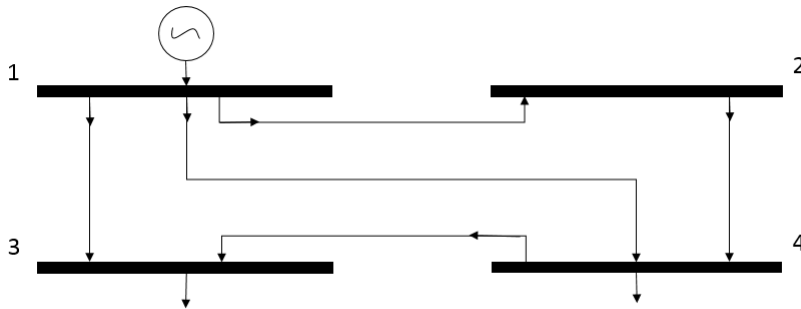


Figura 2.2: Dominio de potencia aparente del generador conectado en el nodo 1.

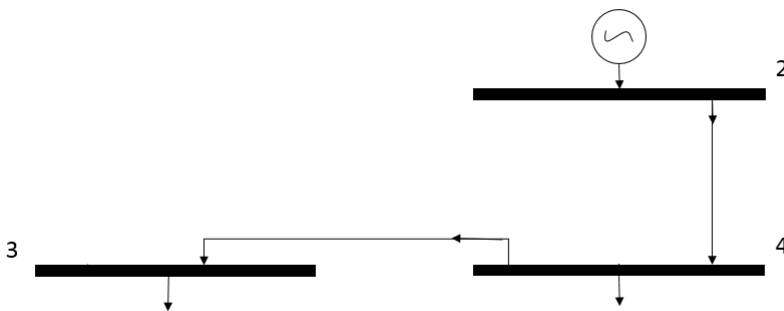


Figura 2.3: Dominio de potencia aparente del generador conectado en el nodo 2.

1. Se analizan todos los nodos del sistema, de tal manera que las ramas conectadas al nodo bajo análisis por las cuales el flujo de potencia aparente entra a él son incluidas dentro del dominio de dicho nodo.
2. Una vez analizados todos los nodos se examinan todas las ramas del sistema, de tal manera que el dominio del nodo de envío de la rama bajo análisis pasa a ser parte del dominio del nodo de recepción de dicha rama.
3. Una vez terminado este proceso se seleccionan únicamente los dominios de los nodos que tienen cargas de potencia aparente.

Los dominios de la potencia aparente de las cargas de la Figura 2.1 se muestran en las Figuras 2.4 y 2.5.

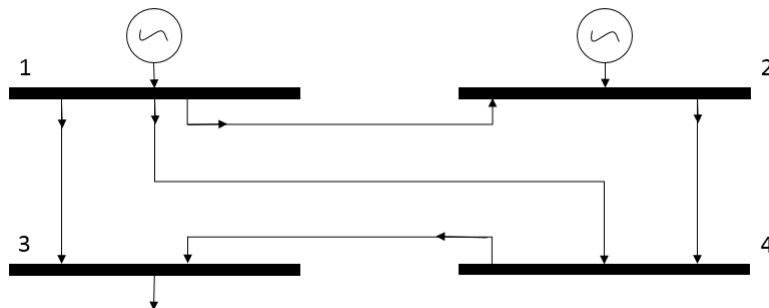


Figura 2.4: Dominio de potencia aparente de la carga conectada en el nodo 3.

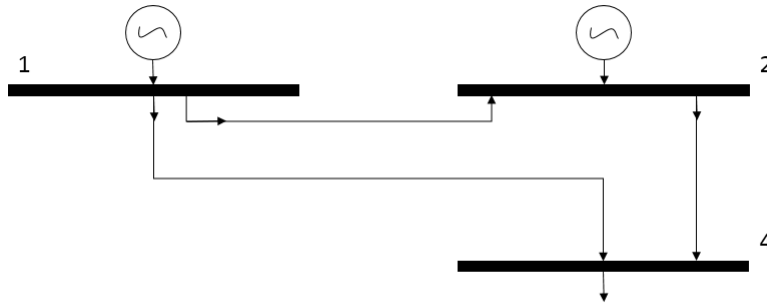


Figura 2.5: Dominio de potencia aparente de la carga conectada en el nodo 4.

2.3.3. Principio de proporcionalidad.

El principio que se utiliza para rastrear el flujo de electricidad en esta tesis es el de la distribución proporcional. Esto se ilustra en la Figura 2.6 donde cuatro líneas están conectadas a través del nodo i , dos con entradas y dos salidas. El flujo total de la energía que pasa a través del nodo es $P_i = 40 + 60 = 100MW$ de los cuales el 40% es suministrado por la línea $a - i$ y el 60% por la línea $b - i$. Como la electricidad es indistinguible y cada uno de los flujos que sale por las líneas desde el nodo i sólo dependen del nivel de tensión y la impedancia de la línea, se puede suponer que cada MW inyectado en el nodo contiene la misma proporción de los flujos de entrada como el total flujo nodal P_i . Por lo tanto el flujo que sale por la línea $i - c$ (70MW) consta de $70MW(40/100) = 28MW$ suministrado por la línea $a - i$ y $70MW(60/100) = 42MW$ suministrado por la línea $b - i$. De manera similar el flujo que sale por la línea $i - d$ (30MW) consta de $30MW(40/100) = 12MW$ suministrado por la línea $a - i$ y $30MW(60/100) = 18MW$ suministrado por la línea $b - i$.

El principio de proporcionalidad básicamente equivale a la suposición de que el nodo de red es una “mezcladora” perfecta de los flujos que entran de manera que es imposible determinar qué electrón incidente sale por cada línea en particular. El principio de proporcionalidad, obviamente no puede ser probado ni refutado, sin embargo, proporciona una poderosa herramienta para el establecimiento de mecanismos de tarificación en el sector

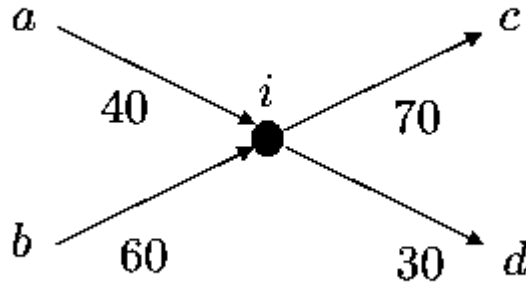


Figura 2.6: Principio de proporcionalidad.

eléctrico privatizado y desregularizado [Bialek and Tam, 1996].

2.4. Contribución de las fuentes a los flujos de potencia aparente.

Con base en la Figura 2.7, se desea obtener la manera en que contribuyen las inyecciones de potencia en el nodo i al flujo de potencia en cada una de las terminales de las ramas conectadas a éste nodo. Para obtener una expresión de éstas contribuciones se considera el equivalente mostrado en la Figura 2.8,

tal que el análisis queda reducido a 4 vías, 2 de abastecimiento y 2 de descarga, donde:

S_{D1} = Fuente de potencia aparente que conforma al dominio 1.

S_{Dd} = Conglomerado de las fuentes de potencia aparente que conforma a los dominios desde la fuente 2 hasta la fuente m , en otras palabras

$$S_{Dd} = S_{D2} + S_{D3} + \cdots + S_{Dm} \quad (2.13)$$

S_{ij} = Flujo de potencia aparente que transita por la línea conectada entre el nodo i y el nodo j .

S_{ir} = Conglomerado de los flujos de potencia aparente que transita por las ramas con flujos

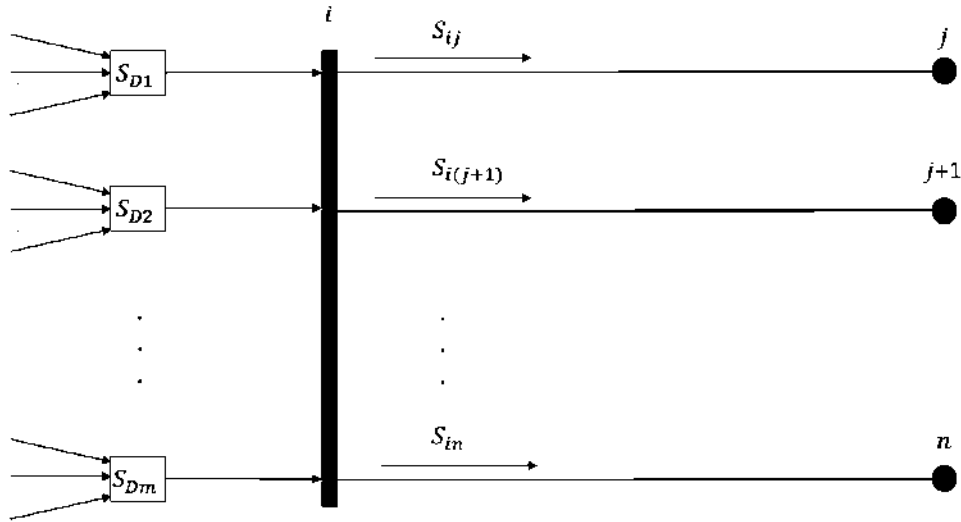


Figura 2.7: Flujos de potencia aparente que transitan por el nodo i .

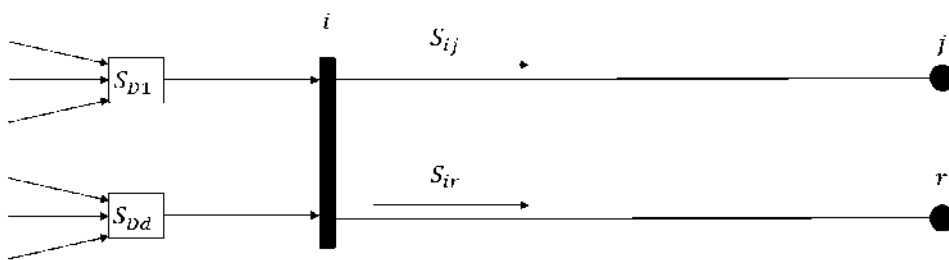


Figura 2.8: Flujos de potencia aparente conglomerada que transitan por el nodo i .

salientes del nodo i , que conforma las líneas desde la $j + 1$ hasta la n , en otras palabras

$$S_{ir} = S_{i(j+1)} + S_{i(j+2)} + \cdots + S_{in} \quad (2.14)$$

Con respecto a los flujos salientes S_{ij} y S_{ir} , se pueden obtener las impedancias equivalentes Z_{ij} y Z_{ir} , partiendo de la definición de potencia compleja

$$S = VI^* = \frac{V^2}{Z^*} \quad \text{y} \quad Z = \frac{V^2}{S^*} \quad (2.15)$$

entonces

$$Z_{ij} = \frac{V_i^2}{S_{ij}^*} \quad \text{y} \quad Z_{ir} = \frac{V_i^2}{S_{ir}^*} \quad (2.16)$$

donde V_i es la magnitud de voltaje del nodo i , y el superíndice $*$ representa el complejo conjugado.

En base a lo anterior es posible representar el circuito eléctrico mostrado en la Figura 2.8, como se ilustra en la Figura 2.9.

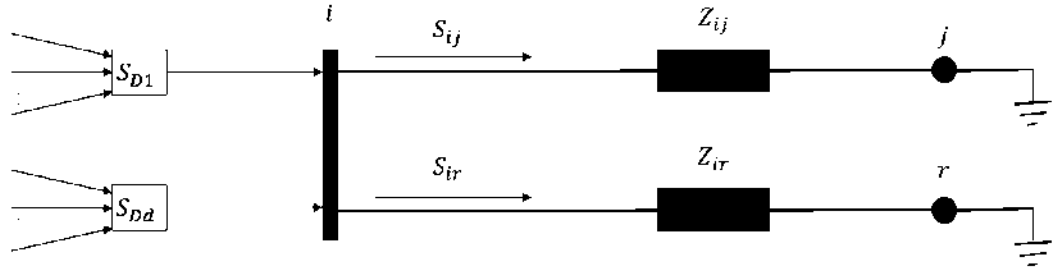


Figura 2.9: Flujos de potencia aparente conglomerada que transitan por el nodo i , con las impedancias equivalentes de rama a tierra.

A partir de la Figura 2.9, y con base en el divisor de corriente, se obtiene

$$V_i = Z_{eq} I_T = \left(\frac{Z_{ij} Z_{ir}}{Z_{ij} + Z_{ir}} \right) I_T \quad (2.17)$$

donde Z_{eq} es la impedancia equivalente a tierra en paralelo de las ramas, e I_T es la corriente total debida a una fuente de potencia cualquiera.

Además, para cualquiera de las dos ramas en paralelo

$$V_i = Z_{ij} I_{ij} = Z_{ir} I_{ir} \quad (2.18)$$

Sustituyendo (2.17) en (2.18)

$$\left(\frac{Z_{ij}Z_{ir}}{Z_{ij} + Z_{ir}} \right) I_T = Z_{ij}I_{ij} = Z_{ir}I_{ir} \quad (2.19)$$

y resolviendo para las corrientes a través de las ramas

$$I_{ij} = \left[\frac{Z_{ij}Z_{ir}}{Z_{ij}(Z_{ij} + Z_{ir})} \right] I_T = \left(\frac{Z_{ir}}{Z_{ij} + Z_{ir}} \right) I_T \quad (2.20)$$

de forma similar

$$I_{ir} = \left(\frac{Z_{ij}}{Z_{ij} + Z_{ir}} \right) I_T \quad (2.21)$$

Debido a que se desea saber la aportación de la fuente de potencia S_{D1} al flujo de potencia a través de la línea conectada entre el nodo i y el nodo j

$$I_T = I_{D1} + I_{D2} + \dots + I_{Dm} \quad (2.22)$$

$$S_{ij} = S_{D1-ij} + S_{D2-ij} + \dots + S_{Dm-ij} \quad (2.23)$$

$$\begin{aligned} S_{ij} &= V_i I_{ij}^* = V_i \left[\left(\frac{Z_{ir}}{Z_{ij} + Z_{ir}} \right) I_T \right]^* = \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) V_i (I_{D1} + I_{D2} + \dots + I_{Dm})^* \\ &= \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) V_i I_{D1}^* + \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) V_i I_{D2}^* + \dots + \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) V_i I_{Dm}^* \\ &= \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D1}^* + \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D2}^* + \dots + \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{Dm}^* \end{aligned} \quad (2.24)$$

de las Ecuaciones (2.23) y (2.24) se tiene que

$$S_{D1-ij} = \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D1}^* \quad (2.25)$$

$$S_{D2-ij} = \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D2}^* \quad (2.26)$$

$$S_{Dm-ij} = \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{Dm}^* \quad (2.27)$$

de manera similar se determina la ecuación para determinar la aportación de la fuente de potencia S_{D1} al flujo de potencia a través del enlace conectado entre los nodos $i - r$,

$$S_{D1-ir} = \left(\frac{Z_{ij}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D1}^* \quad (2.28)$$

donde S_{D1-ij} , S_{D2-ij} y S_{Dm-ij} son el flujo de potencia aparente saliente del nodo i hacia el nodo j causado por el flujo S_{D1} , S_{D2} y S_{Dm} , respectivamente; S_{D1-ir} es el flujo de potencia aparente saliente del nodo i hacia el nodo r causado por el flujo S_{D1} .

Las ecuaciones anteriores deben ser expresadas en función de potencias, sustituyendo la Ecuación (2.16) en (2.25).

$$\begin{aligned} S_{D1-ij} &= \left(\frac{Z_{ir}^*}{Z_{ij}^* + Z_{ir}^*} \right) S_{D1} = \left[\frac{\left(\frac{V_i^2}{S_{ir}^*} \right)^*}{\left(\frac{V_i^2}{S_{ij}^*} \right)^* + \left(\frac{V_i^2}{S_{ir}^*} \right)^*} \right] S_{D1} = \left[\frac{\left(\frac{V_i^{2*}}{S_{ir}} \right)}{\left(\frac{V_i^{2*} S_{ir} + V_i^{2*} S_{ij}}{S_{ij} S_{ir}} \right)} \right] S_{D1} \\ &= \left[\frac{V_i^{2*} S_{ij} S_{ir}}{V_i^{2*} S_{ir} (S_{ij} S_{ir})} \right] S_{D1} = \left(\frac{S_{ij}}{S_{ij} + S_{ir}} \right) S_{D1} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Puesto que el balance de potencia nodal se debe satisfacer

$$S_{ij} + S_{ir} = S_{D1} + S_{Dd} \quad (2.30)$$

se tiene

$$S_{D1-ij} = \left(\frac{S_{ij}}{S_{D1} + S_{Dd}} \right) S_{D1} \quad (2.31)$$

Cuando se realiza el análisis de los factores de proporcionalidad de las fuentes de potencia a los flujos en las ramas del sistema, lo que se considera es la relación de una fuente específica con respecto de un elemento de transmisión determinado. Bajo ésta consideración, se disgregan los conglomerados realizados al inicio de ésta argumentación, ya que el análisis se hará línea por línea, cada cual en su correspondiente turno. Expresando la ecuación anterior en función de todos los dominios se tiene:

$$S_{D1-ij} = \left(\frac{S_{ij}}{S_{D1} + S_{D2} + S_{D3} + \dots + S_{Dm}} \right) S_{D1} \quad (2.32)$$

De igual manera, para la aportación del dominio de la k -ésima fuente al flujo de potencia aparente en el elemento de transmisión conectado entre el nodo i y el nodo j es

$$S_{Dk-ij} = \left(\frac{S_{ij}}{S_{D1} + S_{D2} + S_{D3} + \dots + S_{Dm}} \right) S_{Dk} \quad (2.33)$$

Por analogía se plantea la aportación del dominio de la k -ésima fuente en términos de potencia real y reactiva, es decir

$$P_{Dk-ij} = \left(\frac{P_{ij}}{P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + \dots + P_{Dm}} \right) P_{Dk} = C_{ij}^p P_{Dk} \quad (2.34)$$

$$Q_{Dk-ij} = \left(\frac{Q_{ij}}{Q_{D1} + Q_{D2} + Q_{D3} + \dots + Q_{Dm}} \right) Q_{Dk} = C_{ij}^q Q_{Dk} \quad (2.35)$$

donde C_{ij}^p es el factor de proporcionalidad para la potencia activa y C_{ij}^q es el factor de proporcionalidad para la potencia reactiva.

2.5. Contribución de las cargas a los flujos de potencia aparente.

Utilizando el mismo procedimiento empleado para obtener las contribuciones de las fuentes a los flujos de potencia aparente, se determinan las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia aparente.

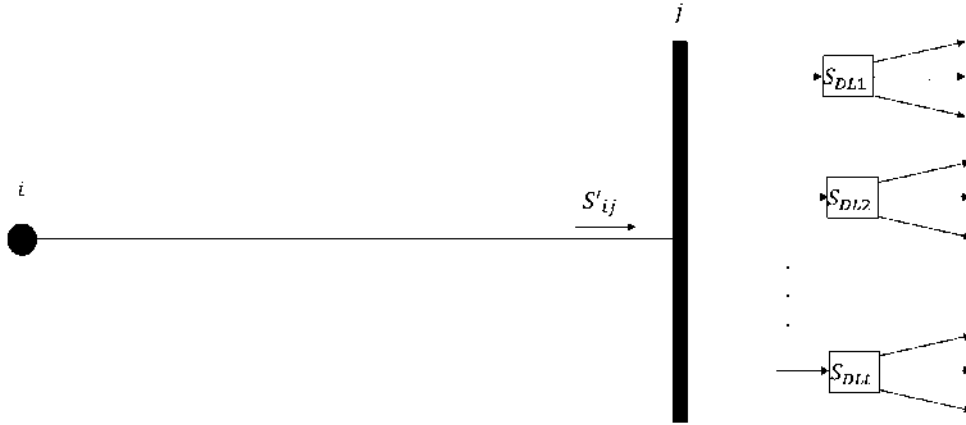


Figura 2.10: Flujos de potencia aparente que transitan por el nodo j

Con base en la Figura 2.10, la aportación del dominio de la k -ésima carga al flujo de recepción de potencia aparente en el elemento de transmisión conectado entre los nodos i y j es

$$S'_{DLk-ij} = \left(\frac{S'_{ij}}{S_{DL1} + S_{DL2} + S_{DL3} + \dots + S_{DLt}} \right) S_{DLk} \quad (2.36)$$

donde S'_{DLk-ij} es la aportación de la carga k al flujo de recepción de potencia aparente S'_{ij} , $S_{DL1} + S_{DL2} + S_{DL3} + \dots + S_{DLt}$ son las contribuciones de potencia aparente de las cargas $(1, 2, 3, \dots, t)$ al nodo j .

Por analogía se plantea la aportación del dominio de la k -ésima carga en términos de potencia real y reactiva. En el nodo receptor del elemento de transmisión conectado entre los nodos i y j es

$$P_{Dk-ij} = \left(\frac{P_{ij}}{P_{D1} + P_{D2} + P_{D3} + \cdots + P_{Dm}} \right) P_{Dk} = C'_{ij}{}^{Lp} P_{Dk} \quad (2.37)$$

$$Q_{Dk-ij} = \left(\frac{Q_{ij}}{Q_{D1} + Q_{D2} + Q_{D3} + \cdots + Q_{Dm}} \right) Q_{Dk} = C'_{ij}{}^{Lq} Q_{Dk} \quad (2.38)$$

Capítulo 3

Método de rastreo de flujos de potencia activa.

3.1. Introducción.

En este capítulo se describe la metodología para obtener las contribuciones de los generadores a la potencia activa que fluye a través de los elementos de transmisión y que es demandada por cada una de las cargas conectadas al sistema eléctrico (rastreo hacia las cargas de potencia activa), así como la metodología para determinar las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia activa en el sistema (rastreo hacia los generadores de potencia activa).

Un problema común en las redes de transmisión eléctricas cuando tienen dispositivos que desfasan el ángulo de voltaje son los flujos circulantes de potencia activa. Este fenómeno aparte de representar un problema para el sistema por aumentar las pérdidas de potencia activa, resulta ser un problema para el rastreo de potencia debido a su característica de fluir en forma circular. En este capítulo se propone una manera de realizar el rastreo de flujos de potencia activa hacia las cargas en presencia de flujos circulantes de potencia activa.

3.2. Contribución de los generadores a los flujos de potencia activa.

En ésta sección se describe de manera detallada el procedimiento para encontrar las aportaciones de cada generador a los flujos de potencia activa a través de la red de transmisión. Es importante mencionar que para obtener el dominio de potencia activa de los generadores se utiliza el mismo procedimiento implementado para la potencia aparente, debido a que los flujos de potencia activa tienen la misma continuidad a través de la rama, fenómeno que no siempre sucede para el caso de la potencia reactiva, cuyo análisis se realiza en el Capítulo 4. En el Apéndice A se muestra el diagrama de flujo para obtener estos dominios que permiten calcular las contribuciones siguientes:

1. Contribución a los flujos de potencia a través de los elementos de transmisión.
2. Contribución a las pérdidas de potencia debidas al efecto Joule.
3. Contribución a la potencia demandada por las cargas del sistema.

A continuación se describen a detalle cada caso.

3.2.1. Contribución a los flujos de potencia activa en los elementos de transmisión.

La contribución del dominio de cada generador al flujo de potencia activa en los elementos de transmisión (ramas) que conforman el sistema eléctrico se determina usando el principio de proporcionalidad de manera similar al desarrollo. Las contribuciones de los dominios de los generadores son obtenidas por las Ecuaciones (3.1) a (3.8), derivadas de la Figura 3.1 y como se explico en la Sección 2.4.

$$P_{ij} = P_{D1-ij} + P_{D2-ij} + \cdots + P_{Dm-ij} + P_{Gi-ij} \quad (3.1)$$

$$P'_{ij} = P'_{D1-ij} + P'_{D2-ij} + \cdots + P'_{Dm-ij} + P'_{Gi-ij} \quad (3.2)$$

$$P_{Dk-ij} = P_{Dk} C_{ij}^p \quad (3.3)$$

$$P'_{Dk-ij} = P_{Dk} C'_{ij}^p \quad (3.4)$$

$$P_{Gi-ij} = P_{Gi}C_{ij}^p \quad (3.5)$$

$$P'_{Gi-ij} = P_{Gi}C'_{ij}{}^p \quad (3.6)$$

$$C_{ij}^p = \frac{P_{ij}}{P_{D1} + P_{D2} + \dots + P_{Dm} + P_{Gi}} \quad (3.7)$$

$$C'_{ij}{}^p = \frac{P'_{ij}}{P_{D1-ij} + P_{D2-ij} + \dots + P_{Dm-ij} + P_{Gi-ij}} \quad (3.8)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$. P_{ij} y P'_{ij} son el flujo de potencia activa inyectada en los nodos de envío y de recepción, respectivamente, de la rama conectada entre los nodos i y j . P_{Li} es la carga de potencia activa total del nodo i . P_{Gi} es la potencia activa total generada del nodo i . P_{D1}, \dots, P_{Dm} son las contribuciones de las fuentes de potencia activa (correspondientes a los dominios $1, \dots, m$) al nodo i . $P_{D1-ij} + P_{D2-ij} + \dots + P_{Dm-ij}$ son las contribuciones de las fuentes de potencia activa (correspondientes a los dominios $1, \dots, m$) al flujo de potencia activa en el nodo de envío P_{ij} . $P'_{D1-ij} + P'_{D2-ij} + \dots + P'_{Dm-ij}$ son las contribuciones de las fuentes de potencia activa (correspondientes a los dominios $1, \dots, m$) al flujo de potencia activa en el nodo de recepción P'_{ij} . Por último C_{ij}^p y $C'_{ij}{}^p$ son los factores de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para los flujos de potencia activa en los nodos de envío y recepción, respectivamente.

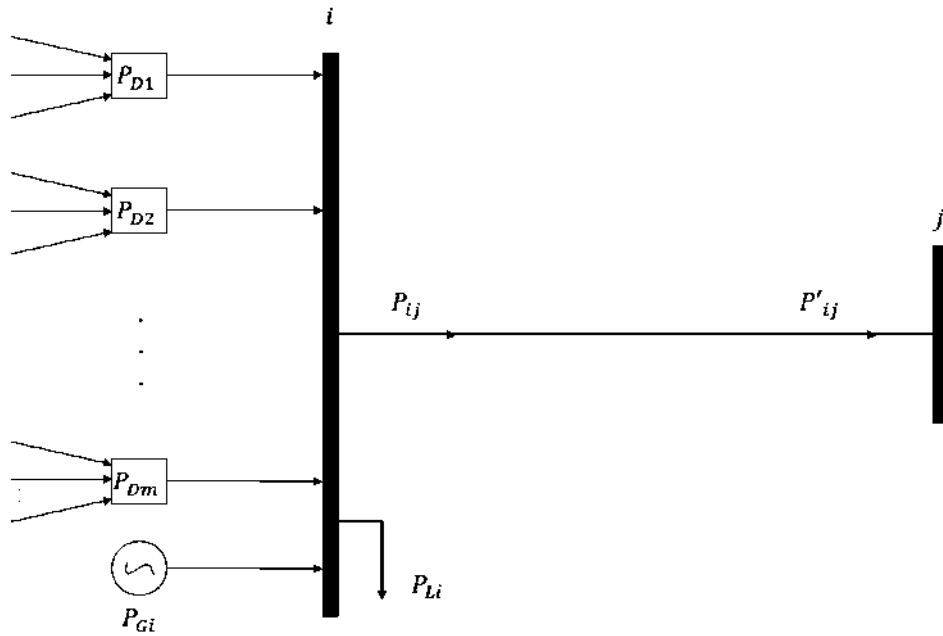


Figura 3.1: Contribución de los generadores al flujo de potencia activa en la rama localizada entre el nodo i y el nodo j .

3.2.2. Contribución a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.

La resistencia de los conductores de los elementos de transmisión es la causa más importante de la pérdida de potencia activa. La resistencia efectiva de un conductor es

$$R = \frac{P_l}{|I|^2} \quad (3.9)$$

donde:

P_l = Pérdida de potencia activa en el conductor, medida en watts.

I = Valor rms eficaz de la corriente que pasa por el conductor, medida en amperes.

R = Resistencia efectiva del conductor, medida en ohms (Ω).

La resistencia en los conductores produce una cantidad importante de pérdidas en el sistema de transmisión, debido al efecto Joule. Con base al método de rastreo propuesto, es posible determinar la aportación de cada generador a las pérdidas de potencia activa a través de la

red de transmisión. La contribución del generador k a las pérdidas de potencia activa en la rama conectada entre el nodo i y el nodo j es

$$P_{lDk-ij} = P_{Dk-ij} - P'_{Dk-ij} \quad (3.10)$$

entonces, la fracción de contribución del k -ésimo generador a las pérdidas de potencia activa en la rama conectada entre el nodo i y el nodo j ($P_{l-ij} = P_{ij} - P'_{ij}$) es

$$F_{PDk-ij} = \frac{P_{lDk-ij}}{P_{l-ij}} = \frac{P_{Dk-ij} - P'_{Dk-ij}}{P_{ij} - P'_{ij}} \quad (3.11)$$

donde P_{l-ij} es la pérdida de potencia activa en la rama conectada entre los nodos i y j . P_{lDk-ij} es la contribución del generador k a las pérdidas de potencia P_{l-ij} . F_{PDk-ij} es la fracción de contribución del generador k a las pérdidas de potencia P_{l-ij} .

3.2.3. Contribución a las cargas de potencia activa en los nodos del sistema.

El método propuesto también se aplica para calcular las contribuciones de los generadores a las cargas de potencia activa conectadas al nodo i . Éstas contribuciones se obtienen basándose en las Ecuaciones (3.12) a (3.15), derivadas en función de la Figura 3.2:

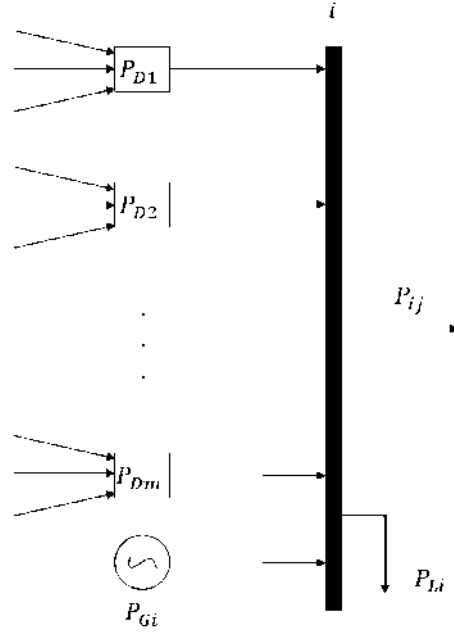


Figura 3.2: Contribución de los generadores a la carga conectada en el nodo i .

$$P_{Li} = P_{D1}^{Li} + P_{D2}^{Li} + \dots + P_{Dm}^{Li} + P_{Gi}^{Li} \quad (3.12)$$

$$P_{Dk}^{Li} = P_{Dk} C_{Li}^p \quad (3.13)$$

$$P_{Gi}^{Li} = P_{Gi} C_{Li}^p \quad (3.14)$$

$$C_{Li}^p = \frac{P_{Li}}{P_{D1} + P_{D2} + \dots + P_{Dm} + P_{Gi}} \quad (3.15)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$. $P_{D1}^{Li} + P_{D2}^{Li} + \dots + P_{Dm}^{Li}$ son las contribuciones de las fuentes que conforman los dominios $1, 2, \dots, m$ a la potencia activa consumida por la carga P_{Li} . C_{Li}^p es el factor de proporcionalidad de la carga de potencia activa conectada en el nodo i . En la Figura 3.2 se puede observar que el flujo de potencia P_{ij} no contribuye a la carga P_{Li} debido a que la dirección del flujo sale del nodo i .

Por lo tanto, la fracción de contribución del k -ésimo generador a la carga P_{Li} es:

$$F_{PDk-Li} = \frac{P_{Dk}^{Li}}{P_{Li}} \quad (3.16)$$

Como puede observarse, el proceso de cómputo de las fracciones de contribución a las pérdidas y a las cargas de potencia activa es relativamente sencillo, pues no existen más proveedores de Mega-Watts que los propios generadores conectados al sistema de transmisión, abasteciendo de manera proporcional tanto a las cargas del sistema como a las pérdidas en los elementos de transmisión.

3.3. Contribución de las cargas a los flujos de potencia activa.

La contribución de las cargas a los flujos de potencia activa a través de los elementos de transmisión es obtenida con base a la potencia activa que extraen las cargas a través de estas ramas del sistema. Para lograr lo anterior, es necesario determinar el dominio de cada carga cuyo procedimiento se explica esquemáticamente en un diagrama de flujo reportado en la Figura A.1 del Apéndice A.

A continuación se detall el procedimiento para encontrar las aportaciones de cada carga a los flujos de potencia activa a través de la red de transmisión, y la contribución a las pérdidas de potencia debidas al efecto Joule. También es posible determinar la potencia activa que extraen las cargas de los generadores, es decir, la contribución de una determinada carga a la potencia activa producida por cada generador, pero en ésta tesis no se analizará éste caso.

3.3.1. Contribución a los flujos de potencia activa en los elementos de transmisión.

La contribución de cada carga del sistema al flujo de potencia activa en cada rama se determina por las Ecuaciones (3.17) a (3.24), derivadas en función de la Figura 3.3:

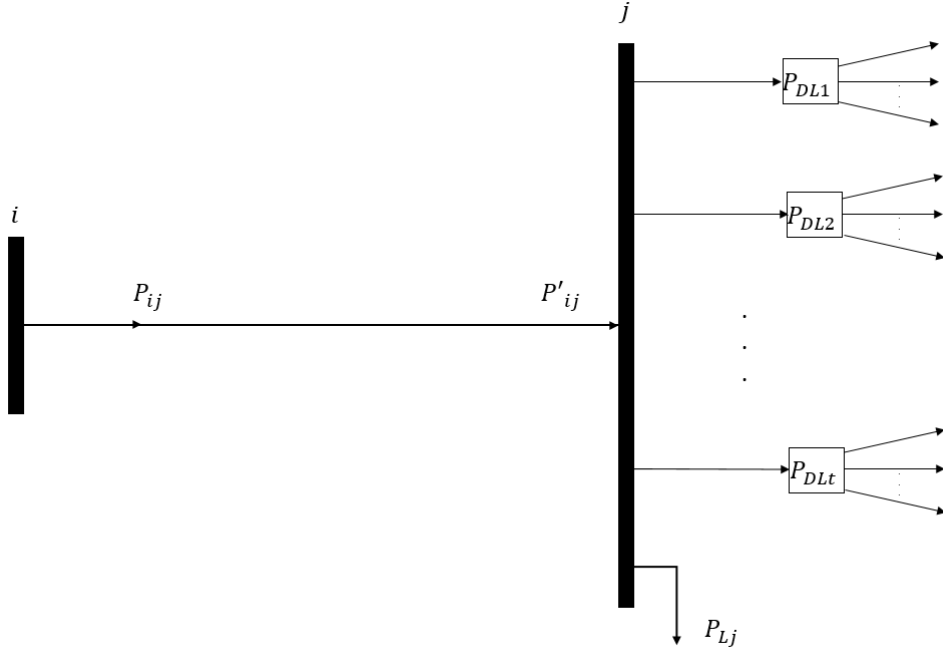


Figura 3.3: Contribución de las cargas al flujo de potencia activa en la rama localizada entre el nodo i , y el nodo j .

$$P'_{ij} = P'_{D1-ij} + P'_{D2-ij} + \cdots + P'_{Dt-ij} + P'_{Lj-ij} \quad (3.17)$$

$$P_{ij} = P_{DL1-ij} + P_{DL2-ij} + \cdots + P_{DLt-ij} + P_{Lj-ij} \quad (3.18)$$

$$P'_{DLk-ij} = P_{DLk} C'_{ij}{}^{Lp} \quad (3.19)$$

$$P_{DLk-ij} = P'_{DLk-ij} C_{ij}{}^{Lp} \quad (3.20)$$

$$P'_{Lj-ij} = P_{Lj} C'_{ij}{}^{Lp} \quad (3.21)$$

$$P_{Lj-ij} = P'_{Lj-ij} C_{ij}{}^{Lp} \quad (3.22)$$

$$C'_{ij}{}^{Lp} = \frac{P'_{ij}}{P_{DL1} + P_{DL2} + \cdots + P_{DLt} + P_{Lj}} \quad (3.23)$$

$$C_{ij}{}^{Lp} = \frac{P_{ij}}{P'_{DL1-ij} + P'_{DL2-ij} + \cdots + P'_{DLt-ij} + P'_{Lj-ij}} \quad (3.24)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$.

3.3.2. Contribución a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión.

Así como es posible determinar las contribuciones de los generadores a las pérdidas de potencia, también es posible determinar las contribuciones de las cargas a las pérdidas de potencia activa de la red, no sin antes haber calculado las contribuciones de las cargas a los flujos a través de las ramas del sistema. Para determinar la contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa, se utilizarán las Ecuaciones (3.10) y (3.11), teniendo en cuenta que ahora se trata del dominio de las cargas y no del dominio de los generadores.

3.4. Rastreo de flujos de potencia activa del sistema de 4 nodos.

Con la finalidad de validar el algoritmo implementado en esta tesis para el rastreo de flujos de potencia activa, se analiza el pequeño sistema de 4 nodos mostrado en el Capítulo 2 (Figura 2.1). Como ya se mencionó anteriormente, éste sistema está conformado por 2 generadores, 2 cargas y 5 líneas.

Los dominios de los generadores de potencia activa del sistema de 4 nodos se reportan en la Tabla 3.1, donde la columna marcada como Dominio muestra las líneas del sistema de transmisión por las cuales fluye la potencia producida por cada generador. Por ejemplo, el dominio del generador conectado en el nodo 2 incluye a las líneas 2-4 (línea conectada entre el nodo 2 y el nodo 4) y 4-3 (línea conectada entre el nodo 4 y el nodo 3).

Tabla 3.1: Dominio de los generadores de potencia activa.

Generador	Dominio
1	1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 2-4, 4-3
2	2-4, 4-3

Las contribuciones de los dos generadores a los flujos de potencia activa de envío P_{ij} y recepción P'_{ij} se muestran en las Tablas 3.2 y 3.3, respectivamente, donde NE es el nodo de envío y NR es el nodo de recepción, P_{D1-ij} es la contribución del generador conectado en

el nodo 1 al flujo de envío de potencia activa P_{ij} , y P'_{D1-ij} es la contribución del generador conectado en el nodo 1 al flujo de recepción de potencia activa P'_{ij} . En ambas tablas, la suma de las contribuciones de los generadores a los flujos de potencia activa (columna marcada como Total) dan como resultado el flujo total a través de la rama (columnas P_{ij} y P'_{ij}).

Tabla 3.2: Contribución de los generadores a los flujos de envío de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	P_{D1-ij} (MW)	P_{D2-ij} (MW)	Total (MW)	P_{ij} (MW)
1	3	224.7577	0	224.7577	224.7577
1	2	59.6613	0	59.6613	59.6613
1	4	115.5811	0	115.5811	115.5811
2	4	58.787	114.2915	173.0785	173.0785
4	3	50.0142	33.1031	83.1172	83.1172

Tabla 3.3: Contribución de los generadores a los flujos de recepción de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	P'_{D1-ij} (MW)	P'_{D2-ij} (MW)	Total (MW)	P'_{ij} (MW)
1	3	217.8818	0	217.8818	217.8818
1	2	58.787	0	58.787	58.787
1	4	112.3626	0	112.3626	112.3626
2	4	57.9976	112.757	170.7546	170.7546
4	3	49.413	32.7052	82.1182	82.1182

De los resultados mostrados en las dos tablas anteriores se obtiene la Tabla 3.4, la cual reporta las contribuciones de los generadores a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema, donde P_{l-ij} es la pérdida de potencia activa en la rama conectada entre los nodos i y j , y P_{lD1-ij} es la contribución del generador 1 a las pérdidas de potencia activa P_{l-ij} .

Tabla 3.4: Contribución de los generadores a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	P_{lD1-ij} (MW)	P_{lD2-ij} (MW)	Total (MW)	P_{l-ij} (MW)
1	3	6.8758	0	6.8758	6.8758
1	2	0.8743	0	0.8743	0.8743
1	4	3.2185	0	3.2185	3.2185
2	4	0.7893	1.5345	2.3238	2.3238
4	3	0.6012	0.3979	0.9991	0.9991

Los dominios de las cargas de potencia activa del sistema de 4 nodos se reportan

en la Tabla 3.5, donde la columna marcada como Dominio muestra las líneas del sistema de transmisión por las cuales fluye la potencia consumida por cada carga; por ejemplo, el dominio de la carga conectada en el nodo 4 incluye a las líneas 1-2 (línea conectada entre el nodo 1 y el nodo 2), 1-4 (línea conectada entre el nodo 1 y el nodo 4) y 2-4 (línea conectada entre el nodo 2 y el nodo 4).

Tabla 3.5: Dominio de las cargas de potencia activa.

Carga	Dominio
3	1-2, 1-3, 1-4, 1-5, 2-4, 4-3
4	1-2, 1-4, 2-4

Las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia activa de envío y recepción se muestran en las Tablas 3.6 y 3.7, respectivamente.

Tabla 3.6: Contribución de las cargas a los flujos de envío de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	P_{DL3-ij} (MW)	P_{DL4-ij} (MW)	Total (MW)	P_{ij} (MW)
1	3	224.7577	0	224.7577	224.7577
1	2	17.5153	42.146	59.6613	59.6613
1	4	33.9322	81.6489	115.5811	115.5811
2	4	50.8122	122.2663	173.0785	173.0785
4	3	83.1172	0	83.1172	83.1172

Tabla 3.7: Contribución de las cargas a los flujos de recepción de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	P'_{DL3-ij} (MW)	P'_{DL4-ij} (MW)	Total (MW)	P'_{ij} (MW)
1	3	217.8818	0	217.8818	217.8818
1	2	17.2586	41.5283	58.787	58.787
1	4	32.9873	79.3753	112.3626	112.3626
2	4	50.13	120.6247	170.7546	170.7546
4	3	82.1182	0	82.1182	82.1182

La Tabla 3.8 reporta las contribuciones de las cargas a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema, P_{DL3-ij} es la contribución de la carga conectada en el nodo 3 a las pérdidas de potencia activa P_{l-ij} .

Tabla 3.8: Contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa en los elementos de transmisión del sistema.

NE	NR	$P_{lDL3-ij}$ (MW)	$P_{lDL4-ij}$ (MW)	Total (MW)	P_{l-ij} (MW)
1	3	6.8758	0	6.8758	6.8758
1	2	0.2567	0.6176	0.8743	0.8743
1	4	0.9449	2.2736	3.2185	3.2185
2	4	0.6822	1.6416	2.3238	2.3238
4	3	0.9991	0	0.9991	0.9991

De las Tablas 3.4 y 3.8 se puede obtener la contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa, identificando de que generadores proviene la potencia activa disipada por efecto Joule (pérdidas), tal como se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9: Contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa del sistema, identificando las fuentes de potencia activa.

NE	NR	$P_{lDL3-ij}$		$P_{lDL4-ij}$		Total (MW)	P_{l-ij} (MW)
		P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)	P_{G1} (MW)	P_{G2} (MW)		
1	3	6.8758	0	0	0	6.8758	6.8758
1	2	0.2567	0	0.6176	0	0.8743	0.8743
1	4	0.9449	0	2.2736	0	3.2185	3.2185
2	4	0.2317	0.4505	0.5576	1.084	2.3238	2.3238
4	3	0.6012	0.3979	0	0	0.9991	0.9991

La finalidad de obtener la contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa, como se muestra en la Tabla 3.9, es poder asignar el costo por pérdidas de potencia activa a las cargas, sabiendo que el costo de producción de la potencia activa de un generador puede diferir del costo de los demás generadores.

Por ultimo las contribuciones de los generadores a las cargas del sistema se muestran en la Tabla 3.10, donde P_{Li} es la carga de potencia activa conectada en el nodo i , P_{D1}^{Li} es la contribución del generador 1 a la carga P_{Li} , y Total es la suma de las contribuciones de los generadores a la carga P_{Li} .

Tabla 3.10: Contribución de los generadores a las cargas de potencia activa del sistema.

Nodo	P_{D1}^{Li} (MW)	P_{D2}^{Li} (MW)	Total (MW)	P_{Li} (MW)
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	267.2948	32.7052	300	300
4	120.3461	79.6539	200	200

3.5. Flujos circulantes de potencia activa.

En las redes de transmisión de sistemas eléctricos de potencia pueden existir flujos de potencia activa que circulan por algunos elementos de transmisión en un lazo cerrado, de tal forma que el flujo circula de manera cíclica y de manera general se denominan como flujos circulantes de potencia activa. Este tipo de fenómeno son un problema en la red de transmisión eléctrica, debido a que aumentan las pérdidas de potencia activa en el sistema. El procedimiento para detectar flujos circulantes de potencia activa y la manera de realizar el rastreo de flujos de potencia activa hacia las cargas se describen a continuación.

3.5.1. Condiciones necesarias para la existencia de flujos circulantes de potencia activa.

La única razón para que surjan flujos circulantes de potencia activa es que existan dispositivos que cambien el ángulo de fase en el sistema como transformadores delta-estrella, transformadores desfasadores y/ó dispositivos controladores. Si se considera la red sin pérdidas de potencia activa, el flujo de potencia activa que fluye por la rama que une el nodo i con el nodo j se expresa por [Wei, et al., 2002]:

$$P_{ij} = \left(\frac{|V_i||V_j|}{X_{ij}} \right) \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3.25)$$

para que fluya la potencia activa en la dirección del nodo i al nodo j , P_{ij} debe de ser mayor que cero, por lo tanto, el valor $\sin(\delta_i - \delta_j)$ debe de ser positivo; es decir $\delta_i > \delta_j$. De tal manera, la existencia de un flujo circulante se detecta si el flujo a través de una

línea no cumple la Ecuación (3.25). El algoritmo implementado en esta tesis para detectar la existencia de algún flujo circulante de potencia activa funciona de la siguiente manera:

- Para cada rama se revisa si la potencia activa sale del nodo de envío y si además el ángulo de voltaje del nodo de recepción es mayor que el ángulo de voltaje del nodo de envío.
- Si ambas condiciones se cumplen dicha rama se marca como una posible trayectoria de flujo circulante y se analiza la siguiente rama.
- El procedimiento se repite para todas las ramas del sistema. Una vez analizadas todas las ramas y si no se marcó ninguna rama como posible trayectoria de flujo circulante, se termina el proceso y se indica que no existe flujo circulante de potencia activa en el sistema.
- Si existe alguna rama marcada como posible trayectoria de flujo circulante, se rastrea la continuidad del flujo a través de las demás ramas y si este llega al nodo de envío de la rama bajo análisis, se indica que existe flujo circulante de potencia activa por la rama analizada y se marcan todas las ramas por donde fluye esta potencia activa. En este caso, los nodos que limitan a las ramas con flujo circulante se integran dentro de un supernodo.
- Este procedimiento se realiza para todas las ramas marcadas como posibles flujos circulantes.

Esta metodología se ilustra esquemáticamente en el diagrama de flujo mostrado en la Figura A.6 del Apéndice A.

3.5.2. Rastreo hacia las cargas en sistemas con flujos circulantes de potencia activa.

El problema de los flujos circulantes o lazos de flujo es que no es posible determinar donde comienza y donde termina la circulación del flujo. Por eso es necesario implementar una metodología para poder hacer el rastreo de flujos de potencia en presencia de flujos

circulantes. En la Figura 3.4 se observa un claro ejemplo de flujo circulante, donde existe un flujo circulante entre los nodos 1, 2 y 4.

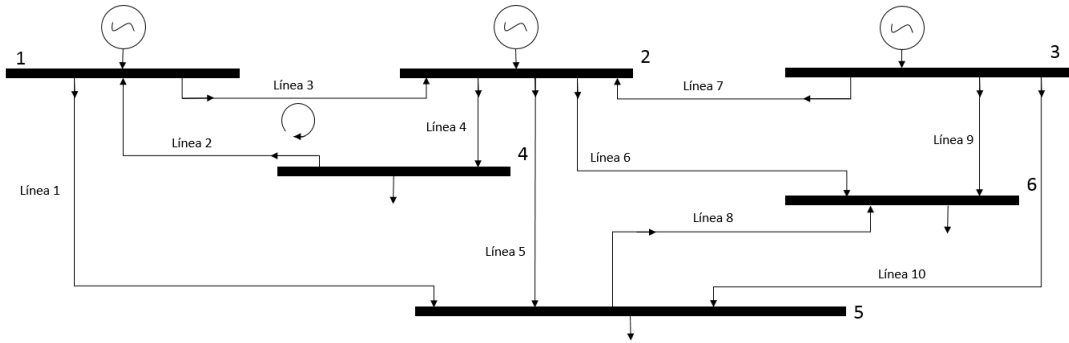


Figura 3.4: Sistema de 6 nodos con flujo circulante.

En ésta tesis se considera a los nodos por los cuales fluye el flujo circulante como un supernodo, y los flujos que fluyen por los elementos de transmisión que forman el flujo circulante se consideran como flujos internos de éste supernodo. En la Figura 3.5 se muestra el supernodo generado para el flujo circulante del sistema mostrado en la Figura 3.4.

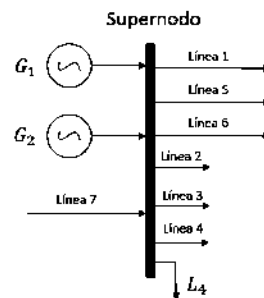


Figura 3.5: Supernodo formado por los nodos 1, 2 y 4 del sistema de 6 nodos con flujo circulante.

Al formar el supernodo con los elementos que forman el flujo circulante el sistema de transmisión se tiene una nueva topología de la red eléctrica, tal como se muestra en la Figura 3.6. Con ésta metodología es posible aplicar el rastreo de potencia tal como se

explicó en las secciones anteriores.

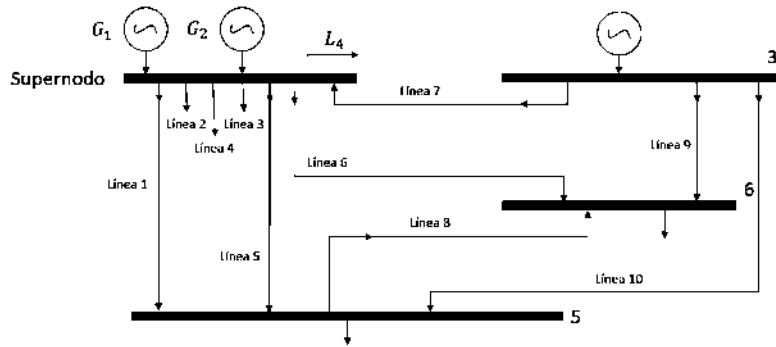


Figura 3.6: Sistema de 6 nodos con flujo circulante, simplificado con el concepto de supernodo.

Con la finalidad de mostrar la aplicación de esta propuesta y validar sus resultados se realiza el rastreo de flujos de potencia activa hacia las cargas del sistema de 6 nodos mostrados en las figuras 3.4 y 3.6 y cuyos datos se describen en el Apéndice B. En éste sistema existe flujo circulante de potencia activa entre los nodos 1, 2 y 4, a través de las ramas 1-2, 1-4 y 2-4, debido al transformador desfasador ubicado entre los nodos 1 y 4.

Los dominios de los generadores se muestran en la Tabla 3.11.

Tabla 3.11: Dominio de los generadores de potencia activa.

Generador	Dominio
1	1-2, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, 2-6, 5-6
2	1-2, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, 2-6, 5-6
3	1-2, 1-4, 1-5, 2-4, 2-5, 2-6, 3-2, 3-5, 3-6, 5-6

Con los dominios de los generadores e implementando el concepto de supernodo, se realiza el rastreo de flujos de potencia activa, los resultados de tal rastreo se muestran en las Tablas 3.12, 3.13 y 3.14.

Tabla 3.12: Contribución en MW de los generadores a los flujos de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

NE	NR	P_{D1}	P_{D2}	P_{D3}	Total	P_{ij}
1	2	44.5808	19.6357	0.2435	64.46	64.46
4	1	3.6724	1.6175	0.0201	5.31	5.31
1	5	37.5956	16.559	0.2053	54.36	54.36
3	2	0	0	0.65	0.65	0.65
2	4	54.533	24.0191	0.2978	78.85	78.85
2	5	6.4458	2.839	0.0352	9.32	9.32
2	6	15.5542	6.8509	0.085	22.49	22.49
3	5	0	0	15.37	15.37	15.37
3	6	0	0	43.98	43.98	43.98
5	6	2.893	1.2742	0.9927	5.16	5.16
NE	NR	P'_{D1}	P'_{D2}	P'_{D3}	Total	P'_{ij}
1	2	41.5239	18.2893	0.2268	60.04	60.04
4	1	3.6724	1.6175	0.0201	5.31	5.31
1	5	36.0257	15.8676	0.1968	52.09	52.09
3	2	0	0	0.62	0.62	0.62
2	4	52.0848	22.9408	0.2845	75.31	75.31
2	5	6.1138	2.6928	0.0334	8.84	8.84
2	6	15.2084	6.6986	0.0831	21.99	21.99
3	5	0	0	14.23	14.23	14.23
3	6	0	0	42.96	42.96	42.96
5	6	2.8314	1.2471	0.9716	5.05	5.05

Tabla 3.13: Contribución en MW de los generadores a las pérdidas de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

NE	NR	P_{lD1-ij}	P_{lD2-ij}	P_{lD3-ij}	Total	P_l
1	2	3.0569	1.3464	0.0167	4.42	4.42
1	4	0	0	0	0	0
1	5	1.5699	0.6915	0.0086	2.27	2.27
2	3	0	0	0.03	0.03	0.03
2	4	2.4483	1.0783	0.0134	3.54	3.54
2	5	0.332	0.1462	0.0018	0.48	0.48
2	6	0.3458	0.1523	0.0019	0.5	0.5
3	5	0	0	1.14	1.14	1.14
3	6	0	0	1.02	1.02	1.02
5	6	0.0617	0.0272	0.0212	0.11	0.11

Tabla 3.14: Contribución en MW de los generadores a las cargas de potencia activa para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

Nodo	P_{D1}	P_{D2}	P_{D3}	Total	P_{Li}
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0
4	48.4123	21.3233	0.2644	70	70
5	39.2465	17.2861	13.4674	70	70
6	18.0397	7.9456	44.0146	70	70

Capítulo 4

Método de rastreo de flujos de potencia reactiva.

4.1. Introducción.

En este capítulo se describe el procedimiento para obtener las contribuciones de las fuentes de potencia reactiva a los flujos de potencia reactiva inyectada en terminales de los elementos de transmisión y la cantidad total de potencia reactiva demandada por las cargas conectadas al sistema eléctrico de potencia. Asimismo, se describe un procedimiento que permite establecer una relación entre la cantidad total de potencia reactiva demandada por una carga específica y la cantidad de flujo de potencia reactiva en elementos de transmisión debida a la demanda de esa carga.

El método de rastreo de flujos de potencia reactiva difiere del método de rastreo de flujos de potencia activa, ya que en el primero es necesario considerar el efecto de la inyección de potencia reactiva por parte de algunos elementos del sistema de transmisión. La línea de transmisión es un ejemplo claro de este fenómeno, cuyo circuito eléctrico equivalente a frecuencia fundamental es representado por un modelo π , tal como se muestra en la Figura 4.1. En este modelo se tienen capacitores conectados en derivación en las terminales de la

línea, los cuales inyectan potencia reactiva. De tal manera, en las propuestas de rastreo de potencia reactiva descritas en este capítulo se toman en cuenta las inyecciones de potencia reactiva del sistema, las cuales están asociadas al efecto capacitivo de los elementos de transmisión, así como también la absorción de potencia reactiva debido al efecto inductivo de estos mismos elementos.

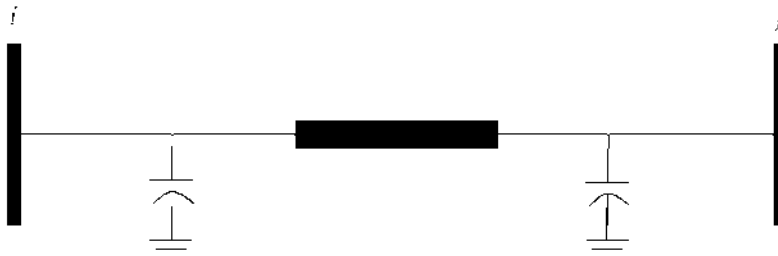


Figura 4.1: Modelo π de la línea de transmisión.

4.2. Rastreo hacia las cargas de la potencia reactiva.

4.2.1. Tipos de elementos de transmisión.

En ésta tesis se utiliza la clasificación de los elementos de transmisión propuesta en [Laguna, et al., 2001] para el rastreo de flujos de potencia reactiva hacia las cargas. Debido a la inyección de reactivos por el efecto capacitivo de las líneas de transmisión y a la absorción de reactivos por el efecto inductivo de los transformadores con derivación fuera del nominal, es necesario considerar estos distintos tipos de líneas o elementos del sistema para realizar el rastreo de los flujos de potencia reactiva. Estos tipos de líneas surgen al considerar las diferentes posibles direcciones que pueden tomar los flujos de potencia reactiva dentro de las secciones del modelo π de la línea, tal como se muestra en la Figura 4.2.

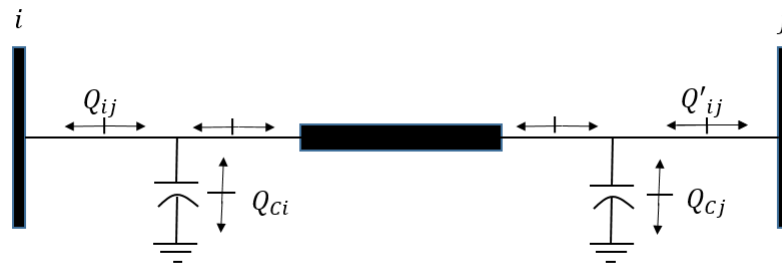


Figura 4.2: Direcciones posibles del flujo de potencia reactiva en las secciones del modelo π de la línea.

Los diferentes tipos de línea son los siguientes [Laguna, et al., 2001]:

- Línea tipo 1 (portadora). Éste tipo de línea se muestra esquemáticamente en la Figura 4.3, y puede considerarse como el tipo de línea más común debido a la característica de dirección de flujo de reactivos. Básicamente sus propiedades son: $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} > 0, Q_{Ci} > 0, Q_{Cj} > 0$ y $Q'_{ij} > Q_{Cj}$. El valor positivo de Q_{ij} indica que el flujo sale del nodo de envío i , un valor negativo de Q_{ij} indicaría que dicho flujo entra al nodo de envío i ; el valor positivo de Q'_{ij} indica que el flujo entra al nodo de recepción j , un valor negativo de Q'_{ij} indicaría que dicho flujo sale del nodo de recepción j . Para éste tipo de línea y con base a la Figura 4.3, la contribución de los generadores se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

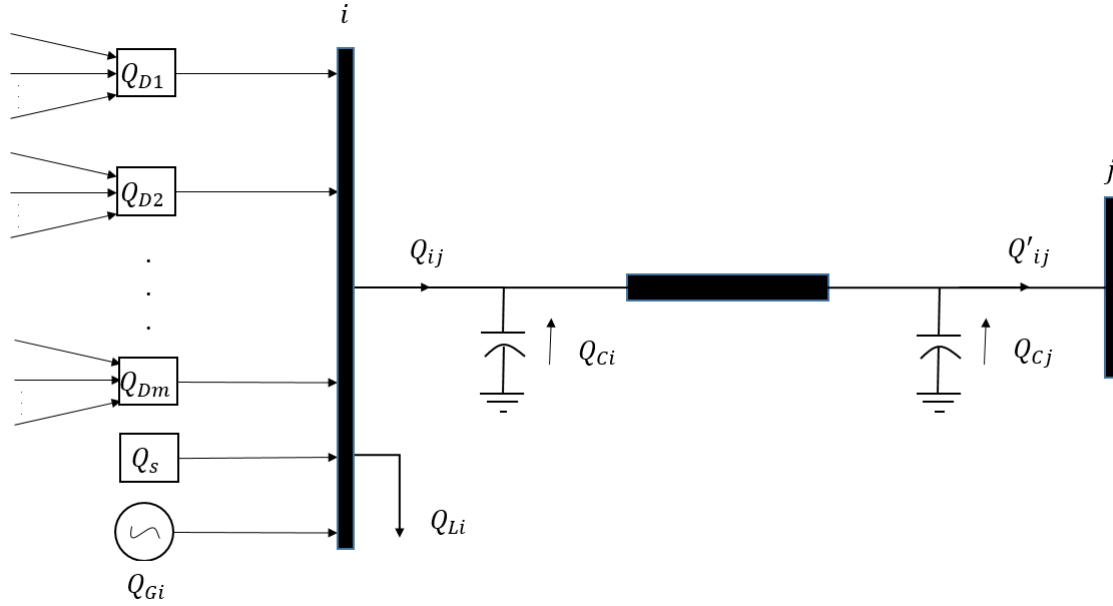


Figura 4.3: Línea tipo 1. Contribución de los generadores al flujo de potencia reactiva en la rama localizada entre el nodo i y el nodo j .

$$Q_{ij} = Q_{D1-ij} + Q_{D2-ij} + \cdots + Q_{Dm-ij} + Q_{Gi-ij} + Q_{s-ij} \quad (4.1)$$

$$Q'_{ij} = Q'_{D1-ij} + Q'_{D2-ij} + \cdots + Q'_{Dm-ij} + Q'_{Gi-ij} + Q'_{s-ij} \quad (4.2)$$

$$Q_{Dk-ij} = Q_{Dk} C_{ij}^q \quad (4.3)$$

$$Q'_{Dk-ij} = Q_{Dk-ij} C'_{ij}{}^q \quad (4.4)$$

$$Q_{Gi-ij} = Q_{Gi} C_{ij}^q \quad (4.5)$$

$$Q'_{Gi-ij} = Q_{Gi-ij} C'_{ij}{}^q \quad (4.6)$$

$$Q_{s-ij} = Q_s C_{ij}^q \quad (4.7)$$

$$Q'_{s-ij} = (Q_{s-ij} + Q_{Ci}) C'_{ij}{}^q + Q_{Cj} \quad (4.8)$$

$$C_{ij}^q = \frac{Q_{ij}}{Q_{D1} + Q_{D2} + \cdots + Q_{Dm} + Q_{Gi} + Q_s} \quad (4.9)$$

$$C'_{ij}{}^q = \frac{Q'_{ij} - Q_{Cj}}{Q_{ij} + Q_{Ci}} \quad (4.10)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$. Q_{Li} es la carga reactiva total conectada en el nodo i . Q_s es la inyección total de potencia reactiva en el nodo i debida a los elementos de transmisión que integran el sistema; toda esta inyección de potencia reactiva es agrupada en lo que se denomina inyección del sistema. Q_{ij} y Q'_{ij} están asociados a el flujo saliente y el flujo entrante a través de la rama conectada entre el nodo i y el nodo j , respectivamente, tal y como se observa en la Figura 4.3. Q_{D1}, \dots, Q_{Dm} son las contribuciones de potencia reactiva de los dominios $1, \dots, m$ al nodo i . $Q_{D1-ij}, \dots, Q_{Dm-ij}$ son las contribuciones de potencia reactiva de los dominios $1, \dots, m$ al flujo saliente Q_{ij} . $Q'_{D1-ij}, \dots, Q'_{Dm-ij}$ son las contribuciones de potencia reactiva de los dominios $1, \dots, m$ al flujo entrante Q'_{ij} . C_{ij}^q y $C'_{ij}{}^q$ representan los factores de proporcionalidad en el rastreo hacia las cargas para los flujos de envío y recepción de potencia reactiva, respectivamente.

Con la Ecuación (4.10) se calcula el factor de proporcionalidad para el flujo de potencia reactiva en la parte interna del modelo π de la línea. Para éste efecto se consideran las inyecciones de reactivos debidas al efecto capacitivo en los extremos de la línea, el total de las contribuciones de los generadores al flujo saliente Q_{ij} , así como el total de las contribuciones de los generadores al flujo entrante Q'_{ij} . El factor $C'_{ij}{}^q$ modifica las Ecuaciones (4.4) y (4.6), de tal forma que la proporcionalidad sea sólo consecuencia de la absorción de reactivos por parte de la línea, y dejando aparte como contribuciones del sistema a las inyecciones de reactivos en los extremos de la línea [Laguna, et al., 2001]. Tal como se describe en la Ecuación (4.8).

- Línea tipo 2 (absorbente). Este tipo de línea está formado por dos partes que poseen flujos con direcciones opuestas, con dirección hacia adentro de la línea tal como se muestra en la Figura 4.4. De tal manera, y con base a la dirección del flujo de potencia reactiva, el nodo de envío i pertenece al dominio del generador que está siendo analizado, pero no el nodo j . Éste último nodo puede pertenecer al dominio del generador analizado si es abastecido a través de alguna otra trayectoria de flujo. Las características de este tipo de línea son: $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} < 0, Q_{Ci} > 0$ y $Q_{Cj} > 0$.

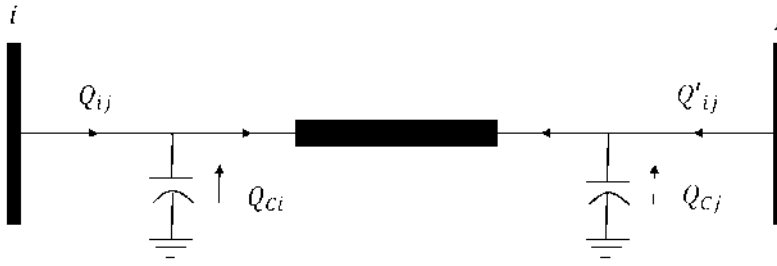


Figura 4.4: Línea tipo 2 (absorbente).

Para la línea tipo 2, se aplicarán las Ecuaciones (4.3) a (4.7) y (4.9) conjuntamente con las siguientes ecuaciones

$$C'_{ij}q = 0 \quad (4.11)$$

$$Q'_{s-ij} = 0 \quad (4.12)$$

- Línea tipo 3a (transformador porteador). Si en un transformador los derivadores se ajustan en un valor fuera del nominal, dicho transformador será representado como una línea de transmisión con una admitancia capacitiva en derivación y otra admitancia inductiva en derivación. Para éste caso, existen varias posibilidades, y la primera que se expone es la del transformador porteador, en el que la admitancia inductiva en derivación se encuentra en el nodo receptor del modelo π de la línea, como se muestra en la Figura 4.5. Las características de este tipo de línea son: $Q_{ij} > 0$, $Q'_{ij} > 0$, $Q_{Ci} > 0$ y $Q_{Cj} < 0$.

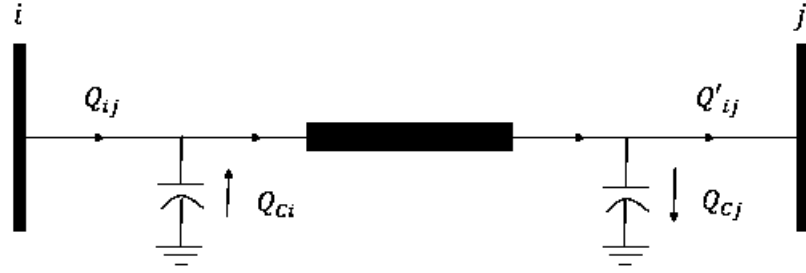


Figura 4.5: Línea tipo 3a (transformador porteador).

Para la línea tipo 3a, se aplicarán las Ecuaciones (4.3) a (4.7) y (4.9) conjuntamente con las siguientes ecuaciones

$$C'_{ij}{}^q = \frac{Q'_{ij} + Q_{Cj}}{Q_{ij} + Q_{Ci}} \quad (4.13)$$

$$Q'_{s-ij} = (Q_{s-ij} + Q_{Ci}) C'_{ij}{}^q - Q_{Cj} \quad (4.14)$$

- Línea tipo 3b (transformador porteador). Esta línea se muestra en la Figura 4.6. Se observa que representa a un transformador con derivador fuera de su valor nominal, pero con la característica de que la admitancia inductiva en derivación se encuentra en el nodo de envío del modelo π de línea. Sus propiedades son: $Q_{ij} > 0$, $Q'_{ij} > 0$, $Q_{Ci} < 0$, $Q_{Cj} > 0$, $Q_{ij} > |Q_{Ci}|$ y $Q'_{ij} > Q_{Cj}$.

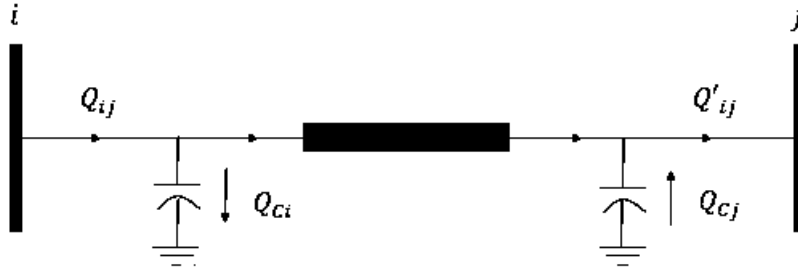


Figura 4.6: Línea tipo 3b (transformador porteador).

Para la línea tipo 3a, se aplicarán las Ecuaciones (4.3) a (4.7) y (4.9) conjuntamente con las siguientes ecuaciones

$$C'_{ij}{}^q = \frac{Q'_{ij} - Q_{Cj}}{Q_{ij} - Q_{Ci}} \quad (4.15)$$

$$Q'_{s-ij} = (Q_{s-ij} - Q_{Ci}) C'_{ij}{}^q + Q_{Cj} \quad (4.16)$$

- Línea tipo 4 (transformador absorbente-generador). Este tipo de línea se caracteriza por tener el flujo interno del modelo π de línea en dirección opuesta al sentido del análisis, tal como se muestra en la Figura 4.7. Esto se debe a que la admitancia inductiva en derivación se encuentra en el nodo de envío, y su flujo de reactivos es de magnitud mayor que el flujo entrante a la línea. Sus características son: $Q_{ij} > 0$, $Q'_{ij} > 0$, $Q_{Ci} < 0$, $Q_{Cj} > 0$, $|Q_{Ci}| Q_{ij}$ y $Q_{Cj} > Q'_{ij}$.

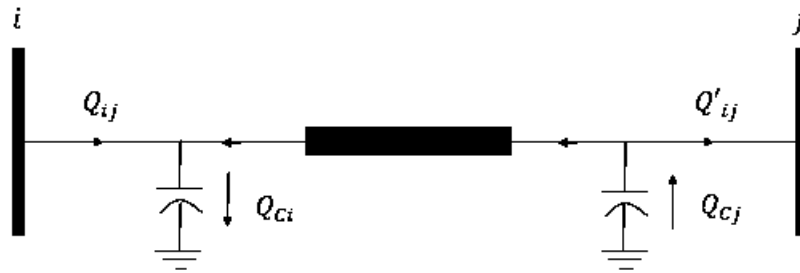


Figura 4.7: Línea tipo 4 (transformador absorbente-generador).

Este tipo de línea se analizará con las Ecuaciones (4.3) a (4.7), (4.9) y (4.11) conjuntamente con

$$Q'_{s-ij} = Q'_{ij} \quad (4.17)$$

- Línea tipo 5a (porteadora-generadora). Este tipo de línea se muestra esquemáticamente en la Figura 4.8. Se observa que existe un flujo interno en el modelo π de línea con dirección opuesta al sentido del análisis, ya que la inyección de reactivos por parte de la admitancia capacitiva que se encuentra en el nodo receptor es mayor que el flujo entrante al mismo nodo. Las propiedades de este tipo de línea son: $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} > 0, Q_{Ci} > 0, Q_{Cj} > 0$ y $Q_{Cj} > Q'_{ij}$. Este tipo de línea se analizará con las Ecuaciones (4.3) a (4.7), (4.9), (4.11) y (4.17).

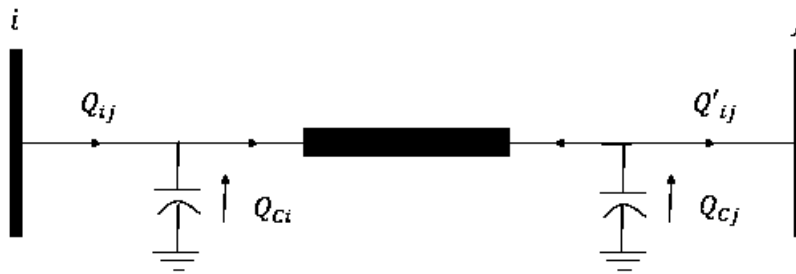


Figura 4.8: Línea tipo 5a (porteadora-generadora).

- Línea tipo 5b (transformador porteador-generador). En el caso de que algún transformador tenga los derivadores ajustados en un valor fuera del nominal con admitancia inductiva en el nodo de envío y que absorba reactivos por un valor absoluto menor que el flujo saliente de dicho nodo, se estará tratando con una línea semejante al caso anterior. Este transformador se muestra esquemáticamente en la Figura 4.9 y sus propiedades son: $Q_{ij} > 0$, $Q'_{ij} > 0$, $Q_{Ci} < 0$, $Q_{Cj} > 0$, $Q_{Cj} > Q'_{ij}$ y $|Q_{Ci}| < Q_{ij}$. Para la línea tipo 5b se utilizan las Ecuaciones (4.3) a (4.7), (4.9), (4.11) y (4.17).

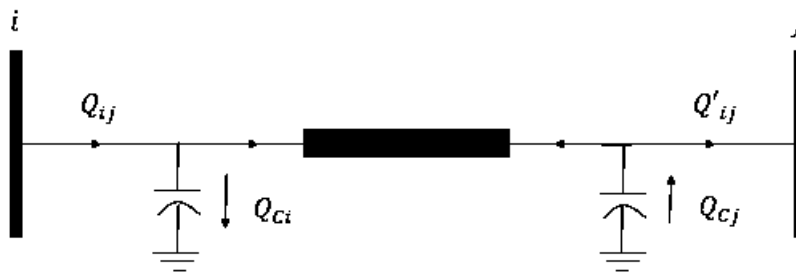


Figura 4.9: Línea tipo 5b (transformador porteador-generador).

- Línea tipo 6 (generadora). Este tipo de línea no pertenece a ningún dominio, ya que

los flujos de ambos extremos salen de la línea, tal como se muestra en la Figura 4.10. El sistema es la única fuente que contribuye a los flujos de este tipo de línea.

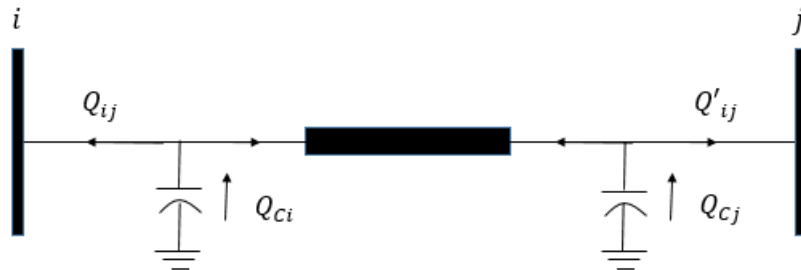


Figura 4.10: Línea tipo 6 (generadora).

- Línea tipo 7 (transformador absorbente-porteador ó transformador porteador-absorbente).

Cuando se da el caso de que algún transformador tenga los derivadores ajustados en un valor fuera del nominal, y la absorción de reactivos sea considerablemente grande, se representará dicho dispositivo como una línea semejante a la línea tipo 2 (absorbente). Este transformador estará caracterizado por dos conjuntos de condiciones: $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} < 0, Q_{Ci} < 0, Q_{Cj} > 0, Q_{Cj} > Q'_{ij}$ y $|Q_{Ci}| > Q_{ij}$ ó $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} < 0, Q_{Ci} > 0, Q_{Cj} < 0$ y $|Q_{Cj}| > |Q'_{ij}|$, dependiendo el sentido del análisis. Las representaciones esquemáticas de esta línea se muestran en la Figura 4.11. Para la línea tipo 7 se utilizan las Ecuaciones (4.3) a (4.7), (4.9), (4.11) y (4.12).

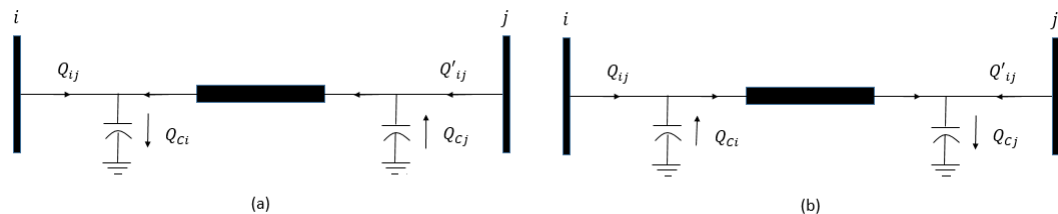


Figura 4.11: Línea tipo 7 [(a) transformador absorbente-porteador ó (b) transformador porteador-absorbente].

- Línea tipo 8 (transformador porteador-porteador). Este tipo de línea es la representación de un transformador con los derivadores ajustados en un valor fuera del nominal, semejante al caso anterior, pero con una variación en los flujos internos del modelo π de línea. Sus propiedades pueden ser: $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} < 0, Q_{Ci} > 0, Q_{Cj} < 0$ y $|Q_{Cj}| < Q'_{ij}$ ó $Q_{ij} > 0, Q'_{ij} < 0, Q_{Ci} < 0, Q_{Cj} > 0$ y $|Q_{Ci}| > Q_{ij}$, dependiendo el sentido del análisis. Para la línea tipo 8 se utilizan las Ecuaciones (4.3) a (4.7), (4.9), (4.11) y (4.12), mientras que su representación esquemática se muestra en la Figura 4.12.

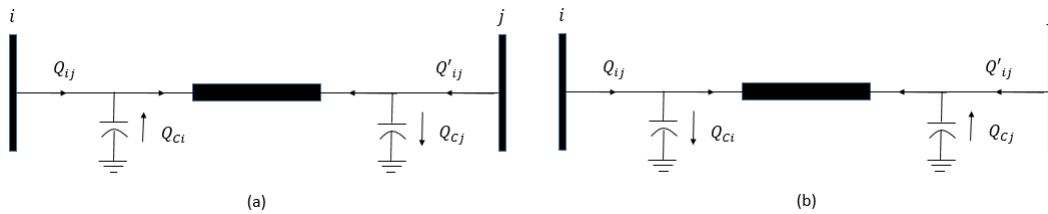


Figura 4.12: Línea tipo 8 [transformador porteador-porteador] (a) con admitancia inductiva en el nodo receptor ó (b) con admitancia inductiva en el nodo de envío].

- Línea tipo 0. Puede ser cualquier tipo de línea semejante a los tipos de líneas anteriormente mencionadas, con la diferencia de que no pertenece a dominio alguno. Puesto que este tipo de línea es parte del sistema eléctrico, debe ser tomada en cuenta en el análisis de absorción de reactivos en las líneas, pero debida solamente al sistema.

De los tipos de líneas anteriormente expuestas, solamente las líneas tipo 1, 3a y 3b permiten la continuidad del análisis y la determinación de los dominios de los generadores. Todos los demás tipos de líneas muestran flujos opuestos al análisis.

4.2.2. Dominio de las fuentes de potencia reactiva.

El dominio de las fuentes de potencia reactiva se obtiene tomando en cuenta los diferentes tipos de líneas mostrados en la sección anterior y de manera similar al procedimiento utilizado para la obtención del dominio de los generadores de potencia activa. El procedimiento para determinar el dominio de las fuentes de potencia reactiva se muestra

detalladamente en la Figura A.4 del Apéndice A.

4.2.3. Contribución de los generadores a la absorción de potencia reactiva por la red de transmisión.

Una vez definidas las aportaciones de cada generador y del sistema a los flujos de potencia reactiva, utilizando las ecuaciones correspondientes a cada tipo de línea, el cálculo de las contribuciones de dichas fuentes a la absorción de reactivos es relativamente sencillo. Para todo tipo de línea se usarán las mismas ecuaciones para determinar la contribución de las fuentes a la absorción de reactivos. Dichas ecuaciones se muestran a continuación.

La contribución del generador k a la absorción de potencia reactiva en la rama entre el nodo i y el nodo j es

$$Q_{lDk-ij} = Q_{Dk-ij} - Q'_{Dk-ij} \quad (4.18)$$

La absorción de potencia reactiva en la rama entre el nodo i y el nodo j es

$$Q_{l-ij} = Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj} \quad (4.19)$$

entonces la fracción de contribución del generador k a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} es

$$F_{QDk-ij} = \frac{Q_{lDk-ij}}{Q_{l-ij}} = \frac{Q_{Dk-ij} - Q'_{Dk-ij}}{Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}} \quad (4.20)$$

Para la contribución del sistema a la absorción de potencia reactiva en la rama entre el nodo i y el nodo j se utiliza la ecuación

$$Q_{ls-ij} = Q_{s-ij} - Q'_{s-ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj} \quad (4.21)$$

para el cálculo de la fracción de contribución del sistema a la absorción de potencia reactiva se utiliza la siguiente ecuación

$$F_{Qs-ij} = \frac{Q_{ls-ij}}{Q_{l-ij}} = \frac{Q_{s-ij} - Q'_{s-ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}}{Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}} \quad (4.22)$$

4.2.4. Contribución de los generadores a las cargas de potencia reactiva en los nodos del sistema.

Utilizando el principio de proporcionalidad y basándose en la Figura 4.13, la contribución de las fuentes a la carga total de potencia reactiva conectada al nodo i se determina utilizando las siguientes ecuaciones:

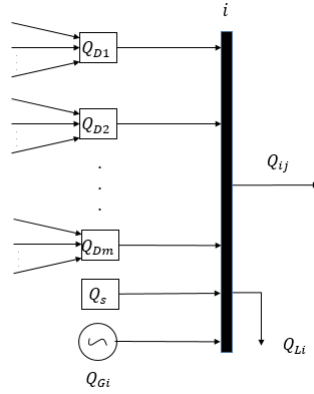


Figura 4.13: Contribución de las fuentes de potencia reactiva a la carga Q_{Li} .

$$Q_{Li} = Q_{D1}^{Li} + Q_{D2}^{Li} + \cdots + Q_{Dm}^{Li} + Q_s^{Li} + Q_{Gi}^{Li} \quad (4.23)$$

$$Q_{Dk}^{Li} = Q_{Dk} C_{Li}^q \quad (4.24)$$

$$Q_{Gi}^{Li} = Q_{Gi} C_{Li}^q \quad (4.25)$$

$$Q_s^{Li} = Q_{Dk} C_{Li}^q \quad (4.26)$$

$$C_{Li}^q = \frac{Q_{Li}}{Q_{D1} + Q_{D2} + \cdots + Q_{Dm} + Q_s + Q_{Gi}} \quad (4.27)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$. $Q_{D1}^{Li} + Q_{D2}^{Li} + \cdots + Q_{Dm}^{Li}$ son las contribuciones de las fuentes que conforman los dominios $1, 2, \dots, m$ a la potencia reactiva consumida por la carga Q_{Li} . Q_s^{Li} es la contribución del sistema a la potencia consumida por la carga Q_{Li} . C_{Li}^q es el factor de proporcionalidad de la carga de potencia reactiva conectada en el nodo i .

4.3. Rastreo hacia los generadores de la potencia reactiva.

Al igual que la potencia activa, también es posible realizar un rastreo para la potencia reactiva desde las cargas hasta las fuentes, este análisis se describirá enseguida. Los tipos de líneas descritos anteriormente y la Figura 4.14 sirven de base para describir las ecuaciones para realizar el rastreo hacia las cargas de la potencia reactiva.

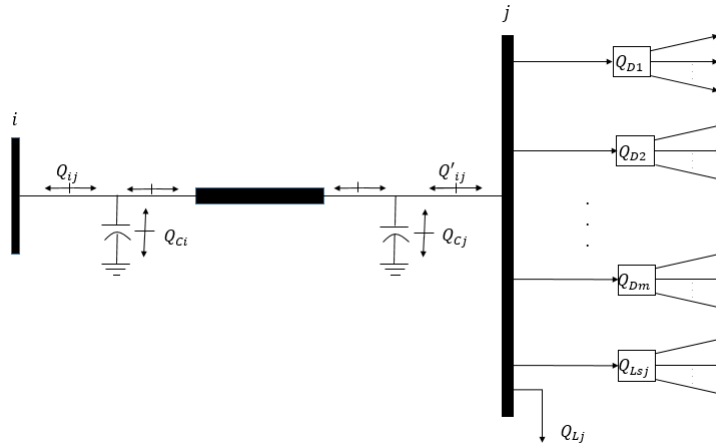


Figura 4.14: Contribución de las cargas al flujo de potencia reactiva de la rama entre el nodo i y el nodo j .

Para los tipos de línea 1, 3a y 3b, las cuales permiten la continuidad del análisis de rastreo se utilizarán las siguientes ecuaciones:

$$C_{ij}^{Lq} = \frac{Q'_{ij}}{Q_{D1} + Q_{D2} + \dots + Q_{Dm} + Q_{Lsj} + Q_{Lj}} \quad (4.28)$$

$$C_{ij}^{Lq} = \frac{Q_{ij}}{Q'_{ij}} \quad (4.29)$$

$$Q'_{DLk-ij} = Q_{Dk} C_{ij}^{Lq} \quad (4.30)$$

$$Q_{DLk-ij} = Q'_{DLk-ij} C_{ij}^{Lq} \quad (4.31)$$

$$Q'_{Lsj-ij} = Q_{Lsj} C_{ij}^{Lq} \quad (4.32)$$

$$Q_{Lsj-ij} = Q'_{Lsj-ij} C_{ij}^{Lq} \quad (4.33)$$

$$Q'_{Lj-ij} = Q_{Lj} C_{ij}^{Lq} \quad (4.34)$$

$$Q_{Lj-ij} = Q'_{Lj-ij} C_{ij}^{Lq} \quad (4.35)$$

donde $k = 1, 2, \dots, m$. Q_{Lsj} es la potencia reactiva total absorbida por el sistema en el nodo j , la cual se considera como carga adicional a la ya conectada en el nodo j para propósitos de rastreo, Q'_{Lsj-ij} y Q_{Lsj-ij} están asociados a la contribución de Q_{Lsj} al flujo entrante Q'_{ij} y al flujo saliente Q_{ij} , respectivamente. Q_{Lj} es la potencia reactiva total de la carga de potencia reactiva conectada en el nodo j . Q'_{Lj-ij} y Q_{Lj-ij} son la contribución de Q_{Lj} al flujo entrante Q'_{ij} y al flujo saliente Q_{ij} , respectivamente.

Para la línea tipo 6 únicamente el extremo receptor (el nodo j) pertenece al dominio de la carga bajo estudio, el nodo i puede pertenecer al dominio de la carga analizada si esta suministrando potencia a dicha carga a través de alguna otra trayectoria de flujo. Para el análisis de éste tipo de línea se utilizan las Ecuaciones (4.4) y (4.30) a (4.35) conjuntamente con

$$C_{ij}^{Lq} = 0 \quad (4.36)$$

Existen tipos de líneas en las que debido a la dirección de los flujos internos de potencia reactiva extraen este tipo de potencia de la red. En ésta tesis al extremo de la línea por la que se extrae potencia sin ser porteada se considera como una carga de potencia reactiva causada por el sistema. Uno de estos casos sucede para los tipos de línea 4, 5a y 5b, donde únicamente el nodo j pertenece al dominio de la carga bajo análisis, y el otro extremo se considera como una carga generada por el sistema. Para éstos tipos de líneas se utilizan las Ecuaciones (4.4), (4.30) a (4.35) y (4.36) en conjunto con las siguientes ecuaciones:

$$Q_{Lsi} = Q_{ij} \quad (4.37)$$

$$Q_{Lsi-ij} = Q_{ij} \quad (4.38)$$

Otro caso donde se consideran los flujos de la línea como carga del sistema sucede para los tipos de línea 2, 7 y 8, donde ambos extremos de la línea extraen potencia de la red. Estos tipos de líneas no pertenecen a ningún dominio, y se utilizan las Ecuaciones (4.37), (4.38), (4.39) y (4.40) para considerar ambos flujos de la línea como cargas del sistema.

$$Q_{Lsj} = |Q'_{ij}| \quad (4.39)$$

$$Q'_{Lsj-ij} = Q'_{ij} \quad (4.40)$$

4.3.1. Dominio de las cargas de potencia reactiva.

El dominio de las cargas reactivas se determina de manera similar al procedimiento utilizado para obtener del dominio de las cargas de potencia activa, pero tomando en cuenta los diferentes tipos de líneas mostrados en la Sección 4.2.1, dicho procedimiento se muestra detalladamente en la Figura A.5 del Apéndice A.

4.3.2. Contribución de las cargas a la absorción de potencia reactiva por la red de transmisión.

Para el cálculo de las contribuciones de los dominios de las cargas a la absorción de potencia reactiva, se utilizan las siguientes ecuaciones para todos los tipos de líneas

$$Q_{IDLk-ij} = \left(\frac{Q_{DLk-ij} - Q'_{DLk-ij}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \right) (Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}) \quad (4.41)$$

$$Q_{LLsj-ij} = \left(\frac{Q_{Lsj-ij} - Q'_{Lsj-ij}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \right) (Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}) \quad (4.42)$$

$$\begin{aligned} F_{QDLk-ij} &= \frac{Q_{IDLk-ij}}{Q_{l-ij}} = \frac{\left(\frac{Q'_{Dk} - Q''_{Dk}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \right) (Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj})}{Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}} \\ &= \frac{Q'_{Dk} - Q''_{Dk}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \end{aligned} \quad (4.43)$$

$$\begin{aligned} F_{QLsj-ij} &= \frac{Q_{LLsj-ij}}{Q_{l-ij}} = \frac{\left(\frac{Q_{Lsj-ij} - Q'_{Lsj-ij}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \right) (Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj})}{Q_{ij} - Q'_{ij} + Q_{Ci} + Q_{Cj}} \\ &= \frac{Q_{Lsj-ij} - Q'_{Lsj-ij}}{Q_{ij} - Q'_{ij}} \end{aligned} \quad (4.44)$$

donde $Q_{IDLk-ij}$ es la contribución de la carga k a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} , y $Q_{LLsj-ij}$ es la contribución de potencia reactiva de la carga Q_{Lsj} a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} . $F_{QDLk-ij}$ y $F_{QLsj-ij}$ son las fracciones de contribucion de la k -ésima carga y de la carga Q_{Lsj} a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} , respectivamente.

4.4. Rastreo de flujos de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.

En la Tabla 4.1 se muestran los flujos de potencia reactiva en MVar del sistema de 4 nodos descrito en el capítulo 2. En esta tabla se incluyen las inyecciones de potencia reactiva en ambos extremos de las ramas del sistema. Estos flujos también son mostrados esquemáticamente en la Figura 4.15.

Tabla 4.1: Flujos de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.

NE	NR	Q_{ij}	Q'_{ij}	Q_{Ci}	Q_{Cj}	Q_l	Tipo de línea
1	3	104.3576	59.9558	20.1601	15.1103	79.6722	1
1	2	-5.0006	35.8609	24.7681	22.747	6.6535	6
1	4	25.531	43.6433	24.3075	20.2132	26.4084	1
2	4	62.3698	60.064	9.522	8.6217	20.4495	1
4	3	23.7073	40.0442	13.8905	12.52	10.0735	1

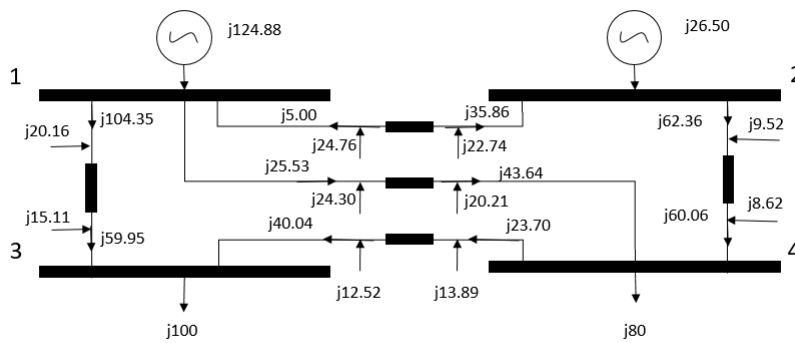


Figura 4.15: Flujos de potencia reactiva para el sistema de 4 nodos.

Los dominios de los generadores de potencia reactiva para el sistema de 4 nodos se muestran en las Figuras 4.16 y 4.17.

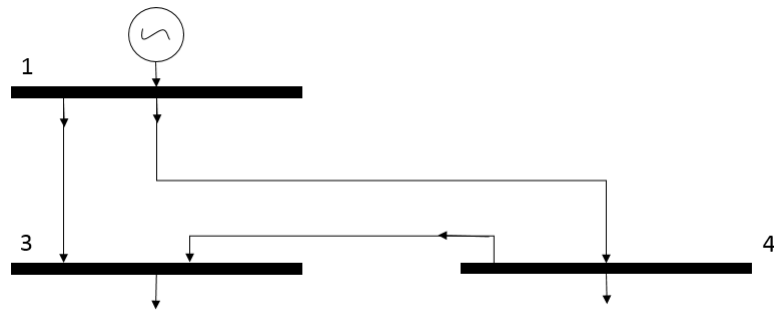


Figura 4.16: Dominio de la potencia reactiva del generador conectado en el nodo 1 para el sistema de 4 nodos.

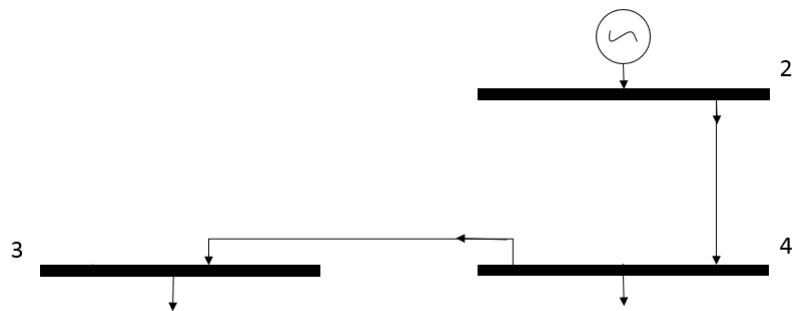


Figura 4.17: Dominio de la potencia reactiva del generador conectado en el nodo 2 para el sistema de 4 nodos.

Las contribuciones de las fuentes a los flujos de potencia reactiva de envío Q_{ij} y recepción Q'_{ij} en terminales de cada elemento de transmisión se muestran en las Tablas 4.2 y 4.3, respectivamente, donde NE es el nodo de envío y NR es el nodo de recepción. En este caso, Q_{D1-ij} es la contribución de la fuente de potencia reactiva conectada en el nodo 1 al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , Q_{s-ij} es la contribución de la potencia reactiva generada por el sistema (debido al efecto capacitivo de las líneas) al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , el superíndice ' indica que se trata del extremo receptor. Los valores de las contribuciones de ambas tablas se muestran en MVar.

Tabla 4.2: Contribución de las fuentes a los flujos de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	Q_{D1-ij}	Q_{D2-ij}	Q_{s-ij}	Total	Q_{ij}
1	3	100.3399	0	4.0177	104.3576	104.3576
1	2	0	0	-5.0006	-5.0006	-5.0006
1	4	24.5481	0	0.9829	25.531	25.531
2	4	0	26.5089	35.8609	62.3698	62.3698
4	3	2.6381	4.3362	16.733	23.7073	23.7073

Tabla 4.3: Contribución de las fuentes a los flujos de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	Q'_{D1-ij}	Q'_{D2-ij}	Q'_{s-ij}	Total	Q'_{ij}
1	3	36.1377	0	23.818	59.9558	59.9558
1	2	0	0	35.8609	35.8609	35.8609
1	4	11.5406	0	32.1028	43.6433	43.6433
2	4	0	18.9685	41.0955	60.064	60.064
4	3	1.9313	3.1744	34.9385	40.0442	40.0442

Las contribuciones de las fuentes de potencia reactiva a la absorción de reactivos en los elementos de transmisión se reportan en la Tabla 4.4, donde Q_{l-ij} es la potencia reactiva absorbida en la rama conectada entre los nodos i y j , Q_{lD1-ij} es la contribución del generador 1 a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} , y Q_{ls-ij} es la contribución del sistema a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} .

Tabla 4.4: Contribución de las fuentes a la absorción de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	Q_{lD1-ij}	Q_{lD2-ij}	Q_{ls-ij}	Total (MVar)	Q_{l-ij} (MVar)
1	3	64.2022	0	15.4701	79.6722	79.6722
1	2	0	0	6.6535	6.6535	6.6535
1	4	13.0075	0	13.4009	26.4084	26.4084
2	4	0	7.5404	12.9091	20.4495	20.4495
4	3	0.7068	1.1618	8.2049	10.0735	10.0735

De la misma manera, los dominios de las cargas de potencia reactiva para el sistema de 4 nodos se muestran en las Figuras 4.18 y 4.19.

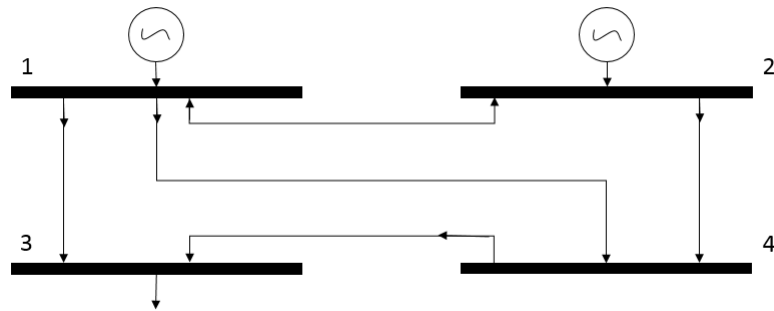


Figura 4.18: Dominio de la potencia reactiva de la carga en el nodo 3 para el sistema de 4 nodos.

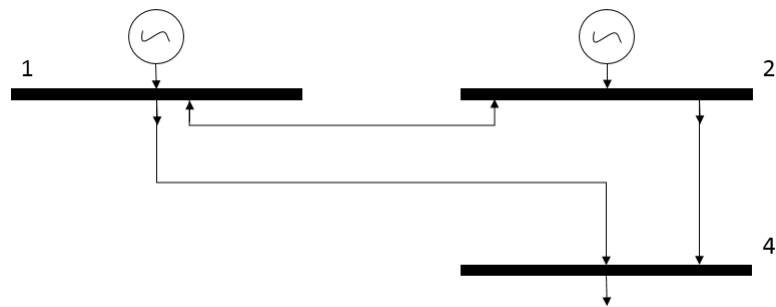


Figura 4.19: Dominio de la potencia reactiva de la carga en el nodo 4 para el sistema de 4 nodos.

Las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia reactiva de envío Q_{ij} y recepción Q'_{ij} se muestran en las Tablas 4.5 y 4.6, respectivamente, donde NE es el nodo de envío y NR es el nodo de recepción, Q_{DL3-ij} es la contribución de la carga de potencia reactiva conectada en el nodo 3 al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , Q_{Lsj-ij} es la contribución del sistema (carga de potencia reactiva causada por el sistema) al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , el superíndice ' indica que se trata del extremo receptor. Los valores de las contribuciones de ambas tablas se muestran en MVar.

Tabla 4.5: Contribución de las cargas a los flujos de envío de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	Q_{DL3-ij}	Q_{DLA-ij}	Q_{Lsj-ij}	Total	Q_{ij}
1	3	104.3576	0	0	104.3576	104.3576
1	2	-4.2424	-0.7582	0	-5.0006	-5.0006
1	4	5.8363	19.6947	0	25.531	25.531
2	4	14.2576	48.1122	0	62.3698	62.3698
4	3	23.7073	0	0	23.7073	23.7073

Tabla 4.6: Contribución de las cargas a los flujos de recepción de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	Q'_{DL3-ij}	Q'_{DLA-ij}	Q'_{Lsj-ij}	Total	Q'_{ij}
1	3	59.9558	0	0	59.9558	59.9558
1	2	8.1977	27.6632	0	35.8609	35.8609
1	4	9.9768	33.6665	0	43.6433	43.6433
2	4	13.7305	46.3335	0	60.064	60.064
4	3	40.0442	0	0	40.0442	40.0442

Las contribuciones de las cargas de potencia reactiva a la absorción de reactivos en los elementos de transmisión se reportan en la Tabla 4.7, donde Q_{l-ij} es la potencia reactiva absorbida en la rama conectada entre los nodos i y j , $Q_{lDL3-ij}$ es la contribución de la carga 3 a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} , y $Q_{lLsj-ij}$ es la contribución del sistema (carga de potencia reactiva causada por el sistema) a la absorción de potencia reactiva Q_{l-ij} .

Tabla 4.7: Contribución de las cargas a la absorción de potencia reactiva del sistema.

NE	NR	$Q_{lDL3-ij}$	$Q_{lDLA-ij}$	$Q_{lLsj-ij}$	Total (MVar)	Q_{l-ij} (MVar)
1	3	79.6722	0	0	79.6722	79.6722
1	2	2.0256	4.6279	0	6.6535	6.6535
1	4	6.0369	20.3715	0	26.4084	26.4084
2	4	4.6747	15.7748	0	20.4495	20.4495
4	3	10.0735	0	0	10.0735	10.0735

De las Tablas 4.4 y 4.7 se obtiene la Tabla 4.8, que muestra la contribución de las cargas a las absorción de potencia reactiva, identificando de que fuentes proviene la potencia reactiva absorbida por el sistema.

Tabla 4.8: Contribución en MVar de las cargas a la absorción de potencia reactiva del sistema, identificando las fuentes de potencia.

NE	NR	$Q_{IDL3-ij}$			$Q_{IDLA-ij}$			Q_{Lsj-ij}			Total	Q_{l-ij}
		Q_{G1}	Q_{G2}	Q_s	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_s	Q_{G1}	Q_{G2}	Q_s		
1	3	64.2022	0	15.4701	0	0	0	0	0	0	79.6723	79.6722
1	2	0	0	2.0256	0	0	4.6279	0	0	0	6.6535	6.6535
1	4	2.9735	0	3.0634	10.034	0	10.3375	0	0	0	26.4084	26.4084
2	4	0	1.7237	2.951	0	5.8167	9.9581	0	0	0	20.4495	20.4495
4	3	0.7068	1.1618	8.2049	0	0	0	0	0	0	10.0735	10.0735

Por último, las contribuciones de las fuentes de potencia reactiva a las cargas del sistema, se muestran en la Tabla 4.9. La potencia reactiva total generada por el sistema es igual a la suma de las inyecciones de potencia reactiva en las líneas debido al efecto capacitivo. Para este ejemplo del sistema de 4 nodos, la potencia reactiva total inyectada por el sistema es 171.8603 MVar, éste valor también se puede obtener al sumar la contribución del sistema a la absorción y a las cargas de potencia reactiva mostrados en las Tablas 4.4 y 4.9, respectivamente.

Tabla 4.9: Contribución de las fuentes de potencia reactiva a las cargas del sistema.

Nodo	Q_{D1}^{Li} (MVar)	Q_{D2}^{Li} (MVar)	Q_s^{Li} (MVar)	Total (MVar)	Q_{Li} (MVar)
1	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0
3	38.0691	3.1744	58.7566	100	100
4	8.9024	14.6323	56.4653	80	80

4.5. Flujos circulantes de potencia reactiva.

4.5.1. Condiciones necesarias para la existencia de flujos circulantes de potencia reactiva.

La única razón para que surjan flujos circulantes de potencia reactiva es que existan dispositivos reguladores de voltaje en la red, como los transformadores con tap variante bajo carga o compensadores estáticos de VARs.

Si se considera la red sin pérdidas, y se utiliza el modelo π de la línea de transmisión, el flujo de potencia reactiva Q'_{ij} en el nodo receptor de la línea se puede expresar por

[Wei, et al., 2002]

$$Q'_{ij} = \frac{(|V_i| \cos(\phi_{ij}) - |V_j|) |V_j|}{X_{ij}} \quad (4.45)$$

donde ϕ_{ij} es el ángulo de la impedancia de la línea, y el valor $\cos(\phi_{ij})$ en sistemas normales se encuentra en un rango entre 0 y 1. Para que Q'_{ij} sea mayor que cero $|V_i|$ debe de ser mucho mayor que $|V_j|$. De tal manera que si el flujo de recepción de potencia reactiva de alguna rama no satisface la Ecuación (4.45), significa que existe flujo circulante de potencia reactiva. En este contexto, la metodología para detectar flujos circulantes de potencia reactiva es similar a la implementada para detectar flujos circulantes de potencia activa, tomando únicamente en cuenta que las ramas marcadas como posible flujo circulante, son aquellas que no satisfacen la Ecuación (4.45). En la Figura A.7 del Apéndice A se muestra el diagrama de flujo implementado en ésta metodología.

4.5.2. Rastreo hacia las cargas en sistemas con flujos circulantes de potencia reactiva.

Para poder realizar el rastreo de flujos de potencia reactiva en sistemas con flujos circulantes de potencia reactiva se utiliza el mismo concepto de supernodo empleado en el capítulo anterior.

A continuación se realiza el rastreo de flujos de potencia reactiva hacia las cargas del sistema 6 nodos descrito anteriormente, al cual se le hicieron algunas modificaciones para generar el flujo circulante de potencia reactiva. Los datos del sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva se muestran en el Apéndice B. El flujo circulante de potencia reactiva se genera entre los nodos 1, 2 y 4, a través de las ramas 2-1, 1-4 y 4-2, tal como se muestra en la Figura 4.20. Para éste caso, las únicas fuentes que aportan potencia reactiva a los flujos y a las cargas del sistema son el generador 1, el generador 3 y el sistema a través de su efecto capacitivo. Los dominios de los generadores se muestran en la Tabla 4.10.

Tabla 4.12: Contribución en MVar de las fuentes a los flujos de potencia reactiva de recepción para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

NE	NR	Q'_{D1}	Q'_{D3}	Q'_s	Total	Q'_{ij}
2	1	5.1278	3.4624	4.2908	12.881	12.881
1	4	14.9243	10.077	12.4882	37.4896	37.4896
1	5	0	0	3.2013	3.2013	3.2013
3	2	0	13.2986	6.444	19.7426	19.7426
4	2	2.9456	1.9889	4.5694	9.5039	9.5039
5	2	0	0.7168	5.1803	5.8971	5.8971
6	2	0	2.8072	5.8102	8.6173	8.6173
3	5	0	7.6223	5.5328	13.1551	13.1551
3	6	0	28.2073	2.1814	30.3888	30.3888
5	6	0	0	2.9688	2.9688	2.9688

Por último, las contribuciones de las fuentes a la absorción de potencia reactiva en las líneas y la contribución a las cargas reactivas del sistema obtenidas por el rastreo de flujos se muestran en las Tablas 4.13 y 4.14, respectivamente.

Tabla 4.13: Contribución en MVar de las fuentes a la absorción de potencia reactiva para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

NE	NR	Q_{lD1-ij}	Q_{lD2-ij}	Q_{ls-ij}	Total (MW)	Q_{l-ij} (MW)
2	1	0.3503	0.2365	0.2931	0.8798	0.8798
1	4	1.4806	0.9997	1.2389	3.7191	3.7191
1	5	0	0	0.0005	0.0005	0.0005
3	2	0	0.6095	0.1505	0.7601	0.7601
4	2	0.036	0.0243	0.0429	0.1032	0.1032
5	2	0	0.091	0.3903	0.4813	0.4813
6	2	0	0.032	0.0363	0.0683	0.0683
3	5	0	0.2352	0.0857	0.3209	0.3209
3	6	0	1.0576	0.0414	1.0989	1.0989
5	6	0	0	0.4264	0.4264	0.4264

Tabla 4.14: Contribución de las fuentes a las cargas de potencia reactiva para el sistema de 6 nodos con flujo circulante.

Nodo	Q_{D1} (MW)	Q_{D3} (MW)	Q_s (MW)	Total (MW)	Q_{Li} (MW)
1	0	0	0	0	0
2	2.0193	12.896	15.0846	30	30
3	0	0	0	0	0
4	11.9428	8.0639	9.9934	30	30
5	0	6.8145	10.6212	17.4357	17.4357
6	0	25.3681	4.6319	30	30

Capítulo 5

Método para la asignación de costos.

5.1. Introducción.

En un mercado de energía eléctrica debe de existir una metodología para asignar los cobros por uso de la red de transmisión a los agentes que participan en el mercado eléctrico. En este contexto, se han propuesto diversos métodos para calcular el cobro por porteo de potencia activa, los cuales pueden ser clasificados como métodos encubiertos (Estampilla Postal, Ruta Contractual) y métodos basados en flujos de potencia (MW-milla, Contra Flujo y Flujo Dominante) [Marangon, 1995, Happ, 1994]. Sin embargo, este tipo de metodologías fueron desarrolladas bajo la falsa hipótesis de que el flujo de potencia eléctrica a través de la red de transmisión no puede ser rastreado a partir de una solución al problema de flujos de potencia. Puesto que lo anterior si es posible, se pueden plantear metodologías de cobro por porteo con base a la contribución de generadores o cargas al flujo total de potencia eléctrica transmitida a través de cada elemento de transmisión. Asimismo, es también posible asociar la cantidad de potencia eléctrica consumida por cada carga del sistema con respecto a la potencia de cada generador, así como las pérdidas que produce el consumo (la generación) de potencia de cada carga (generador) en cada uno de los elementos de transmisión. De tal manera, es también posible calcular costos de generación (consumo) de potencia eléctrica

para cada generador (carga) y costos por pérdidas en la red de transmisión asociadas a la generación (el consumo) de cada uno de los generadores (cargas). El cálculo de este tipo de costos es reportado en esta capítulo. Asimismo, el costo por porteo obtenido con la metodología propuesta es comparado contra el costo determinado por el método de la estampilla postal, actualmente utilizado en el mercado eléctrico mexicano.

5.2. Costo de producción de potencia eléctrica.

El costo de la potencia activa producida por una central eléctrica depende del tipo de energía primaria que está siendo utilizada para la generación de potencia. Puesto que en este trabajo solo se consideran centrales termoeléctricas, el costo de producción de potencia se calcula mediante un polinomio diferenciable de segundo grado dado por

$$C(P) = a_P + b_PP + c_PP^2 \quad \$/h \quad (5.1)$$

donde a_P , b_P , y c_P son los coeficientes de la función de costo de la potencia activa y se determinan experimentalmente, mientras que P es la potencia activa generada por la central eléctrica en MW.

De manera similar a la función de costo de la potencia activa de las centrales térmicas es posible representar una función de costo para la potencia reactiva [De and Goswami, 2012], donde sus coeficientes se derivan directamente de los coeficientes de la función de costo de la potencia activa y el ángulo de factor de potencia θ del generador. De tal manera, la función de costo de la potencia reactiva se puede representar como

$$C(Q) = a_Q + b_QQ + c_QQ^2 \quad \$/h \quad (5.2)$$

donde sus coeficientes se definen como $a_Q = a_P$, $b_Q = b_P \sin\theta$ y $c_Q = c_P \sin^2\theta$.

La potencia reactiva también puede ser generada por otros dispositivos eléctricos diferentes a los generadores, por lo que resulta necesario cuantificar el costo relacionado a esta generación de potencia reactiva. Los capacitores son una fuente de generación de potencia reactiva

y tienen costos de inversión muy altos pero costos de mantenimientos bajos. El costo de la potencia reactiva generada por un capacitor es [Dai, et al., 2002]

$$C(Q_{cap}) = \frac{Q_{cap}C_c}{lifespan \cdot usage} \quad (5.3)$$

donde Q_{cap} es la potencia reactiva de salida del capacitor en MVar, C_c es el costo de inversión del capacitor por MVar, $lifespan$ es el tiempo de vida del capacitor en horas y $usage$ es el tiempo que se usa el capacitor. Para propósitos de éste trabajo se asumen los siguientes valores $C_c = \$11,600/\text{MVar}$, $lifespan = 15$ años y $usage = 2/3$, reportados en [Dai, et al., 2002]. Con base a lo anterior se obtiene:

$$C(Q_{cap}) = \frac{Q_{cap} \cdot 11600}{15 \cdot 365 \cdot 24 \cdot (\frac{2}{3})} \$/\text{MVar} - h = \$0.1324 \cdot Q_{cap}/\text{MVar} - h \quad (5.4)$$

Otra fuente de generación de potencia reactiva son los condensadores síncronos, y en éste trabajo el costo de la potencia reactiva proveniente de un condensador síncrono es tomado como cinco veces el costo de la potencia reactiva proveniente de un capacitor. Por lo tanto, el costo de la potencia reactiva del condensador síncrono esta dado por [Dai, et al., 2002]

$$C(Q_{con}) = \$0.1324 \cdot Q_{con} \cdot 5/\text{MVar} - h = \$0.662 \cdot Q_{con}/\text{MVar} - h \quad (5.5)$$

El efecto capacitivo de las líneas es similar al comportamiento de un capacitor, por lo tanto el precio para la potencia suministrada por el efecto capacitivo de las líneas es calculado utilizando la ecuación (5.4) pero considerando el valor Q_{cap} como la potencia reactiva inyectada en terminales del elemento de transmisión.

5.3. Asignación de costos de generación, consumo y pérdidas de potencia

Como ya se demostró en los capítulos anteriores es posible identificar de manera clara y precisa la cantidad de potencia que suministra cada generador a cada una de las cargas del sistema, así como también es posible determinar las contribuciones de cada participante de la red a la pérdida de potencia activa y absorción de potencia reactiva en cada uno de los elementos de transmisión. De tal manera, es posible determinar los pagos

que debe realizar cada participante del mercado debido a los costos de generación, consumo y pérdidas de potencia. Lo anterior se ilustra numéricamente en esta sección utilizando los datos del rastreo de flujos obtenidos en los capítulos anteriores para el sistema de 4 nodos.

El cálculo del costo de la potencia activa de los dos generadores del sistema de 4 nodos se realiza mediante las siguientes funciones de costo,

$$C(P_{G1}) = 213.1 + 11.669P_{G1} + 0.00533P_{G1}^2 \quad (5.6)$$

$$C(P_{G2}) = 200 + 10.333P_{G2} + 0.00889P_{G2}^2 \quad (5.7)$$

Las funciones de costo de la potencia reactiva se obtienen utilizando la ecuación (5.2), mientras que el costo de la potencia reactiva suministrada por el efecto capacitivo de las líneas se calcula con la ecuación (5.4). Todos estos costos son reportados en la Tabla 5.1, donde el costo asociado a potencias se expresa en $\$/h$ y la potencias activa y reactiva se reportan en MW y MVar, respectivamente.

Tabla 5.1: Costo de la potencia activa y potencia reactiva generada en el sistema de 4 nodos.

Bus	P_g	$C(P_g)$	Q_g	$C(Q_g)$
1	400	5733.5	124.888	654.810555
2	114.2915	1497.10056	26.5089	262.208514
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
Q_s	0	0	171.8603	22.7543
total	514.2915	7230.60056	323.2572	939.773369

Utilizando los costos de la potencia generada reportados en la Tabla 5.1, así como los datos obtenidos del rastreo de potencia activa y potencia reactiva, se determinan los pagos correspondientes que debe realizar cada participante en el mercado por la potencia eléctrica consumida y por su contribución a las pérdidas de potencia. Es importante mencionar que el costo total por pérdidas de potencia se divide en partes iguales entre los conjuntos de generadores y cargas del sistema. De tal manera, los pagos, expresados en $\$/hr$, que deberán realizar los participantes de la red, así como el cobro de las fuentes de generación de potencia activa y potencia reactiva se muestran en las Tablas 5.2 y 5.3.

Tabla 5.2: Pagos por el consumo y pérdidas de potencia activa del sistema de 4 nodos.

Generador	Carga	$C(P_g)$	Pago por el consumo de MW	Pago por las pérdidas de MW	Pago Total
1	-	5733.5	0	88.576110	88.576110
2	-	1497.10056	0	12.656467	12.656467
-	3	0	4259.74107	69.415474	4329.15654
-	4	0	2768.39433	31.817096	2800.21143
Total		7230.60056	7028.1354	202.465147	7230.60055

Tabla 5.3: Pagos por el consumo y absorción de potencia reactiva del sistema de 4 nodos.

Generador	Carga	$C(Q_g)$	Pago por el consumo de MVar	Pago por la absorción de MVar	Pago Total
1	-	654.8106	0	204.2653	204.2653
2	-	262.2085	0	43.0382	43.0382
-	3	0	238.7813	194.3304	433.1117
-	4	0	198.8862	56.7225	255.6087
Q_s	-	22.7543	0	3.7495	3.7495
Total		939.7734	437.6675	502.1059	939.7734

En la Tabla 5.2 se puede observar que el costo total de la potencia activa generada (7230.60 \$/hr) se recupera con el pago total de las cargas por la potencia activa consumida (7028.13 \$/hr) y el pago total de los participantes del mercado por su contribución a las pérdidas de potencia activa en el sistema (202.46 \$/hr). De manera similar, en la Tabla 5.3 se reporta que el costo total de la potencia reactiva generada (939.77 \$/hr) se recupera con el pago total de las cargas por la potencia reactiva consumida (437.66 \$/hr) y el pago total de los participantes del mercado por su contribución a las absorciones de potencia reactiva en el sistema (502.10 \$/hr).

5.4. Cobro por el uso de la red de transmisión.

El costo total por el uso de la red involucra los costos de mantenimiento y operación de la red, así como el costo para la ampliación de dicha red. En los métodos que se describen a continuación, éste costo total se asigna a los usuarios del sistema en proporción al uso de la red.

Método de la estampilla postal.

Éste es el método que la Comisión Federal de Electricidad (CFE) utilizará en México para cobrar por uso de la Red Nacional de Transmisión (RNT) durante el periodo del 1 de enero de 2016 hasta el 31 de diciembre de 2018. Dicho cobro se realizará asignándole el 70 % del costo a los consumidores y el 30 % a los generadores [CRE, 2015].

En éste método, los cobros fijos por uso de la red de transmisión son asignados en proporción a la potencia consumida o generada por un agente: consumidor o generador. De tal manera, al agente u se le cobrará con base a la siguiente ecuación [Shimohammadi, et al., 1996]:

$$R(u) = \frac{W}{D} CFT \quad (5.8)$$

donde $R(u)$ es el cobro asignado al agente u , W es la potencia activa que genera o consume el agente u en su punto de conexión a la red eléctrica, D es la potencia activa total del sistema, y CFT es el costo fijo total de transmisión. En este contexto, la potencia activa total a ser considerada en (5.8) dependerá del tipo de agente; si se está obteniendo el cobro para un generador (consumidor), la potencia activa total corresponde a la suma de las potencias activas producidas (consumidas) por los generadores (consumidores) conectados al sistema. Para propósitos de esta tesis, se asigna un costo fijo para cada elemento de transmisión y la suma de estos costos dan como resultado el costo fijo total de transmisión CFT . Con éste método se recupera todo el CFT , además tiene las ventajas de ser muy simple y fácil de utilizar, pero tiene la desventaja de que ignora el uso real de los elementos de transmisión.

Método Modular.

El método modular es otra manera simple de asegurar la recuperación de todos los costos de transmisión, pero considerando de forma explícita el uso real de los elementos de transmisión. En este caso, el cobro por uso de la red de transmisión al u -ésimo agente es [Marangon, 1995]:

$$R(u) = \sum_{\text{toda } k} C_k \frac{|f_k(u)|}{\sum_{\text{toda } s} |f_k(s)|} \quad (5.9)$$

donde $R(u)$ es el cobro asignado al agente u , C_k es el costo del elemento de transmisión k , $f_k(u)$ es el flujo en MW a través del elemento de transmisión k causado por el agente u ,

$f_k(s)$ es el flujo en MW a través del elemento de transmisión k causado por el agente s , y $\sum_{\text{todas } s} |f_k(s)|$ es el flujo total en MW a través del elemento de transmisión k . Cabe mencionar que éste método de cobro es utilizado como parte del algoritmo propuesto. De tal manera, $f_k(u)$ es equivalente a la contribución de los dominios al flujo de potencia en cada elemento de transmisión, se obtuvieron en los capítulos anteriores.

Con la finalidad de demostrar que la ecuación (5.9) puede ser expresada en términos de las fracciones de contribución de los dominios a las pérdidas de potencia se realiza el siguiente procedimiento matemático a partir de la ecuación

$$S''_{Dk} = S'_{Dk} \left(\frac{S'_j}{S_j} \right) \quad (5.10)$$

donde S'_{Dk} es la potencia aparente que sale del nodo de envío del circuito (rama) j debido al dominio k ; S''_{Dk} es la potencia aparente que entra al nodo de recepción del circuito (rama) j debida al dominio k ; S_j es la potencia aparente total que sale del nodo de envío del circuito (rama) j ; y S'_j es la potencia aparente total que entra al nodo de recepción del circuito (rama) j .

La pérdida de potencia aparente a través del circuito (rama) j es dada por la diferencia entre la potencia aparente existente en terminales del circuito, tal como se reporta en la Figura 5.1 (a) [Laguna, et al., 2001]. Esta pérdida es considerada como una carga repartida de manera proporcional en cada nodo del circuito, tal como se ilustra en la Figura 5.1 (b) [Laguna, et al., 2001]. Con base a esta consideración, el flujo de potencia aparente que transita por el circuito (rama) j es la media aritmética de los flujos entrante y saliente, tal como se reporta en la Figura 5.1 (b) [Laguna, et al., 2001].

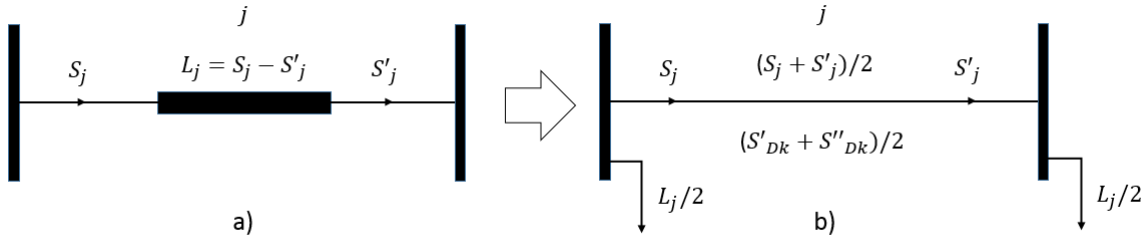


Figura 5.1: Determinación del flujo de potencia a través del elemento de transmisión j .

Con base a lo anteriormente descrito, el término del lado derecho de la ecuación (5.9) puede ser expresado por

$$\begin{aligned}
 \frac{|f_k(u)|}{\sum_{\text{todas } s} |f_k(s)|} &= \frac{\frac{S'_{Dk} + S''_{Dk}}{2}}{\frac{S_j + S'_j}{2}} = \frac{S'_{Dk} + S''_{Dk}}{S_j + S'_j} = \frac{S'_{Dk} + S'_{Dk} \left(\frac{S'_j}{S_j} \right)}{S_j + S'_j} = \frac{S'_{Dk} \left(1 + \frac{S'_j}{S_j} \right)}{S_j + S'_j} = \frac{S'_{Dk} \left(\frac{S_j + S'_j}{S_j} \right)}{S_j + S'_j} \\
 &= \frac{S'_{Dk}}{S_j + S'_j} = \frac{S'_{Dk} \left(\frac{S_j - S'_j}{S_j} \right)}{S_j - S'_j} = \frac{S'_{Dk} \left(\frac{S_j - S'_j}{S_j} \right)}{S_j - S'_j} = \frac{S'_{Dk} - S'_{Dk} \left(\frac{S'_j}{S_j} \right)}{S_j - S'_j} = \frac{S'_{Dk} - S''_{Dk}}{S_j - S'_j} \\
 &= F_{SDk-j}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

donde F_{SDk-j} es la fracción de contribución del dominio k a las pérdidas y absorciones de potencia en la rama j . Así la ecuación (5.9) se puede expresar como

$$R(u) = \sum_{\text{toda } k} C_k F_{SDk-j} \tag{5.12}$$

5.5. Método Modular vs Método de la Estampilla Postal.

Con la finalidad de mostrar las virtudes del método propuesto para asignar los cobros por uso de la red de transmisión se analiza un pequeño sistema de 5 nodos, comparando los resultados obtenidos mediante el método de la Estampilla Postal contra los resultados del método Modular. En ambos casos se reparte el costo por uso de cada elemento de transmisión en la proporción 30% a los generadores y 70% a las cargas, tal como se realiza dicho cobro en el mercado eléctrico mexicano. Los datos de éste pequeño sistema se muestran en el Apéndice B.

Para simplificar los cálculos, el cargo por el uso de una línea particular (en pu) es igual al valor de la resistencia de la línea en ohms [Bialek, 1997a]. Con los valores base del sistema se obtiene la impedancia base de 529Ω , y con éste valor se calcula el costo por el uso de cada línea transmisión en pu, como se reporta en la Tabla 5.4, donde R es la resistencia efectiva de la línea, expresada en por unidad (pu), NE y NR son el nodo de envío y el nodo de recepción, respectivamente. Para este sistema el costo total por el uso de la red de transmisión es 151.0824 pu.

Tabla 5.4: Costo por el uso de cada línea expresado en pu.

Línea		R	Costo
NE	NR	(pu)	(pu)
1	5	0.0423	22.3767
1	4	0.0635	33.5915
4	3	0.0317	16.7693
3	5	0.0317	16.7693
5	2	0.0529	27.9841
2	4	0.0635	33.5915

Las fracciones de contribución a las pérdidas de potencia activa por los generadores y por las cargas fueron obtenidas del rastreo de flujos de potencia, y se reportan en las Tablas 5.5 y 5.6, respectivamente. En la primera tabla se puede observar que el generador 3 no utiliza ningún elemento de transmisión y por lo tanto no contribuye a las pérdidas de potencia activa del sistema. La segunda tabla muestra que todas las cargas utilizan algún elemento de transmisión, de tal modo que todas contribuyen a las pérdidas de potencia activa del sistema.

Tabla 5.5: Fracciones de contribución de los generadores a las pérdidas de potencia activa.

Línea		Generador			
NE	NR	1	2	3	Total
1	5	1	0	0	1
1	4	1	0	0	1
2	5	0	1	0	1
2	4	0	1	0	1
4	3	0.3742	0.6258	0	1
5	3	0.4269	0.5731	0	1

Tabla 5.6: Fracciones de contribución de las cargas a las pérdidas de potencia activa.

Línea		Carga			
NE	NR	3	4	5	Total
1	5	0.1892	0	0.8108	1
1	4	0.2425	0.7575	0	1
2	5	0.1892	0	0.8108	1
2	4	0.2425	0.7575	0	1
4	3	1	0	0	1
5	3	1	0	0	1

Utilizando la ecuación (5.12) junto con los costos de las líneas reportados en la Tabla 5.4, así como las fracciones de contribución de los generadores (las cargas) a las pérdidas de potencia activa mostrados en las Tablas 5.5 y 5.6, se obtienen los pagos que deben realizar los participantes del mercado por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa (Tablas 5.7 y 5.8). Como se puede observar en la Tabla 5.7, el generador conectado en el nodo 3 no deberá pagar por el uso de la red de transmisión, ya que no utiliza la red y la potencia activa generada se consume en ese mismo nodo.

Tabla 5.7: Pago que deberán realizar los generadores por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa (Método Modular).

Línea		Pago por Generador (pu)			
NE	NR	1	2	3	Total
1	5	6.713	0	0	6.713
1	4	10.0775	0	0	10.0775
2	5	0	8.3952	0	8.3952
2	4	0	10.0775	0	10.0775
4	3	1.8826	3.1482	0	5.0308
5	3	2.1476	2.8832	0	5.0308
Total		20.8207	24.5041	0	45.3248

Tabla 5.8: Pago que deberán realizar las cargas por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa (Método Modular).

Línea		Pago por Carga (pu)			
NE	NR	3	4	5	Total
1	5	2.9634	0	12.7003	15.6637
1	4	5.7023	17.8117	0	23.514
2	5	3.706	0	15.8828	19.5889
2	4	5.7023	17.8117	0	23.514
4	3	11.7385	0	0	11.7385
5	3	11.7385	0	0	11.7385
Total		41.551	35.6234	28.5831	105.7576

En la siguiente tabla se muestran los pagos que deberán realizar las cargas y generadores por las pérdidas ocasionadas por el peaje de potencia activa al utilizar el método de la estampilla postal.

Tabla 5.9: Pago que deberán realizar las cargas y generadores por el peaje de potencia activa (Método de la Estampilla Postal).

Carga			Generador		
Nodo	Consumo de MW	Pago (pu)	Nodo	Generación de MW	Pago (pu)
3	60	25.3818	1	100	17.457
4	80	33.8425	2	150	26.1855
5	110	46.5334	3	9.63	1.6823
Total	250	105.7577	Total	259.63	45.3248

En la Tabla 5.9 se observa que con el método de la estampilla postal el generador conectado al nodo 3 pagará por el uso de la red de transmisión, aún sin estarla usando realmente; esto es debido a que el método no contempla el uso real del sistema y simplemente asigna los costos de transmisión a los participantes del mercado en proporción a la potencia que consumen o generan. De igual manera, al comparar los cobros a cada consumidor se observa que la mayor carga (carga conectada en el nodo 5) es la que más paga con el método de la estampilla postal, y en cambio con el método modular es la carga que paga menos debido a que utiliza pocos elementos de transmisión y con pocas pérdidas; el caso contrario ocurre para la menor carga (carga conectada en el nodo 3) ya que con el método modular es la carga que más paga y con el método de la estampilla postal es la que menos paga. Por último, ambas metodologías recuperan el costo total por uso de la red de transmisión, 151.0824 pu.

5.6. Comparación del método propuesto para el pago de peaje de potencia reactiva.

En esta sección se comparan los resultados obtenidos por el método implementado en este trabajo contra los resultados presentados en [Bialek, 1998] para el pago del peaje de potencia reactiva en un sistema de 4 nodos. Cabe mencionar que en [Bialek, 1998] también utilizan el método modular para el peaje de la potencia reactiva, la diferencia en los resultados que se presentan a continuación es debido a que en [Bialek, 1998] utilizan el falso concepto de nodos ficticios para realizar el rastreo de flujos de potencia reactiva. Los flujos de potencia, y los valores de la potencia consumida y generada en este sistema se muestran en las Tablas 5.10 y 5.11. El superíndice ' indica flujo de potencia en el nodo de recepción.

Tabla 5.10: Flujos de potencia del sistema de 4 nodos reportados en [Bialek, 1998].

Línea		Flujos de potencia			
NE	NR	P_{ij} (MW)	P'_{ij} (MW)	Q_{ij} (MVar)	Q'_{ij} (MVar)
1	2	27	26	-35	17
1	3	78	76	-7	13
1	4	295	277	92	58
2	3	153	149	27	24
3	4	25	23	36	42

Tabla 5.11: Potencia consumida y generada reportada en [Bialek, 1998] para el sistema de 4 nodos.

Nodo	Carga		Generación	
	P_d (MW)	Q_d (MVar)	P_g (MW)	Q_g (MVar)
1	100	70	500	120
2	50	20	177	30
3	200	100	0	99
4	300	100	0	0

De acuerdo a [Bialek, 1998], los cargos marginales/incrementales por uso de la red de transmisión no logran recuperar todos los costos necesarios para la transmisión de potencia eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo, por lo que en [Bialek, 1998] se propone asignar un costo suplementario a las cargas para poder recuperar todos los costos asociados a la transmisión de potencia eléctrica. El peaje para

la potencia activa y potencia reactiva para este cargo suplementario se realiza utilizando la Tabla 5.12.

Tabla 5.12: Costos del peaje de potencia activa y reactiva [Bialek, 1998].

line		C	C^p	C^q	C^c
from	to	\$	\$	\$	\$
1	2	4	0.22	0.37	3.41
		4	0.29	0.12	3.59
2	3	1	0.5	0.02	0.48
		1	0.49	0.01	0.5
3	4	2	0.1	0.2	1.7
		2	0.07	0.25	1.68
1	4	1	0.94	0.06	0
		1	0.9	0.04	0.06
1	3	3	0.78	0.01	2.21
		3	0.75	0.02	2.23
Total		22	5.04	1.1	15.86

donde el costo es presentado en unidades monetarias denotadas simbólicamente por \$, C es el costo medio de la línea de transmisión y se puede desglosar en el costo de la capacidad usada de la línea C^u y en el costo de la capacidad no usada C^c (para el cálculo de los costos C^u y C^c en este ejemplo se considera una capacidad de potencia de 300 MVA para todas las líneas) ; C^p es el costo asociado con el flujo de potencia activa; C^q es el costo asociado con el flujo de potencia reactiva; y C^c es el costo de la capacidad no usada de la línea. Los valores de C^p y C^q se obtienen de la siguiente expresión [Bialek, 1998]:

$$C_{jl}^u = C_{jl}^u \frac{P_{jl}^2}{P_{jl}^2 + Q_{jl}^2} + C_{jl}^u \frac{Q_{jl}^2}{P_{jl}^2 + Q_{jl}^2} = C_{jl}^p + C_{jl}^q \quad (5.13)$$

donde

$$C_{jl}^u = C \frac{\sqrt{P_{jl}^2 + Q_{jl}^2}}{300} \quad (5.14)$$

$$C_{jl}^p = C_{jl}^u \frac{P_{jl}^2}{P_{jl}^2 + Q_{jl}^2} \quad (5.15)$$

$$C_{jl}^q = C_{jl}^u \frac{Q_{jl}^2}{P_{jl}^2 + Q_{jl}^2} \quad (5.16)$$

Los pagos que deben de realizar las cargas reactivas del sistema por el peaje de potencia reactiva se presenta en la Tabla 5.13, según [Bialek, 1998].

Tabla 5.13: Asignación del costo C^q para cargas de potencia reactiva obtenido por [Bialek, 1998].

Load	Line					Total \$
	1-2 \$	2-3 \$	3-4 \$	1-4 \$	1-3 \$	
Q_{L1}	0	0	0	0	0	0
Q_{L2}	0	0	0	0	0	0
Q_{L3}	0	0.01	0	0	0	0.01
Q_{L4}	0	0	0.34	0.07	0	0.41
Total	0	0.01	0.34	0.07	0	0.42

Como se puede ver en la Tabla 5.13 con la metodología empleada en [Bialek, 1998] no se recupera todo el costo C^q , así que para obtener el costo faltante y el costo de la capacidad no utilizada C^c , proponen repartir dicho costo entre las cargas de potencia activa usando el método de la estampilla postal.

Las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia reactiva (expresados en MVars) obtenidas del rastreo río abajo se muestran en la Tabla 5.14, donde la parte superior de la tabla muestra las contribuciones de las cargas a los flujos de potencia reactiva en el nodo de envío Q_{ij} y la parte inferior se refiere a las contribuciones a los flujos de potencia reactiva en el nodo de recepción Q'_{ij} , Q_{DL1-ij} es la contribución de la carga de potencia reactiva conectada en el nodo 1 al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , Q_{Lsj-ij} es la contribución de la carga de potencia reactiva causada por el sistema (véase sección 4.3) al flujo de envío de potencia reactiva Q_{ij} , el superíndice ' indica que se trata del extremo receptor.

Tabla 5.14: Contribución de las cargas a los flujos de potencia reactiva.

NE	NR	Q_{DL1-ij}	Q_{DL2-ij}	Q_{DL3-ij}	Q_{DL4-ij}	Q_{Lsj-ij}	Total	Q_{ij}
1	2	-15.123457	0	0	-19.876543	0	-35	-35
1	3	-3.024691	0	0	-3.975309	0	-7	-7
1	4	0	0	0	92	0	92	92
2	3	0	0	19.852941	7.147059	0	27	27
3	4	0	0	0	36	0	36	36
NE	NR	Q'_{DL1-ij}	Q'_{DL2-ij}	Q'_{DL3-ij}	Q'_{DL4-ij}	Q'_{Lsj-ij}	Total	Q'_{ij}
1	2	0	7.234043	7.180851	2.585106	0	17	17
1	3	0	0	9.558824	3.441176	0	13	13
1	4	0	0	0	58	0	58	58
2	3	0	0	17.647059	6.352941	0	24	24
3	4	0	0	0	42	0	42	42

Utilizando la metodología propuesta, se puede obtener todo el costo C^q tal como se muestra en la Tabla 5.15, dicha tabla se obtuvo del costo C^q de cada línea y de la contribución de las cargas a los flujos de potencia reactiva, utilizando el método modular. Aunque en este ejemplo solo se recupera el costo de la capacidad utilizada C^q , es posible obtener el costo total C utilizando las contribuciones de los generadores/cargas a los flujos de potencia activa y potencia reactiva, esta metodología es atractiva desde el punto de vista de que solo pagaran los usuarios de la red por el uso de los elementos que realmente están utilizando.

Tabla 5.15: Asignación del costo C^q para cargas de potencia reactiva, obtenido por el rastreo de flujos de potencia reactiva, implementado en esta tesis.

Load	Line					Total
	1-2	2-3	3-4	1-4	1-3	
	\$	\$	\$	\$	\$	\$
Q_{L1}	0.160	0	0	0	0.004	0.164
Q_{L2}	0.051	0	0	0	0	0.051
Q_{L3}	0.051	0.022	0	0	0.015	0.087
Q_{L4}	0.228	0.008	0.450	0.100	0.011	0.797
Total	0.490	0.030	0.450	0.100	0.030	1.100

Capítulo 6

Conclusiones.

6.1. Conclusiones Generales.

Al término de esta tesis las conclusiones que se obtuvieron son las siguientes:

- Es posible determinar la contribución de las cargas a la pérdida de potencia activa y absorción de potencia reactiva en los elementos de transmisión identificando de que fuentes proviene la potencia pérdida/absorbida.
- El uso del concepto de “supernodo” en la metodología implementada en esta tesis para realizar el rastreo de flujos de potencia río arriba en sistemas eléctricos con flujos circulantes evita que el algoritmo caiga dentro de un ciclo de cálculo infinito y determina apropiadamente la contribución de cada fuente a los flujos de potencia activa y reactiva que circula por los elementos de transmisión. Cabe mencionar que el algoritmo no considera el caso de sistemas de potencia con múltiples flujos circulantes empalmados (que compartan uno o más elementos de transmisión), ya que quedarían supernodos dentro de otros supernodos o puede existir la intersección de dos o más supernodos.
- El sistema eléctrico de potencia es una importante fuente de potencia reactiva ya que debido al efecto capacitivo de las líneas de transmisión inyecta una considerable cantidad de potencia reactiva en las terminales de los elementos de transmisión. Por tal motivo, se le debe retribuir monetariamente al dueño de la red de transmisión.

- El algoritmo utilizado en esta tesis se aplicó a 7 sistemas eléctricos de diferentes dimensiones, obteniéndose resultados satisfactorios en el cálculo de las contribuciones de las fuentes/cargas a los flujos de potencia activa y potencia reactiva.
- De la comparación de los resultados de la metodología propuesta en esta tesis para el pago de peaje de potencia activa contra los resultados presentados en [Bialek, 1998], se concluye que con el método aquí descrito se recupera todo el costo de la capacidad utilizada asociado al flujo de potencia reactiva C^q . Además es posible recuperar el costo total por el peaje de potencia C utilizando las contribuciones de los generadores/cargas a los flujos de potencia activa y potencia reactiva.
- Al comparar el método modular (método utilizado en esta tesis) contra el método de la estampilla postal (método utilizado en el MEM) para realizar el cobro por el uso de la red de transmisión, se concluye que el primer método contempla el uso real de la red de transmisión y que además resulta atractivo para los generadores (las cargas) que se encuentran físicamente cerca de las cargas (los generadores) ya que son los usuarios del sistema que pagaran menos por el uso de la red de transmisión, el segundo método es atractivo para las cargas (los generadores) que consumen (generan) menos potencia eléctrica sin importar que sean los usuarios que utilizan más elementos de la red de transmisión.

6.2. Trabajos Futuros.

Para extender y complementar la investigación realizada en esta tesis los trabajos futuros que se visulizan son los siguientes:

1. Desarrollar una versión mejor y más eficiente del algoritmo utilizado en esta tesis para el rastreo de flujos de potencia. Trabajar con el rastreo de flujos de potencia cuando existen múltiples flujos circulantes empalmados en el mismo sistema eléctrico.
2. Aplicar el rastreo de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia cuando ocurren colapsos de voltaje, para determinar responsabilidades y asignar las multas correspondientes.

3. Implementar una metodología similar a la propuesta en esta tesis para realizar el rastreo de señales armónicas y transitorias.
4. Desarrollar un prototipo para el rastreo de flujos de potencia activa y reactiva en sistemas eléctricos de potencia trifásicos.
5. Utilizar el concepto de “supernodo” para realizar el rastreo de flujos de potencia hacia los generadores en sistemas con flujos circulantes.

Apéndice A

Diagramas de flujo

A continuación se presenta el diagrama de flujo para determinar las ramas que conforman el dominio de los nodos del sistema por medio del rastreo hacia las cargas (rastreo río arriba) de potencia activa.

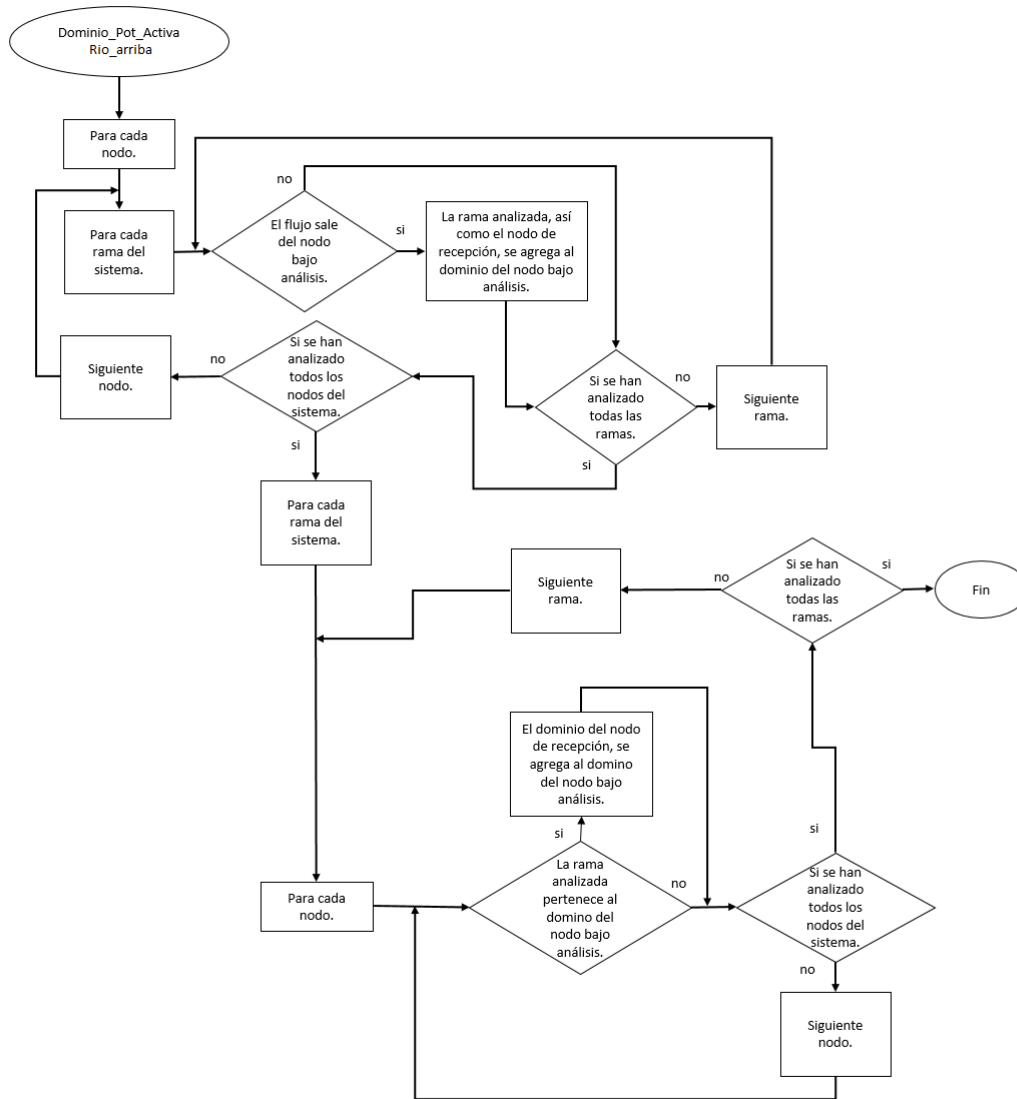


Figura A.1: Diagrama de flujo para obtener los dominios de nodos por medio del rastreo hacia las cargas de flujos de potencia activa.

Para determinar las líneas que conforman el dominio de los nodos por medio del rastreo hacia los generadores (rastreo río abajo) de potencia activa, se siguen las instrucciones del diagrama de la Figura A.2.

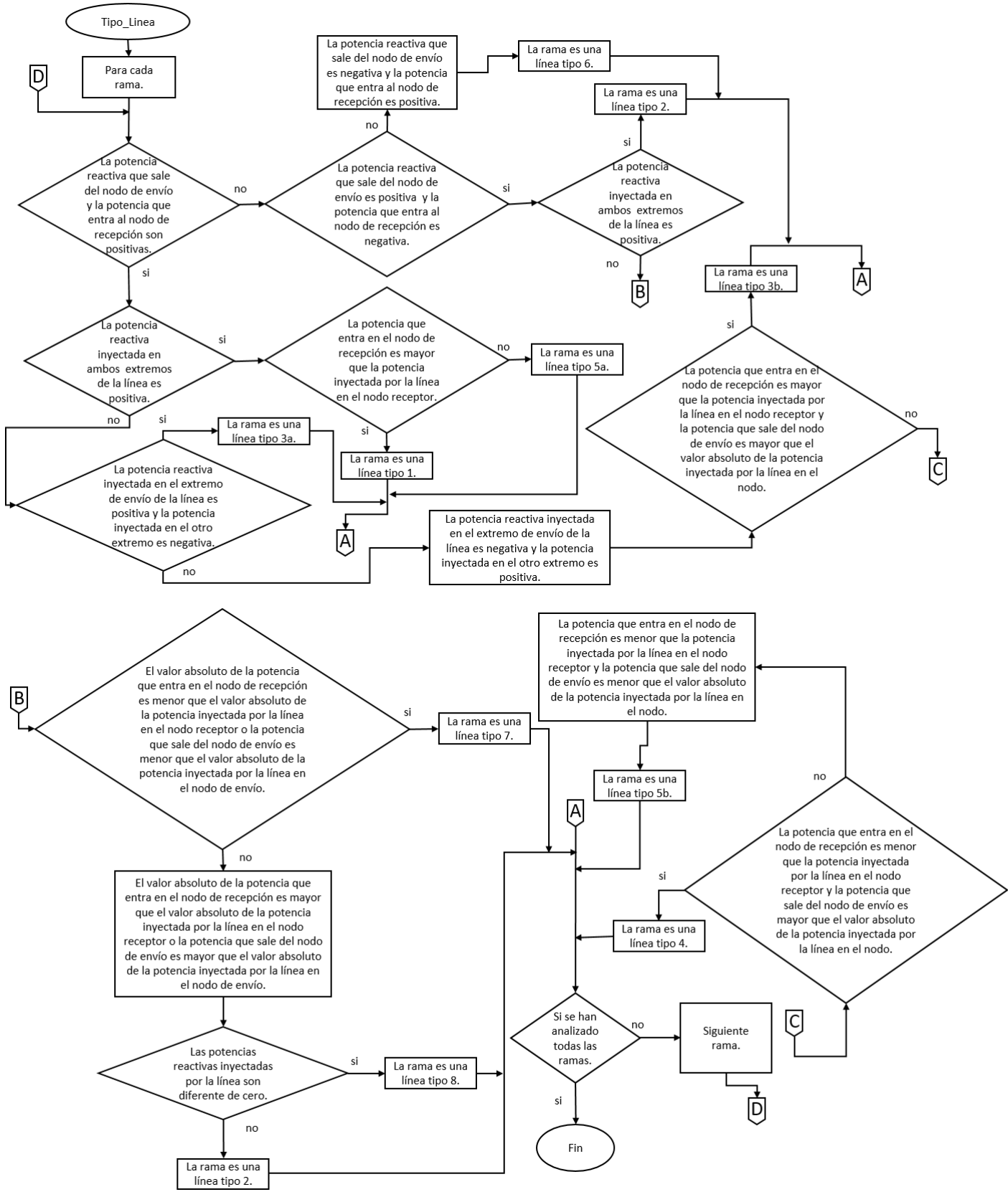


Figura A.3: Diagrama de flujo utilizado para identificar los tipos de líneas del sistema.

Después de identificar los tipos de líneas (Figura A.3) es posible determinar el dominio de los nodos tanto para el rastreo hacia las cargas como para el rastreo hacia los generadores, estos dominios se determinan utilizando los diagramas de las Figuras A.4 y A.5, respectivamente.

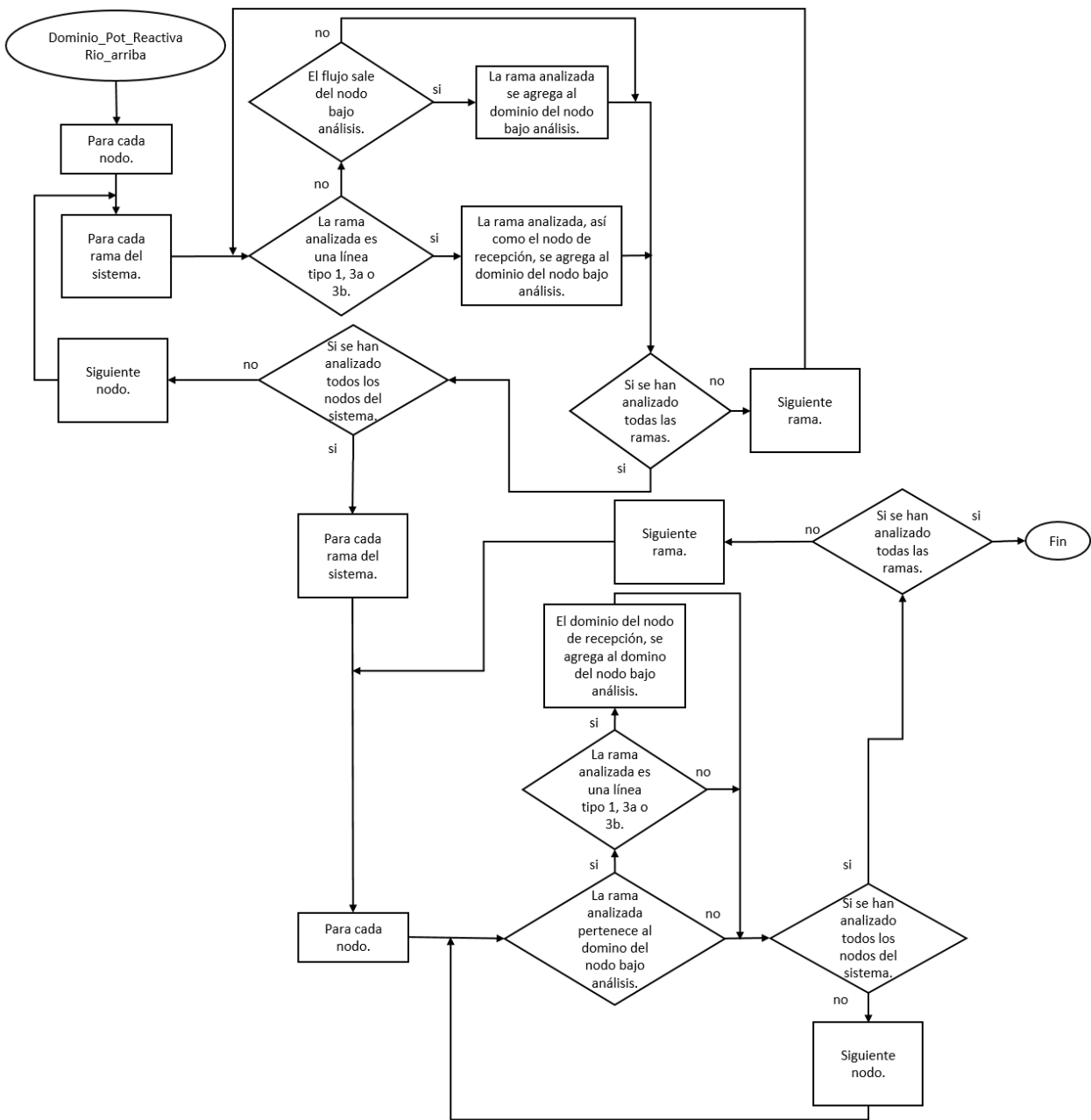


Figura A.4: Diagrama de flujo para obtener los dominios mediante el rastreo hacia las cargas de flujos de potencia reactiva.

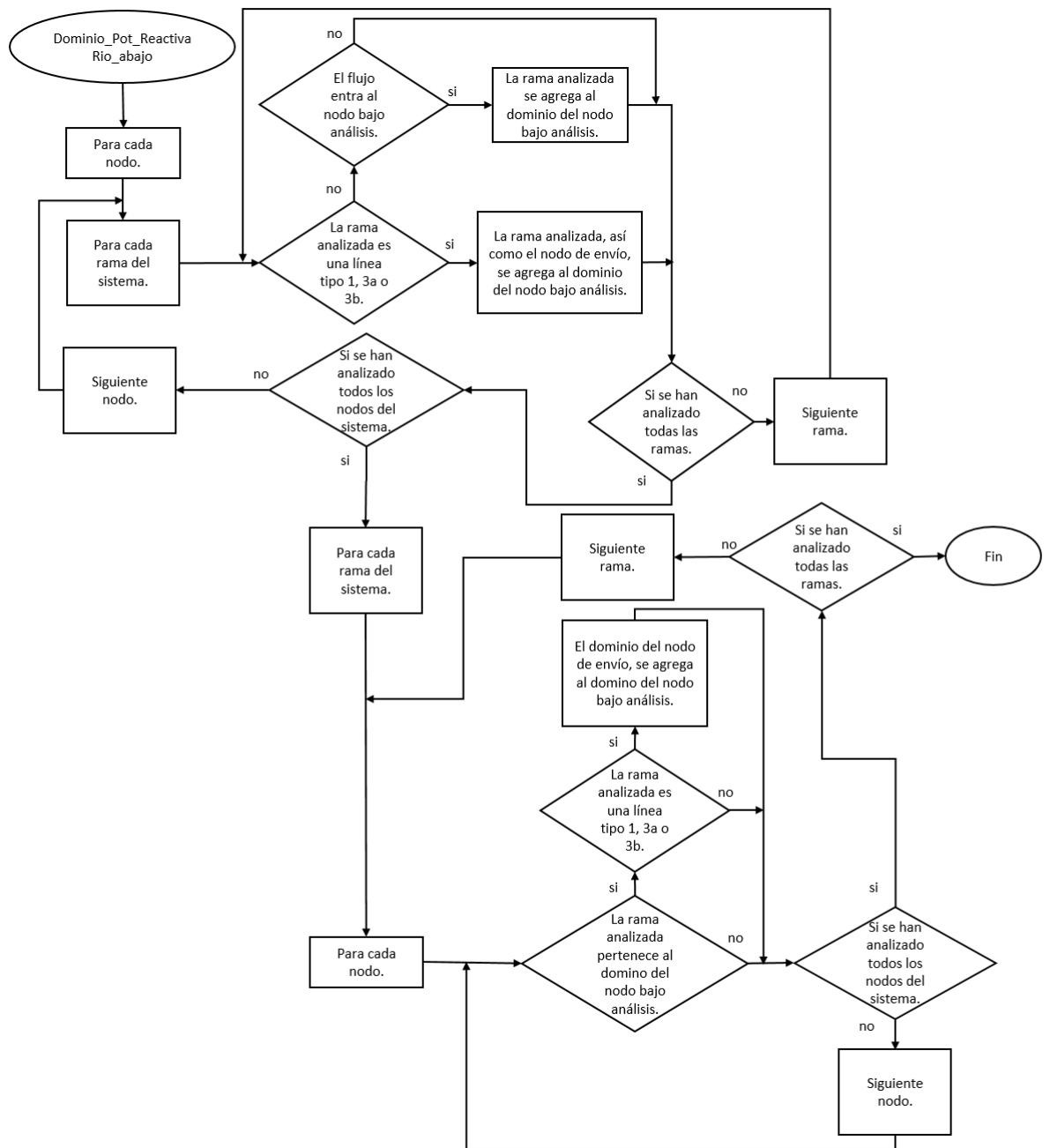


Figura A.5: Diagrama de flujo para obtener los dominios mediante el rastreo hacia los generadores de flujos de potencia reactiva.

Para detectar la existencia de flujos circulantes de potencia activa ó de potencia reactiva se utilizan los diagramas de flujo de las Figuras A.6 y A.7.

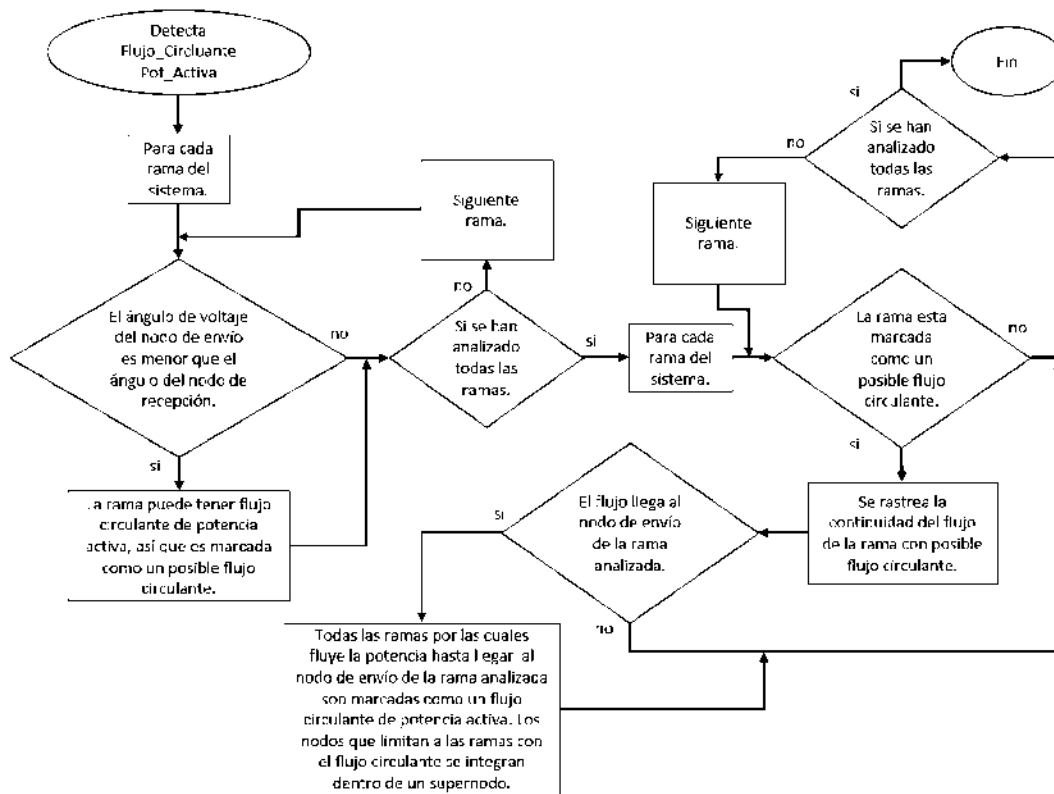


Figura A.6: Diagrama de flujo para detectar flujos circulantes de potencia activa.

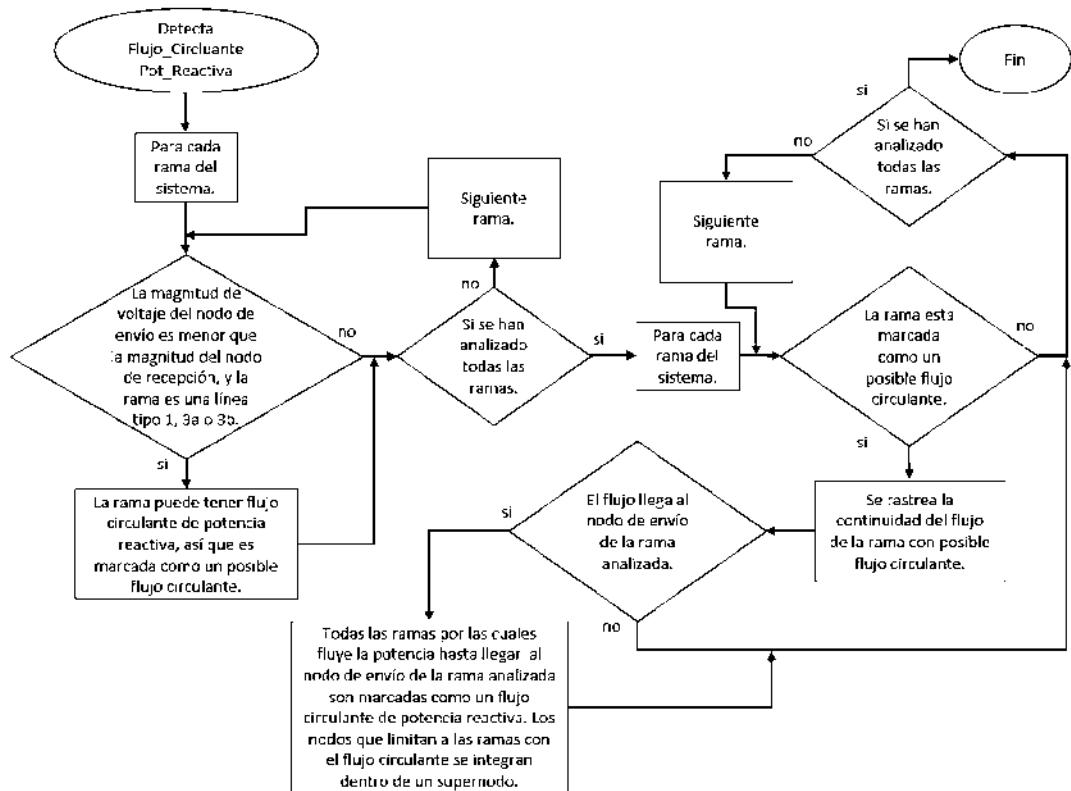


Figura A.7: Diagrama de flujo para detectar flujos circulantes de potencia reactiva.

Apéndice B

Datos generales de las redes analizadas

B.1. Sistema de 4 nodos.

Éste pequeño sistema esta compuesto por 4 nodos , 5 líneas, 2 generadores y 2 cargas. Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga. El nodo de compensación es el nodo 2, con un voltaje controlado por el regulador automático de voltaje (RAV) a la magnitud de 1.00 pu, y un ángulo de voltaje definido como 0° . En la Tabla B.1 se muestran los datos de las líneas de transmisión en p.u., y en la Tabla B.2 se dan los datos nodales para éste sistema. En ésta ultima Tabla la columna marcada como Tipo indica el tipo de nodo, donde el Tipo 1 indica que es un nodo de compensación, el Tipo 2 indica que es un nodo de voltaje controlado, y el Tipo 0 indica que es un nodo de carga.

Tabla B.1: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 4 nodos.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
1	3	0.01134	0.1314	0.18515
1	2	0.0241	0.1834	0.22747
2	4	0.006616	0.05822	0.09522
1	4	0.02212	0.1815	0.22324
4	3	0.01087	0.1096	0.15341

Tabla B.2: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 4 nodos.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	2	4	0	0	0	1.04348	0
2	1	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	3	1	1	0
4	0	0	0	2	0.8	1	0

B.2. Sistema de 5 nodos.

Este sistema está compuesto por 5 nodos, 6 líneas, 3 generadores y 3 cargas. Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga. En la Tabla B.3 se muestran los datos de las líneas de transmisión para este sistema, y los datos nodales del sistema se muestran en la Tabla B.4.

Tabla B.3: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 5 nodos.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
1	5	0.0423	0.1693	0.0205
1	4	0.0635	0.2539	0.0305
4	3	0.0317	0.1269	0.0155
3	5	0.0317	0.1269	0.0155
5	2	0.0529	0.2116	0.0255
2	4	0.0635	0.2539	0.0305

Tabla B.4: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 5 nodos.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	2	1	0	0	0	1.04	0
2	2	1.5	0	0	0	1.03	0
3	1	0	0	0.6	0.1	1.02	0
4	0	0	0	0.8	0.2	1	0
5	0	0	0	1.1	0.5	1	0

B.3. Sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.

Este sistema esta compuesto por 6 nodos, 9 líneas, 1 transformador desfasador, 3 generadores y 3 cargas. Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga. En la Tabla B.5 se muestran los datos de las líneas de transmisión para éste sistema. El transformador desfasador esta conectado entre los nodos 1 y 4, tiene una reactancia en serie de 0.2 pu, y un desfasamiento del angulo de voltaje de 12 grados. El nodo de compensación es el nodo 1, con un voltaje controlado por el regulador automático de voltaje (RAV) a la magnitud de 1.05 pu, y un ángulo de voltaje definido como 0° , tal como se muestra en la Tabla B.6 junto con los demás datos nodales.

Tabla B.5: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
1	2	0.1	0.2	0.02
1	5	0.08	0.3	0.03
2	3	0.05	0.25	0.03
2	4	0.05	0.1	0.01
2	5	0.1	0.3	0.02
2	6	0.07	0.2	0.025
3	5	0.12	0.26	0.025
3	6	0.02	0.1	0.01
4	5	0.2	0.4	0.04
5	6	0.1	0.3	0.03

Tabla B.6: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia activa.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	1	0	0	0	0	1.05	0
2	2	0.5	0	0	0	1.05	0
3	2	0.6	0	0	0	1.07	0
4	0	0	0	0.7	0.7	1	0
5	0	0	0	0.7	0.7	1	0
6	0	0	0	0.7	0.7	1	0

B.4. Sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.

Para este sistema se hicieron algunas modificaciones al sistema de 6 nodos anterior. Los elementos que componen al sistema son 6 nodos, 8 líneas, 2 transformadores convencionales, 3 generadores y 3 cargas. Los datos de las líneas de transmisión y los datos nodales se muestran en las Tablas B.7 y B.8, respectivamente. Los transformadores se encuentran en las ramas 1-2 y 1-4, con una relación de transformación de 1.05 y 0.95, respectivamente, ambos transformadores tienen una reactancia en serie de 0.2 p.u. El nodo de compensación es el nodo 1, con un voltaje controlado por el regulador automático de voltaje (RAV) a la magnitud de 1.05 pu, y un ángulo de voltaje definido como 0° . Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga.

Tabla B.7: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
1	5	0.08	0.3	0.03
2	3	0.05	0.25	0.03
2	4	0.05	0.1	0.01
2	5	0.1	0.3	0.02
2	6	0.07	0.2	0.025
3	5	0.12	0.26	0.025
3	6	0.02	0.1	0.01
5	6	0.1	0.3	0.03

Tabla B.8: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 6 nodos con flujos circulantes de potencia reactiva.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	1	0	0	0	0	1.05	0
2	0	0	0	0.3	0.3	1	0
3	2	0.2	0	0	0	1.07	0
4	0	0	0	0.3	0.3	1	0
5	2	0.3	0	0	0	1.05	0
6	0	0	0	0.3	0.3	1	0

B.5. Sistema de 14 nodos.

Éste sistema está compuesto por 14 nodos, 15 líneas, 5 transformadores convencionales, 5 generadores y 11 cargas. Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga. El nodo de compensación es el nodo 1, con un voltaje controlado por el regulador automático de voltaje (RAV) a la magnitud de 1.06 pu, y un ángulo de voltaje definido como 0° . En la Tabla B.9 se muestran los datos de las líneas de transmisión en p.u., en la Tabla B.10 se dan los datos nodales, y en la Tabla B.11 se muestran los parámetros de los transformadores para éste sistema.

Tabla B.9: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 14 nodos.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
2	5	0.057	0.1739	0.034
6	12	0.1229	0.2558	0
12	13	0.2209	0.1999	0
6	13	0.0662	0.1303	0
6	11	0.095	0.1989	0
11	10	0.082	0.1921	0
9	10	0.0318	0.0845	0
9	14	0.1271	0.2704	0
14	13	0.1709	0.384	0
1	2	0.0194	0.0592	0.0528
3	2	0.047	0.198	0.0438
3	4	0.067	0.171	0.0346
1	5	0.054	0.223	0.0492
5	4	0.0134	0.0421	0.0128
2	4	0.0581	0.1763	0.0374

Tabla B.10: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 14 nodos.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	1	0	0	0	0	1.06	0
2	2	0.5	0	0.217	0.127	1.045	0
3	2	0.4	0	0.942	0.19	1.01	0
4	0	0	0	0.478	0.04	1	0
5	0	0	0	0.076	0.016	1	0
6	2	0.2	0	0.112	0.075	1.07	0
7	0	0	0	0	0	1	0
8	2	0.2	0	0	0	1.0867	0
9	0	0	0	0.295	0.166	1	0
10	0	0	0	0.09	0.058	1	0
11	0	0	0	0.035	0.018	1	0
12	0	0	0	0.061	0.016	1	0
13	0	0	0	0.135	0.058	1	0
14	0	0	0	0.149	0.05	1	0

Tabla B.11: Datos en p.u. de los transformadores del sistema de 14 nodos.

NE	NR	X_L	Tap
7	9	0.11	1
5	6	0.252	0.932
4	9	0.5562	0.969
4	7	0.2091	0.978
8	7	0.1762	1

B.6. Sistema de 30 nodos.

Éste sistema está compuesto por 30 nodos, 34 líneas, 7 transformadores convencionales, 6 generadores y 22 cargas. Los datos generales del sistema son: 100 MVA de potencia base, 230 kV de voltaje base y una tolerancia de 10^{-12} para los cálculos a realizar en el programa de flujos de carga. En la Tabla B.12 se muestran los datos de las líneas de transmisión para éste sistema, y los datos nodales del sistema se muestran en la Tabla B.13. En la Tabla B.14 se muestran los parámetros de los transformadores para éste sistema.

Tabla B.12: Datos de las líneas de transmisión en p.u. para el sistema de 30 nodos.

NE	NR	R	X_L	$\frac{B_c}{2}$
1	2	0.0192	0.0575	0.0528
1	3	0.0452	0.1852	0.0408
2	4	0.057	0.1737	0.0368
3	4	0.0132	0.0379	0.0084
2	5	0.0472	0.1983	0.0418
2	6	0.0581	0.1763	0.0374
4	6	0.0119	0.0414	0.009
5	7	0.046	0.116	0.0204
6	7	0.0267	0.082	0.017
6	8	0.012	0.042	0.009
12	14	0.1231	0.2559	0
12	15	0.0662	0.1304	0
12	16	0.0945	0.1987	0
14	15	0.221	0.1997	0
16	17	0.0824	0.1923	0
15	18	0.1073	0.2185	0
18	19	0.0639	0.1292	0
19	20	0.034	0.068	0
10	20	0.0936	0.209	0
10	17	0.0424	0.0845	0
10	21	0.0348	0.0749	0
10	22	0.0727	0.1499	0
21	22	0.0116	0.0236	0
15	23	0.1	0.202	0
22	24	0.115	0.179	0
23	24	0.132	0.27	0
24	25	0.1885	0.3292	0
25	26	0.2544	0.38	0
25	27	0.1093	0.2087	0
27	29	0.2198	0.4153	0
27	30	0.3202	0.6027	0
29	30	0.2399	0.4533	0
8	28	0.0636	0.2	0.0428
6	28	0.0169	0.0599	0.013

Tabla B.13: Datos de los nodos en p.u. para el sistema de 30 nodos.

Nodo	Tipo	P_{Gi}	Q_{Gi}	P_{Li}	Q_{Li}	$ V_i $	δ_i
1	1	0	0	0	0	1.06	0
2	0	0	0	0.024	0.127	1	0
3	2	0.5	0	0.3	0.19	1.01	0
4	2	0.4	0	0.217	0.04	1.01	0
5	0	0	0	0.076	0.016	1	0
6	2	0.3085	0	0.942	0.075	1.07	0
7	0	0	0	0.228	0.075	1	0
8	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0.058	0.058	1	0
11	2	0.5	0	0	0.018	1.05	0
12	0	0	0	0.112	0.016	1	0
13	2	0.5	0	0	0	1.05	0
14	0	0	0	0.062	0.05	1	0
15	0	0	0	0.082	0.166	1	0
16	0	0	0	0.035	0.166	1	0
17	0	0	0	0.09	0.166	1	0
18	0	0	0	0.032	0.166	1	0
19	0	0	0	0.095	0.166	1	0
20	0	0	0	0.022	0.166	1	0
21	0	0	0	0.175	0.166	1	0
22	0	0	0	0	0	1	0
23	0	0	0	0.032	0.166	1	0
24	0	0	0	0.087	0.166	1	0
25	0	0	0	0	0	1	0
26	0	0	0	0.035	0.166	1	0
27	0	0	0	0	0	1	0
28	0	0	0	0.024	0.166	1	0
29	0	0	0	0.106	0.166	1	0
30	0	0	0	0	0	1	0

Tabla B.14: Datos en p.u. de los transformadores del sistema de 30 nodos.

NE	NR	X_L	Tap
6	9	0.208	0.978
6	10	0.556	0.969
9	11	0.208	1
9	10	0.11	1
4	12	0.256	0.932
12	13	0.14	1
28	27	0.396	0.968

Referencias

[Philipson, et al., 1999] Philipson, Lorrin; Willis, H. Lee.

Understanding electric utilities and de-regulation.

Marcel Dekker Inc., New York, U. S. A., 1999.

[Marangon, 1995] Marangon Lima, J. W.:

Allocation of transmission fixed charges: An economic interpretation.

IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conference, Stockholm, Sweden, June 18-22, 1995, pp. 716-721.

[Kirshen, et al., 1997] Kirshen, Daniel; Allan, Ron; Strbac, Goran.

Contributions of individual generators to loads and flows.

IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 1, February 1997, pp. 52-60.

[Bialek, 1996a] Bialek, J.

Identification of source-sink connections in transmission networks.

IEE Power System Control and Management Conference Publication No. 421, 1996, pp. 200- 204.

[Bialek and Tam, 1996] Bialek, J.; Tam D. B.

Tracing the generators' output.

IEE Opportunities and advances in international power generation, Conference publication No. 419, March 1996, pp. 133-136.

[Bialek, 1996b] Bialek, J.

Tracing the flow of electricity.

IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 4, July 1996, pp. 313-320.

[Bialek, 1997a] Bialek, Janusz

Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access.

IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 3, August 1997, pp. 1185-1193.

[Bialek, 1997b] Bialek, J. W.

Elimination of merchandise surplus due to spot pricing of electricity.

IEE Proc. -Gener. Transm. Distrib., Vol. 144, No. 5, September 1997, pp. 399-405.

[Bialek, 1998] Bialek, Janusz

Allocation of transmission supplementary charge to real and reactive loads.

IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 749-754.

[Strbac, et al., 1998] Strbac, Goran; Kirshen, Daniel; Ahmed, Syed

Allocating transmission system usage on the basis of traceable contributions of generators and loads to flows.

IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 2, May 1998, pp. 527-534.

[Shoults, et al., 1997] Shoults, R.; Swift, L. D.

A comparison between circuits based methods and topological trace methods for determining the contribution of each generator to load and line flows.

Proceedings of the workshop on available transfer capability, University of Illinois at Urbana-Champaign, June 1997, pp. 167-182.

[Yang and Anderson, 1999] Yang, Jian; Anderson, Max D.

Tracing the flow of power in transmission networks for use-of-transmission-system charges and congestion management.

IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, Vol. 1, 1999, pp. 399-405.

[Fuerte, 1997] Fuerte E., Claudio R.

- Modelling and Analysis of FACTS devices.*
Ph. D. Thesis, University of Glasgow, Scotland, UK, 1997.
- [Sun, et al., 2000] Sun, Hongbo; Yu, David C.; Zheng, Qionglin.
AC Power flow tracing in transmission networks.
IEEE Power Engineering Society 2000 Winter Meeting, Vol. 3, 2000, pp. 1715-1720.
- [Xi-Fan, et al., 2000] Xi-Fan, Wang; Xiu-Li, Wang; Bin, Jia.
Power tracing analysis in wheeling costing.
IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, City University, London, 4-7 April 2000, pp. 173-178.
- [Wu and Chen, 2001] Wu, Z. Q.; Chen, G. Z.
MVA power flow and loss analysis for electricity market.
IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 148, No. 2, March 2001, pp. 153-158.
- [De la Torre, et al., 1999] De la Torre, Teófilo; Feltes, James W.; Gómez S. R., Tomás; Merrill, Hyde M.
Deregulation, privatization, and competition: transmission planning under uncertainty.
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 2, May 1999, pp. 460-465.
- [Laguna, et al., 2001] Laguna-Velasco R.; Fuerte-Esquivel C. R.; Acha E. y Ambriz-Peréz
A Generalised Methodology to Trace Reactive Power Flow in Electric Power Systems.
IEEE Porto Power Tech Conference, Porto, Portugal, 10-13 September 2001, 6 pages.
- [Abdelkader, 2009] Abdelkader, S. M.
Complex Power Flow Tracing For Transmission Loss Allocation Considering Loop Flows.
IEEE Power & Energy Society General Meeting, 2009, pp. 1-9.
- [Bialek, 2000] Bialek, Janusz W.
Tracing-based unifying framework for transmission pricing of cross - border trades in Europe.
IEEE Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2000, pp. 532-537.

- [Wei, et al., 2002] Ping Wei; Yixin Ni; Felix F.
Load flow tracing in power system with circulating power.
Elsevier Science Ltd. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, December 2002, pp. 807-813.
- [Huelsman, 1972] HUELSMAN, LAWRENCE P.
Basic circuit theory with digital computations.
Prentice-Hall Inc., New Jersey, U. S. A., 1972.
- [Grainger and Stevenson, 1994] GRAINGER, JOHN J. and STEVENSON, WILLIAM D.
Power system analysis.
McGranw-Hill, New York, U. S. A. 1994.
- [De and Goswami, 2012] Mala De; Swapan K. Goswami
Reactive power cost allocation by power tracing based method.
Elsevier Ltd. Energy Conversion and Management, September 2012, pp. 43-51.
- [Dai, et al., 2002] Y. Dai; X.D. Liu; Y.X. Ni; F.S. Wen; Z.X. Han; C.M. Shen; Felix F. Wu
A cost allocation method for reactive power service based on power flow tracing.
Elsevier Ltd. Electric Power Systems Research 64, June 2002, pp. 59-65.
- [Rubio, 1999] Rubio O., Francisco J.
Metodología de asignación de costes de la red transporte en un contexto de regulación abierta a la competencia.
Tesis Doctoral, Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Madrid, España, 1999.
- [Shimohammadi, et al., 1996] Shimohammadi, Darjush; Vieira F., Xisto; Gorenstin, Boris; Pereira, Mario V.
Some fundamental, technical concepts about cost based transmission pricing.
IEEE Transactions Power System, Vol. 11, May 1996, pp. 1002-1008.
- [Happ, 1994] Happ, H. H.
Cost of wheeling methodologies.
IEEE Transactions on Power System, Vol. 9, No. 1, Feb. 1994, pp. 147-156.

- [Shimohammadi, et al., 1989] Shimohammadi, Darjush; Gribik, P. R.; Law, E. T. K.; Malowsky, J. H.; O'Doneel, R. E.
Evaluation of transmission network capacity use for wheeling transactions.
IEEE Transactions Power System, Vol. 4, No. 4, Oct. 1989, pp. 1405-1413.
- [CRE, 2015] Comisión Reguladora de Energía.
Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de Energía expide las tarifas que aplicará la Comisión Federal de Electricidad por el servicio público de transmisión de energía eléctrica durante el periodo tarifario inicial que comprende del 1 de enero de 2016 y hasta el 31 de diciembre de 2018.
<http://www.cre.gob.mx/acuerdo.aspx?id=452>, Sep. 2015.
- [Bialek, 1998] Bialek, Janusz W.
Allocation of transmission supplementary charge to real and reactive loads.
IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 13, No. 3, August 1998, pp. 749-754.