

**FLUJO DE CARGA: FORMULACIÓN DE UNA NUEVA TÉCNICA PARA
DESARROLLAR EL MÉTODO NEWTON-RAPHSON**

PEDRO AUGUSTO MALDONADO DULCEY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2005**

**FLUJO DE CARGA: FORMULACIÓN DE UNA NUEVA TÉCNICA PARA
DESARROLLAR EL MÉTODO NEWTON-RAPHSON**

PEDRO AUGUSTO MALDONADO DULCEY

**Trabajo de grado como requisito para optar al título de
Ingeniero Electricista**

**Director
Dr. GERARDO LATORRE BAYONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELECTRICA ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2005**

DEDICATORIA

A Dios.

A mi madre celestial.

A mi madre María del Carmen
por estar en los momentos difíciles.

A mi hermana Gloria.

A mi gran amigo Wei Jian Chen.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Ing. Gerardo Latorre Bayona, por su valiosa colaboración.

A todo el personal administrativo y operativo que conforma la gran familia de la escuela de Ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones.

A todo el personal administrativo y operativo que conforma la gran familia de la Universidad Industrial de Santander.

A todos nuestros profesores: **Ciro Jurado, Julio Rugeles Jones, Gabriel Ordóñez, Gabriel Plata, Julio Gelvez, Julio Chacón, Gilberto Carrillo, Jaime Barrero, Daniel Sierra, César Duarte, Roberto Martínez, Oscar Gualdrón, Carlos Correa Celis, Jorge Ramón, Francisco Rueda y Carlos Gómez (q.e.p.d.).**

A Boris, Edwin, Jhon Jairo, Edward Navas, William, por su compañerismo y amistad sincera.

RESUESPA

1. TITULO*

FLUJO DE CARGA: FORMULACIÓN DE UNA NUEVA TÉCNICA PARA DESARROLLAR EL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON

2. AUTOR**

PEDRO AUGUSTO MALDONADO DULCEY .

3. PALABRAS CLAVES

Flujo, carga, sistema, potencia.

4. DESCRIPCION DEL CONTENIDO

Debido a la necesidad de mejorar el desempeño en la asignatura de sistemas de potencia y en especial el tema concerniente al flujo de carga, se desarrollo una técnica nueva y práctica que permite desarrollar el método de Newton-Raphson de una manera ágil y confiable, con menos procedimientos de cálculo y que a su vez resulta ser de fácil implementación computacional para un gran número de casos, los cálculos del método convencional incluyen la evaluación de suma de funciones senoidales con varias argumentos y parámetros así mismo como sus derivadas lo cual lo convierte en extremadamente lento y dificultoso .

El presente documento presenta la técnica propuesta adicionalmente se incorporan los transformadores de una forma alternativa que facilita el manejo de las relaciones de transformación fuera de la nominal en transformadores.

Adicionalmente se estudian casos que no son resueltos en los textos de la materia usualmente y otros que se proponen por primera vez.

La versatilidad del método permite mejorar el rendimiento del trabajo en el aula y de los trabajos fuera de las clases. Se recomienda que el método sea combinando con un riguroso marco teórico para que no se apliquen estos resultados sin un trasfondo significativo.

* Tesis de grado

** Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones,
director Gerardo Latorre Bayona.

RESUINGLES

1. TITLE*

LOAD FLOW: FORMULATION OF THE NEW TECHNIQUE FOR DEVELOPMENT
THE METHOD OF NEWTON-RAPHSON

2. AUTHOR**

PEDRO AUGUSTO MALDONADO DULCEY.

3. KEY WORDS

Flow, load, system, power.

4. CONTENT DESCRIPTION

Due to the necessity of improvement the development in the matter of power systems and specially of the chapter on the load flow, to development a new technique and practical to permit to execute of a manner rapid and sure, with low content in calculus and that result in a easy computational implementation for a lot of cases, the calculus of the conventional method involve the evaluation of the sum of sinusoidal functions with multiples arguments and parameters, moreover the derivatives that convert in extremely slowing and difficulty.

The present paper present the technique proposed, additionally the transformers include of the alternative form that to have easy the drive of the of turn off-nominal.

Additionally in this paper study the solution of cases no usually working in textbook of the matter and other are proposes for fist time.

The versatility of the method permit improvement of the development of the job in class in the jobs out classroom. It is a recommendation that the method is combine with the rigorous theory.

* Thesis of grade

** Physics mechanical faculty, electric, electronic and telecommunications engineering school, director Gerardo Latorre Bayona.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	3
1. MODELADO Y TRATAMIENTO MATRICIAL DE LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN EN MAGNITUD Y FASE	4
1.1 REPRESENTACIONES EQUIVALENTES DE LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN DE TENSIÓN	4
1.1.1 Representación circuital.	4
1.1.2 Representación matricial.	4
1.2 TRANSFORMACIÓN DEL MODELO PRIMITIVO AL NODAL PARA TRANSFORMADORES	4
1.2.1 Matriz de admitancias de barra.	4
1.3 MÉTODO PROPUESTO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE REDES INCORPORANDO LOS MODELOS DE LOS TRANSFORMADORES	7
2. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON POR INSPECCIÓN MATRICIAL PARA FLUJO DE CARGAS	10

2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ AUXILIAR	11
2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ AUXILIAR	13
2.3 ELEMENTOS DEL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON A PARTIR DE LA MATRIZ AUXILIAR	13
2.4 CONSTRUCCIÓN DE LA JACOBIANA A PARTIR DE LA MATRIZ M	14
3. EJEMPLOS DEL CONTROL DE LA OPERACIÓN DE SISTEMAS EN ESTADO ESTACIONARIO Y EQUILIBRADO	22
3.1 CASO : SOLUCIÓN CASO BASE	25
3.2 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN MEDIANTE INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA	28
3.3 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN REMOTA MEDIANTE INYECCIÓN DE REACTIVOS	31
3.4 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN LOCAL MEDIANTE TRANSFORMADOR	35
3.5 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN REMOTA MEDIANTE TRANSFORMADOR	39
3.6 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA ACTIVA POR EL REGULADOR	43
3.7 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA REACTIVA POR EL TR-REGULADOR	47
3.8 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA COMPLEJA POR EL TR-REGULADOR	47

3.9 CASO: CONTROL DEL INTERCAMBIO DE POTENCIA ACTIVA ENTRE ÁREAS	59
3.10 CASO: CONTROL DEL INTERCAMBIO DE REACTIVA ENTRE ÁREAS	63
3.11 CASO: CONTROL DEL INTERCAMBIO DE POTENCIA COMPLEJA ENTRE ÁREAS	68
3.12 CASO: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RED	74
3.12.1 Marco teórico	74
3.12.2 La matriz de sensibilidad.	75
CONCLUSIONES	85
BIBLIOGRAFÍA	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos del sistema	23
Tabla 2. Datos iniciales	24
Tabla 3. Voltajes caso base	25
Tabla 4. Vector de errores en potencia del caso base	26
Tabla 5. Matriz auxiliar - solución final caso base	27
Tabla 6. Voltajes control de la tensión local mediante inyección de reactivos	29
Tabla 7. Vector de errores de potencia control de la tensión local mediante inyección de reactivos	29
Tabla 8. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión local mediante inyección de reactivos	30
Tabla 9. Voltajes control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva	32
Tabla 10. Vector de errores de potencias control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva	33
Tabla 11. Matriz auxiliar solución final para control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva	34
Tabla 12. Voltajes control de la tensión local mediante transformador	36
Tabla 13. Vector de errores control de la tensión local mediante transformador	37
Tabla 14. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión localmente mediante transformador	38

Tabla 15. control de la tensión local mediante Transformador	39
Tabla 16. Voltajes control de la tensión remota mediante Transformador	40
Tabla 17. Vector de errores de potencia control de la tensión remota mediante transformador	41
Tabla 18. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión remota mediante transformador	42
Tabla 19. Relación de transformación en magnitud para control de la tensión remota mediante transformador	43
Tabla 20. Voltajes control de la potencia activa por el Regulador	44
Tabla 21. Vector de errores de potencias control de la potencia activa transportada por el transformador	45
Tabla 22. Matriz auxiliar - solución final para control de la potencia activa por el regulador	46
Tabla 23. Relación de transformación en ángulo para control de la potencia activa por el regulador	47
Tabla 24. Voltajes control del flujo de potencia reactiva por el regulador	48
Tabla 25. Vector de errores de potencias control del flujo de potencia reactiva por el regulador	50
Tabla 26. Matriz auxiliar - solución final para control del flujo de potencia en cuadratura por el regulador	51
Tabla 27. Relación de transformación de tensiones en magnitud para control del flujo de potencia reactiva por el regulador	53
Tabla 28. Voltajes control del flujo de potencia compleja por el regulador	54
Tabla 29. vector de errores de potencia, control del flujo de potencia compleja por el regulador	56
Tabla 30. Matriz auxiliar - solución final para control del flujo de potencia compleja por el regulador	58
Tabla 31. relación de transformación en magnitud para control del flujo de potencia compleja por el regulador	59

Tabla 32. Voltajes control del intercambio de potencia activa entre áreas	60
Tabla 33. Vector de errores de potencias, control del intercambio de potencia activa entre áreas	61
Tabla 34. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de potencia activa entre áreas	62
Tabla 35. Voltajes control del intercambio de reactiva entre áreas	65
Tabla 36. Vector de correcciones de potencias para control del intercambio de reactiva entre áreas	66
Tabla 37. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de reactiva entre áreas	67
Tabla 38. Relación de transformación en magnitud por el regulador para control del intercambio de reactiva entre áreas	68
Tabla 39. Voltajes control del intercambio de activa y reactiva entre áreas	70
Tabla 40. Vector de correcciones de potencia para control del intercambio de potencia compleja entre áreas	71
Tabla 41. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de potencia compleja entre áreas	72
Tabla 42. Relación de transformación en magnitud por el regulador para control del intercambio de activa y reactiva entre áreas	74
Tabla 43. Ejemplo de la estructura de la matriz G_x , sistema de seis Barras	78
Tabla 44. Ejemplo de la estructura de la matriz G_u , sistema de seis barras de la referencia.	78
Tabla 45. Matriz de sensibilidad S: caso base	79
Tabla 46. Matriz G_x	80
Tabla 47. Matriz de parámetros G_u , caso base	82
Tabla 48. Voltajes después de variar la magnitud de la tensión V1 en 0.05, caso base	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Representación de un transformador	7
Figura 2. Modelo primitivo del transformador	8
Figura 3a. Modelo de auto-compensador intercalado entre transformador y la línea	19
Figura 3b. Modelo de auto-compensador intercalado entre transformador y nodo	19
Figura 4 .gráfico del sistema estudiado	22
Figura 5 .Caso base	25
Figura 6 .control de la tensión local mediante inyección de Reactivos	28
Figura 7 . Control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva	32
Figura 8 . Control de la tensión local mediante Transformador	35
Figura 9 . Control de la tensión remota mediante Transformador	39
Figura 10. Control de la potencia activa transportada por el transformador	44
Figura 11. Control del flujo de potencia reactiva por el Regulador	47
Figura 12. Control del flujo de potencia compleja por el Regulador	54
Figura 13. Control del intercambio de potencia activa entre áreas	60
Figura 14. Control del intercambio de reactiva entre Áreas	64
Figura 15. Control del intercambio de activa y reactiva entre áreas	68

INTRODUCCIÓN

La mayor parte del tiempo de la labor del ingeniero moderno se desarrolla en un medio abstracto. Por tanto es conveniente lograr simplicidad y rapidez en muchos y variados procesos de cálculo, empleando modernas herramientas que cada vez poseen mayores prestaciones, tratamientos matemáticos alternos, aproximaciones, tablas, gráficas, formularios, nomogramas, ábacos, etcétera. Y sin tener la necesidad de recurrir cada vez (si éste lo permite o no lo exige), a la solución completa y formal.

La aplicación de tratamientos matemáticos alternos, por medio de reglas sencillas, busca obtener la solución final de una manera relativamente más directa y sencilla para obtener reducciones y simplificaciones en los procesos de cálculo. Sin embargo, es importante, cuando se requiera, conocer el desarrollo formal y completo de las fórmulas.

Por esto, que se ve la necesidad de encontrar una simplificación al desarrollo de los algoritmos de flujo de carga y en lo posible con la misma calidad de la solución o sin comprometer ésta demasiado. Por esto se presentan acá las técnicas más generales encontradas después de un largo tiempo de búsqueda que permiten desarrollar el algoritmo tanto para la versión manual como para la automática.

En el trabajo realizado se pone la mira en primera lugar, en el sub-algoritmo de obtención de la matriz de admitancias de barra con presencia de relación de transformación de tensiones de redes con valores tratados en unidad. Esta matriz no es particular a un método de solución. La dificultad está en que mientras el sub-algoritmo de formación de la matriz de admitancias de barra sin estos elementos es muy directo y simple, no lo es si se incluyen

tales elementos, requiriéndose así pasos intermedios adicionales de cálculo. Antes de aplicar el algoritmo, la dificultad aumenta cuando se requiere estar actualizando los valores de estos elementos. Se ha encontrado que los elementos del modelo de estos componentes pueden ser añadidos utilizando una matriz de incidencia modificada, a la cual se le ha denominado matriz de incidentalidad (E), para diferenciarla de la matriz de incidencia normal (A). Ambas conjuntamente son utilizadas para la ejecución del sub-algoritmo.

En segundo lugar, se aborda el algoritmo de Newton-Raphson para el flujo de carga, para el caso más general y para casos particulares. La variante principal es la definición de la matriz desplegada de potencias de nodo (M), que va a servir de auxiliar para la obtención de la matriz de primeras derivadas parciales (jacobiana).

Adicionalmente se han introducido elementos ficticios (auto-compensadores), que permiten extender la metodología a ciertos casos particulares.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Mostrar las ventajas de la técnica propuesta para el proceso enseñanza-aprendizaje de los estudios de flujo de carga

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Proponer una serie de ejemplos en los que se empleen las técnicas propuestas, que incorporen características tales como:

- Análisis de sensibilidad.
- Transformadores con relación diferente a la nominal.
- Control de tensión por fuentes de reactivos.
- Aplicaciones de control de los transformadores en sistemas de potencia.
- Intercambio de potencia en sistemas interconectados.

1. MODELADO Y TRATAMIENTO MATRICIAL DE LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN EN MAGNITUD Y FASE

1.1 REPRESENTACIONES EQUIVALENTES DE LAS RELACIONES DE TRANSFORMACIÓN DE TENSIÓN

Los modelos de transformadores empleados son dos:

1.1.1 Representación circuital. En la representación circuital se emplean elementos pasivos para el modelado de los transformadores. El modelo simplificado universalmente aceptado, se muestra en Gross, Charles A., *power systems analysis*. John Wiley & Sons, Inc., fig 5-21 pág. 182, fig 5-22a, fig 5-22b pág. 183., 1979.

1.1.2 Representación matricial. Este modelado se basa en el equivalente de dos puertas, expresado en términos de la red de admitancias como se indica en Gross, Charles A., *power systems analysis*. John Wiley & Sons, Inc., eq 5-45a, eq 5-45b, eq 5-46a, eq 5-46b, eq 5-46c, eq 5-46d., pág. 182-183, 1979.

1.2 TRANSFORMACIÓN DEL MODELO PRIMITIVO AL NODAL PARA TRANSFORMADORES

1.2.1 Matriz de admitancias de barra. La matriz de admitancias de barra puede construirse mediante dos procedimientos: inspección de red y por transformación del modelo. Cuando se construye por inspección, la matriz se obtiene directamente de observar el circuito equivalente de la red. Por su parte cuando se utiliza la transformación, la matriz de admitancias de barra es el resultado de ordenar en forma matricial las ecuaciones de corriente por

las ramas de la red y transformar ese equivalente primitivo al nodal. En éste último procedimiento surgen problemas con los valores complejos de taps, dado en los equivalentes circuitales se presentan elementos primitivos como son definidos generalmente.¹

INSPECCIÓN DE RED

El procedimiento se encuentra descrito en Carrillo, Gilberto., *Sistemas Eléctricos de Potencia*. Publicaciones UIS., pág. 80-84, 1984. Básicamente la construcción por inspección matricial se aplica a redes o equivalentes de redes sin acoples mutuos.

Este es el caso general para el análisis de flujos de carga, ya que en estado estacionario y equilibrado este efecto se puede considerar como despreciable. El procedimiento, a grandes rasgos, consiste en formar los elementos de la matriz de admitancias de barra de acuerdo con dos reglas sencillas.

a. Los elementos de la diagonal principal se obtienen como la suma de admitancias conectadas a cada barra, sin cambiar su signo

b. Los elementos fuera de la diagonal principal están constituidos por el valor con signo contrario de la admitancia de enlace entre las barras correspondientes a la celda de posición de la matriz.

Estas reglas se aplican cuando son consideradas la potencias como inyecciones a la red. En caso tal de ser expresadas como potencias que

¹ Paul M, Anderson. *Faulted power systems*. IEEE Press Power Systems Engineering Series., Fig 11,1 p. 367.

salen de los nodos, se invierte la convención de los signos dada anteriormente.

TRANSFORMACIÓN DE REDES

La transformación se efectúa conformando la matriz de la red primitiva y por transformación matricial (utilizando la matriz de incidencia), se transforma en la matriz de admitancias de barra.

Este procedimiento es muy sencillo de aplicar cuando se tienen en cuenta los efectos mutuos Stagg and El-Abiad., *Computer Methods in power system Analysis*. McGraw-Hill., pág 42, 1968. Tal es el caso en condiciones de desequilibrios y para el análisis de fallas.

Reglas para armar la matriz de incidencia, punto de vista gráfico:

- 1 Cuando el elemento está conectado a la barra y está orientado saliendo
- -1 Cuando el elemento está conectado a la barra y esta orientado entrando
- 0 Cuando el elemento no está conectado a la barra.

Además desde el punto de vista de la programación, la convención se puede aplicar con respecto a la numeración de las barras:

- 1 Cuando el elemento se conecta a la barra de numeración mayor.
- -1 Cuando el elemento se conecta a la barra de menor numeración.
- 0 Cuando el elemento no está conectado a la barra.

1.3 MÉTODO PROPUESTO PARA LA TRANSFORMACIÓN DE REDES INCORPORANDO LOS MODELOS DE LOS TRANSFORMADORES

El procedimiento propuesto facilita el proceso de armado de la matriz de admitancias de barra, desde el punto de vista de la programación, y consiste en modificar la matriz de incidencia y emplearla de la siguiente manera:

$$Y_{barra} = E \times Y_{primitiva} \times A^T \quad \text{ec. 1.1}$$

ó

$$A \times Y_{primitiva} \times E^{*T} \quad \text{ec. 1.2}$$

Donde:

- ❖ A matriz de incidencia barra-elemento.
- ❖ E matriz de incidencia barra-elemento modificada ó de incidentalidad.
- ❖ $Y_{primitiva}$ matriz de admitancias de la red primitiva.

REGLAS PARA ARMAR LA MATRIZ DE INCIDENCIA, RELATIVA A LOS ELEMENTOS DEL TRANSFORMADOR

En éste caso, el modelo primitivo del transformador ($Y_{primitiva}$) se obtiene con el producto de la admitancia por una matriz identidad 3x3.

Figura 1. Representación de un transformador

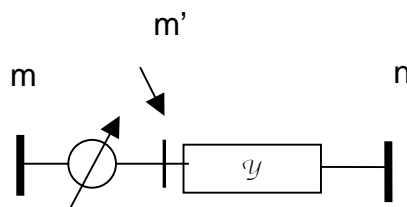
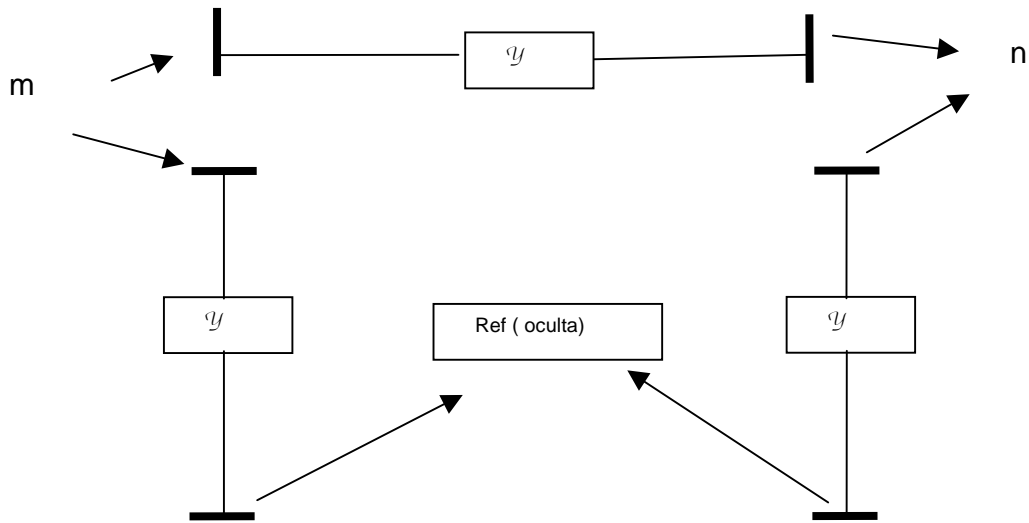


Figura 2. Modelo primitivo del transformador



EJEMPLO:

Sea $TAP_{1250'-3511'} = 1.2 \angle 10^\circ = 1.18 + 0.20j$

$m=1250$

$m'=1250'$

$n=3511$

$Y_{pr} = (10 \angle -90^\circ) = 0 - 10j$

$F_{(1250'-y(1250-3511))} = (1.2 \angle -10^\circ)$

fila: nodo
Columna: elemento primitivo

$E_{(1250'-y(1250-3511))} = A_{(1250'-y(1250-3511))} \times (1.2 \angle -10^\circ) = \pm 1.2 \angle -10^\circ$

$F_{(3511'-y(3511-1250))} = (1.2 \angle 10^\circ)$

$$E(3511- \mathcal{Y}(3511-1250))= A(3511- \mathcal{Y}(3511-1250)) \times (1.2 \angle 10^\circ) = 1.2 \angle -10^\circ$$

$$F_{(1250- \mathcal{Y}(1250-ref))} = (1.2 \angle -10^\circ) \times ((1.2 \angle -10^\circ) - 1) = 1.44 - (1.2 \angle -10^\circ) = 0.33 \angle 38.9^\circ$$

$$E(1250- \mathcal{Y}(1250-ref)) = A(1250- \mathcal{Y}(1250-ref)) \times (0.33 \angle 38.9^\circ) = \pm 0.33 \angle 38.9^\circ$$

$$F_{(3511- \mathcal{Y}(3511-ref))} = (1 - 1.2 \angle 10^\circ) = 0.27 \angle -131.1^\circ$$

$$E(3511- \mathcal{Y}(3511-ref)) = A(3511- \mathcal{Y}(3511-ref)) \times (0.27 \angle -131.1^\circ) = \pm 0.27 \angle -131.1^\circ$$

MODELADO DE LAS DEMANDAS

En general, en los estudios de flujos de carga el modelo de potencia constante. Para propósitos de desarrollo se emplea el concepto y de no incurrir en generalizaciones, se pueden obtener modelos de demanda diferentes de acuerdo con variaciones de tensión nominal especificada, Kundur P., *Power System Stability and Control*, MacGraw-Hill, Inc., Cap. 7, 1993.

Si se considera el modelo planteado de elemento primitivo-conector, con conexión a la matriz de incidencia de manera similar a los elementos modelo del transformador explicado anteriormente, se pueden obtener los elementos para modelos de demanda incorporándolos a la matriz E, lo cual evita la necesidad de realizar los cálculos de una forma desligada. La ventaja radica en que no se requiere desarrollar y acoplar los cálculos efectuados por separado y aprovechar la capacidad de programas que permiten trabajar con matrices simbólicas, y de ésta manera la realización de programación o cálculos más compactos.

2. MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON POR INSPECCIÓN MATRICIAL PARA FLUJO DE CARGAS

La presente tesis contiene el planteamiento general de la propuesta de una solución que rompe con el esquema tradicional del ya conocido desarrollo del método de Newton-Raphson para flujos de carga.

Una descripción detallada del método se halla en: Tinney, William.F., y and Powell, Walter L., *Notes on Newton-Raphson Method For Solution of AC Power Flow Problem*. IEEE, short course, Bonneville Power Administration; Pórtland, Oregon, 1971.

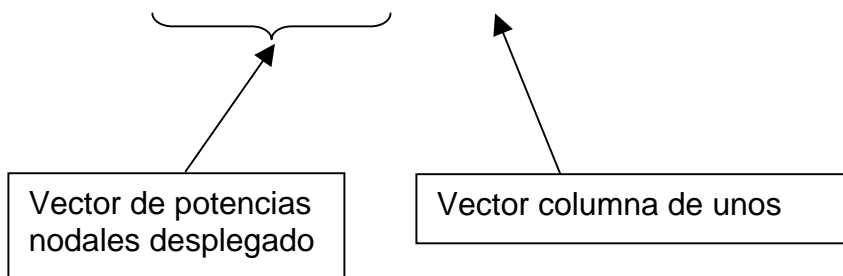
El problema del flujo de cargas se puede ver como la solución de un sistema de ecuaciones no lineales que representan potencias inyectadas a los nodos.

Por definición, la potencia neta inyectada en cada barra es

$$S_k = P_k + JQ_k = V_k (I_k)^* = V_k (n Y_{km} V_m)^* \quad \text{ec. 2.1}$$

También se obtiene de la siguiente expresión:

$$P_k + JQ_k = \underbrace{V_{NN} \times Y_{NN}^* \times V_{NN}^*}_{\text{Vector de potencias nodales desplegado}} \times \underbrace{(U_{N \times 1})}_{\text{Vector columna de unos}} \quad \text{ec. 2.2}$$



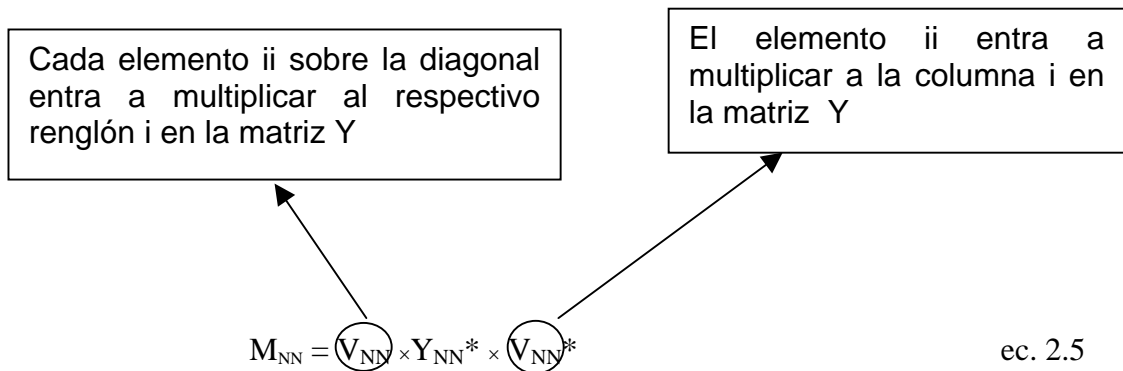
Definiendo el siguiente producto como matriz auxiliar M_{NN}

$$M_{NN} = V_{NN} \times Y_{NN}^* \times V_{NN}^* \quad \text{ec. 2.3}$$

Lo potencia nodal en términos de la matriz auxiliar se expresa como:

$$P_{1 \times N} + JQ_{1 \times N} = M_{NN} \times U_{N \times 1} \quad \text{ec. 2.4}$$

2.1 CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ AUXILIAR



Estas reglas sencillas de multiplicar arreglos por derecha y por la izquierda con matrices diagonales, resultan ser de mucha utilidad para conocer como quedan conformados los términos de la matriz M .

Para un valor cualquiera por fuera de la diagonal principal de M

$$M_{5449-3571} = V_{5449} \times Y_{5449-3571}^* \times V_{3571}^* \quad \text{ec. 2.6}$$

$$\text{mag}(M_{5449-3571}) = \text{mag}(V_{5449}) \times \text{mag}(Y_{5449-3571}^*) \times \text{mag}(V_{3571}^*) \quad \text{ec. 2.7}$$

$$\text{ang}(M_{5449-3571}) = \text{ang}(V_{5449}) + \text{ang}(Y^*_{5449-3571}) + \text{ang}(V^*_{3571}) \quad \text{ec. 2.8}$$

Para un valor cualquiera por dentro de la diagonal principal de M

$$M_{4989-4989} = V_{4989} \times Y^*_{4989-4989} \times V^*_{4989} \quad \text{ec. 2.9}$$

$$\text{mag}(M_{4989-4989}) = \text{mag}(V_{4989}) \times \text{mag}(Y^*_{4989-4989}) \times \text{mag}(V^*_{4989}) \quad \text{ec. 2.10}$$

$$\text{mag}(M_{4989-4989}) = (\text{mag}(V_{4989}))^2 \times \text{mag}(Y^*_{4989-4989}) \quad \text{ec. 2.11}$$

$$\text{ang}(M_{4989-4989}) = \text{ang}(V_{4989}) + \text{ang}(Y^*_{4989-4989}) + \text{ang}(V^*_{4989}) \quad \text{ec. 2.12}$$

$$\text{ang}(M_{4989-4989}) = \text{ang}(Y^*_{4989-4989}) \quad \text{ec. 2.13}$$

2.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MATRIZ AUXILIAR

La matriz auxiliar es una matriz de valores complejos, cuyos renglones no son más que las potencias de nodo desplegadas, por lo tanto de la suma de renglón correspondiente se pueden obtener los valores necesarios o requeridos para el cálculo de elementos del vector de error, por lo mismo y tanto si ya se ha alcanzado la convergencia la suma de los renglones correspondientes entregan las potencias de holgura y para control de tensión.

La sumatoria de todos los términos de la matriz M constituye la potencia suministrada de los elementos de la red.

Por tanto, involucra las pérdidas por líneas y la potencia entregada a las cargas o elementos de impedancia constante que son tratados como parte constitutiva de la red.

2.3 ELEMENTOS DEL MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON A PARTIR DE LA MATRIZ AUXILIAR

Las reglas o ecuaciones dadas a continuación se basan en la matriz auxiliar a partir de ***EL ESTUDIO DE LOS TÉRMINOS CONSTITUYENTES DE DICHA MATRIZ***. El punto de partida recomendado es el procedimiento de construcción de la matriz M . Se debe tener cuidado al plantear las funciones de transporte para que éstas queden en términos de los parámetros que se manejan en la matriz auxiliar.

Es decir, que sean funciones de los parámetros de los elementos de Y-barra para de esta forma poder establecer las respectivas comparaciones con los elementos de la matriz auxiliar.

POTENCIAS NODALES

Como ya se anotó anteriormente éstas pueden ser obtenidas para cada iteración de la suma de los elementos del renglón correspondiente, término a término, de la matriz auxiliar correspondiente.

POTENCIAS POR LAS LÍNEAS

En general éstas pueden ser obtenidas fácilmente del arreglo auxiliar, mediante un procedimiento especial que más adelante se explicará.

2.3 CONSTRUCCIÓN DE LA JACOBIANA A PARTIR DE LA MATRIZ *M*

DERIVADAS DE LAS POTENCIAS

A. DERIVADAS DE LAS POTENCIAS NODALES

En general se presentan dos casos (dos variables nodales)

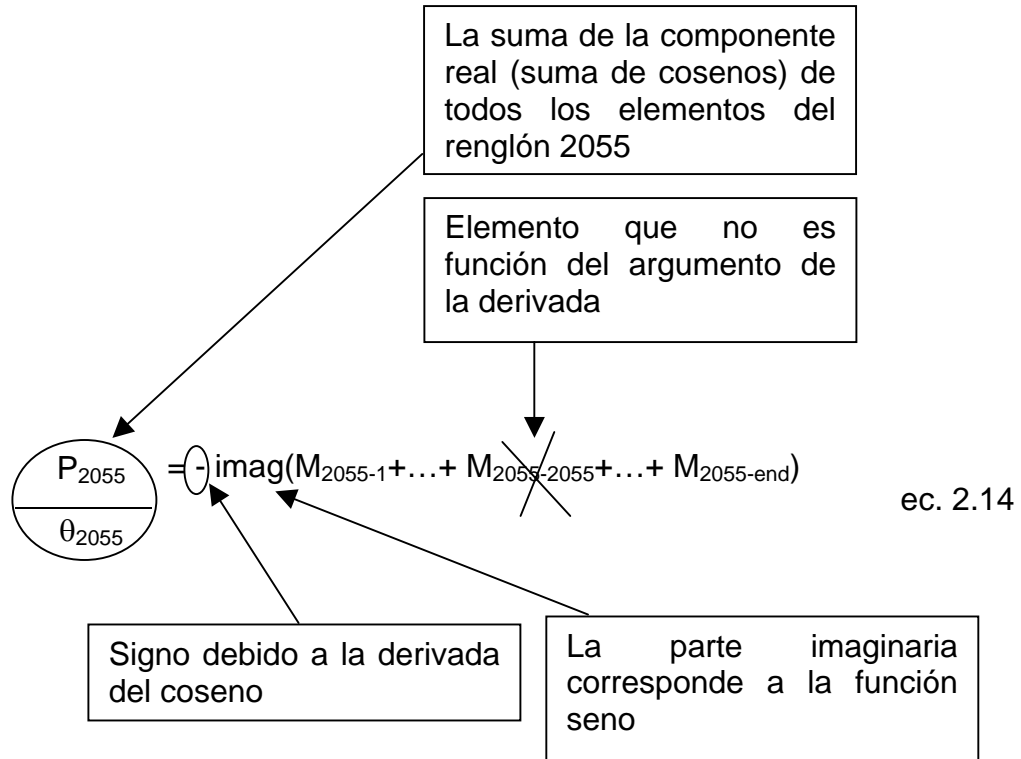
A.1 DERIVADAS DE LAS POTENCIAS NODALES RESPECTO DE LOS ÁNGULOS DE NODO

Se presentan cuatro sub-casos:

Sub-Caso 1 : el ángulo y la función corresponden al mismo nodo

Si la función es la potencia real **SE SUMAN LAS PARTES IMAGINARIAS DEL RENGLÓN EXCLUYENDO LA POSICIÓN DIAGONAL PRINCIPAL** en la matriz auxiliar **Y SE LE CAMBIA SU SIGNO.**

EJEMPLO:



Si la función es la potencia reactiva **SE SUMAN LAS PARTES REALES DEL RENGLÓN EXCLUYENDO LA POSICIÓN DIAGONAL PRINCIPAL** en la matriz auxiliar **Y NO SE LE CAMBIA SU SIGNO.**

$$\frac{Q_{1565}}{\theta_{1565}} = \text{re} (M_{1565-1} + \dots + M_{1565-1565} + \dots + M_{1565-\text{end}}) \quad \text{ec. 2.15}$$

Sub-Caso 2 : el ángulo y la función no corresponden al mismo nodo

Si la función es la potencia **SE TOMA LA PARTE IMAGINARIA DEL RENGLÓN EN LA POSICIÓN DE LA VARIABLE** en la matriz auxiliar **Y NO SE LE CAMBIA SU SIGNO.**

Hay inversión de signo de la derivada de la función coseno, debido a la derivada interna, la variable a derivar se encuentra multiplicada por -1. Este signo surge del hecho de que el elemento en M especificado, es función del complejo conjugado de la tensión nodal.

$$\frac{P_{2055}}{\theta_{1000}} = \text{imag}(M_{2055-1000}) \quad \text{ec. 2.16}$$

Si la función es la potencia reactiva **SE TOMA LA PARTE REAL DEL RENGLÓN EN LA POSICIÓN DE LA VARIABLE** en la matriz auxiliar **Y SE LE CAMBIA SU SIGNO.**

$$\frac{Q_{3789}}{\theta_{5555}} = -\text{imag}(M_{3789-5555}) \quad \text{ec. 2.17}$$

A.2 DERIVADAS DE LAS POTENCIAS NODALES RESPECTO DE LAS MAGNITUDES DE LA TENSIÓN DE NODO.

Al igual que con los ángulos nodales se presentan dos sub-casos.

Sub-Caso 1 : la magnitud de tensión y la función corresponden al mismo nodo.

Si la función es la potencia **SE SUMAN LAS PARTES REALES DEL RENGLÓN INCLUYENDO DOS VECES LA POSICIÓN DIAGONAL PRINCIPAL** en la matriz auxiliar.

$$\frac{V_{2468} P_{2468}}{V_{2468}} = \text{re} (M_{2468-1} + \dots + 2xM_{2468-2468} + \dots + M_{2468-\text{end}}) \quad \text{ec. 2.18}$$

Este dos aparece porque la derivada respecto de la magnitud del tensión en este término esta elevado al cuadrado

Es importante tener en cuenta éste término, por lo que las correcciones de magnitud que se obtienen, son cantidades relativas de este valor

Si la función es la potencia reactiva **SE SUMAN LAS PARTES IMAGINARIAS DEL RENGLÓN INCLUYENDO DOS VECES LA POSICIÓN DIAGONAL PRINCIPAL** en la matriz auxiliar.

$$\frac{V_{4325} Q_{4325}}{V_{4325}} = \text{imag} (M_{4325-1} + \dots + 2xM_{4325-4325} + \dots + M_{4325-\text{end}}) \quad \text{ec. 2.19}$$

Sub-Caso 2 : la magnitud de tensión y la función no corresponden al mismo nodo.

Si la función es la potencia **SE TOMA LA PARTE REAL DEL RENGLÓN EN LA POSICIÓN DE LA VARIABLE** en la matriz auxiliar.

$$\frac{V_{1973} P_{4748}}{V_{1973}} = \text{re} (M_{4748-1973}) \quad \text{ec. 2.20}$$

Si la función es la potencia reactiva **SE TOMA LA PARTE IMAGINARIA DEL RENGLÓN EN LA POSICIÓN DE LA VARIABLE** en la matriz auxiliar

$$\frac{V_{3633} Q_{5847}}{V_{3633}} = \text{imag} (M_{5847-3633}) \quad \text{ec. 2.21}$$

De esta manera la jacobiana para la mayor parte de casos está resuelta.

Continuando en la misma línea de trabajo, para las nuevas variables que pueden aparecer en una jacobiana de flujo de cargas: la magnitud y el ángulo de tap y nuevas funciones: potencias transmitidas por las líneas y potencias transmitidas entre las áreas, resulta que en general no se pueden obtener los valores de las funciones ni de las nuevas derivadas, salvo contadas excepciones para casos muy particulares.

Por tanto, el procedimiento falla, pero las excepciones dan la pista del camino a seguir y revelan que el procedimiento no falla si se adapta el modelo al procedimiento para que trabaje con base en estas excepciones.

Se propone instalar elementos ficticios que se han denominado auto-compensadores.

Estos tienen un valor de impedancia neta cero, constituidos por tramos de línea en serie cortos y sin pérdidas.

Uno con reactancia inductiva y el otro con reactancia capacitiva del mismo valor. Se conecta entre las líneas y los nodos o entre las líneas y los transformadores de tal forma que se pueden obtener los valores por los tramos de línea inductivo del auto-compensador, a partir del arreglo M . Ver figuras 3a y 3b.

Figura 3a. Modelo de auto-compensador intercalado entre transformador y la línea.

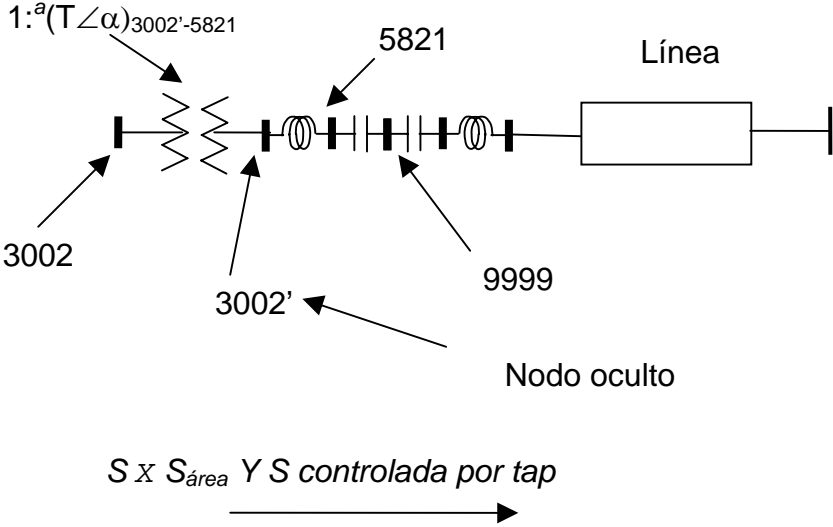
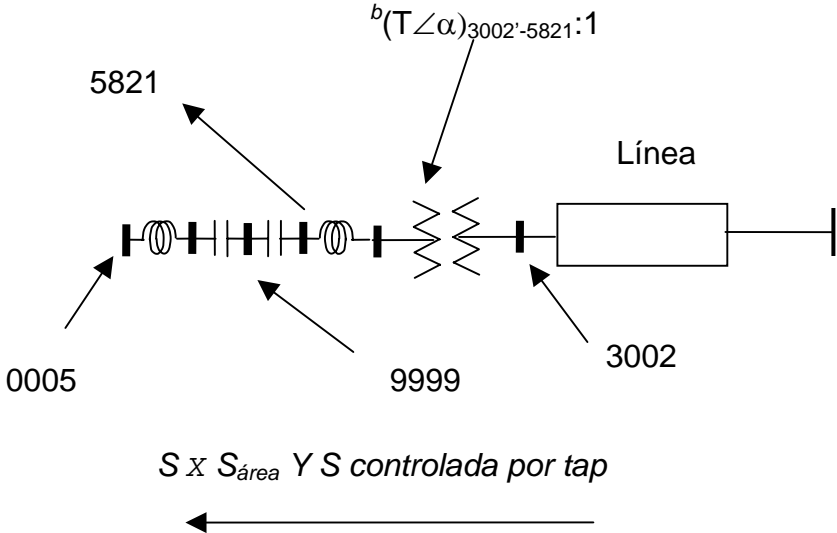


Figura 3b. Modelo de auto-compensador intercalado entre transformador y nodo.



$$1:\overset{a}{(T\angle\alpha)}_{3002'-5821} = \frac{1}{\overset{b}{(T\angle\alpha)}_{3002'-5821}:1} \quad \text{ec. 2.22}$$

Las expresiones que siguen, se aplican a las figuras 2.1a y 2.1b. La escogencia del modelo se hace teniendo en cuenta la dirección de la potencia, especificada inicialmente, y se hace para no tener en cuenta el cambios de signos cuando se tratan simultáneamente el control de área y de línea. Es decir, para hacerlas coincidir, de lo contrario es indistinto el modelo que se escoja de acuerdo con el valor con la dirección pre-asumida.

Las figuras 2.1a y 2.1b, son las mismas pero con los nodos re-enumerados para no repetir las formulaciones en función del tap que para un caso es tap^a y para el otro caso, el inverso, tap^b .

También resulta importante ver que no hay consumo de potencia en el auto-compensador. La potencia de salida es la misma que entra.

EJEMPLO:

$$\frac{\text{Tx } P_{3002}}{T_{3002'-5821}} = \text{re}(M_{3002-5821}) = \frac{\text{Tx } P_{(3002'-5821)}}{T_{3002'}} = P_{(3002'-5821)} \quad \text{ec. 2.23}$$

$$\frac{P_{3002}}{\alpha_{3002'-5821}} = -\text{imag}(M_{3002-5821}) = \frac{P_{(3002'-5821)}}{\alpha_{3002'-5821}} \quad \text{ec. 2.24}$$

$$\frac{\text{Tx } Q_{3002}}{T_{3002'-5821}} = -\text{imag}(M_{9999-9999}) + \text{imag}(M_{3002-5821}) = \frac{\text{Tx } Q_{(3002'-5821)}}{T_{3002'}} \quad \text{ec. 2.25}$$

$$Q_{3002'-5821} = -\frac{1}{2} \text{imag}(M_{9999-9999}) + \text{imag}(M_{3002-5821}) \quad \text{ec. 2.26}$$

$$\frac{Q_{3002}}{\alpha_{3002'-5821}} = \text{re}(M_{3002-5821}) = \frac{Q_{(3002'-5821)}}{\alpha_{3002'-5821}} \quad \text{ec. 2.27}$$

$$\frac{T_x P_{5821}}{T_{3002'-5821}} = \text{re}(M_{5821-3002}) = \frac{P_{(5821-3002')}}{T_{3002'-5821}} \quad \text{ec. 2.28}$$

$$\frac{P_{5821}}{\alpha_{3002'-5821}} = \text{imag}(M_{5821-3002}) = \frac{P_{(5821-3002')}}{\alpha_{3002'-5821}} \quad \text{ec. 2.29}$$

$$\frac{T_x Q_{5821}}{T_{3002'-5821}} = \text{imag}(M_{5821-3002}) \quad \text{ec. 2.30}$$

$$\frac{Q_{5821}}{\alpha_{3002'-5821}} = -\text{re}(M_{5821-3002}) \quad \text{ec. 2.31}$$

Observe que para el cálculo de algunas funciones y derivadas se hace uso de valores del nodo 9999, que funciona como nodo reflejo, los tres nodos, los de los extremos y el del centro en la configuración utilizada de auto-compensador convergen al mismo valor, y sus valores durante el proceso son muy próximos.

El resto de elementos de jacobiana de los sub-bloques adicionales valen cero.

Tabla 1. Datos del sistema.

ELEMENTOS		MATRIZ DE INCIDENCIA				MAT. INCIDENCIA MODIFICADA			
(1,1)	4.0000 - 8.0000i	(1,1)	-1	(18,19)	1	(1,1)	-1	(18,19)	1
(2,2)	4.0000 - 8.0000i	(8,1)	1	(14,20)	-1	(8,1)	1	(14,20)	-1
(3,3)	4.0000 - 8.0000i	(3,2)	-1	(15,20)	1	(3,2)	-1	(15,20)	1
(4,4)	4.0000 - 8.0000i	(17,2)	1	(15,21)	-1	(17,2)	1	(15,21)	-1
(5,5)	4.0000 - 8.0000i	(2,3)	-1	(16,21)	1	(2,3)	-1	(16,21)	1
(6,6)	0 -10.0000i	(13,3)	1	(10,22)	-1	(13,3)	1	(10,22)	-1
(7,7)	0 -10.0000i	(1,4)	-1	(11,22)	1	(1,4)	-1	(11,22)	1
(8,8)	0 -10.0000i	(4,4)	1	(9,23)	-1	(4,4)	1	(9,23)	-1
(9,9)	0 -10.0000i	(4,5)	-1	(10,23)	1	(4,5)	-1	(10,23)	1
(10,10)	0 -10.0000i	(12,5)	1	(1,24)	1	(12,5)	1	(1,24)	1
(11,11)	0 -10.0000i	(7,6)	-1	(8,25)	1	(7,6)	-1	(8,25)	1
(12,12)	0 -10.0000i	(8,6)	1	(3,26)	1	(8,6)	1	(3,26)	1
(13,13)	0 -10.0000i	(3,7)	-1	(17,27)	1	(3,7)	-1	(17,27)	1
(14,14)	0 -10.0000i	(5,7)	1	(2,28)	1	(5,7)	1	(2,28)	1
(15,15)	0 -10.0000i	(11,8)	-1	(13,29)	1	(11,8)	-1	(13,29)	1
(16,16)	0 -10.0000i	(12,8)	1	(4,30)	1	(12,8)	1	(4,30)	1
(17,17)	0 +10.0000i	(13,9)	-1	(1,31)	1	(13,9)	-1	(1,31)	1
(18,18)	0 +10.0000i	(14,9)	1	(4,32)	1	(14,9)	1	(4,32)	1
(19,19)	0 +10.0000i	(4,10)	-1	(12,33)	1	(4,10)	-1	(12,33)	1
(20,20)	0 +10.0000i	(16,10)				(16,10)	1		
(21,21)	0 +10.0000i		1			(3,11)	A1		
(22,22)	0 +10.0000i	(3,11)	-1			(9,11)	B1		
(23,23)	0 +10.0000i	(9,11)	1			(2,12)	A2		
(24,24)	0 + 0.0200i	(2,12)	-1			(18,12)	B2		
(25,25)	0 + 0.0200i	(18,12)				(3,13)	D1		
(26,26)	0 + 0.0200i		1			(9,14)	C1		
(27,27)	0 + 0.0200i	(3,13)	1			(2,15)	D1		
(28,28)	0 + 0.0200i	(9,14)	1			(18,16)	C2		
(29,29)	0 + 0.0200i	(2,15)	1			(6,17)	-1		
(30,30)	0 + 0.0200i	(18,16)				(7,17)	1		
(31,31)	0 + 0.0200i		1			(5,18)	-1		
(32,32)	0 + 0.0200i	(6,17)	-1			(6,18)	1		
(33,33)	0 + 0.0200i	(7,17)	1			(17,19)	-1		
		(5,18)	-1						
		(6,18)	1						
		(17,19)	-						
			1						

Usando la notación de Matlab para variables simbólicas, se tiene:

$$A1 = -\text{sym}(\text{'conj}(tap1)\text{'})$$

$$B1 = \text{sym}(\text{'tap1'\text{'}})$$

$$C1 = \text{sym}(\text{'(1-tap1)\text{'}})$$

$$D1 = \text{sym}(\text{'conj}(tap1)*(tap1-1)\text{'})$$

$$A2 = -\text{sym}(\text{'conj}(tap2)\text{'})$$

$$B2 = \text{sym}(\text{'tap2'\text{'}})$$

$$C2 = \text{sym}(\text{'(1-tap2)\text{'}})$$

$$D1 = \text{sym}(\text{'conj}(tap2)*(tap2-1)\text{'})$$

Tabla 2. Datos iniciales.

	mag(V)	ang(V)	Q	P
n ₁	1	0	NA	NA
n ₂	1	0	NA	0.6000
n ₃	1	0	-0.3500	-1.0000
n ₄	1	0	-0.4000	-1.1000
n ₅	1	0	0	0
n ₆	1	0	0	0
n ₇	1	0	0	0
n ₈	1	0	0	0
n ₉	1	0	0	0
n ₁₀	1	0	0	0
n ₁₁	1	0	0	0
n ₁₂	1	0	0	0
n ₁₃	1	0	0	0
n ₁₄	1	0	0	0
n ₁₄	1	0	0	0
n ₁₆	1	0	0	0
n ₁₇	1	0	0	0
n ₁₈	1	0	0	0

3.1 CASO : SOLUCIÓN CASO BASE

Figura 5 .caso base.

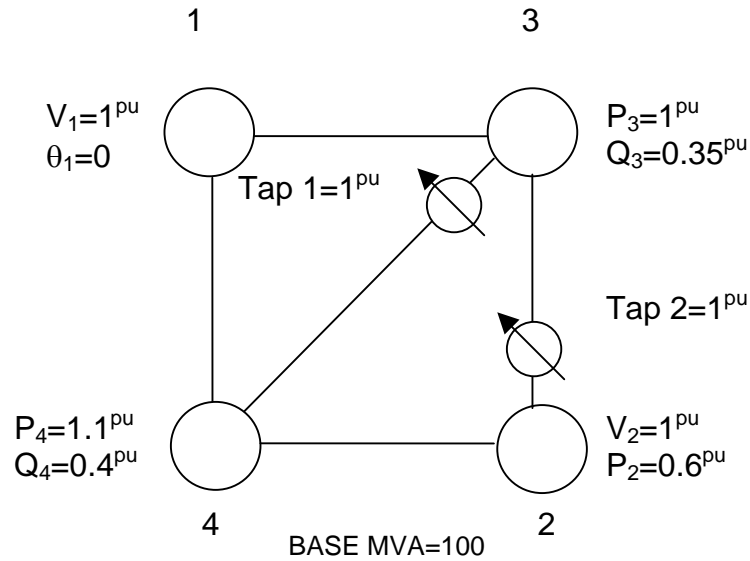


Tabla 3. Voltajes caso base

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-3.2229	1.0000	-3.6036	1.0000	-3.6066
n_3	0.9590	-4.1074	0.9555	-4.4159	0.9555	-4.4179
n_4	0.9565	-4.2146	0.9528	-4.5348	0.9527	-4.5369
n_5	0.9650	0.1182	0.9630	0.2415	0.9630	0.2425
n_6	0.9590	-4.1074	0.9555	-4.4159	0.9555	-4.4179
n_7	0.9530	-8.3330	0.9543	-9.1170	0.9544	-9.1207
n_8	0.9590	-4.1074	0.9555	-4.4159	0.9555	-4.4179
n_9	0.9596	-4.2506	0.9560	-4.5764	0.9560	-4.5785
n_{10}	0.9590	-4.1074	0.9555	-4.4159	0.9555	-4.4179
n_{11}	0.9584	-3.9642	0.9550	-4.2552	0.9550	-4.2571
n_{12}	0.9590	-4.1074	0.9555	-4.4159	0.9555	-4.4179
n_{13}	0.9565	-4.2146	0.9528	-4.5348	0.9527	-4.5369
n_{14}	0.9268	-6.0051	0.9202	-6.5160	0.9202	-6.5199
n_{14}	0.9565	-4.2146	0.9528	-4.5348	0.9527	-4.5369
n_{16}	0.9862	-2.4241	0.9864	-2.6848	0.9864	-2.6870
n_{17}	1.0000	-3.2229	1.0000	-3.6036	1.0000	-3.6066
n_{18}	0.9754	-4.8701	0.9722	-5.2934	0.9721	-5.2966

En la tabla 3. se muestran los voltajes incluyendo los nodos de los auto-compensadores.

Tabla 4. Vector de errores en potencia del caso base.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾ 1.0e-003 *	Q⁽³⁾ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.6000	N.A.	0.0126	N.A.	-0.0099	N.A.
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.0659	-0.0397	-0.4064	-0.4053
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0635	-0.0405	-0.3357	-0.2801
n ₅	0	0	0.0000	0	-0.0000	0
n ₆	0	0	-0.0084	0.0500	0.2068	0.7525
n ₇	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	0.0235	-0.0435	-0.0547	-0.5852
n ₉	0	0	0.0000	0	0	0
n ₁₀	0	0	0.0000	0.0001	-0.0002	0.0010
n ₁₁	0	0	0	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0004	0.0004	-0.0056	-0.0019
n ₁₃	0	0.0200	0.0213	-0.0046	0.2905	-0.0643
n ₁₄	0	0	0.0000	0	0.0000	0
n ₁₄	0	0	-0.0178	0.0089	-0.2802	0.0819
n ₁₆	0	0	-0.0000	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	-0.0025	0.0006	-0.0624	0.0130
n ₁₈	0	0	-0.0000	0	-0.0000	0

El criterio de tolerancia es <1.0e-003

Tabla 5. Matriz auxiliar – solución final caso base.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(3,9)	0.0256 - 9.1343i
(4,1)	-4.4019 - 7.2966i	(10,9)	-0.0256 + 9.1343i
(8,1)	-4.3994 - 7.3267i	(9,10)	0.0256 + 9.1343i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(10,10)	0 -18.2588i
(13,2)	-3.9342 - 7.5590i	(11,10)	-0.0256 + 9.1245i
(18,2)	-0.2867 - 9.7172i	(10,11)	0.0256 + 9.1245i
(3,3)	3.6518 +25.5441i	(12,11)	-0.0256 - 9.1245i
(5,3)	0.7476 - 9.1709i	(4,12)	-3.6564 - 7.2750i
(9,3)	-0.0256 - 9.1343i	(11,12)	0.0256 - 9.1245i
(17,3)	-3.7133 - 7.6972i	(12,12)	3.6518 +16.4147i
(1,4)	-3.1961 - 7.8995i	(2,13)	-3.6867 - 7.6828i
(4,4)	7.2617 +23.5642i	(13,13)	3.6308 +16.3206i
(12,4)	-3.6262 - 7.2901i	(14,13)	-0.3034 - 8.7616i
(16,4)	0.3034 - 9.3926i	(13,14)	0.3034 - 8.7616i
(3,5)	-0.7476 - 9.1709i	(15,14)	-0.3034 + 8.7616i
(6,5)	0.7476 + 9.1709i	(14,15)	0.3034 + 8.7616i
(5,6)	-0.7476 + 9.1709i	(15,15)	0 -18.1542i
(6,6)	0 -18.2588i	(16,15)	-0.3034 + 9.3926i
(7,6)	0.7476 + 9.0879i	(4,16)	-0.3034 - 9.3926i
(6,7)	-0.7476 + 9.0879i	(15,16)	0.3034 + 9.3926i
(8,7)	0.7476 - 9.0879i	(3,17)	-3.9298 - 7.5890i
(1,8)	-3.2218 - 7.9155i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(7,8)	-0.7476 - 9.0879i	(18,17)	0.2867 + 9.7172i
(8,8)	3.6518 +16.4147i	(2,18)	0.2867 - 9.7172i
		(17,18)	-0.2867 + 9.7172i

En la tabla 5 se han ordenado los términos de la matriz dispersa con un esquema de ordenamiento por columnas de los términos no cero.

3.2 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN MEDIANTE INYECCIÓN DE POTENCIA REACTIVA

En muchas ocasiones es necesario mantener la tensión dentro de unos márgenes de variación estrechos.

Este control se hace mediante una fuente capaz de controlar la potencia reactiva, como es el caso de los compensadores síncronos que son máquinas sin carga acoplada al eje.

Con un devanado de campo más robusto que las máquinas síncronas convencionales, su rango de actuación es continuo, a diferencia de los compensadores estacionarios convencionales que pueden suministrar potencia de un modo discontinuo.

Figura 6. Control de la tensión local mediante inyección de reactivos

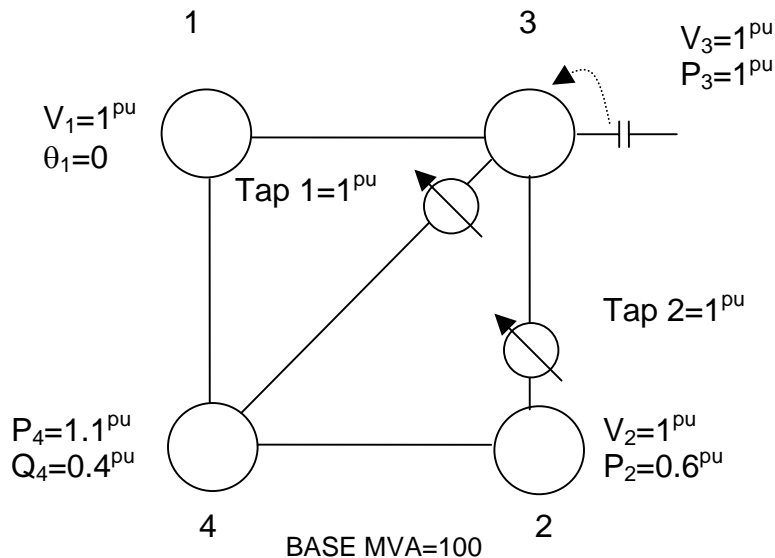


Tabla 6. Voltajes control de la tensión local mediante inyección de reactivos.

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n ₁	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n ₂	1.0000	-3.2229	1.0000	-3.4860	1.0000	-3.4869
n ₃	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.5299	1.0000	-5.5307
n ₄	0.9702	-4.6077	0.9679	-4.8384	0.9679	-4.8391
n ₅	0.9651	-1.0564	0.9627	-1.0482	0.9627	-1.0479
n ₆	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.5299	1.0000	-5.5307
n ₇	1.0349	-9.5075	1.0430	-9.6658	1.0430	-9.6675
n ₈	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.5299	1.0000	-5.5307
n ₉	0.9735	-5.4252	0.9716	-5.7370	0.9716	-5.7381
n ₁₀	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.5299	1.0000	-5.5307
n ₁₁	1.0265	-5.1387	1.0284	-5.3341	1.0284	-5.3347
n ₁₂	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.5299	1.0000	-5.5307
n ₁₃	0.9702	-4.6077	0.9679	-4.8384	0.9679	-4.8391
n ₁₄	0.9542	-6.3982	0.9505	-6.7430	0.9505	-6.7444
n ₁₄	0.9702	-4.6077	0.9679	-4.8384	0.9679	-4.8391
n ₁₆	0.9863	-2.8172	0.9864	-3.0025	0.9864	-3.0031
n ₁₇	1.0000	-3.2229	1.0000	-3.4860	1.0000	-3.4869
n ₁₈	1.0164	-4.8701	1.0162	-5.1094	1.0162	-5.1101

Tabla 7. Vector de errores de potencia control de la tensión local mediante inyección de reactivos.

	$P^{(1)}$	$Q^{(1)}$	$P^{(2)}$	$P^{(2)}$	$P^{(3)}$ 1.0e-003 *	$P^{(3)}$ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.6000	N.A.	-0.0000	N.A.	-0.0119	N.A.
n ₃	-1.0000	N.A.	-0.0283	N.A.	-0.0961	N.A.
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0505	-0.0407	-0.1609	-0.1615
n ₅	0	0	0	0	0.0000	0
n ₆	0	0	0.0514	0.0544	-0.0108	0.0912
n ₇	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	-0.0431	-0.0616	0.0831	-0.0745
n ₉	0	0	0	0	0	0
n ₁₀	0	0	-0.0013	0.0001	-0.0377	0.0103
n ₁₁	0	0	0	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0024	0.0008	0.0114	-0.0019
n ₁₃	0	0.0200	0.0128	-0.0062	0.1006	-0.0319
n ₁₄	0	0	0.0000	0	0	0
n ₁₄	0	0	-0.0097	0.0092	-0.0948	0.0407
n ₁₆	0	0	-0.0000	0	0.0000	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0021	-0.0010	0.0007	0.0006
n ₁₈	0	0	0.0000	0	0	0

Tabla 8. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión local mediante inyección de reactivos.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.0352 + 9.7160i
(4,1)	-4.5111 - 7.3891i	(9,10)	0.0352 + 9.7160i
(8,1)	-4.7524 - 7.5772i	(10,10)	0 -20.0000i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.0352 +10.2840i
(13,2)	-4.0533 - 7.6498i	(10,11)	0.0352 +10.2840i
(18,2)	-0.2878 -10.1576i	(12,11)	-0.0352 -10.2840i
(3,3)	4.0000 +27.9800i	(4,12)	-3.7779 - 7.7895i
(5,3)	0.7524 - 9.5972i	(11,12)	0.0352 -10.2840i
(9,3)	-0.0352 - 9.7160i	(12,12)	4.0000 +17.9800i
(17,3)	-3.7122 - 8.1376i	(2,13)	-3.6878 - 7.8325i
(1,4)	-3.2046 - 8.0423i	(13,13)	3.7474 +16.8447i
(4,4)	7.4949 +24.3208i	(14,13)	-0.3059 - 9.1949i
(12,4)	-3.9648 - 7.6960i	(13,14)	0.3059 - 9.1949i
(16,4)	0.3059 - 9.5422i	(15,14)	-0.3059 + 9.1949i
(3,5)	-0.7524 - 9.5972i	(14,15)	0.3059 + 9.1949i
(6,5)	0.7524 + 9.5972i	(15,15)	0 -18.7372i
(5,6)	-0.7524 + 9.5972i	(16,15)	-0.3059 + 9.5422i
(6,6)	0 -20.0000i	(4,16)	-0.3059 - 9.5422i
(7,6)	0.7524 +10.4028i	(15,16)	0.3059 + 9.5422i
(6,7)	-0.7524 +10.4028i	(3,17)	-4.2828 - 7.8523i
(8,7)	0.7524 -10.4028i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-3.2103 - 8.3483i	(18,17)	0.2878 +10.1576i
(7,8)	-0.7524 -10.4028i	(2,18)	0.2878 -10.1576i
(8,8)	4.0000 +17.9800i	(17,18)	-0.2878 +10.1576i
(3,9)	0.0352 - 9.7160i		

La suma de la parte imaginaria de la fila tres del la matriz auxiliar, es la potencia total inyectada por la barra tres. La diferencia entre la demanda

inyectada y esta potencia total, es la potencia que debe ser inyectada a la barra para llevar el tensión de nodo al valor de consigna 1^{pu}.

La potencia de compensación se calcula a partir de estos resultados de la siguiente manera:

$$Q_{Comp} = Q_{Tot} - Q_{Dem} = 0.8145 - 0.35 = 0.4645$$

3.3 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN REMOTA MEDIANTE INYECCIÓN DE REACTIVOS

El control se efectúa manteniendo la tensión de un nodo con la tensión en otro por inyección de potencia reactiva. Matemáticamente esto se efectúa haciendo un intercambio de variables de magnitudes de tensiones de nodo, con las mismas ecuaciones de potencias especificadas.

Este caso se distingue del precedente, en que la potencia debe ser inyectada en un nodo cercano para mantener la tensión en una barra. La característica principal es que puede hacerse para un nodo en particular, como es el caso que se resolverá mediante la jacobiana, pero también puede hacerse para mejorar el perfil de tensiones de una zona.

Esto basado en los criterios de calidad, y por tanto es necesario ubicar óptimamente tales equipos de compensación para que tengan el mayor impacto positivo, para mantener las tensiones dentro de unos adecuados márgenes.

Este último caso de la determinación del valor de tensión de nodo piloto, puede auxiliarse mediante un análisis de sensibilidad.

Figura 7. Control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva.

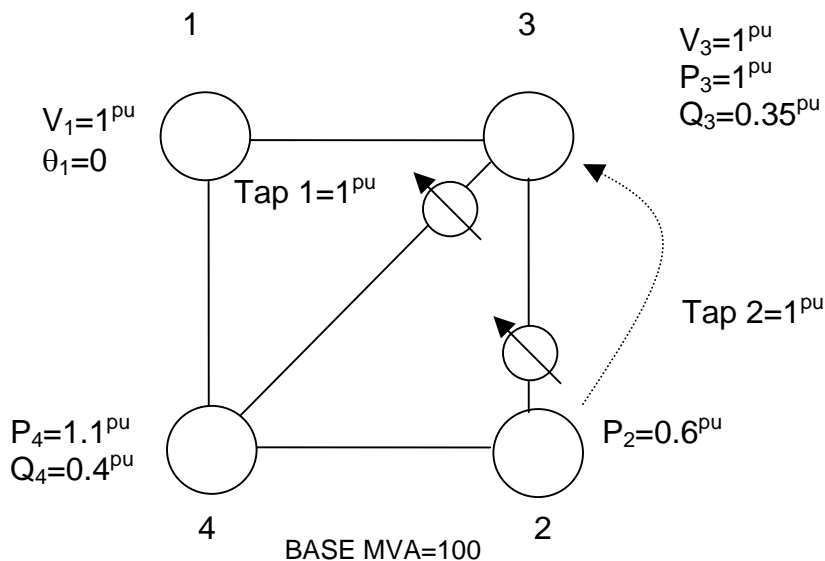


Tabla 9. Voltajes control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva.

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0815	-5.5579	1.0865	-6.2552	1.0866	-6.2590
n_3	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.6606	1.0000	-5.6634
n_4	0.9975	-5.3892	0.9974	-5.7691	0.9974	-5.7720
n_5	0.9651	-1.0564	0.9617	-1.0716	0.9617	-1.0714
n_6	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.6606	1.0000	-5.6634
n_7	1.0349	-9.5075	1.0442	-9.8878	1.0442	-9.8919
n_8	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.6606	1.0000	-5.6634
n_9	1.0007	-5.4252	1.0007	-5.8069	1.0007	-5.8097
n_{10}	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.6606	1.0000	-5.6634
n_{11}	0.9993	-5.1387	0.9993	-5.5140	0.9993	-5.5169
n_{12}	1.0000	-5.2820	1.0000	-5.6606	1.0000	-5.6634
n_{13}	0.9975	-5.3892	0.9974	-5.7691	0.9974	-5.7720
n_{14}	0.9271	-7.1797	0.9209	-7.5295	0.9208	-7.5305
n_{14}	0.9975	-5.3892	0.9974	-5.7691	0.9974	-5.7720
n_{16}	1.0679	-3.5987	1.0747	-4.2627	1.0747	-4.2653
n_{17}	1.0815	-5.5579	1.0865	-6.2552	1.0866	-6.2590
n_{18}	1.0167	-7.2052	1.0156	-7.7399	1.0156	-7.7443

Tabla 10. Vector de errores de potencias control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾ 1.0e-003 *	Q⁽³⁾ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.6000	-0.3300	-0.0541	-0.0248	0.1605	-0.2017
n ₃	-1.0000	NA	-0.0296	NA	-0.5188	NA
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0004	-0.0408	-0.4454	-0.2915
n ₅	0	0	0.0000	0	-0.0000	0
n ₆	0	0	0.0514	0.0544	0.2322	0.1772
n ₇	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	-0.0431	-0.0616	-0.1060	-0.1659
n ₉	0	0	0	0	-0.0000	0
n ₁₀	0	0	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0000
n ₁₁	0	0	0	0	-0.0000	0
n ₁₂	0	0.0200	0.0000	-0.0001	0.0001	-0.0000
n ₁₃	0	0.0200	0.0208	-0.0035	-0.3176	-0.0261
n ₁₄	0	0	0	0	0	0
n ₁₄	0	0	-0.0439	0.0097	0.3694	0.1245
n ₁₆	0	0	-0.0000	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0051	0.0027	-0.0600	-0.1011
n ₁₈	0	0	0.0000	0	0	0

Tabla 11. Matriz auxiliar solución final para control de la tensión remota mediante inyección de potencia reactiva.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.0256 +10.0067i
(4,1)	-4.7714 - 7.5377i	(9,10)	0.0256 +10.0067i
(8,1)	-4.7696 - 7.5665i	(10,10)	-0.0000 -20.0000i
(2,2)	4.7220 +21.2253i	(11,10)	-0.0256 + 9.9933i
(13,2)	-4.2610 - 8.7058i	(10,11)	0.0256 + 9.9933i
(18,2)	-0.2859 -11.0312i	(12,11)	-0.0256 - 9.9933i
(3,3)	4.0000 +27.9800i	(4,12)	-4.0047 - 7.9716i
(5,3)	0.7694 - 9.5864i	(11,12)	0.0256 - 9.9933i
(9,3)	-0.0256 -10.0067i	(12,12)	4.0000 +17.9800i
(17,3)	-4.4360 - 8.6465i	(2,13)	-4.4081 - 8.6323i
(1,4)	-3.1673 - 8.3398i	(13,13)	3.9792 +17.8863i
(4,4)	7.9583 +25.8248i	(14,13)	-0.2821 - 9.1805i
(12,4)	-3.9744 - 7.9867i	(13,14)	0.2821 - 9.1805i
(16,4)	0.2818 -10.7152i	(15,14)	-0.2821 + 9.1805i
(3,5)	-0.7694 - 9.5864i	(14,15)	0.2821 + 9.1805i
(6,5)	0.7694 + 9.5864i	(15,15)	0.0000 -19.8958i
(5,6)	-0.7694 + 9.5864i	(16,15)	-0.2818 +10.7152i
(6,6)	-0.0000 -20.0000i	(4,16)	-0.2818 -10.7152i
(7,6)	0.7697 +10.4134i	(15,16)	0.2818 +10.7152i
(6,7)	-0.7697 +10.4134i	(3,17)	-4.2556 - 8.7367i
(8,7)	0.7697 -10.4134i	(17,17)	4.7220 - 2.3846i
(1,8)	-3.1914 - 8.3555i	(18,17)	0.2859 +11.0312i
(7,8)	-0.7697 -10.4134i	(2,18)	0.2859 -11.0312i
(8,8)	4.0000 +17.9800i	(17,18)	-0.2859 +11.0312i
(3,9)	0.0256 -10.0067i		

La potencia reactiva adicional a la solución del caso base, que debe ser inyectada en el nodo dos para mantener la magnitud de la tensión del nodo tres en 1^{pu} es de:

$$Q_{2 \text{ (adicional)}} = Q_{2 \text{ (actual)}} - Q_{2 \text{ (caso base)}} = 1.5618 - 0.5800 = 0.9818$$

3.4 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN LOCAL MEDIANTE TRANSFORMADOR

El ajuste en la relación de transformación en magnitud, con el cual se puede controlar el voltaje en uno de sus nodos u otro cercano. El problema es resuelto intercambiando las variables. Esto es, la tensión que se quiere ajustar por la magnitud de la relación de tensiones en el transformador. Como la relación es un valor discreto, se debe hacer un ajuste final al valor mas cercano posible.

Figura 8 . Control de la tensión local mediante transformador

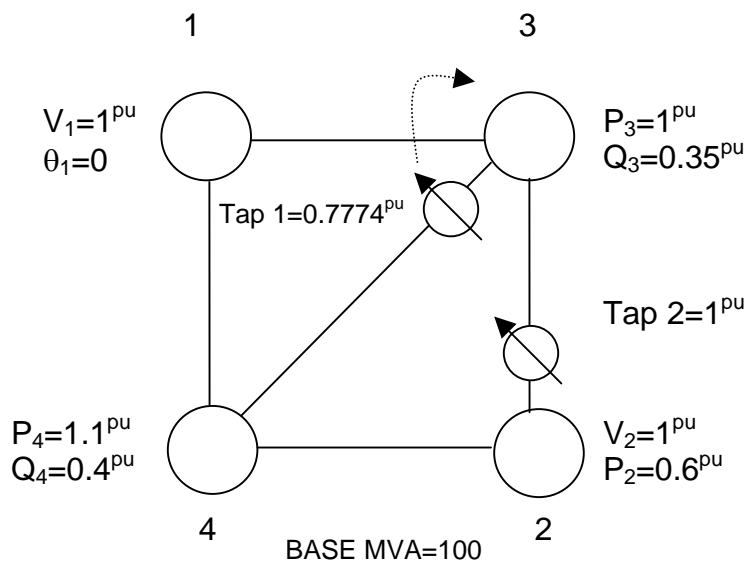


Tabla 12. Voltajes control de la tensión local mediante transformador

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$		$V^{(4)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.2313	1.0000	-8.3159	1.0000	-8.3166
n_3	1.0000	-6.0376	1.0000	-6.6700	1.0000	-6.7109	1.0000	-6.7112
n_4	0.9152	-6.1424	0.8914	-6.9642	0.8894	-7.0213	0.8894	-7.0217
n_5	0.9598	-1.2075	0.9544	-1.2480	0.9541	-1.2531	0.9541	-1.2531
n_6	1.0000	-6.0376	1.0000	-6.6700	1.0000	-6.7109	1.0000	-6.7112
n_7	1.0402	-10.8676	1.0537	-11.5841	1.0541	-11.6495	1.0541	-11.6500
n_8	1.0000	-6.0376	1.0000	-6.6700	1.0000	-6.7109	1.0000	-6.7112
n_9	0.9013	-4.2958	0.8737	-4.0943	0.8715	-4.0204	0.8714	-4.0194
n_{10}	0.8355	-6.0376	0.7824	-6.6700	0.7775	-6.7109	0.7774	-6.7112
n_{11}	0.7697	-7.7793	0.6926	-9.7793	0.6857	-10.1277	0.6856	-10.1335
n_{12}	0.8355	-6.0376	0.7824	-6.6700	0.7775	-6.7109	0.7774	-6.7112
n_{13}	0.9152	-6.1424	0.8914	-6.9642	0.8894	-7.0213	0.8894	-7.0217
n_{14}	0.8390	-7.3284	0.7944	-8.7750	0.7908	-8.9093	0.7907	-8.9105
n_{14}	0.9152	-6.1424	0.8914	-6.9642	0.8894	-7.0213	0.8894	-7.0217
n_{16}	0.9913	-4.9564	0.9890	-5.4775	0.9888	-5.5112	0.9888	-5.5114
n_{17}	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.2313	1.0000	-8.3159	1.0000	-8.3166
n_{18}	0.9947	-6.2481	0.9910	-6.9802	0.9907	-7.0291	0.9907	-7.0294

Tabla 13. Vector de errores control de la tensión local mediante transformador.

	$P^{(1)}$	$Q^{(1)}$	$P^{(2)}$	$Q^{(2)}$	$P^{(3)}$	$Q^{(3)}$	$P^{(4)}$ 1.0e-003 *	$Q^{(4)}$ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.0600	N.A.	-0.0125	N.A.	-0.0014	N.A.	-0.0098	N.A.
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.1106	-0.1472	-0.0104	-0.0148	-0.1200	-0.1402
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.1197	-0.0730	-0.0056	-0.0023	-0.0303	-0.0062
n ₅	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₆	0	0	0.0676	0.0710	0.0008	0.0005	0.0038	0.0028
n ₇	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	-0.0566	-0.0805	-0.0005	-0.0005	-0.0030	-0.0030
n ₉	0	0	0.0000	0	-0.0000	0	-0.0000	0
n ₁₀	0	0	-0.0334	0.0065	-0.0133	0.0021	-0.3412	0.0860
n ₁₁	0	0	0	0	-0.0000	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	0.0596	-0.0008	0.0185	-0.0014	0.4130	-0.0716
n ₁₃	0	0.0200	0.0300	-0.0011	0.0051	-0.0005	0.0539	-0.0069
n ₁₄	0	0	-0.0000	0	0.0000	0	0	0
n ₁₄	0	0	-0.0288	0.0036	-0.0050	0.0005	-0.0534	0.0069
n ₁₆	0	0	0	0	0.0000	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0001	-0.0003	0.0001	-0.0001	0.0008	-0.0004
n ₁₈	0	0	0	0	-0.0000	0	0	0

Tabla 14. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión localmente mediante transformador.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	0.3180 + 6.7678i
(4,1)	-4.4007 - 6.6270i	(9,10)	-0.3180 + 6.7678i
(8,1)	-4.9075 - 7.4777i	(10,10)	0 -12.0892i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	0.3177 + 5.3213i
(13,2)	-3.3960 - 7.1938i	(10,11)	-0.3177 + 5.3213i
(18,2)	0.2225 - 9.9048i	(12,11)	0.3177 - 5.3213i
(3,3)	4.0000 +24.0246i	(4,12)	-2.7959 - 5.5169i
(5,3)	0.9075 - 9.4977i	(11,12)	-0.3177 - 5.3213i
(9,3)	0.3180 - 6.7678i	(12,12)	2.4178 +10.8682i
(17,3)	-4.2225 - 7.8848i	(2,13)	-3.7175 - 7.0331i
(1,4)	-2.6612 - 7.4968i	(13,13)	3.1642 +14.2231i
(4,4)	6.3284 +20.5357i	(14,13)	-0.2317 - 7.0292i
(12,4)	-2.7360 - 5.5468i	(13,14)	0.2317 - 7.0292i
(16,4)	0.2318 - 8.7918i	(15,14)	-0.2317 + 7.0292i
(3,5)	-0.9075 - 9.4977i	(14,15)	0.2317 + 7.0292i
(6,5)	0.9075 + 9.4977i	(15,15)	0 -15.8210i
(5,6)	-0.9075 + 9.4977i	(16,15)	-0.2318 + 8.7918i
(6,6)	0 -20.0000i	(4,16)	-0.2318 - 8.7918i
(7,6)	0.9075 +10.5023i	(15,16)	0.2318 + 8.7918i
(6,7)	-0.9075 +10.5023i	(3,17)	-3.7744 - 8.1089i
(8,7)	0.9075 -10.5023i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-3.0377 - 8.4126i	(18,17)	-0.2225 + 9.9048i
(7,8)	-0.9075 -10.5023i	(2,18)	-0.2225 - 9.9048i
(8,8)	4.0000 +17.9800i	(17,18)	0.2225 + 9.9048i
(3,9)	-0.3180 - 6.7678i		

Tabla 15. Relación de transformación en magnitud, control de la tensión local mediante transformador

	Tap1 ⁽¹⁾	Tap1 ⁽²⁾	Tap1 ⁽³⁾	Tap1 ⁽⁴⁾
mag	0.8355	0.7824	0.7775	0.7774

3.5 CASO: CONTROL DE LA TENSIÓN REMOTA MEDIANTE TRANSFORMADOR

Este esquema es limitado, según el grado de sensibilidad de la magnitud de la tensión que se desee controlar con el parámetro de control

Figura 9 . Control de la tensión remota mediante transformador.

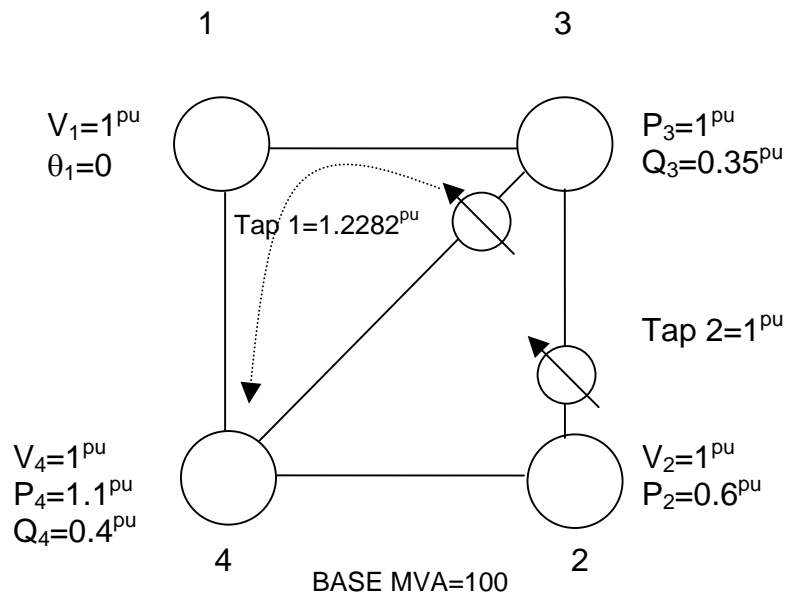


Tabla 16. Voltajes de control de la tensión remota mediante transformador.

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$		$V^{(4)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.1948	1.0000	-8.2268	1.0000	-8.2268
n_3	0.9158	-6.0449	0.8920	-6.7904	0.8926	-6.8380	0.8926	-6.8380
n_4	1.0000	-6.1546	1.0000	-6.7766	1.0000	-6.8041	1.0000	-6.8041
n_5	0.9426	0.7198	0.9367	1.4781	0.9368	1.4687	0.9368	1.4687
n_6	0.9158	-6.0449	0.8920	-6.7904	0.8926	-6.8380	0.8926	-6.8380
n_7	0.8891	-12.8096	0.8663	-15.6771	0.8689	-15.7996	0.8689	-15.7993
n_8	0.9158	-6.0449	0.8920	-6.7904	0.8926	-6.8380	0.8926	-6.8380
n_9	1.0209	-8.1724	1.0221	-8.9369	1.0219	-8.9728	1.0219	-8.9728
n_{10}	1.0890	-6.0449	1.0962	-6.7906	1.0964	-6.8380	1.0964	-6.8380
n_{11}	1.1571	-3.9174	1.1717	-4.9235	1.1721	-4.9768	1.1721	-4.9768
n_{12}	1.0890	-6.0449	1.0962	-6.7906	1.0964	-6.8380	1.0964	-6.8380
n_{13}	1.0000	-6.1546	1.0000	-6.7766	1.0000	-6.8041	1.0000	-6.8041
n_{14}	0.9915	-5.4060	0.9885	-5.6237	0.9885	-5.6457	0.9885	-5.6457
n_{14}	1.0000	-6.1546	1.0000	-6.7766	1.0000	-6.8041	1.0000	-6.8041
n_{16}	1.0085	-6.9032	1.0119	-7.9052	1.0119	-7.9358	1.0119	-7.9358
n_{17}	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.1948	1.0000	-8.2268	1.0000	-8.2268
n_{18}	0.9274	-8.1827	0.9069	-9.8064	0.9076	-9.8518	0.9076	-9.8518

Tabla 17. Vector de errores de potencia control de la tensión remota mediante transformador.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾	Q⁽³⁾	P⁽⁴⁾ 1.0e-004 *	Q⁽⁴⁾ 1.0e-004 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A	N.A	N.A.	N.A.
n ₂	0.0600	N.A.	0.0133	N.A.	0.0017	N.A.	-0.0165	N.A.
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.2163	-0.0482	-0.0082	0.0283	0.0679	-0.0563
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0245	-0.0468	-0.0006	-0.0006	-0.0127	-0.0119
n ₅	0	0	0	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
n ₆	0	0	-0.0578	0.1168	-0.0079	0.0100	0.3437	0.0587
n ₇	0	0	0	0	0.0000	0	0	0
n ₈	0	0.0200	0.1004	-0.0952	0.0103	-0.0073	-0.3808	-0.0818
n ₉	0	0	-0.0055	-0.1487	-0.0004	-0.0131	-0.0256	0.0329
n ₁₀	0	0	-0.0550	0.0163	0.0011	-0.0000	0.0058	0.0029
n ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	0.0634	-0.0106	-0.0012	-0.0001	-0.0058	-0.0057
n ₁₃	0	0.0200	-0.0016	-0.0019	-0.0004	-0.0005	0.0001	-0.0007
n ₁₄	0	0	0.0000	0	-0.0000	0	0	0
n ₁₄	0	0	0.0022	0.0017	0.0004	0.0005	-0.0001	0.0006
n ₁₆	0	0	0.0000	0	0	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	-0.0268	0.0066	-0.0031	0.0008	0.0009	0.0078
n ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 18. Matriz auxiliar - solución final para control de la tensión remota mediante transformador.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.4174 +11.1962i
(4,1)	-4.9196 - 7.4698i	(9,10)	0.4174 +11.1962i
(8,1)	-4.3954 - 6.6653i	(10,10)	-0.0000 -24.0397i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.4174 +12.8435i
(13,2)	-3.8001 - 8.0968i	(10,11)	0.4174 +12.8435i
(18,2)	-0.2574 - 9.0725i	(12,11)	-0.4174 -12.8435i
(3,3)	3.1873 +26.3467i	(4,12)	-4.3802 - 8.7734i
(5,3)	1.2082 - 8.2748i	(11,12)	0.4174 -12.8435i
(9,3)	-0.4174 -11.1962i	(12,12)	4.8079 +21.6117i
(17,3)	-3.7426 - 7.0526i	(2,13)	-4.1974 - 7.8982i
(1,4)	-3.0240 - 8.4176i	(13,13)	4.0000 +17.9800i
(4,4)	8.0000 +25.9600i	(14,13)	0.1999 - 9.8832i
(12,4)	-4.3906 - 8.7682i	(13,14)	-0.1999 - 9.8832i
(16,4)	-0.1999 -10.1168i	(15,14)	0.1999 + 9.8832i
(3,5)	-1.2082 - 8.2748i	(14,15)	-0.1999 + 9.8832i
(6,5)	1.2082 + 8.2748i	(15,15)	0 -20.0000i
(5,6)	-1.2082 + 8.2748i	(16,15)	0.1999 +10.1168i
(6,6)	0 -15.9364i	(4,16)	0.1999 -10.1168i
(7,6)	1.2082 + 7.6616i	(15,16)	-0.1999 +10.1168i
(6,7)	-1.2082 + 7.6616i	(3,17)	-3.3965 - 7.2256i
(8,7)	1.2082 - 7.6616i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-2.6949 - 7.5155i	(18,17)	0.2574 + 9.0725i
(7,8)	-1.2082 - 7.6616i	(2,18)	0.2574 - 9.0725i
(8,8)	3.1873 +14.3268i	(17,18)	-0.2574 + 9.0725i
(3,9)	0.4174 -11.1962i		

Tabla 19. Relación de transformación en magnitud para control de la tensión remota mediante transformador.

	Tap1 ⁽¹⁾	Tap1 ⁽²⁾	Tap1 ⁽³⁾	Tap1 ⁽⁴⁾
mag	1.1732	1.2275	1.2282	1.2282

3.6 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA ACTIVA POR EL REGULADOR

La relación de transformación de fase requerida para mantener un flujo de potencia activa específica a través del regulador, puede ser determinada de especificarla como una variable adicional del problema y la función de potencia incluidas en la matriz jacobiana.

La matriz jacobiana normal es aumentada en una fila y una columna adicionales para el desfaseamiento α_{pq} como una nueva variable del problema y P_{pq} es dado, de este modo se necesitan nuevas expresiones para la derivadas parciales de la nueva fila y columna.

En ciertas ocasiones es necesario que el operador del sistema ajuste el flujo de potencia por una línea, para llevar el sistema a una condición de operación más segura.

Así mismo, para redistribuir los flujo por la red y de esta manera evitar que se saturate la capacidad de determinados elementos.

Figura 10. Control de la potencia activa transportada por el transformador.

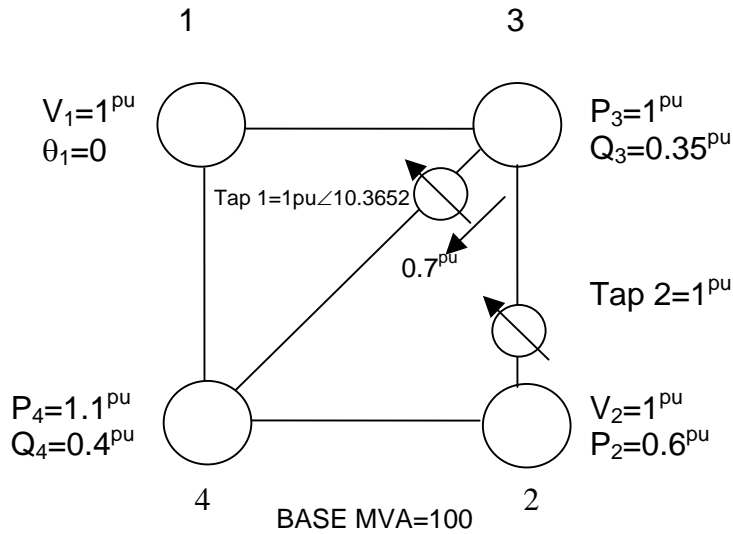


Tabla 20. Voltajes control de la potencia activa por el regulador

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$		$V^{(4)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.0835	1.0000	-8.1057	1.0000	-8.1057
n_3	0.9590	-8.4583	0.9493	-9.2011	0.9491	-9.2157	0.9491	-9.2157
n_4	0.9565	-3.7312	0.9486	-4.2687	0.9484	-4.2805	0.9484	-4.2805
n_5	0.9346	-0.7520	0.9285	-0.3459	0.9285	-0.3353	0.9285	-0.3353
n_6	0.9590	-8.4583	0.9493	-9.2011	0.9491	-9.2157	0.9491	-9.2157
n_7	0.9834	-16.1646	0.9911	-17.5091	0.9912	-17.5296	0.9912	-17.5296
n_8	0.9590	-8.4583	0.9493	-9.2011	0.9491	-9.2157	0.9491	-9.2157
n_9	0.9933	-2.8003	0.9859	-3.1336	0.9857	-3.1417	0.9857	-3.1417
n_{10}	0.9590	1.2104	0.9493	1.1514	0.9491	1.1495	0.9491	1.1495
n_{11}	0.9247	5.2211	0.9182	5.7477	0.9182	5.7570	0.9182	5.7570
n_{12}	0.9590	1.2104	0.9493	1.1514	0.9491	1.1495	0.9491	1.1495
n_{13}	0.9565	-3.7312	0.9486	-4.2687	0.9484	-4.2805	0.9484	-4.2805
n_{14}	0.8964	-2.0410	0.8813	-2.0982	0.8810	-2.0925	0.8810	-2.0925
n_{14}	0.9565	-3.7312	0.9486	-4.2687	0.9484	-4.2805	0.9484	-4.2805
n_{16}	1.0166	-5.4214	1.0170	-6.1583	1.0170	-6.1759	1.0170	-6.1759
n_{17}	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.0835	1.0000	-8.1057	1.0000	-8.1057
n_{18}	0.9788	-9.1244	0.9693	-10.1610	0.9691	-10.1843	0.9691	-10.1843

Tabla 21. Vector de errores de potencias control de la potencia activa transportada por el transformador.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾	Q⁽³⁾	P⁽⁴⁾ 1.0e- 005 *	Q⁽⁴⁾ 1.0e- 005 *
n ₁	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
n ₂	0.0600	NA	-0.0196	NA	-0.0005	NA	-0.0241	NA
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.1251	-0.1200	-0.0025	-0.0030	-0.0493	-0.1529
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.1024	-0.0494	-0.0019	-0.0007	-0.0694	-0.0285
n ₅	0	0	-0.0000	0	0	0	0	0
n ₆	0	0	0.0628	0.1661	0.0027	0.0039	0.0758	0.1642
n ₇	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	-0.0206	-0.1658	-0.0013	-0.0029	-0.0527	-0.0826
n ₉	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0000	0
n ₁₀	0	0	0.0461	0.0450	0.0008	0.0009	0.0135	0.0376
n ₁₁	0	0	0.0000	0	-0.0000	0	0.0000	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0351	-0.0630	-0.0006	-0.0015	-0.0108	-0.0628
n ₁₃	0	0.0200	-0.0356	-0.0162	-0.0016	-0.0006	-0.1038	-0.0593
n ₁₄	0	0	0	0	0.0000	0	0	0
n ₁₄	0	0	0.0339	0.0080	0.0015	0.0004	0.0976	0.0474
n ₁₆	0	0	0.0000	0	0.0000	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	-0.0009	0.0001	-0.0005	0.0001	-0.0255	0.0023
n ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0
*	0.7000		0.0337		0.0008		0.0328	

* es el error en potencia activa por el regulador

Tabla 22. Matriz auxiliar - solución final para control de la potencia activa por el regulador.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.7000 + 9.3290i
(4,1)	-4.3495 - 7.2832i	(9,10)	0.7000 + 9.3290i
(8,1)	-4.9633 - 6.8866i	(10,10)	0 -18.0149i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.7000 + 8.6858i
(13,2)	-3.2791 - 7.8237i	(10,11)	0.7000 + 8.6858i
(18,2)	-0.3515 - 9.6847i	(12,11)	-0.7000 - 8.6858i
(3,3)	3.6030 +25.2028i	(4,12)	-4.2658 - 6.8281i
(5,3)	1.3603 - 8.7061i	(11,12)	0.7000 - 8.6858i
(9,3)	-0.7000 - 9.3290i	(12,12)	3.6030 +16.1954i
(17,3)	-3.6485 - 7.6647i	(2,13)	-4.2915 - 7.3175i
(1,4)	-3.2169 - 7.8495i	(13,13)	3.5982 +16.1738i
(4,4)	7.1963 +23.3521i	(14,13)	0.3190 - 8.3500i
(12,4)	-2.9030 - 7.5095i	(13,14)	-0.3190 - 8.3500i
(16,4)	-0.3190 - 9.6408i	(15,14)	0.3190 + 8.3500i
(3,5)	-1.3603 - 8.7061i	(14,15)	-0.3190 + 8.3500i
(6,5)	1.3603 + 8.7061i	(15,15)	0 -17.9908i
(5,6)	-1.3603 + 8.7061i	(16,15)	0.3190 + 9.6408i
(6,6)	0.0000 -18.0149i	(4,16)	0.3190 - 9.6408i
(7,6)	1.3603 + 9.3087i	(15,16)	-0.3190 + 9.6408i
(6,7)	-1.3603 + 9.3087i	(3,17)	-3.9427 - 7.5176i
(8,7)	1.3603 - 9.3087i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-2.5313 - 8.1026i	(18,17)	0.3515 + 9.6847i
(7,8)	-1.3603 - 9.3087i	(2,18)	0.3515 - 9.6847i
(8,8)	3.6030 +16.1954i	(17,18)	-0.3515 + 9.6847i
(3,9)	0.7000 - 9.3290i		

El transporte de activa por el regulador en la solución del caso base es de 0.0256^{pu} , para llevarlo a 0.7^{pu} se debe ajustar la relación de ángulos de tensión en 10.3652° .

Tabla 23. Relación de transformación en ángulo para control de la potencia activa por el regulador.

	Tap1 ⁽²⁾	Tap1 ⁽²⁾	Tap1 ⁽³⁾	Tap1 ⁽⁴⁾
ang	9.6687	10.3525	10.3652	10.3652

3.7 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA REACTIVA POR EL TR-REGULADOR

Esta acción de control no es muy común, pero puede ser requerida cuando circulen grande flujos de reactiva, evitando que el límite térmico de los equipos asociados sea superado con la consiguiente pérdida de vida útil. También para aliviar los problemas asociados a los regímenes transitorios relacionados con el flujo de potencia reactiva.

Figura 11. Control del flujo de potencia reactiva por el regulador.

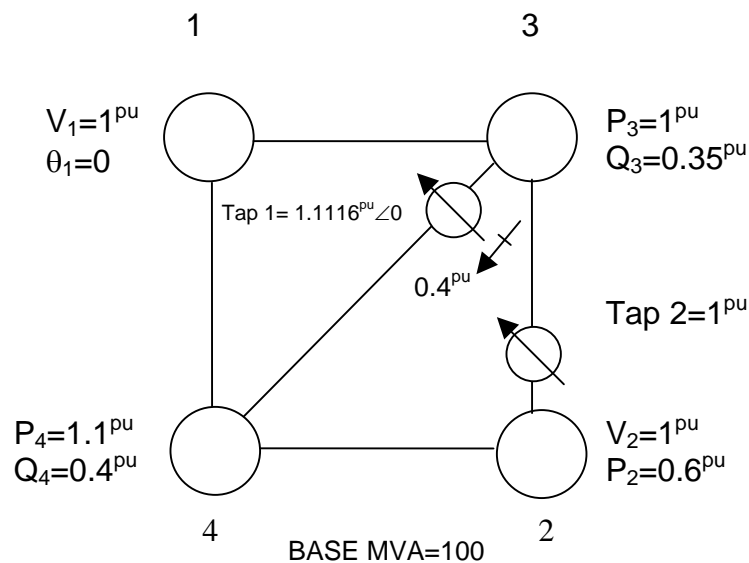


Tabla 24. Voltajes control del flujo de potencia reactiva por el regulador

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.0904	1.0000	-7.8328	1.0000	-7.9008
n_3	0.9335	-6.0433	0.9351	-6.5762	0.9253	-6.6198
n_4	0.9822	-6.1520	0.9687	-6.6364	0.9765	-6.6607
n_5	0.9462	0.3156	0.9448	0.4119	0.9430	0.6561
n_6	0.9335	-6.0433	0.9351	-6.5762	0.9253	-6.6198
n_7	0.9207	-12.4023	0.9394	-13.6197	0.9228	-14.0496
n_8	0.9335	-6.0433	0.9351	-6.5762	0.9253	-6.6198
n_9	0.9958	-7.3593	0.9785	-7.4839	0.9894	-7.8482
n_{10}	1.0358	-6.0433	1.0052	-6.5735	1.0280	-6.6199
n_{11}	1.0758	-4.7273	1.0320	-5.6954	1.0671	-5.4759
n_{12}	1.0358	-6.0433	1.0052	-6.5735	1.0280	-6.6199
n_{13}	0.9822	-6.1520	0.9687	-6.6364	0.9765	-6.6607
n_{14}	0.9595	-5.8092	0.9336	-6.3717	0.9474	-6.1722
n_{14}	0.9822	-6.1520	0.9687	-6.6364	0.9765	-6.6607
n_{16}	1.0049	-6.4949	1.0039	-6.8807	1.0058	-7.1182
n_{17}	1.0000	-7.0904	1.0000	-7.8328	1.0000	-7.9008
n_{18}	0.9415	-7.7770	0.9418	-8.4194	0.9339	-8.7227

Tabla 24. Voltajes control del flujo de potencia reactiva por el regulador (continuación)

	$V^{(4)}$		$V^{(5)}$		$V^{(6)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.9090	1.0000	-7.9126	1.0000	-7.9126
n_3	0.9255	-6.6240	0.9249	-6.6266	0.9249	-6.6266
n_4	0.9761	-6.6657	0.9766	-6.6671	0.9766	-6.6671
n_5	0.9431	0.6516	0.9430	0.6647	0.9430	0.6647
n_6	0.9255	-6.6240	0.9249	-6.6266	0.9249	-6.6266
n_7	0.9232	-14.0568	0.9223	-14.0820	0.9223	-14.0820
n_8	0.9255	-6.6240	0.9249	-6.6266	0.9249	-6.6266
n_9	0.9888	-7.8330	0.9894	-7.8527	0.9894	-7.8526
n_{10}	1.0269	-6.6240	1.0281	-6.6266	1.0281	-6.6266
n_{11}	1.0653	-5.5017	1.0672	-5.4899	1.0672	-5.4900
n_{12}	1.0269	-6.6240	1.0281	-6.6266	1.0281	-6.6266
n_{13}	0.9761	-6.6657	0.9766	-6.6671	0.9766	-6.6671
n_{14}	0.9466	-6.1871	0.9474	-6.1766	0.9474	-6.1767
n_{14}	0.9761	-6.6657	0.9766	-6.6671	0.9766	-6.6671
n_{16}	1.0057	-7.1162	1.0058	-7.1291	1.0058	-7.1290
n_{17}	1.0000	-7.9090	1.0000	-7.9126	1.0000	-7.9126
n_{18}	0.9340	-8.7254	0.9336	-8.7421	0.9336	-8.7421

Tabla 25. Vector de errores de potencias: control del flujo de potencia reactiva por el regulador.

	$P^{(1)}$	$Q^{(1)}$	$P^{(2)}$	$Q^{(2)}$	$P^{(3)}$	$Q^{(3)}$
n_1	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n_2	0.0600	N.A.	0.0042	N.A.	-0.0005	N.A.
n_3	-1.0000	-0.3300	-0.1458	-0.0485	-0.0031	-0.0091
n_4	-1.1000	-0.3600	-0.0436	-0.0513	-0.0008	-0.0011
n_5	0	0	0	0	-0.0000	0
n_6	0	0	-0.0264	0.1072	0.0022	0.0012
n_7	0	0	0	0	0	0
n_8	0	0.0200	0.0619	-0.0924	-0.0023	-0.0010
n_9	0	0	-0.0016	-0.0678	-0.0005	-0.0016
n_{10}	0	0	-0.0190	0.0057	-0.0027	0.0008
n_{11}	0	0	0	0	-0.0000	0
n_{12}	0	0.0200	0.0183	-0.0038	0.0038	-0.0004
n_{13}	0	0.0200	-0.0029	-0.0009	0.0003	-0.0001
n_{14}	0	0	0	0	0.0000	0.0000
n_{14}	0	0	0.0027	0.0003	-0.0003	0.0000
n_{16}	0	0	0	0	0	0
n_{17}	0	0.0200	-0.0174	0.0043	0.0000	-0.0001
n_{18}	0	0	0	0	0	0
*		0.4000		-0.0848		0.1293

Tabla 25. Vector de errores de potencias: control del flujo de potencia reactiva por el regulador (continuación)

	P⁽⁴⁾	Q⁽⁴⁾	P⁽⁵⁾	Q⁽⁵⁾	P⁽⁶⁾ 1.0e-004 *	Q⁽⁶⁾ 1.0e-004 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.0004	N.A.	-0.0000	N.A.	0.0110	N.A.
n ₃	-0.0027	-0.0006	-0.0000	-0.0000	-0.0797	-0.0213
n ₄	-0.0002	-0.0001	-0.0000	-0.0000	-0.0063	-0.0017
n ₅	0	0	0.0000	0	0	0
n ₆	-0.0009	0.0002	0.0000	0.0000	-0.0299	0.0053
n ₇	0	0	0	0	0	0
n ₈	0.0010	-0.0001	-0.0000	-0.0000	0.0327	-0.0024
n ₉	-0.0000	-0.0035	-0.0000	-0.0000	-0.0022	-0.1026
n ₁₀	-0.0010	0.0003	-0.0000	0.0000	-0.0311	0.0093
n ₁₁	0	-0.0000	0	0.0000	0	0
n ₁₂	0.0016	-0.0001	0.0000	-0.0000	0.0497	-0.0049
n ₁₃	0.0005	-0.0001	0.0000	-0.0000	0.0151	-0.0022
n ₁₄	0.0000	0	-0.0000	0	-0.0000	0
n ₁₄	-0.0005	0.0001	-0.0000	0.0000	-0.0132	0.0041
n ₁₆	0	0	0	0	0	0
n ₁₇	-0.0004	0.0001	-0.0000	-0.0000	-0.0104	0.0027
n ₁₈	0	0	0	0	0	0
*		-0.0030		0.0072		-0.1109

* es el error en potencia reactiva por el regulador

Tabla 26. Matriz auxiliar - solución final para control del flujo de potencia en cuadratura por el regulador.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.2177 +10.1701i
(4,1)	-4.7869 - 7.3062i	(9,10)	0.2177 +10.1701i
(8,1)	-4.5289 - 6.9231i	(10,10)	0.0000 -21.1403i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.2177 +10.9701i
(13,2)	-3.7355 - 7.8956i	(10,11)	0.2177 +10.9701i
(18,2)	-0.1352 - 9.3345i	(12,11)	-0.2177 -10.9701i
(3,3)	3.4220 +25.9519i	(4,12)	-4.0217 - 8.0293i
(5,3)	1.1069 - 8.6511i	(11,12)	0.2177 -10.9701i
(9,3)	-0.2177 -10.1701i	(12,12)	4.2281 +19.0051i
(17,3)	-3.8648 - 7.3145i	(2,13)	-4.0752 - 7.7258i
(1,4)	-2.9728 - 8.2132i	(13,13)	3.8147 +17.1471i
(4,4)	7.6294 +24.7575i	(14,13)	0.0792 - 9.2515i
(12,4)	-4.0104 - 8.0350i	(13,14)	-0.0792 - 9.2515i
(16,4)	-0.0792 - 9.8220i	(15,14)	0.0792 + 9.2515i
(3,5)	-1.1069 - 8.6511i	(14,15)	-0.0792 + 9.2515i
(6,5)	1.1069 + 8.6511i	(15,15)	0.0000 -19.0736i
(5,6)	-1.1069 + 8.6511i	(16,15)	0.0792 + 9.8220i
(6,6)	0 -17.1098i	(4,16)	0.0792 - 9.8220i
(7,6)	1.1069 + 8.4587i	(15,16)	-0.0792 + 9.8220i
(6,7)	-1.1069 + 8.4587i	(3,17)	-3.5327 - 7.4806i
(8,7)	1.1069 - 8.4587i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-2.8211 - 7.7769i	(18,17)	0.1352 + 9.3345i
(7,8)	-1.1069 - 8.4587i	(2,18)	0.1352 - 9.3345i
(8,8)	3.4220 +15.3818i	(17,18)	-0.1352 + 9.3345i
(3,9)	0.2177 -10.1701i		

Tabla 27. Relación de transformación de tensiones en magnitud para control del flujo de potencia reactiva por el regulador.

	Tap 1 ⁽¹⁾	Tap 1 ⁽²⁾	Tap 1 ⁽³⁾	Tap 1 ⁽⁴⁾	Tap 1 ⁽⁵⁾	Tap 1 ⁽⁶⁾
Mag	1.1023	1.0748	1.1107	1.1096	1.1116	1.1116

La relación de transformación de voltajes en magnitud es de 1.1116^{pu} para establecer un flujo de potencia reactiva por el regulador de 0.4^{pu}

3.8 CASO: CONTROL DE LA POTENCIA COMPLEJA POR EL TR-REGULADOR

Este caso es una combinación de los dos anteriores, en el que se obtiene una solución simultánea, incorporando las dos ecuaciones de control de potencia activa y reactiva a través del regulador, junto con las variables de la magnitud β_{pq} y el ángulo α_{pq} del transformador.

Estos equipos tienen un alto costo asociado y su empleo se justifica en redes de gran tamaño y fuertemente malladas.

Para obtener una mejor explotación de la red cuando se acerca a sus límites de capacidad.

Y en otro, para postergar inversiones en expansión y conservar un margen de capacidad de los elementos de la red.

Figura 12. Control del flujo de potencia compleja por el regulador

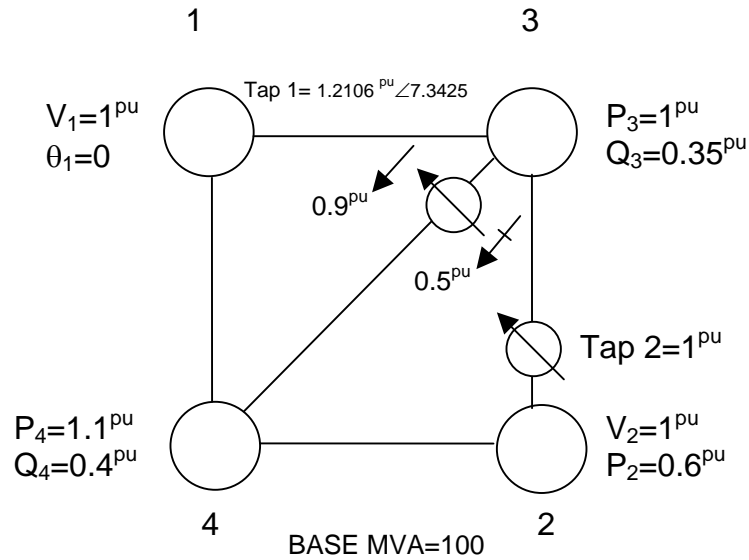


Tabla 28. Voltajes control del flujo de potencia compleja por el regulador.

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.1252	1.0000	-8.2720
n_3	0.9116	-7.8179	0.9175	-9.3264	0.8966	-8.9519
n_4	1.0042	-4.3825	0.9803	-4.4170	0.9957	-4.9605
n_5	0.9294	0.4613	0.9234	0.4854	0.9233	1.0883
n_6	0.9116	-7.8179	0.9175	-9.3264	0.8966	-8.9519
n_7	0.8939	-16.0972	0.9380	-19.0651	0.8986	-19.2478
n_8	0.9116	-7.8179	0.9175	-9.3264	0.8966	-8.9519
n_9	1.0516	-5.8839	1.0264	-4.7852	1.0410	-6.1480
n_{10}	1.1016	-0.7272	1.0398	0.0846	1.0835	-1.5855
n_{11}	1.1516	4.4294	1.0599	4.8537	1.1323	2.5709
n_{12}	1.1016	-0.7272	1.0398	0.0846	1.0835	-1.5855
n_{13}	1.0042	-4.3825	0.9803	-4.4170	0.9957	-4.9605
n_{14}	0.9867	-2.1193	0.9392	-1.7164	0.9695	-2.2922
n_{14}	1.0042	-4.3825	0.9803	-4.4170	0.9957	-4.9605
n_{16}	1.0218	-6.6457	1.0233	-6.9181	1.0239	-7.4875
n_{17}	1.0000	-7.0904	1.0000	-8.1252	1.0000	-8.2720
n_{18}	0.9364	-9.6973	0.9448	-11.0651	0.9248	-11.3503

Tabla 28. Voltajes control del flujo de potencia compleja por el regulador (continuación).

	$V^{(4)}$		$V^{(5)}$		$V^{(6)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-8.3155	1.0000	-8.3313	1.0000	-8.3317
n_3	0.8972	-8.9908	0.8951	-8.9560	0.8951	-8.9565
n_4	0.9941	-4.9515	0.9956	-5.0066	0.9956	-5.0064
n_5	0.9231	1.0691	0.9231	1.1276	0.9230	1.1273
n_6	0.8972	-8.9908	0.8951	-8.9560	0.8951	-8.9565
n_7	0.9000	-19.3116	0.8962	-19.3452	0.8962	-19.3458
n_8	0.8972	-8.9908	0.8951	-8.9560	0.8951	-8.9565
n_9	1.0394	-6.0535	1.0409	-6.1918	1.0409	-6.1905
n_{10}	1.0793	-1.4525	1.0837	-1.6157	1.0837	-1.6140
n_{11}	1.1257	2.7947	1.1329	2.5878	1.1328	2.5904
n_{12}	1.0793	-1.4525	1.0837	-1.6157	1.0837	-1.6140
n_{13}	0.9941	-4.9515	0.9956	-5.0066	0.9956	-5.0064
n_{14}	0.9664	-2.2664	0.9693	-2.3268	0.9693	-2.3264
n_{14}	0.9941	-4.9515	0.9956	-5.0066	0.9956	-5.0064
n_{16}	1.0239	-7.4855	1.0240	-7.5433	1.0240	-7.5431
n_{17}	1.0000	-8.3155	1.0000	-8.3313	1.0000	-8.3317
n_{18}	0.9252	-11.3897	0.9233	-11.4216	0.9233	-11.4219

Tabla 29. vector de errores de potencia, control del flujo de potencia compleja por el regulador.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾	Q⁽³⁾
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	-1.0000	N.A.	-0.3908	N.A.	-0.0049	N.A.
n ₃	-1.1000	-0.3300	0.0265	-0.0689	-0.0075	-0.0461
n ₄	0	-0.3600	0	-0.0735	0	0.0011
n ₅	0	0	-0.0466	0	0.0120	0
n ₆	0	0	0	0.1732	-0.0000	0.0059
n ₇	0	0	0.1069	0	-0.0121	0
n ₈	0	0.0200	-0.0159	-0.1496	-0.0015	-0.0056
n ₉	0	0	-0.0990	-0.1758	-0.0103	-0.0075
n ₁₀	0	0	0	0.0982	0.0000	0.0063
n ₁₁	0	0	0.1378	0	0.0163	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0097	-0.0706	-0.0043	-0.0068
n ₁₃	0	0.0200	0	-0.0169	0	-0.0017
n ₁₄	0	0	0.0139	0	0.0039	0
n ₁₄	0	0	0	0.0157	0	0.0006
n ₁₆	0	0	-0.0204	0	-0.0000	0
n ₁₇	0	0.0200	-0.0000	0.0046	-0.0000	0.0001
n ₁₈	0.9000	0	-0.1254	0	-0.0045	0.0000
*	0.5000	0.0600	-0.2735	0.0261	0.3147	-0.0044

Tabla 29. vector de errores de potencia, control del flujo de potencia compleja por el regulador (continuación).

	P⁽⁴⁾	Q⁽⁴⁾	P⁽⁵⁾	Q⁽⁵⁾	P⁽⁶⁾ 1.0e-003 *	Q⁽⁶⁾ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	0.0028	N.A.	0.0000	N.A.	0.0230	N.A.
n ₃	-0.0079	-0.0025	-0.0001	-0.0002	-0.0767	-0.0345
n ₄	0	0.0019	0	0.0000	0	0.0174
n ₅	-0.0032	0	0.0000	0	-0.0411	0
n ₆	0	-0.0000	0	0.0000	0	-0.0010
n ₇	0.0031	0	-0.0000	0	0.0405	0
n ₈	-0.0013	-0.0001	0.0000	-0.0000	-0.0129	0.0005
n ₉	0.0080	-0.0160	0.0001	-0.0000	0.0522	-0.1600
n ₁₀	-0.0000	-0.0002	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0004
n ₁₁	-0.0071	0	-0.0001	0	-0.0401	0.0000
n ₁₂	-0.0002	-0.0025	-0.0000	-0.0001	-0.0036	-0.0257
n ₁₃	0	-0.0002	0	-0.0000	0	-0.0018
n ₁₄	0.0001	0	0.0000	0	0.0028	0
n ₁₄	0.0000	-0.0000	-0.0000	0.0000	0	-0.0001
n ₁₆	-0.0022	0.0000	0.0000	-0.0000	-0.0212	-0.0000
n ₁₇	-0.0000	0.0004	0	-0.0000	0	0.0043
n ₁₈	0.0040	-0.0000	0.0000	0	0.0344	0
*	-0.0123	-0.0004	0.0331	-0.0000	-0.1945	-0.0038

* es el error en potencias por el regulador

Tabla 30. Matriz auxiliar - solución final para control del flujo de potencia compleja por el regulador.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.9000 +11.2444i
(4,1)	-4.6624 - 7.5871i	(9,10)	0.9000 +11.2444i
(8,1)	-4.6517 - 6.5163i	(10,10)	0 -23.4888i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.8999 +12.2444i
(13,2)	-3.5139 - 8.1826i	(10,11)	0.8999 +12.2444i
(18,2)	-0.4977 - 9.2197i	(12,11)	-0.8999 -12.2444i
(3,3)	3.2050 +26.1507i	(4,12)	-4.8189 - 8.3614i
(5,3)	1.4466 - 8.1349i	(11,12)	0.8999 -12.2444i
(9,3)	-0.9000 -11.2442i	(12,12)	4.6978 +21.1164i
(17,3)	-3.5022 - 7.1997i	(2,13)	-4.4377 - 7.7206i
(1,4)	-3.2722 - 8.2822i	(13,13)	3.9651 +17.8231i
(4,4)	7.9302 +25.7334i	(14,13)	0.4512 - 9.6405i
(12,4)	-3.7978 - 8.8720i	(13,14)	-0.4512 - 9.6405i
(16,4)	-0.4512 -10.1849i	(15,14)	0.4512 + 9.6405i
(3,5)	-1.4466 - 8.1349i	(14,15)	-0.4512 + 9.6405i
(6,5)	1.4466 + 8.1349i	(15,15)	0 -19.8254i
(5,6)	-1.4466 + 8.1349i	(16,15)	0.4512 +10.1849i
(6,6)	0.0000 -16.0252i	(4,16)	0.4512 -10.1849i
(7,6)	1.4466 + 7.8903i	(15,16)	-0.4512 +10.1849i
(6,7)	-1.4466 + 7.8903i	(3,17)	-3.6584 - 7.1216i
(8,7)	1.4466 - 7.8903i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-2.4221 - 7.6311i	(18,17)	0.4977 + 9.2197i
(7,8)	-1.4466 - 7.8903i	(2,18)	0.4977 - 9.2197i
(8,8)	3.2050 +14.4066i	(17,18)	-0.4977 + 9.2197i
(3,9)	0.9000 -11.2442i		

Relación de transformación en magnitud y ángulo para ajustar el transporte de potencia en el regulador a $0.9+0.5i$.

Tabla 31. Relación de transformación en magnitud para control del flujo de potencia compleja por el regulador

	Tap 1 ⁽¹⁾	Tap 1 ⁽²⁾	Tap 1 ⁽³⁾	Tap 1 ⁽⁴⁾	Tap 1 ⁽⁵⁾	Tap 1 ⁽⁶⁾
mag	1.1900	1.1324	1.2067	1.2031	1.2107	1.2106
ang	7.0907	9.4065	7.3665	7.5384	7.3404	7.3425

3.9 CASO: CONTROL DEL INTERCAMBIO DE POTENCIA ACTIVA ENTRE ÁREAS

Esta situación es bastante común cuando se operan redes conectadas.

El control de la operación se hace ajustando el intercambio neto entre las áreas, que es la suma de las potencias en las líneas que las enlazan.

El intercambio puede resultar conveniente aunque la capacidad del área sea suficiente, ya sea para asegurar la reserva o por costos de los combustibles.

También se debe tener en cuenta el máximo de capacidad de intercambio por razones de seguridad, así como también para ajustarse al contrato de la energía pactada.

Figura 13. Control de intercambio de potencia activa entre áreas.

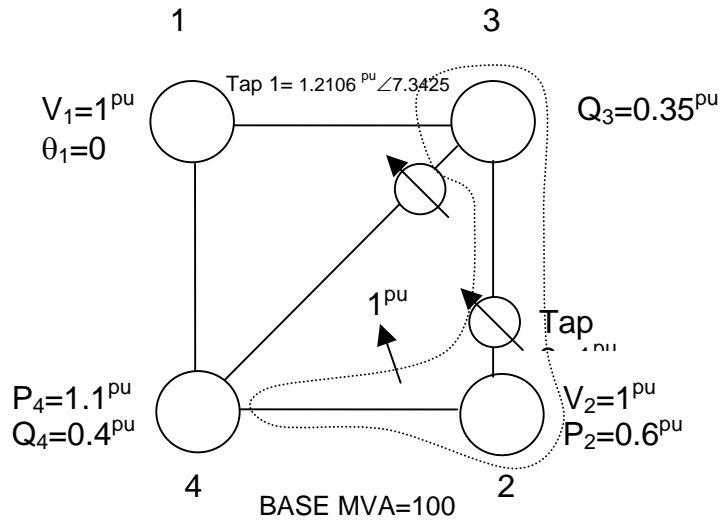


Tabla 32. Voltajes control del intercambio de potencia activa entre áreas

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$		$V^{(4)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	6.8039	1.0000	7.3236	1.0000	7.3276	1.0000	7.3276
n_3	0.9590	0.9060	0.9539	1.0398	0.9538	1.0409	0.9538	1.0409
n_4	0.9565	0.7988	0.9511	0.9205	0.9511	0.9215	0.9511	0.9215
n_5	1.0000	1.1208	0.9998	1.2612	0.9998	1.2624	0.9998	1.2624
n_6	0.9590	0.9060	0.9539	1.0398	0.9538	1.0409	0.9538	1.0409
n_7	0.9180	0.6911	0.9080	0.7964	0.9079	0.7971	0.9079	0.7971
n_8	0.9590	0.9060	0.9539	1.0398	0.9538	1.0409	0.9538	1.0409
n_9	0.9596	0.7627	0.9544	0.8788	0.9543	0.8797	0.9543	0.8797
n_{10}	0.9590	0.9060	0.9539	1.0398	0.9538	1.0409	0.9538	1.0409
n_{11}	0.9584	1.0492	0.9534	1.2010	0.9533	1.2023	0.9533	1.2023
n_{12}	0.9590	0.9060	0.9539	1.0398	0.9538	1.0409	0.9538	1.0409
n_{13}	0.9565	0.7988	0.9511	0.9205	0.9511	0.9215	0.9511	0.9215
n_{14}	0.9618	-5.0024	0.9655	-5.4003	0.9656	-5.4005	0.9656	-5.4005
n_{14}	0.9565	0.7988	0.9511	0.9205	0.9511	0.9215	0.9511	0.9215
n_{16}	0.9512	6.6000	0.9485	7.3511	0.9485	7.3579	0.9485	7.3579
n_{17}	1.0000	6.8039	1.0000	7.3236	1.0000	7.3276	1.0000	7.3276
n_{18}	1.0104	1.1459	1.0077	1.3844	1.0077	1.3856	1.0077	1.3856

Tabla 33. Vector de errores de potencias, control del intercambio de potencia activa entre áreas

	P ⁽¹⁾	Q ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	Q ⁽²⁾	P ⁽³⁾	Q ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾ 1.0e-006 *	Q ⁽⁴⁾ 1.0e-006 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.0617	-0.0536	-0.0004	-0.0005	-0.0265	-0.0306
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0977	-0.0628	-0.0009	-0.0009	-0.0395	-0.0923
n ₅	0	0	0.0000	0	0.0000	0	0	0
n ₆	0	0	-0.0029	0.0001	-0.0001	0.0000	-0.0092	0.0003
n ₇	0	0	0	0	0.0000	0	0	0
n ₈	0	0.0200	0.0025	-0.0002	0.0001	-0.0000	0.0079	-0.0028
n ₉	0	0	0.0000	0	-0.0000	0	0	0
n ₁₀	0	0	0.0000	0.0001	-0.0000	0.0000	-0.0001	0.0002
n ₁₁	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0004	0.0004	-0.0000	-0.0000	-0.0011	-0.0006
n ₁₃	0	0.0200	0.0161	-0.0875	-0.0003	-0.0011	-0.0316	-0.0644
n ₁₄	0	0	0.0000	0	0	0	0	0
n ₁₄	0	0	0.0102	0.0937	0.0007	0.0014	0.0339	0.1205
n ₁₆	0	0	0.0000	0	0.0000	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0235	-0.0090	0.0001	-0.0002	-0.0039	-0.0064
n ₁₈	0	0	0	0	0	0	0	0
*	1.0000		0.0831		0.0002		0.0042	

* es el error en potencia activa de intercambio

Tabla 34. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de potencia activa entre áreas.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
celda	valor	celda	valor
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,9)	-0.0256 + 9.1029i
(4,1)	-3.6815 - 7.6690i	(9,10)	0.0256 + 9.1029i
(8,1)	-3.6761 - 7.6988i	(10,10)	0.0000 -18.1963i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(11,10)	-0.0256 + 9.0933i
(13,2)	-4.6296 - 7.1368i	(10,11)	0.0256 + 9.0933i
(18,2)	-1.0432 -10.0226i	(12,11)	-0.0256 - 9.0933i
(3,3)	3.6393 +25.4566i	(4,12)	-3.6439 - 7.2500i
(5,3)	0.0369 - 9.5366i	(11,12)	0.0256 - 9.0933i
(9,3)	-0.0256 - 9.1029i	(12,12)	3.6393 +16.3585i
(17,3)	-2.9568 - 8.0026i	(2,13)	-2.9317 - 7.9857i
(1,4)	-3.9263 - 7.5466i	(13,13)	3.6183 +16.2644i
(4,4)	7.2367 +23.4830i	(14,13)	-1.0112 - 9.1276i
(12,4)	-3.6136 - 7.2651i	(13,14)	1.0112 - 9.1276i
(16,4)	1.0112 - 8.9640i	(15,14)	-1.0112 + 9.1276i
(3,5)	-0.0369 - 9.5366i	(14,15)	1.0112 + 9.1276i
(6,5)	0.0369 + 9.5366i	(15,15)	0 -18.0917i
(5,6)	-0.0369 + 9.5366i	(16,15)	-1.0112 + 8.9640i
(6,6)	0.0000 -18.1963i	(4,16)	-1.0112 - 8.9640i
(7,6)	0.0369 + 8.6597i	(15,16)	1.0112 + 8.9640i
(6,7)	-0.0369 + 8.6597i	(3,17)	-4.6280 - 7.1671i
(8,7)	0.0369 - 8.6597i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(1,8)	-3.9534 - 7.5602i	(18,17)	1.0432 +10.0226i
(7,8)	-0.0369 - 8.6597i	(2,18)	1.0432 -10.0226i
(8,8)	3.6393 +16.3585i	(17,18)	-1.0432 +10.0226i
(3,9)	0.0256 - 9.1029i		

En el caso base, el intercambio entre las áreas fue de -0.4186 , para éste caso se ha ajustado el intercambio de potencia de activa entre las áreas a 1pu .

El intercambio se ha asumido con la potencia saliendo del área encerrada.

La potencia del slack número uno es de $0.1203 + 0.8532i$, como la demanda del área es de 1.1pu , importa 1pu ; los restantes 0.0203 constituyen las pérdidas netas de esta área, ya que no hay modelos de demanda del tipo potencia constante incluidas en esta parte de la red.

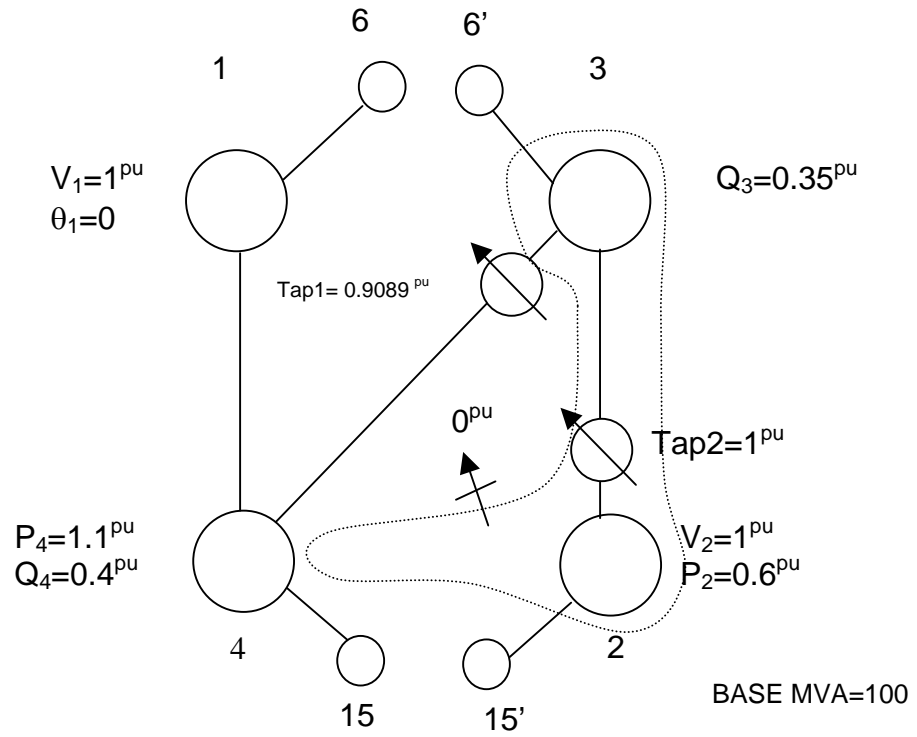
La potencia del slack número dos es de $2.1115 - 0.0283i$, ya que debe suministrar su propia demanda de 1pu y adicionalmente tiene que exportar 1pu .

Los restantes 0.1115 constituye las pérdidas propias del área.

3.10 CASO: CONTROL DEL INTERCAMBIO DE REACTIVA ENTRE ÁREAS

Para evitar un mal perfil de tensión en la frontera de área por déficit de las áreas vecinas, es posible ajustar el intercambio de potencia reactiva mediante el empleo de reguladores colocados en las líneas de enlace.

Figura 14. Control del intercambio de reactiva entre áreas.



Tap 6'-6= $0.9713^{pu} \angle -1.7168^\circ$

$P_6 = -0.74712^{pu}$
 $Q_6 = -0.0415$

$P_{6'} = 0.74712^{pu}$
 $Q_{6'} = 0.0415^{pu}$

Tap 15'-15= $0.9672^{pu} \angle -1.7809^\circ$

$P_{15} = 0.303105^{pu}$
 $Q_{15} = 0.3155^{pu}$

$P_{15'} = -0.303105^{pu}$
 $Q_{15'} = -0.3155^{pu}$

Tabla 35. Voltajes control del intercambio de reactiva entre áreas

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$		$V^{(1)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	-0.7844	1.0000	-1.3072	1.0000	-1.1083	1.0000	-1.1005
n_3	0.9836	-2.4414	0.9814	-2.8482	0.9836	-2.7100	0.9837	-2.7042
n_4	0.9316	-3.4318	0.9244	-3.8661	0.9216	-3.8127	0.9215	-3.8107
n_5	0.9877	1.8394	0.9885	1.5686	0.9907	1.6869	0.9908	1.6921
n_6	0.9836	-2.4414	0.9814	-2.8482	0.9836	-2.7100	0.9837	-2.7042
n_7	0.9562	-8.4960	0.9544	-9.1102	0.9544	-9.1145	0.9544	-9.1145
n_8	0.9604	-4.2152	0.9556	-4.4142	0.9555	-4.4153	0.9555	-4.4153
n_9	0.9354	-2.6936	0.9277	-3.0546	0.9249	-2.9176	0.9248	-2.9117
n_{10}	0.9080	-2.4414	0.8997	-2.8483	0.8943	-2.7100	0.8941	-2.7042
n_{11}	0.8806	-2.1891	0.8718	-2.6290	0.8638	-2.4877	0.8634	-2.4819
n_{12}	0.9080	-2.4414	0.8997	-2.8483	0.8943	-2.7100	0.8941	-2.7042
n_{13}	0.9551	-1.6698	0.9528	-2.2364	0.9528	-2.0376	0.9528	-2.0298
n_{14}	0.9236	-3.4065	0.9202	-4.2160	0.9202	-4.0187	0.9202	-4.0110
n_{14}	0.9316	-3.4318	0.9244	-3.8661	0.9216	-3.8127	0.9215	-3.8107
n_{16}	0.9631	-1.6951	0.9591	-1.9094	0.9564	-1.8421	0.9563	-1.8395
n_{17}	1.0000	-0.7844	1.0000	-1.3072	1.0000	-1.1083	1.0000	-1.1005
n_{18}	1.0005	-2.4854	0.9978	-2.9556	1.0000	-2.7527	1.0001	-2.7449
n_{19}	0.9604	-4.2152	0.9556	-4.4142	0.9555	-4.4153	0.9555	-4.4153
n_{20}	0.9551	-1.6698	0.9528	-2.2364	0.9528	-2.0376	0.9528	-2.0298

Tabla 36. Vector de correcciones de potencias para control del intercambio de reactiva entre áreas.

	P ⁽¹⁾	Q ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	Q ⁽²⁾	P ⁽³⁾	Q ⁽³⁾	P ⁽⁴⁾ 1.0e-003 *	Q ⁽⁴⁾ 1.0e-003 *
n ₁	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
n ₂	0.6000	NA	0.0050	NA	-0.0000	NA	0.0015	NA
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.0219	-0.0675	-0.0002	-0.0001	-0.0135	-0.0397
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.1050	-0.0373	-0.0012	-0.0006	-0.0837	0.0149
n ₅	0	0	-0.0000	0	0	0	0	0
n ₆	0.7471	0.0413	0.0219	0.0278	0.0000	0.0001	0.0114	0.0000
n ₇	0	0	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	0.0211	-0.0454	0.0002	-0.0005	0.0000	-0.0000
n ₉	0	0	0.0001	0.0116	0.0000	0.0003	-0.0005	-0.1578
n ₁₀	0	0	0.0022	0.0002	0.0000	0.0000	0.0033	0.0000
n ₁₁	0	0	0	0	0.0000	0	0.0000	0
n ₁₂	0	0.0200	0.0033	-0.0037	0.0001	-0.0000	0.0234	-0.0219
n ₁₃	0	0.0200	0.0217	-0.0041	0.0002	-0.0001	0.0000	-0.0000
n ₁₄	0	0	-0.0000	0	0.0000	0	0	0
n ₁₄	0.3031	0.3153	0.0312	0.0257	0.0004	0.0003	0.0100	0.0038
n ₁₆	0	0	-0.0000	0	0	0	0	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0023	-0.0008	-0.0000	0.0000	-0.0229	0.0045
n ₁₈	0	0	0.0000	0	0.0000	0	-0.0000	0
n ₁₉	-0.7471	-0.0413	-0.0617	0.0240	-0.0005	0.0003	-0.0000	0.0000
n ₂₀	-0.3031	-0.3153	-0.0358	-0.0101	-0.0002	0.0000	-0.0000	0.0000
*		-0.2740		-0.0137		-0.0219		-0.7790

* es el error en potencia reactiva de intercambio.

El transporte de reactiva entre las áreas en el caso base fue de 0.2691^{pu}. Se trabajan las líneas de enlace, excepto la del regulador, como inyecciones de potencia en los nodos abiertos de los auto-compensadores y se regula con el tap del regulador del enlace retenido. En el caso base el flujo de reactiva por el regulador es de - 0.0049^{pu} y por las otras líneas es de 0.2740. Se va a

llevar el flujo de activa por el regulador a -0.2740 para que el intercambio neto sea de 0.

Tabla 37. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de reactiva entre áreas.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,10)	-0.0000 -15.9970i
(4,1)	-4.1686 - 7.1115i	(11,10)	-0.0300 + 7.7251i
(8,1)	-4.3993 - 7.3273i	(10,11)	0.0300 + 7.7251i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(12,11)	-0.0300 - 7.7251i
(13,2)	-3.9342 - 7.5594i	(4,12)	-3.4232 - 6.5292i
(18,2)	-0.2870 - 9.9959i	(11,12)	0.0300 - 7.7251i
(3,3)	3.8701 +25.3941i	(12,12)	3.1994 +14.3813i
(5,3)	0.7471 - 9.7164i	(2,13)	-3.6870 - 7.6830i
(9,3)	-0.0300 - 8.2717i	(13,13)	3.6311 +16.3218i
(17,3)	-3.7130 - 7.9759i	(14,13)	-0.3031 - 8.7624i
(1,4)	-3.1880 - 7.6017i	(13,14)	0.3031 - 8.7624i
(4,4)	6.7950 +22.0498i	(20,14)	-0.3031 + 8.7624i
(12,4)	-3.1694 - 6.6561i	(15,15)	0.0000 - 8.4937i
(16,4)	0.3031 - 8.8091i	(16,15)	-0.3031 + 8.8091i
(3,5)	-0.7471 - 9.7164i	(4,16)	-0.3031 - 8.8091i
(6,5)	0.7471 + 9.7164i	(15,16)	0.3031 + 8.8091i
(5,6)	-0.7471 + 9.7164i	(3,17)	-4.1529 - 7.7559i
(6,6)	0.0000 - 9.6752i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(8,7)	0.7471 - 9.0891i	(18,17)	0.2870 + 9.9959i
(19,7)	-0.7471 + 9.0891i	(2,18)	0.2870 - 9.9959i
(1,8)	-3.2223 - 7.9158i	(17,18)	-0.2870 + 9.9959i
(7,8)	-0.7471 - 9.0891i	(7,19)	0.7471 + 9.0891i
(8,8)	3.6521 +16.4164i	(19,19)	0 - 9.1304i
(3,9)	0.0300 - 8.2717i	(14,20)	0.3031 + 8.7624i
(10,9)	-0.0300 + 8.2719i	(20,20)	0.0000 - 9.0778i
(9,10)	0.0300 + 8.2719i		

Tabla 39. Voltajes control del intercambio de activa y reactiva entre áreas.

	$V^{(1)}$		$V^{(2)}$		$V^{(3)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	13.6890	1.0000	8.1659	1.0000	6.9395
n_3	0.9412	7.2010	0.9643	3.6488	0.9637	2.7443
n_4	0.9745	1.3845	0.9436	-0.6950	0.9400	-1.1191
n_5	0.9454	11.4817	0.9717	8.2403	0.9711	7.3234
n_6	0.9412	7.2010	0.9643	3.6488	0.9637	2.7443
n_7	0.9562	-8.4960	0.9544	-9.1102	0.9544	-9.1145
n_8	0.9604	-4.2152	0.9556	-4.4142	0.9555	-4.4153
n_9	1.0208	2.1129	0.9715	0.3409	0.9646	-0.0781
n_{10}	0.9934	7.2010	0.9361	3.6543	0.9299	2.7454
n_{11}	0.9660	12.2891	0.9025	7.2152	0.8975	5.7794
n_{12}	0.9934	7.2010	0.9361	3.6543	0.9299	2.7454
n_{13}	0.9551	12.8035	0.9528	7.2367	0.9528	6.0102
n_{14}	0.9236	11.0669	0.9202	5.2570	0.9202	4.0291
n_{14}	0.9745	1.3845	0.9436	-0.6950	0.9400	-1.1191
n_{16}	1.0060	3.1212	0.9775	1.1810	0.9741	0.7777
n_{17}	1.0000	13.6890	1.0000	8.1659	1.0000	6.9395
n_{18}	1.0003	7.1521	1.0044	3.7980	1.0017	2.8200
n_{19}	0.9604	-4.2152	0.9556	-4.4142	0.9555	-4.4153
n_{20}	0.9551	12.8035	0.9528	7.2367	0.9528	6.0102

Tabla 39. Voltajes control del intercambio de activa y reactiva entre áreas (continuación)

	$V^{(4)}$		$V^{(5)}$	
n_1	1.0000	0	1.0000	0
n_2	1.0000	6.5984	1.0000	6.6116
n_3	0.9594	2.4809	0.9595	2.4918
n_4	0.9449	-1.2140	0.9447	-1.2106
n_5	0.9669	7.1002	0.9670	7.1106
n_6	0.9594	2.4809	0.9595	2.4918
n_7	0.9544	-9.1145	0.9544	-9.1145
n_8	0.9555	-4.4153	0.9555	-4.4153
n_9	0.9696	-0.3133	0.9694	-0.3045
n_{10}	0.9393	2.4809	0.9390	2.4918
n_{11}	0.9114	5.4531	0.9109	5.4679
n_{12}	0.9393	2.4809	0.9390	2.4918
n_{13}	0.9528	5.6692	0.9528	5.6823
n_{14}	0.9202	3.6880	0.9202	3.7012
n_{14}	0.9449	-1.2140	0.9447	-1.2106
n_{16}	0.9788	0.6641	0.9786	0.6682
n_{17}	1.0000	6.5984	1.0000	6.6116
n_{18}	0.9978	2.4420	0.9978	2.4545
n_{19}	0.9555	-4.4153	0.9555	-4.4153
n_{20}	0.9528	5.6692	0.9528	5.6823

Tabla 40. Vector de correcciones de potencia para control del intercambio de potencia compleja entre áreas.

	P⁽¹⁾	Q⁽¹⁾	P⁽²⁾	Q⁽²⁾	P⁽³⁾	Q⁽³⁾
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₃	-1.0000	-0.3300	-0.1845	-0.0876	-0.0402	-0.0067
n ₄	-1.1000	-0.3600	-0.0540	-0.0526	0.0033	-0.0159
n ₅	0	0	-0.0000	0	0.0000	0
n ₆	0.7471	0.0413	0.0829	0.0272	-0.0030	-0.0004
n ₇	0	0	0	0	0	0
n ₈	0	0.0200	0.0211	-0.0454	0.0002	-0.0005
n ₉	0	0	-0.0028	-0.0312	-0.0020	-0.0201
n ₁₀	0	0	0.0483	0.0778	0.0010	0.0142
n ₁₁	0	0	0	0	0	0
n ₁₂	0	0.0200	-0.0291	-0.0885	0.0069	-0.0093
n ₁₃	0	0.0200	0.0217	-0.0041	0.0002	-0.0001
n ₁₄	0	0	0	0	0.0000	0
n ₁₄	0.3031	0.3153	0.0060	0.0126	0.0011	0.0007
n ₁₆	0	0	-0.0000	0	-0.0000	0
n ₁₇	0	0.0200	0.0288	-0.0107	0.0026	-0.0002
n ₁₈	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
n ₁₉	-0.7471	-0.0413	-0.0617	0.0240	-0.0005	0.0003
n ₂₀	-0.3031	-0.3153	-0.0358	-0.0101	-0.0002	0.0000
*	-0.2740	0.4440	-0.0729	-0.4526	0.0226	-0.0796

* es el error en potencias de intercambio

Tabla 40. Vector de correcciones de potencia para control del intercambio de potencia compleja entre áreas (continuación)

	$P^{(4)}$	$Q^{(4)}$	$P^{(5)}$ 1.0e-003 *	$Q^{(5)}$ 1.0e-003 *
n ₁	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₂	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
n ₃	-0.0009	-0.0007	-0.0022	-0.0456
n ₄	0.0001	-0.0007	-0.2701	0.0718
n ₅	0	0	-0.0000	0
n ₆	-0.0000	0.0000	0.0427	0.0008
n ₇	0	0	0	0
n ₈	0.0000	-0.0000	0.0000	0.0000
n ₉	-0.0002	-0.0001	-0.0254	-0.5759
n ₁₀	0.0001	0.0008	0.1152	-0.0109
n ₁₁	0	0	0	0
n ₁₂	0.0001	-0.0006	-0.0433	-0.0702
n ₁₃	0.0000	-0.0000	0	0
n ₁₄	0.0000	0	0.0000	0
n ₁₄	0.0000	0.0000	0.0226	0.0084
n ₁₆	0	0	0	0
n ₁₇	0.0000	-0.0000	-0.0761	0.0126
n ₁₈	0	0	0	0
n ₁₉	-0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
n ₂₀	-0.0000	0.0000	0.0000	-0.0000
*	0.0380	0.0023	-0.7674	0.0754

El transporte de reactiva entre las áreas en el caso base fue de 0.2691^{pu}. Se trabajan las líneas de enlace, excepto la del regulador, como inyecciones de potencia en los nodos abiertos de los auto-compensadores y se regula con el tap del regulador restante. En el caso base, el flujo de reactiva por el regulador fue de - 0.0049^{pu} y por los otros fue de 0.2740. Se va a llevar el

flujo de activa por el regulador a -0.2740 para que el intercambio neto sea de cero. Para el intercambio de activa se trabaja la red abierta y se lleva el flujo por la línea retenida de conexión entre las áreas al negado del intercambio de activa de las líneas que son abiertas, esto es a 0.4440.

Tabla 41. Matriz auxiliar - solución final para control del intercambio de potencia compleja entre áreas.

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	8.0000 +15.9600i	(10,10)	0 -17.6449i
(4,1)	-3.9388 - 7.4773i	(11,10)	-0.4439 + 8.5487i
(8,1)	-4.3993 - 7.3273i	(10,11)	0.4439 + 8.5487i
(2,2)	4.0000 +17.9800i	(12,11)	-0.4439 - 8.5487i
(13,2)	-3.9342 - 7.5594i	(4,12)	-4.0002 - 6.8565i
(18,2)	-0.7232 - 9.9513i	(11,12)	0.4439 - 8.5487i
(3,3)	3.6821 +25.3725i	(12,12)	3.5290 +15.8628i
(5,3)	0.7471 - 9.2466i	(2,13)	-3.6870 - 7.6830i
(9,3)	-0.4439 - 9.0957i	(13,13)	3.6311 +16.3218i
(17,3)	-3.2768 - 7.9313i	(14,13)	-0.3031 - 8.7624i
(1,4)	-3.6185 - 7.6374i	(13,14)	0.3031 - 8.7624i
(4,4)	7.1424 +23.1770i	(20,14)	-0.3031 + 8.7624i
(12,4)	-3.0851 - 7.3141i	(15,15)	0 - 8.9279i
(16,4)	0.3031 - 9.2433i	(16,15)	-0.3031 + 9.2433i
(3,5)	-0.7471 - 9.2466i	(4,16)	-0.3031 - 9.2433i
(6,5)	0.7471 + 9.2466i	(15,16)	0.3031 + 9.2433i
(5,6)	-0.7471 + 9.2466i	(3,17)	-4.3790 - 7.3802i
(6,6)	0.0000 - 9.2053i	(17,17)	4.0000 - 2.0200i
(8,7)	0.7471 - 9.0891i	(18,17)	0.7232 + 9.9513i
(19,7)	-0.7471 + 9.0891i	(2,18)	0.7232 - 9.9513i
(1,8)	-3.2223 - 7.9158i	(17,18)	-0.7232 + 9.9513i
(7,8)	-0.7471 - 9.0891i	(7,19)	0.7471 + 9.0891i
(8,8)	3.6521 +16.4164i	(19,19)	0 - 9.1304i
(3,9)	0.4439 - 9.0957i	(14,20)	0.3031 + 8.7624i
(10,9)	-0.4440 + 9.0963i	(20,20)	-0.0000 - 9.0778i
(9,10)	0.4440 + 9.0963i		

Tabla 42. Relación de transformación en magnitud por el regulador para control del intercambio de activa y reactiva entre áreas.

	Tap1 ⁽¹⁾	Tap1 ⁽²⁾	Tap1 ⁽³⁾	Tap1 ⁽⁴⁾	Tap1 ⁽⁵⁾
mag	1.0522	0.9686	0.9649	0.9789	0.9786

3.12 CASO: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE RED

3.12.1 Marco teórico. El operador podría no encontrar aceptable la solución del flujo de carga base; en tal caso, deberá hacer algún ajuste a determinadas variables para llevar a un valor deseado otras. A la interdependencia entre las variables puede ser cuantitativamente determinada por el análisis conocido como sensibilidad. La sensibilidad se define como la razón de un pequeño cambio de una variable dependiente, con respecto a un pequeño cambio de la variable independiente considerada. En la operación de un sistema de potencia, el análisis de sensibilidad es de gran importancia, ya que éste ayuda a la visualización de la relación causa-efecto entre las variables y como tal esta es la base de muchos esquemas de control.

Partiendo de las ecuaciones de balance potencia nodal:

$$\left. \begin{aligned}
 V_i \sum_{m=1}^N Y_{im} V_m \cos(\theta_i - \theta_m - \zeta_{im}) - PG_i + PD_i &= 0 \\
 V_i \sum_{m=1}^N Y_{im} V_m \sin(\theta_i - \theta_m - \zeta_{im}) - QG_i + QD_i &= 0
 \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} i=1,2,\dots,N \\ \text{ec. 3.12.1} \\ \text{ec. 3.12.2} \end{array}$$

Las variables involucradas en estas ecuaciones de flujo pueden ser clasificadas en tres grupos:

- Independientes o variables de control, generalmente denotadas por \mathbf{u} .
- Dependientes o variables controladas, las cuales son generalmente representadas por \mathbf{x} .
- Variables no controladas, parámetros fijos en estudios determinísticos o variables aleatorias en estudios probabilísticos, los símbolos para los cuales son las \mathbf{p} .

Empleando la simbología presentada, las ecuaciones de flujo de carga se pueden expresar en la siguiente forma compacta.

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{p})=0 \quad \text{ec. 3.12.3}$$

Donde \mathbf{G} denota las $2*N$ ecuaciones de flujo de carga, con N igual al número de barras del sistema.

$$\left. \begin{array}{l} G_{i+N}=V_i \quad \left. \begin{array}{l} n \\ m=1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} Y_{im} V_m \text{Sen}(\theta_i - \theta_m - \zeta_{im}) - QG_i + QD_i = 0 \\ \end{array} \\ \\ G_i = V_i \quad \left. \begin{array}{l} n \\ m=1 \end{array} \right\} \begin{array}{l} Y_{im} V_m \text{Cos}(\theta_i - \theta_m - \zeta_{im}) - PG_i + PD_i = 0 \\ \end{array} \end{array} \right\} \begin{array}{l} i=1,2,\dots,N \\ \text{ec. 3.12.4} \\ \text{ec. 3.12.5} \end{array}$$

3.12.2 La matriz de sensibilidad. En una condición de operación especificada por \mathbf{x}_0 , \mathbf{u}_0 , y \mathbf{p} , pequeños cambios de las variables de control

$\Delta \mathbf{u}$, causarán cambios en las variables controladas $\Delta \mathbf{x}$; lo mismo ocurriría de la manera contraria, si el sistema permaneciera en equilibrio. La condición resultante puede ser expresada por:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_0 + \Delta \mathbf{x}, \mathbf{u}_0 + \Delta \mathbf{u}, \mathbf{p}) = 0 \quad \text{ec. 3.12.6}$$

Empleando el teorema de Taylor se puede expresar la siguiente ecuación:

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}) + \mathbf{G}_x \Delta \mathbf{x} + \mathbf{G}_u \Delta \mathbf{u} = 0 \quad \text{ec 3.12.7}$$

En esta ecuación no se incluyen los términos de orden superior, debido a que los cambios se consideran suficientemente pequeños.

\mathbf{G}_x es la matriz que contiene las primeras derivadas de las ecuaciones de flujo con respecto a \mathbf{x} .

De forma similar, \mathbf{G}_u contiene las primeras derivadas de las mismas ecuaciones con respecto a \mathbf{u} .

Puesto que el primer término de la ecuación es cero,

$$\mathbf{G}(\mathbf{x}_0, \mathbf{u}_0, \mathbf{p}) = 0 \quad \text{ec. 3.12.8}$$

Dado que el sistema está en equilibrio antes que los cambios ocurran, se tiene que:

$$\mathbf{G}_x \Delta \mathbf{x} + \mathbf{G}_u \Delta \mathbf{u} = 0 \quad \text{ec 3.12.9}$$

De lo cual

$$\Delta \mathbf{x} = -\mathbf{G}_x^{-1} \mathbf{G}_u \Delta \mathbf{u} = \mathbf{S} \Delta \mathbf{u} \quad \text{ec 3.12.10}$$

$$\mathbf{S} = -\mathbf{G}_x^{-1} \mathbf{G}_u \quad \text{ec. 3.12.11}$$

Donde **S** es la matriz de sensibilidad del sistema:

Por ejemplo, para un sistema de seis barras cuya generación slack está ubicada en la barra 1, generación especificada en la barra 2 y demandas en las restantes barras:

$$[\mathbf{x} = P1, \theta2, \theta3, \theta4, \theta5, \theta6, Q1, Q2, V3, V4, V5, V6] \quad \text{ec. 3.12.12}$$

Los elementos de \mathbf{G}_u y \mathbf{G}_x pueden obtenerse diferenciando las ecuaciones de flujo con respecto a \mathbf{u} y a \mathbf{x} , respectivamente. \mathbf{G}_x será una matriz cuadrada de orden 12x12, mientras que \mathbf{G}_u será una matriz de orden 12x2, si se asume como parámetros controlados:

$$\mathbf{u} = [V1, V2] \quad \text{ec 3.12.14}$$

La diferenciación detallada se encuentra en Dhar, R. N., *Computer Aided power System Operation and Analysis.*, Tata McGraw-Hill Book Company, chp 7, 1982.

Tabla 43 Ejemplo de la estructura de la matriz G_x , sistema de seis barras

	$\Delta Q1$	$\Delta Q2$	$\Delta V3/V3$	$\Delta V4/V4$	$\Delta V5/V5$	$\Delta V6/V6$	$\Delta P1$	$\Delta \theta 2$	$\Delta \theta 3$	$\Delta \theta 4$	$\Delta \theta 5$	$\Delta \theta 6$
$\Delta Q1$	-1		L13	L14	L15	L16		M12	M13	M14	M15	M16
$\Delta Q2$		-1	L23	L24	L25	L26		M22	M23	M24	M25	M26
$\Delta Q3$			L33	L34	L35	L36		M32	M33	M34	M35	M36
$\Delta Q4$			L43	L44	L45	L46		M42	M43	M44	M45	M46
$\Delta Q5$			L53	L54	L55	L56		M52	M53	M54	M55	M56
$\Delta Q6$			L63	L64	L65	L66		M62	M63	M64	M65	M66
$\Delta P1$			N13	N14	N15	N16	-1	H12	H13	H14	H15	H16
$\Delta P2$			N23	N24	N25	N26		H22	H23	H24	H25	H26
$\Delta P3$			N33	N34	N35	N36		H32	H33	H34	H35	H36
$\Delta P4$			N43	N44	N45	N46		H42	H43	H44	H45	H46
$\Delta P5$			N53	N54	N55	N56		H52	H53	H54	H55	H56
$\Delta P6$			N63	N64	N65	N66		H62	H63	H64	H65	H66

Fuente: referencia [9]

Tabla 44. Ejemplo de la estructura de la matriz G_u , sistema de seis barras de la referencia [9]

	$\Delta Q1$	$\Delta Q2$
$\Delta Q1$	L11	L12
$\Delta Q2$	L21	L22
$\Delta Q3$	L31	L32
$\Delta Q4$	L41	L42
$\Delta Q5$	L51	L52
$\Delta Q6$	L61	L62
$\Delta P1$	N11	N12
$\Delta P2$	N21	N22
$\Delta P3$	N31	N32
$\Delta P4$	N41	N42
$\Delta P5$	N51	N52
$\Delta P6$	N61	N62

Fuente: referencia [9]

De la solución del caso base y como parámetros de control las tensiones de los nodos 1 y 2, se tiene la siguiente matriz de sensibilidades:

Tabla 45. Matriz de sensibilidad S: caso base.

	V1	V2
Q1	9.7233	9.7233
Q2	-10.7274	-10.7274
V3	0.5647	0.5647
V4	0.5681	0.5681
V5	1.0919	1.0919
V6	0.5647	0.5647
V7	0.0146	0.0146
V8	0.5647	0.5647
V9	0.5664	0.5664
V10	0.5647	0.5647
V11	0.5629	0.5629
V12	0.5647	0.5647
V13	0.5681	0.5681
V14	1.1785	1.1785
V15	0.5681	0.5681
V16	-0.0028	-0.0028
V17	0.0000	0.0000
V 18	0.5514	0.5514
P1	-0.4002	-0.4002
θ2	0.6738	0.6738
θ3	0.4001	0.4001
θ4	0.4025	0.4025
θ5	0.2463	0.2463
θ6	0.4001	0.4001
θ7	0.4667	0.4667
θ8	0.4001	0.4001
θ9	0.4033	0.4033
θ10	0.4001	0.4001
θ11	0.3969	0.3969
θ12	0.4001	0.4001
θ13	0.4025	0.4025
θ14	0.4446	0.4446
θ15	0.4025	0.4025
θ16	0.4013	0.4013
θ17	0.6738	0.6738
θ18	0.6890	0.6890

Tabla 46. Matriz G_x

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(1,1)	-1.0000	(26,8)	3.6520	(4,16)	-9.3928
(2,2)	-1.0000	(3,9)	-9.1347	(15,16)	9.3928
(3,3)	25.1957	(10,9)	9.1347	(22,16)	-0.3034
(5,3)	-9.1711	(21,9)	0.0256	(33,16)	0.3034
(9,3)	-9.1347	(28,9)	-0.0256	(3,17)	-7.5891
(17,3)	-7.6974	(9,10)	9.1347	(17,17)	-2.0200
(21,3)	2.6523	(10,10)	-18.2597	(18,17)	9.7174
(23,3)	0.7471	(11,10)	9.1250	(21,17)	-3.9300
(27,3)	-0.0256	(27,10)	0.0256	(35,17)	4.0001
(35,3)	-3.7133	(28,10)	0.0000	(36,17)	0.2867
(1,4)	-7.8996	(29,10)	-0.0256	(2,18)	-9.7174
(4,4)	23.1656	(10,11)	9.1250	(17,18)	9.7174
(12,4)	-7.2905	(12,11)	-9.1250	(20,18)	0.2867
(16,4)	-9.3928	(28,11)	0.0256	(35,18)	-0.2867
(19,4)	-3.1965	(30,11)	-0.0256	(36,18)	0.0000
(22,4)	6.1624	(4,12)	-7.2754	(19,19)	-1.0000
(30,4)	-3.6263	(11,12)	-9.1250	(2,20)	-3.4000
(34,4)	0.3034	(12,12)	16.4154	(13,20)	3.9344
(3,5)	-9.1711	(22,12)	-3.6566	(18,20)	0.2867
(6,5)	9.1711	(29,12)	0.0256	(20,20)	17.4004
(21,5)	-0.7471	(30,12)	3.6519	(31,20)	-7.5592
(23,5)	0.0000	(2,13)	-7.6830	(36,20)	-9.7174
(24,5)	0.7471	(13,13)	16.3215	(3,21)	-4.6515
(5,6)	9.1711	(14,13)	-8.7622	(5,21)	-0.7471
(6,6)	-18.2604	(20,13)	-3.6867	(9,21)	0.0256
(7,6)	9.0878	(31,13)	3.6307	(17,21)	3.7133
(23,6)	-0.7471	(32,13)	-0.3031	(21,21)	25.8949
(24,6)	-0.0002	(13,14)	-8.7622	(23,21)	-9.1711
(25,6)	0.7473	(15,14)	8.7622	(27,21)	-9.1347
(6,7)	9.0878	(31,14)	0.3031	(35,21)	-7.6974
(8,7)	-9.0878	(32,14)	-0.0000	(1,22)	3.1965
(24,7)	-0.7473	(33,14)	-0.3031	(4,22)	-8.3617
(26,7)	0.7473	(14,15)	8.7622	(12,22)	3.6263
(1,8)	-7.9156	(15,15)	-18.1552	(16,22)	-0.3034
(7,8)	-9.0878	(16,15)	9.3928	(19,22)	-7.8996
(8,8)	16.4160	(32,15)	0.3031	(22,22)	23.9651
(19,8)	-3.2221	(33,15)	0.0003	(30,22)	-7.2905
(25,8)	-0.7473	(34,15)	-0.3034	(34,22)	-9.3928

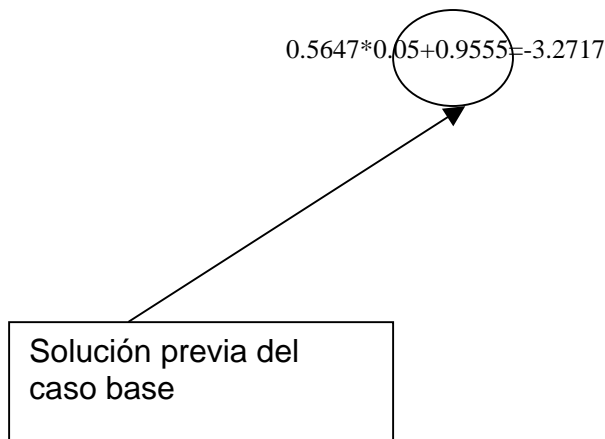
Tabla 46. Matriz G_x (continuación)

CELDA	VALOR	CELDA	VALOR
(3,23)	0.7471	(22,30)	-7.2754
(5,23)	0.0000	(29,30)	-9.1250
(6,23)	-0.7471	(30,30)	16.4154
(21,23)	-9.1711	(2,31)	3.6867
(24,23)	9.1711	(13,31)	-3.6313
(5,24)	0.7471	(14,31)	0.3031
(6,24)	-0.0002	(20,31)	-7.6830
(7,24)	-0.7473	(31,31)	16.3214
(23,24)	9.1711	(32,31)	-8.7622
(24,24)	-18.2589	(13,32)	-0.3031
(25,24)	9.0878	(14,32)	-0.0000
(6,25)	0.7473	(15,32)	0.3031
(8,25)	-0.7473	(31,32)	-8.7622
(24,25)	9.0878	(33,32)	8.7622
(26,25)	-9.0878	(14,33)	-0.3031
(1,26)	3.2221	(15,33)	0.0003
(7,26)	0.7473	(16,33)	0.3034
(8,26)	-3.6519	(32,33)	8.7622
(19,26)	-7.9156	(33,33)	-
(25,26)	-9.0878	(34,33)	18.1551
(26,26)	16.4149	(4,34)	9.3928
(3,27)	-0.0256	(15,34)	0.3034
(10,27)	0.0256	(22,34)	-0.3034
(21,27)	-9.1347	(33,34)	-9.3928
(28,27)	9.1347	(3,35)	9.3928
(9,28)	-0.0256	(17,35)	3.9300
(10,28)	0.0000	(18,35)	-3.9999
(11,28)	0.0256	(21,35)	-0.2867
(27,28)	9.1347	(35,35)	-7.5891
(28,28)	-18.2597	(36,35)	-2.0200
(29,28)	9.1250	(2,36)	9.7174
(10,29)	-0.0256	(17,36)	-0.2867
(12,29)	0.0256	(18,36)	0.2867
(28,29)	9.1250	(20,36)	0.0000
(30,29)	-9.1250	(35,36)	-9.7174
(4,30)	3.6566		9.7174
(11,30)	-0.0256		
(12,30)	-3.6519		

Tabla 47. Matriz de parámetros G_u , caso base

j/j	V1	V2
Q1	16.1048	0
Q2	0	18.5596
Q3	0	0
Q4	-7.2969	0
Q5	0	0
Q6	0	0
Q7	0	0
Q8	-7.3270	0
Q9	0	0
Q10	0	0
Q11	0	0
Q12	0	0
Q13	0	-7.5592
Q14	0	0
Q15	0	0
Q16	0	0
Q17	0	0
Q 18	0	-9.7174
P1	9.5814	0
P2	0	4.6000
P3	0	0
P4	-4.4018	0
P5	0	0
P6	0	0
P7	0	0
P8	-4.3992	0
P9	0	0
P10	0	0
P11	0	0
P12	0	0
P13	0	-3.9344
P14	0	0
P15	0	0
P16	0	0
P17	0	0
P18	0	-0.2867

De la matriz de sensibilidad puede determinarse, de forma aproximada, el cambio en las variables dependientes al modificar una variable independiente. En este caso la magnitud del tensión en el nodo uno o en el nodo dos. Por ejemplo, para la tensión del nodo 3 al variar la magnitud de la tensión en el nodo uno en 0.05:



Que comparado con el valor obtenido al resolver el flujo de cargas, $V_3 = 0.9833$, es un valor muy aproximado. Para su ángulo, a partir de la matriz de sensibilidad se tiene:

$$\theta_3 = 0.4001 \cdot 0.05 \cdot 180 / \pi - 4.4179 = 1.1462^\circ$$

En general, si a partir del caso base se perturba la magnitud de la tensión del nodo uno en 0.05 p.u., la solución estimada a partir de la matriz de sensibilidad para las tensiones en las barra es :

Tabla 48. Tensión después de variar la magnitud de la tensión V1 en 0.05, caso base.

V	
1.0500	0
1.0000	-1.7937
0.9823	-3.3597
0.9796	-3.4722
1.0152	0.9112
0.9823	-3.3597
0.9552	-7.8994
0.9823	-3.3597
0.9829	-3.5114
0.9823	-3.3597
0.9817	-3.2077
0.9823	-3.3597
0.9796	-3.4722
0.9739	-5.3211
0.9796	-3.4722
0.9863	-1.6466
1.0000	-1.7937
0.9987	-3.4415

CONCLUSIONES

- La técnica presentada, permite acelerar el procedimiento manual de ejecución del algoritmo de Newyon-Raphson, y de modelado matricial de red que presenten relaciones de transformación no unitarias.
- Los métodos propuestos permiten desarrollar una programación más compacta mediante el empleo de programas que permitan el cálculo con matrices, de del método de Newton-Rpahson, y para obtener el modelo matricial de redes que incluyan reaciones de transformnación no unitarias de voltaje.
- Los procedimientos alternativos del presente proyecto ofrecen una mejor protección contra posibles errores del cálculo y de la programación, así como una depuración más rápida de errores en caso de presentarse.
- Las técnicas propuestas son de fácil asimilación y ofrecen una ventaja para retener o llamar de la memoria.

BIBLIOGRAFÍA

BROWN, Homer E., Solution of Large Networks by Matrix Methods, John Wiley and Sons, Inc., 1975.

C. E. Gross, Power System Analysis, John Wiley & Sons, New York. 1985.

DHAR, R. N., Computer Aided Power System Operation and Analysis, Tata MacGraw-Hill Book Company, 1982.

G. W. Stagg, A. H. El-Abiad, Computer Methods in Power System Analysis, New York, McGraw-Hill, 1968, Chapter 8.

J. B. Ward, H. W. Hale, "Digital Computer Solution of Power-Flow Problems," AIEE TRANSACTIONS, Vol. 75, No. III, June, 1956, p. 398-404.

J. Grainger and William D. Stevenson, Jr., Power Systems Analysis, McGraw-Hill, Inc., New York, 1994.

J. P. Britton, "Improved Area Interchange Control for Newton's Method Load Flows," IEEE Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-88, No. 10, October, 1969, p. 1577-1581.

LATORRE BAYONA, Gerardo. Notas de clase del curso análisis de sistemas de potencia.

N. M. Peterson, W. S. Meyer, "Automatic Adjustment of Transformer and Phase Shifter Taps in the Newton Power Flow," IEEE Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-71, No. 1, January/February, 1971, pp. 103-108.