

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

ESCUELA DE POSGRADO

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE
INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“MÉTODO DE LA SEGMENTACIÓN
ORDENADA DE LOS SISTEMAS
ELECTRICOS PARA EL CÁLCULO DEL
FLUJO DE POTENCIA ELÉCTRICA”**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO ACADEMICO DE DOCTOR
EN INGENIERIA ELECTRICA**

BASILIO SALAS ALAGON

Callao 2018
PERU

DEDICATORIA

Con mucho cariño:

- *A mi esposa María Liliana.*
- *A mis hijos: Carol, Christian, Ángela y Pamela; y mis queridos nietitos Ian y Fernandita.*
- *Con recuerdo amoroso a mi madre Natividad Q.E.P.D.*
- *A mi padre Justo Rosendo y mis hermanos.*
- *A la Srta. Inés Gutiérrez, por sus desvelos, que goza de la gloria del señor.*

AGRADECIMEINTOS

Mi sincero agradecimiento a:

- *La Universidad Nacional del Callao, por haberme dado la oportunidad de seguir los estudios del Doctorado*
- *Los Docentes del Doctorado en Ingeniería Eléctrica de la UNAC.*
- *Mis Colegas del Doctorado por haberme permitido compartir los estudios de Pos Grado.*

INDICE DEL CONTENIDO

INDICE DEL CONTENIDO.....	1
INDICE DE FIGURAS.....	4
INDICE DE CUADRO Y TABLAS.....	5
INDICE DE GRAFICOS.....	7
RESUMEN.....	8
ABSTRAC.....	9
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION	
1.1. Identificación del Problema.....	11
1.2. Formulación de Problemas.....	14
1.3. Objetivos.....	15
1.4. Justificación del Estudio.....	16
1.5. Alcances y Limitaciones.....	18
CAPITULO II: MARCO TEORICO	
2.1 Antecedentes del Estudio.....	19
2.2 Bases teóricas.....	22
2.3 Bases Conceptuales.....	29
CAPITULO III: VARIABLES, HIPOTESIS Y METODOLOGIA	
3.1 Identificación de Variables.....	33
3.2 Operacionalización de Variables.....	33
3.3 Hipótesis.....	34
3.4 Metodología.....	34
CAPITULO IV: MÉTODOS CLASICOS PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE POTENCIA ELECTRICA	
4.1 Método de Gauss-Seidel.....	40
4.2 Método de Newton Rapson.....	42

4.3	Método Desacoplado Normal.....	45
4.4	Método Desacoplado Rápido.....	46

CAPITULO V: SEGMENTACION DE ECUACIONES MATRICIALES EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

5.1	Numeración ordenada de barras en modo segmentado.....	48
5.2	Ecuaciones matriciales para N barras con segmentación ordenada	49
5.3	Segmentación de ecuaciones matriciales en un sistema eléctrico de potencia de N barras.....	53

CAPITULO VI: CÁLCULO ITERATIVO DE TENSIONES Y FLUJO DE POTENCIA POR EL METODO DE SEGMENTACION ORDENADA.

6.1	Proceso del cálculo	60
6.2	Asignación numérica de barras en modo ordenado y Segmentado.....	60
6.3	Segmentación de las matrices de admitancias y tensiones.....	61
6.4	Calculo iterativo de las tensiones segmentadas V_Q	62
6.5	Calculo iterativo de las tensiones segmentadas V_V	62
6.6	Calculo iterativo de las potencias segmentadas S_V	63
6.7	Integración de las tensiones y potencias segmentadas.....	64
6.8	Reajuste iterativo de las tensiones integradas.....	64
6.9	Determinación de la diferencial y finalización de la iteración.....	65
6.10	Cálculo de la potencia nodal.....	65
6.11	Cálculo del flujo de potencia.....	65
6.12	Diagrama de flujo para el cálculo de las tensiones en un sistema eléctrico de potencia por segmentación ordenada.....	66

CAPITULO VII: RESULTADOS

7.1	Estudio de casos aplicados mediante el método de la segmentación ordenada.....	68
7.2	Estudio de casos mediante los métodos clásicos.....	83

CAPITULO VIII: DISCUSION DE RESULTADOS

8.1	Análisis de resultados para el caso de cuatro (4) barras.....	89
8.2	Análisis de resultados para el caso de cinco (5) barras.....	92
8.3	Análisis de resultados para el caso de catorce (14) barras de la IEEE.....	97

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.....	104
Recomendaciones.....	105

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	106
---------------------------------	-----

ANEXOS

A. Matriz de consistencia.....	110
B. Resultados de los indicadores obtenidos para los casos en estudio	111
C. Resumen de Resultados Oficiales del Cálculo por Newton Rapson según la Bibliografía y la IEEE para los casos aplicados.....	117
D. Código fuente del programa en MATLAB para el cálculo FP por el método de la segmentación ordenada.....	122

INDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1:	Circuito equivalente de una Línea Corta.....	23
Fig. 2.2:	Circuito equivalente de una Línea de longitud media.....	23
Fig. 2.3:	Circuito equivalente de una Línea larga.....	24
Fig. 2.4:	SEP de dos barras.....	24
Fig. 2.5:	Circuito equivalente del SEP de dos barras.....	24
Fig. 2.6:	Representación de una barra p en un SEP.....	27
Fig. 5.1:	Reordenamiento de la numeración de las barras del SEP de 14 barras de la IEEE en orden segmentado.....	49
Fig. 5.2:	Diagrama de potencias segmentadas PV.....	58
Fig. 6.1:	Diagrama de flujo para el cálculo de las tensiones de barras por segmentación ordenada.....	65
Fig. 7.1:	Diagrama unifilar para el caso de 4 barras.....	66
Fig. 7.2:	Diagrama unifilar para el caso de 5 barras.....	78
Fig. 7.3:	Diagrama unifilar para el caso de 14 barras de IEEE....	79

INDICE DE CUADROS Y TABLAS

Cuadro N° 3.1: Operacionalización de Variables.....	32
Cuadro N° 3.2: Procedimiento de Análisis de Datos.....	38
Cuadro N° 3.3: Parámetros de Medición de Indicadores.....	39
Cuadro N° 3.4: Verificación de Hipótesis.....	39
Cuadro N° 7.1: Resultados del cálculo del flujo de potencia para el caso de 4 barras.....	77
Cuadro N° 7.2: Resultados de tensiones y potencias nodales con segmentación ordenada.....	82
Cuadro N° 7.3: Resultados de indicadores de análisis para segmentación ordenada.....	82
Cuadro N° 7.4: Tensiones y potencias nodales con Gauss Seidel...	84
Cuadro N° 7.5: Indicadores de análisis para Gauss Seidel.....	84
Cuadro N° 7.6: Resultados de tensiones y potencias nodales con Newton Rapson	86
Cuadro N° 7.7: Resultados de indicadores de análisis para Newton Rapson.....	86
Cuadro N° 7.8: Resultados de tensiones y potencias nodales con desacoplado normal.....	88
Cuadro N° 7.7: Resultados de indicadores de análisis para desacoplado normal.....	88
Cuadro N° 8.1: Tensiones y potencias de generación para el caso de 4 barras.....	89
Cuadro N° 8.2: Diferencia de resultados para el caso de 4 barras...	90
Cuadro N° 8.3: Resultados de indicadores de análisis para el caso de 4 barras.....	91

Cuadro N° 8.4: Equivalencia de la asignación numérica para 5 barras	92
Cuadro N° 8.5: Tensiones y potencias de generación para el caso de 5 barras.....	93
Cuadro N° 8.6: Diferencia de resultados para el caso de 5 barras...	95
Cuadro N° 8.7: Resultados de indicadores de análisis para el caso de 5 barras.....	97
Cuadro N° 8.8: Equivalencia de la asignación numérica para 14 barras de la IEEE.....	99
Cuadro N° 8.9: Tensiones y potencias de generación para el caso de 14 barras de la IEEE.....	99
Cuadro N° 8.10: Diferencia de resultados para el caso de 14 barras de la IEEE.....	102
Cuadro N° 8.11: Resultados de indicadores de análisis para el caso de 14 barras de la IEEE.....	103
Tabla N° 7.1: Datos de barras para el caso de 4 barras.....	67
Tabla N° 7.2: Datos de líneas para el caso de 4 barras.....	69
Tabla N° 7.3: Datos de barras para el caso de 5 barras.....	79
Tabla N° 7.4: Datos de líneas para el caso de 5 barras.....	79
Tabla N° 7.5: Datos de barras para el caso 14 barras de la IEEE.....	81
Tabla N° 7.6: Datos de líneas para el caso 14 barras de la IEEE.....	81

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N° 8.1: Comparacion de tensiones para 4 barras.....	91
Gráfico N° 8.2: Comparación de potencias para 4 barras.....	91
Gráfico N° 8.3: Comparación de indicadores para 4 barras.....	92
Gráfico N° 8.4: Comparacion de tensiones para 5 barras.....	95
Gráfico N° 8.5: Comparacion de potencias para 5 barras.....	95
Gráfico N° 8.6: Comparación de indicadores para 5 barras.....	97
Gráfico N° 8.7: Comparación de los módulos de tensión para 14 barra de la IEEE.....	101
Gráfico N° 8.8: Comparación de los módulos de potencia para 14 barras de la IEEE.....	101
Gráfico N° 8.9: Comparación de indicadores para 14 barras de la IEEE.....	104

RESUMEN

Actualmente existen diferentes métodos para la solución del flujo de potencia en sistemas eléctricos en régimen permanente, siendo los métodos clásicos los de Gauss-Seidel, Newton Raphson, y el Desacoplado, cada uno de ellos con sus propias limitaciones y características de solución. Las características de cálculo de Newton-Raphson son superiores a las de Gauss-Seidel, sin embargo presenta algunas dificultades aún no superadas, como la de requerir mayor espacio de memoria y su relativa lentitud en el cálculo del Jacobiano para cada iteración; por tanto, la búsqueda de algoritmos alternativos más eficientes y confiables para resolver el problema de flujo de carga, es un proceso que hasta la fecha continua.

El método que se propone como tesis doctoral, enfoca el problema del cálculo, de una manera distinta a los métodos clásicos actualmente utilizados, toda vez que está basado en el reordenamiento de las barras del sistema, las que se agrupan en dos grandes sub grupos: bloque de barras de carga (PQ), y bloque de barras de tensión controlada (PV), aparte de la barra referencial. Cada uno de estos bloques es tratado de manera independiente para luego ser integradas en una sola matriz y determinar directamente las tensiones. El método planteado, no requiere la determinación del Jacobiano, siendo el cálculo íntegramente matricial y vectorial, utilizando el concepto de la segmentación matricial de las ecuaciones, los que dan lugar al cálculo directo de las tensiones en barras, y luego calcular el flujo de potencia.

El método propuesto fue validado mediante tres casos aplicados, obteniéndose resultados satisfactorios en cuanto a mejorar los índices de velocidad y capacidad de memoria frente a los métodos clásicos, así como un mínimo número de iteraciones.

ABSTRACT

Currently there are different methods for the solution of the power flow in electric systems in permanent regime, being the classical methods those of Gauss-Seidel, Newton Raphson, and the decoupled, each of them with its own limitations and solution characteristics. The calculation characteristics of Newton-Raphson are superior to those of Gauss-Seidel, however it presents some difficulties not yet overcome, such as that of requiring more memory space and its relative slowness in the calculation of the Jacobian for each iteration; therefore, the search for more efficient and reliable alternative algorithms to solve the load flow problem is a process that continues to date.

The method proposed as a doctoral thesis, focuses on the problem of calculation, in a different way to the classical methods currently used, since it is based on the reordering of the bars of the system, which are grouped into two large sub groups: block of load bars (PQ), and block of controlled tension bars (PV), apart from the reference bar. Each of these blocks is treated independently and then integrated into a single matrix and directly determine the stresses. The method proposed, does not require the determination of the Jacobian, being the calculation totally matrix and vector, using the concept of matrix segmentation of the equations, which give rise to the direct calculation of the tensions in bars, and then calculate the power flow .

The proposed method was validated by three applied cases, obtaining satisfactory results in terms of improving speed and memory capacity indexes compared to classical methods, as well as a minimum number of iterations.

RESUMO

Atualmente existem diferentes métodos para a solução do fluxo de potência em sistemas elétricos em regime permanente, sendo os métodos clássicos os de Gauss-Seidel, Newton Raphson e o desacoplado, cada um deles com suas próprias limitações e características de solução. As características de cálculo de Newton-Raphson são superiores às de Gauss-Seidel, porém apresenta algumas dificuldades ainda não superadas, como a de exigir mais espaço de memória e sua relativa lentidão no cálculo do jacobiano para cada iteração; Portanto, a busca por algoritmos alternativos mais eficientes e confiáveis para resolver o problema de fluxo de carga é um processo que continua até hoje.

O método proposto como tese de doutorado, centra-se no problema de cálculo, de forma diferenciada aos métodos clássicos atualmente utilizados, uma vez que se baseia no reordenamento das barras do sistema, as quais são agrupadas em dois grandes subgrupos: bloco de barras de carga (PQ) e bloco de barras de tensão controlada (PV), além da barra de referência. Cada um desses blocos é tratado de forma independente e depois integrado em uma matriz única e determina diretamente as tensões. O método proposto, não requer a determinação do jacobiano, sendo o cálculo totalmente matricial e vetorial, utilizando o conceito de segmentação matricial das equações, que dão origem ao cálculo direto das tensões em barras, e então calculam o fluxo de potência.

O método proposto foi validado por três casos aplicados, obtendo resultados satisfatórios em termos de melhora dos índices de velocidade e capacidade de memória em relação aos métodos clássicos, além de um número mínimo de iterações.

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

1.1. Identificación del problema

Los estudios de flujo de potencia, también llamados estudios de flujo de carga, son sumamente importantes para evaluar el funcionamiento de los sistemas de potencia, el control, planificación para expansiones futuras, pre despacho, análisis de confiabilidad, etc. Un estudio de flujo de potencia define principalmente las potencias activa y reactiva y el vector de tensión en cada barra del sistema.

En la operación, planificación y mantenimiento de los sistemas eléctricos de potencia, generalmente se requiere simular una importante cantidad de flujos de potencia, como es el caso de la determinación del pre despacho de los generadores, en el planeamiento de los sistemas de transmisión y generación, en los estudios de estabilidad, etc. Para resolver estos problemas, se requiere simular un gran número de flujos de potencia, lo que podría, en muchos casos, resultar un proceso engorroso y demandar un tiempo demasiado largo en su ejecución, haciendo que el procedimiento de cálculo resulte ineficiente para las necesidades requeridas.

Desde la década del 40 hasta la fecha, se han venido desarrollando diferentes métodos en la solución de las ecuaciones no lineales para el flujo de potencia en régimen permanente, sin embargo todos los métodos planteados hasta ahora, no han logrado compatibilizar todas las necesidades del cálculo, en cuanto a tipos de red, tiempos del procesamiento, cantidad de memoria computacional, etc. Por esa razón, la comunidad de la ingeniería eléctrica continúa en los

esfuerzos de encontrar un método de cálculo que solucione el problema del flujo de potencia de manera óptima y eficiente.

A la fecha, se viene aplicando, tanto en el campo académico como en el comercial, los denominados métodos clásicos de solución del flujo de potencia, como son el de Gauss-Seidel y principalmente el de Newton Raphson es sus diferentes versiones.

El método **Gauss-Seidel**, utiliza la matriz de admitancias nodal. Este método demanda poca memoria para los cálculos, pero presenta problemas de convergencia lenta y en varios casos divergencia, especialmente cuando la matriz Y_{bus} no es diagonalmente dominante, llegando en muchos casos a requerir cerca de 200 iteraciones para llegar a la solución final.

El otro método clásico de **Newton-Raphson**, que es el más utilizado, no requiere de condiciones específicas de la matriz de admitancias para converger, sus características cuadráticas de convergencia hacen que tenga mayor velocidad, precisión y un número menor a 10 iteraciones para encontrar la solución final, sin embargo la cantidad de cálculos utilizados en cada iteración es hasta seis veces mayor a los que requiere Gauss-Seidel, necesitándose mayor cantidad de memoria. Entre las dificultades que presenta el método Newt Rapson que aún no han sido superadas, podemos mencionar las siguientes:

- Utiliza excesiva memoria para el cálculo.
- La determinación del Jacobiano, así como su cálculo para cada iteración, lo hace lento y tedioso.
- La necesidad de calcular en cada iteración la potencia reactiva, aumenta la necesidad de mayor tiempo y espacio de memoria en el cálculo computarizado
- Su algoritmo resulta ser complejo.

- Utiliza el método de triangularización del sistema de ecuaciones, en cada iteración.

Una versión de Newton Raphson bastante utilizado, es el método **Desacoplado Rápido**, que considera algunas simplificaciones importantes, considerando que las líneas de transporte presentan reactancias mucho mayores que sus resistencias, y además haciendo otras suposiciones, referidas a los senos y cosenos de los ángulos de desfasaje, así como despreciar las reactancias en derivación.

Sin embargo, a pesar de sus ventajas en cuanto a tiempo de ejecución y menor memoria computacional, las simplificaciones utilizadas hacen que este método no tenga la precisión adecuada en el cálculo y la confiabilidad del caso cuando se aplica para determinar las condiciones de operación de los sistemas eléctricos de potencia. Además, no se puede aplicar de forma general a cualquier red, como sería el caso, por ejemplo, de las redes de media tensión, donde no se cumple las suposiciones del desacoplamiento (mayor razón R/X), haciendo que el sistema sea mal condicionado y los métodos tarden mucho en converger a la solución o inclusive divergen

Existen otros métodos para la solución del flujo de carga, como por ejemplo el planteamiento de considerar sistemas eléctricos de potencia en DC, lo que significa resolver ecuaciones de tipo lineal, Sin embargo, las suposiciones asumidas para el cálculo de sistemas en DC, no tienen aplicación en la operación de SEP, estando su aplicación limitada a los estudios de planificación de los SEP".

También se pueden mencionar otros métodos, como los de suma de corrientes, pero básicamente aplicados a sistemas de distribución

que difieren en topología y carga de los sistemas de transmisión de potencia eléctrica.

Los métodos clásicos como el de Gauss-Seidel y principalmente el de Newton Raphson en sus diferentes versiones, que hasta el momento son los más aceptados tanto en el mundo académico como en el comercial, como puede verse, presentan diferentes dificultades y desventajas; lo que hace necesario continuar con los esfuerzos de encontrar métodos más eficientes, que procuren superar los problemas que presentan los actuales métodos clásicos, aplicados en la solución de las ecuaciones del flujo de potencia en régimen permanente.

1.2. Formulación de problemas

Problema Central:

Dificultades y desventajas del procedimiento de cálculo que presentan los métodos clásicos para la determinación del flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, con relación al proceso mismo, la velocidad del cálculo y la cantidad de memoria digital utilizada para tal fin.

Pregunta:

¿Cómo optimizar el procedimiento del cálculo de flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, utilizando la segmentación matricial, y superar las dificultades que presentan los métodos clásicos, en cuanto a tiempo y cantidad de memoria computacional?

1.2.1. Problemas específicos

- a). Las ecuaciones matriciales para la solución del flujo de potencia, son planteadas considerando al SEP como un todo, y de manera indistinta para las barras de tipo PV y PQ, lo que

trae consigo que la solución del sistema de ecuaciones debe ser también como un todo.

- b). El sistema de ecuaciones clásico, para la solución del flujo de potencia, dificulta el desarrollo de programas computacionales ágiles y eficientes.
- c). Los niveles de tensión en las barras del SEP obtenidos por los métodos clásicos, son ineficientes en cuanto tiempo y cantidad de memoria computacional requerido por los programas respectivos.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un método matemático para optimizar el procedimiento del cálculo del flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, que permita reducir el tiempo y la cantidad de memoria computacional, requeridos por los métodos clásicos, aplicando el concepto de la segmentación matricial de las ecuaciones de un SEP.

1.3.2. Objetivos específicos

- a). Obtener las ecuaciones matriciales particionadas para las tensiones del SEP, a partir de la segmentación ordenada de las barras del SEP, en función de los tipos de barras PQ y PV.
- b). Desarrollar un PROGRAMA específico en MATLAB óptimo y ágil, para la prueba experimental del método de segmentación matricial para el cálculo de las tensiones en las barras del SEP.
- c). Aplicar el método propuesto a casos de SEP conocidos de la bibliografía y la IEEE, y calcular los niveles de tensión en las

barras del SEP, y comparar con los obtenidos por los métodos clásicos, para los mismos casos, y contrastar los procedimientos en cuanto a cantidad de memoria y tiempos computacionales.

1.4. Justificación del estudio

1.4.1. Legal

El presente trabajo de tesis doctoral, está fundamentado en las siguientes normas legales:

- a) Ley Universitaria 30220.
- b) Estatuto de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Asamblea Universitaria el año 2015.
- c) Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución del Concejo Universitario N° 309-2017-CU.
- d) Directiva para la Presentación de Planes de Tesis y Trabajos de Tesis de Posgrado de la Universidad Nacional del Callao, aprobado por Resolución Rectoral N° 1181-2017-R.

1.4.2. Teórica

El análisis más frecuente que se realiza en un sistema eléctrico de potencia, es la determinación del estado de operación en régimen permanente del mismo, siendo los parámetros más importantes a determinar las tensiones vectoriales en las distintas barras del sistema y los flujos de potencia activa y reactiva en todas las líneas.

La determinación de las tensiones en barras del Sistema Eléctrico de Potencia, demandan del planteamiento y solución de un sistema de ecuaciones no lineales, haciendo necesario de métodos iterativos para la solución de dichas ecuaciones, con un cierto nivel de error tolerable que generalmente es de 0,0001. En ese sentido el presente

trabajo contribuirá a generar un nuevo método de solución de carácter iterativo aplicando los conceptos de la subdivisión (segmentación) de las ecuaciones matriciales y vectoriales.

1.4.3. Técnica

Las aplicaciones del estudio de flujos de potencia son diversas como muy importantes, es así que muchos trabajos, como en el caso de los pre despacho de unidades de generación, en la planificación de las redes de transporte, en el análisis de confiabilidad, estabilidad y estados de falla de los sistemas eléctricos, entre otros, donde se requiere simular cientos y hasta miles de flujos de potencia, demandan de grandes cantidades de memoria y de tiempo, así como de ciertos niveles de exactitud en el cálculo.

Por estas razones es de suma importancia disponer de métodos para el cálculo de los flujos de potencia que sean eficientes en cuanto a la cantidad de memoria y velocidad en los tiempos de los procesos de cálculo, aspectos en los que el estudio aporta.

1.4.4. Económica

Las empresas dedicadas a la explotación de los sistemas eléctricos de potencia están permanentemente a la búsqueda de métodos más eficientes para el cálculo del flujo de potencia eléctrica, lo que motiva al desarrollo de algoritmos que permitan superar los inconvenientes de los métodos clásicos actualmente utilizados.

El presente estudio que propone desarrollar un nuevo método para el cálculo del flujo de potencia eléctrica, tendrá un aporte desde el punto vista económico, porque permitirá que el cálculo de flujo de carga de carácter comercial sean más eficientes, en cuanto a tiempo y memoria computacional, repercutiendo en los costos operativos más económicos de los SEP.

1.4.5. Social

Este trabajo constituye un aporte a la formación académica de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica en el nivel universitario y su posterior desempeño en el campo laboral.

Así mismo, el trabajo tendrá un aporte en una mejor operatividad de los Sistema Eléctricos, lo que repercutirá en un mejor servicio eléctrico a la sociedad en su conjunto.

1.5. Alcances y limitaciones

Los elementos de la red de transmisión son considerados para condiciones de operación en equilibrio y en régimen permanente, además la operación de los mismos es efectuada de manera balanceada debido a que la carga nodal es equilibrada, por lo tanto, el flujo de potencia a través de los elementos presenta condiciones de balanceo, esto es, no existe circulación de corriente por neutro ni tierra, en estas condiciones, si la red trifásica es descompuesta en tres redes de secuencia, denominadas de secuencia positiva, negativa y cero, solo la red de secuencia positiva tiene efecto en la operación. Por lo anterior, al efectuar análisis en estado estacionario en redes de alta potencia, la red se modela por su equivalente monofásico de secuencia positiva.

No se considera los casos especiales de transformadores o sus conexiones, solo aquellas de carácter normal, pues se trata de exponer el principio del método.

El método planteado se aplica básicamente a redes de transmisión y no se analiza su aplicación para el caso de redes de distribución.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes del estudio

Hasta mediados de la década del 40 del siglo pasado, se utilizaban modelos físicos a escala para poder estudiar el comportamiento de una red eléctrica de potencia. El año 1947 se utilizó por primera vez la computadora, para el análisis del flujo de potencia, y que fue publicado por la Dunstan en el artículo, "Machine computations of power network performance", AIEE Transactions, vol. 66. Sin embargo su aplicación fue mejorada por J. Ward y H. Hale, publicado en el artículo "Digital computer solution of power flow problems" en el AIEE Transactions, vol 75, 1956.

Los primeros años de la década del 60 se empezaron a plantear modelos matemáticos computarizados para resolver el problema del flujo de potencia, siendo así que en 1961 James E. Van Ness y John H. Griffin; plantearon el denominado método: "*Elimination Methods for Load-Flow Studies*"; [1], que luego de ser probado por Bonneville Power Administration, determinaron que al aumentar el número de nodos del sistema de potencia en análisis, el método propuesto, demandaba de mayores tiempos y mayor cantidad de memoria computacional.

El año 1963, H. E Brown, G. K. Carter, H. H. Happ, y C. E. Person, propusieron un método basado en el uso de la matriz de impedancias de barra (Z_{barra}) [2], pero que su eficiencia iterativa dependía del tamaño de red a ser analizado. Más adelante, el método es mejorado, tomando el nombre de Gauss-Seidel.

Posteriormente, en 1967, William F. Tinney y Clifford E. Hart mejoraron la eficiencia del método, mediante la eliminación

Gaussiana ordenada óptimamente y usar técnicas especiales de programación, logrando de esta forma proponer el así llamado método de *Newton-Rapson* [3]. Este método, resultó ser bastante eficiente frente al de Gauss-Seidel, por lo que fue considerado el modelo patrón, para el contraste de otros modelos.

Más tarde, se propone el método **desacoplado rápido** (*versión XB*), desarrollado por Brian Stott y Alsaç en 1974 [4], el cual incremento la velocidad de cálculo, logrando reducir el uso de memoria y tiempo de cálculo computarizado, sin embargo presenta un bajo nivel de convergencia para sistemas con una alta relación R/X.

El método de desacoplado rápido reduce aproximadamente a la mitad la cantidad de almacenamiento de la memoria en comparación al de Newton Rapson, por lo que es utilizado como una alternativa para la solución de flujos de cargas en sistemas de grandes redes radiales o sistemas de Distribución.

Hasta la fecha se han planteado diferentes métodos iterativos para el cálculo del flujo de potencia, la mayoría de ellos basados en los fundamentos de Newton Rapson, siendo entre los más destacados los siguientes:

- **Modificación del método desacoplado rápido para sistemas con alta relación R/X.**- Tiene excelentes características de convergencia para sistemas con alta relación R/X pero es menos eficiente que la versión XB del método desacoplado rápido, fue planteado el año 1988, por D. RAJICIC y A. BOSE [5]. Su aplicación está más orientada a los sistemas de Distribución.
- **Versión BX del flujo de carga desacoplado rápido.**- Propuesto el año 1989 por R. A. M. AMERONGEN [6]; esta versión del Flujo de Carga Desacoplado Rápido presenta excelentes características de convergencia ante sistemas con alta relación

R/X. Utiliza un esquema de iteraciones sucesivas P- δ y Q-V para evitar convergencia cíclica. Su aplicación se limita a sistemas de Distribución.

- **Método de Newton-Raphson en forma compleja.-** Propuesto el año 1996 por H. L. NGUYEN [7]; este método emplea por primera vez una matriz jacobiana compleja. Sin embargo requiere de mayores tiempos de cómputo que con las versiones anteriores del desacoplado rápido, ya que debe volver a calcular la matriz Jacobiana en cada iteración.
- **Método desacoplado rápido robusto.-** Otro método eficiente y rápido para calcular flujos de potencia en sistemas con altas tasas de R/X y/o bajos niveles de tensión, es el método desacoplado rápido robusto (Robust Fast Decoupled Power Flow Method o RFDPFM), planteado por Lu. Wang y X Rong Li, el año 2000 [8]. Su aplicación se limita a Sistemas de distribución.
- **Flujo de cargas semidesacoplado rápido.-** Propuesto el año 2004, por Eduardo Revollo en la tesis: "*Flujos De Carga: Un Método Alternativo Para Su Solución*" [9]. Este método de Flujo de Carga Semidesacoplado Rápido (FCSDR) se caracteriza principalmente por el empleo de ecuaciones complejas y por permitir la obtención de soluciones en formato fasorial.
- **Modelo de la potencia activa.-** Método aproximado donde sólo interesa estimar el flujo de potencia activa y despreciar la potencia reactiva, por tanto se establece que la magnitud de tensiones en todas las barras son iguales a la unidad [10]. Este método, es ampliamente utilizado para estudios de planificación, puesto que realiza una buena estimación de los flujos de potencia activa; pero no así para estudios de operación de los sistemas en A.T.

También existen otros modelos para el cálculo del flujo de potencia aplicados específicamente a los sistemas de distribución, cuya estructura es distinta a los Sistemas de Trasmisión Eléctrica en alta tensión, que es el propósito del método de la Segmentación Matricial que se propone en el presente trabajo, para el cálculo de los niveles de tensión en las barras del sistema y el flujo de potencia eléctrica correspondiente en estos sistemas.

En resumen, a la fecha existen diferentes métodos para la solución del problema de Flujo de Potencia eléctrica en líneas de trasmisión en alta tensión; sin embargo las técnicas actualmente preferidas y utilizadas tanto por el mundo académico, así como por el sector empresarial, son los denominados METODOS CLASICOS, como son los de Gauss-Seidel, Newton-Raphson, y el método desacoplado rápido (FCDR) en sus diferentes versiones.

2.2 Bases teóricas

Se han tomado como referencias las tesis en [9], [10], [11], [12], y bibliografía en [22], [23], [24].

2.2.1 Representación de las líneas de transmisión

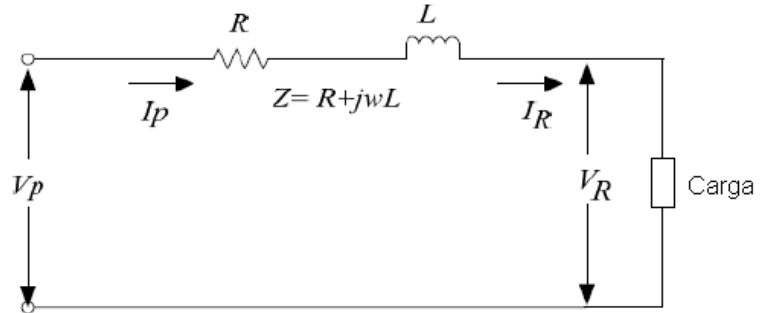
Para el análisis, las líneas de transmisión pueden ser clasificados en: cortas, medianas y largas, y de acuerdo con esta clasificación se obtiene el modelo matemático correspondiente para el cálculo del flujo de potencia.

a. Líneas cortas:

En la figura 2.1. Se representa una línea de transmisión corta, por lo común aplicadas a líneas con menos de 80 km de largo y a 60 Hz. En este caso la admitancia en derivación de la línea se considera despreciable.

Figura 2.1

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LÍNEA CORTA

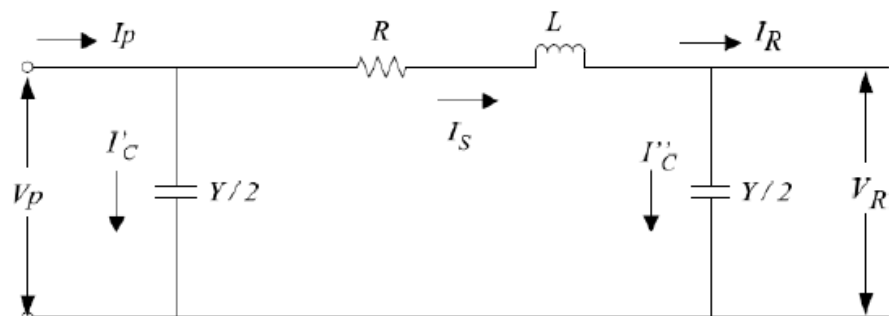


b. Líneas medianas

Son aquellas líneas cuya longitud están comprendidas entre 80 a 250 km, a 60 Hz, es frecuente concentrar la capacitancia total en derivación y situar la mitad en cada extremo de la línea.

Figura 2. 2

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LÍNEA DE LONGITUD MEDIA

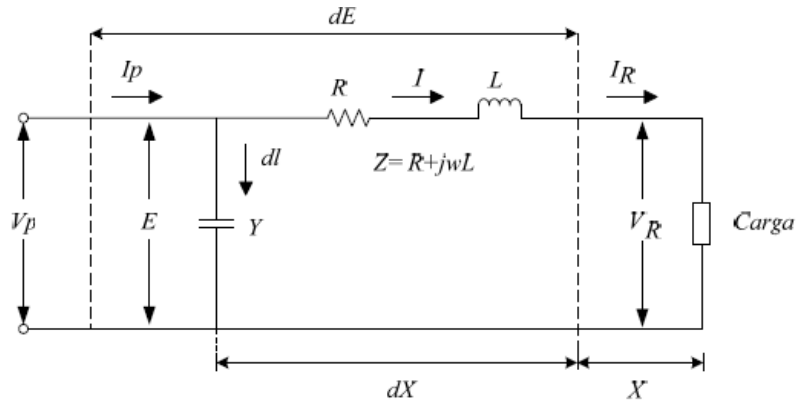


c. Líneas largas.

Son consideradas así, aquellas líneas cuya longitud es superior a 250 Km, 60 Hz. Para este tipo de línea debe considerarse el hecho de que los parámetros de la línea no están agrupados sino distribuidos uniformemente a lo largo de la línea.

Figura 2.3

CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA LÍNEA LARGA

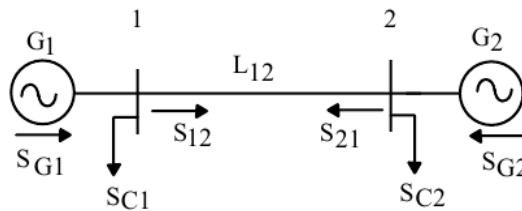


2.2.2 Incógnitas para el cálculo del flujo de potencia

Considerando un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) de dos barras:

Figura 2.4

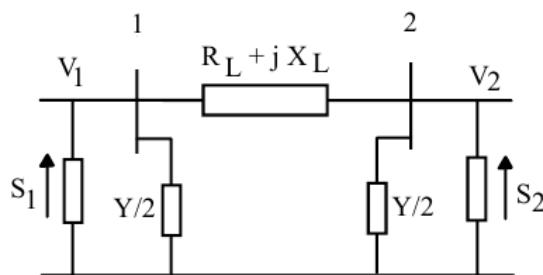
SISTEMA ELECTRICO DE DOS BARRAS



Circuito equivalente en pi:

Figura 2.5

CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SISTEMA ELECTRICO DE DOS BARRAS



Dónde:

S_1 y S_2 : Son las potencias complejas netas de las barra 1 y 2 respectivamente, representadas como fuentes de potencia activa y reactiva, que corresponden a la Potencia Generada menos la Potencia Consumida.

S_{12} y S_{21} : Flujos de potencia compleja que van desde la barra 1 a la barra 2 y viceversa.

De acuerdo con la Fig. 2.4, (pág. 24), las potencias complejas netas de las barras 1 y 2 son:

$$S_1 = S_{G1} - S_{C1} = (P_{G1} - P_{C1}) + j(Q_{G1} - Q_{C1}) = P_1 + jQ_1$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{C2} = (P_{G2} - P_{C2}) + j(Q_{G2} - Q_{C2}) = P_2 + jQ_2$$

En el circuito de la Fig. 2.5, (pág. 26), se puede escribir:

$$\frac{S_1^*}{V_1^*} = \frac{P_1 - jQ_1}{V_1^*} = V_1 \frac{Y}{2} + \frac{V_1 - V_2}{R_L + jX_L}$$

$$\frac{S_2^*}{V_2^*} = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = V_2 \frac{Y}{2} + \frac{V_2 - V_1}{R_L + jX_L}$$

Estas ecuaciones, que relacionan las tensiones con las potencias activas y reactivas, presentan las siguientes características:

- Son algebraicas y no lineales.
- No se indica la frecuencia de manera específica, porque está es de carácter constante.
- El sistema de cuatro ecuaciones, tiene 12 variables en total: P_{G1} , P_{G2} , Q_{G1} , Q_{G2} , P_{C1} , P_{C2} , Q_{C1} , Q_{C2} , V_1 , θ_1 , V_2 , θ_2 , por lo que no es posible obtener una solución para ninguna de ellas a menos que se reduzca el número de incógnitas, fijando de antemano algunas variables.

Una forma de encontrar la solución al problema señalado anteriormente es la siguiente:

- Se suponen conocidas e independientes del voltaje, las potencias de las cargas P_{Ci} , Q_{Ci} , con $i = 1, 2$.
- Se fijan dos variables de generación, por ejemplo P_{G2} y Q_{G2} . No es posible fijar las cuatro variables de generación por que no se conocen de inicio las pérdidas en el sistema.
- Se fija el módulo y ángulo de la tensión en barra 1; vale decir V_1 , θ_1 . Puede tomarse esta tensión como referencia, con $\theta_1=0$, $V_1=1.0$
- Bajo estas consideraciones, el sistema de 4 ecuaciones, se reduce a contar con sólo 4 variables: P_{G1} , Q_{G1} , V_2 , θ_2 .

2.2.3 Tipos de barras

Asociados a cada barra p de un SEP existen cuatro variables, P_p , Q_p , V_p , θ_p , y según las variables conocidas y desconocidas, las barras se clasifican en los siguientes grupos:

a. Barras de carga: barras PQ

En este tipo de barras, se especifican los valores de P_p y Q_p , siendo; V_p y θ_p son las incógnitas.

b. Barras de tensión controlada: barra PV

En este tipo de barras, P_p y V_p son especificadas; siendo Q_p y θ_p las incógnitas. Estas barras deben presentar alguna fuente controlable de potencia reactiva.

c. Barra flotante o slack

Esta barra es de referencia, donde V_p y θ_p están especificados; P_p y Q_p constituyen las incógnitas. En esta barra se encuentran las fuentes de generación. Se requiere de definir esta barra, porque no es posible especificar a priori, la

potencia total de generación necesaria en el sistema, puesto que inicialmente no se conocen las pérdidas en el mismo. La barra slack debe suministrar la diferencia entre la potencia compleja inyectada al sistema en el resto de las barras y la carga total más las pérdidas.

2.3.1 Ecuaciones generales para el cálculo del flujo de potencia

a. Ecuaciones de barra

Considerando una barra p cualquiera de un sistema tal como se muestra en la Fig. 2.6. La potencia compleja neta, S_p y la corriente inyectada en la barra p , I_p están relacionadas por las siguientes ecuaciones, que constituyen las ecuaciones de barras.

$$S_p = V_p I_p^* = P_p + jQ_p \quad (2.1) \quad I_p = \frac{S_p^*}{V_p^*} = \frac{P_p - jQ_p}{V_p^*} \quad (2.2)$$

Figura 2.6

REPRESENTACIÓN DE UNA BARRA P EN UN SEP



b. Ecuaciones de flujo de potencia

Tomando en cuenta la Fig. 2.6, se puede escribir:

$$I_{pq} = (V_p - V_q)Y_{pq} + V_p(Y'_{pq}/2) \quad (2.3)$$

La potencia que fluye desde la barra p a la q está dada por:

$$S_{pq} = V_p I_{pq}^* = \left[Y_{pq}^* + \left(\frac{Y'_{pq}}{2} \right) \right] V_p^2 - V_p^* V_q Y_{pq}^* \quad (2.4)$$

Análogamente, la potencia que fluye desde la barra q a la barra p estará dada por:

$$S_{qp} = V_q I_{qp}^* = \left[Y_{qp}^* + \left(\frac{Y'_{qp}}{2} \right) \right] V_q^2 - V_p^* V_q Y_{qp}^* \quad (2.5)$$

c. Pérdida de potencia en la línea

De acuerdo con los sentidos adoptados para S_{pq} y S_{qp} , la potencia compleja perdida en la línea será:

$$S_{Lpq} = S_{pq} + S_{qp} \quad (2.6)$$

d. Ecuaciones para las tensiones de barra

Para solucionar las ecuaciones de los flujos de potencia, se requiere determinar previamente las tensiones en todas las correspondientes barras. Empleando el método nodal de resolución de circuitos, en forma matricial, para la red de un SEP de n barras se puede escribir:

$$[I_B] = [Y_B][V_B] \quad (2.7)$$

Donde $[I_B]$ es el vector de corrientes inyectadas a las barras; $[Y_B]$ es la matriz admitancia de barras, y $[V_B]$ es el vector tensiones de barra, definidos como:

$$[I_B] = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_p \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad [V_B] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_p \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad [Y_B] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1p} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2p} & \cdots & Y_{2n} \\ & & & \vdots & & \\ Y_{p1} & Y_{p2} & \cdots & Y_{pp} & \cdots & Y_{pn} \\ & & & \vdots & & \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{np} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Teniendo en cuenta que, las corrientes inyectadas en las barras dependen de las potencias complejas netas respectivas ($I_p = S_p^*/V_p^*$), se puede escribir, en forma general:

$$S_1^*/V_1^* = Y_{11}V_1 + Y_{12}V_2 + \cdots Y_{1p}V_p \cdots Y_{1n}V_n$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{S}_2^*/\mathbf{V}_2^* &= Y_{21}\mathbf{V}_1 + Y_{22}\mathbf{V}_2 + \cdots Y_{2p}\mathbf{V}_p \cdots Y_{2n}\mathbf{V}_n \\
\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots & \\
\mathbf{S}_p^*/\mathbf{V}_p^* &= Y_{p1}\mathbf{V}_1 + Y_{p2}\mathbf{V}_2 + \cdots Y_{pp}\mathbf{V}_p \cdots Y_{pn}\mathbf{V}_n \\
\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots & \\
\mathbf{S}_n^*/\mathbf{V}_n^* &= Y_{n1}\mathbf{V}_1 + Y_{n2}\mathbf{V}_2 + \cdots Y_{np}\mathbf{V}_p \cdots Y_{nn}\mathbf{V}_n
\end{aligned} \tag{2.9}$$

Este sistema de ecuaciones (2.9), es similar al obtenido en el problema elemental de 2 barras; es decir; las ecuaciones son algebraicas y no lineales, por lo tanto es necesario resolverlo mediante técnicas de aproximaciones sucesivas.

2.3 Bases conceptuales

2.3.1 Partición de matrices

La partición de matrices, consiste en dividir una determinada matriz en varias partes como sub matrices, los mismos que se consideran como elementos simples al aplicarles las reglas de la multiplicación y sumas [13]

Así, una matriz A de 3 x 3, puede ser partida en 4 sub matrices:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = \left[\begin{array}{ccc|c} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \\ \hline a_{21} & a_{22} & a_{23} & \\ \hline a_{31} & a_{32} & a_{33} & \end{array} \right]$$

Siendo, las sub matrices:

$$D = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix} \quad F = [a_{31} \quad a_{32}] \quad G = [a_{33}]$$

Luego, las sub matrices se consideran como elementos de la matriz A y se tendrá:

$$A = \begin{bmatrix} D & E \\ F & G \end{bmatrix}$$

Así mismo, una matriz B de una sola columna de 3 x 1, puede ser partida en 2 sub matrices:

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} \Rightarrow H = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} \quad J = [b_{31}] \quad \Rightarrow B = \begin{bmatrix} H \\ J \end{bmatrix}$$

Ahora, el producto matricial de AB, se desarrolla considerando las sub matrices como simples elementos:

$$C = AB = \begin{bmatrix} D & E \\ F & G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ J \end{bmatrix} \Rightarrow C = \begin{bmatrix} DH + EJ \\ FH + GJ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M \\ N \end{bmatrix}$$

Siendo:

$$M = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13} \\ a_{23} \end{bmatrix} [b_{31}] \Rightarrow M = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{13}b_{31} \\ a_{23}b_{31} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{bmatrix} a_{11}b_{11} + a_{12}b_{21} + a_{13}b_{31} \\ a_{21}b_{11} + a_{22}b_{21} + a_{23}b_{31} \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} a_{31} & a_{32} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_{33} \end{bmatrix} [b_{31}] \Rightarrow N = [a_{31}b_{11} + a_{32}b_{21} + a_{33}b_{31}]$$

2.3.2 Segmentación

Según el diccionario de la Real Academia de la lengua española [14], el vocablo *segmentación*, viene del latín *segmentum*, y entre sus significados se mencionan los siguientes:

- a. Porción o parte cortada o separada de una cosa, de un elemento geométrico o de un todo.
- b. Geom. Parte de una recta comprendida entre dos puntos

La definición del término *segmentación* aparece citada en los temas relacionados a la mercadotecnia, así entre algunos se tienen los siguientes conceptos:

Roberto Espinosa en su tratado sobre “Segmentación De Mercado, Concepto y Enfoque” [15], dice: “*La segmentación de mercado divide el mercado en grupos con características y necesidades semejantes para poder ofrecer una oferta diferenciada*”

y adaptada a cada uno de los grupos objetivo. Esto permite optimizar recursos y utilizar eficazmente nuestros esfuerzos de marketing”.

Jesús Enrique Quijano Caicedo; Economista y especialista en Gerencia de Mercadeo [16]; define la segmentación así: *“Es el proceso de dividir un gran mercado heterogéneo en subconjuntos homogéneos, con necesidades similares y capacidad de respuesta a lo ofrecido por una Mezcla de Mercadeo.”*

Roberto Santivañez ; en su tratado sobre MERCADO ELÉCTRICO PERUANO: [17], dice *“Con la finalidad de establecer condiciones para un mercado eficiente y competitivo el sistema peruano se basa, en (i) la segmentación de las tres principales actividades (generación, transmisión y distribución) que se desarrollan en el mercado, (ii) la especialización de las empresas eléctricas en cada una de estas actividades, ...”*

2.3.3 Segmentación de barras en un sistema eléctrico de potencia

Considerando que un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), contiene dentro de su estructura, 3 tipos de barras (Slack, PV y PQ), y cada tipo con características eléctricas semejantes, estas pueden ser agrupadas en 3 segmentos de barras:

- a). Segmento de barras tipo Slack (Una sola barra)
- b). Segmento de barras tipo PQ.
- c). Segmento de barras tipo PV.

Esta segmentación del conjunto de barras del SEP, permite que las matrices de las ecuaciones que lo gobiernan, puedan ser particionadas para cada segmento de barras, dando lugar a la *segmentación matricial* de las ecuaciones respectivas.

2.3.4 Definición conceptual de método

De acuerdo al diccionario de la Lengua Española, se encuentran los siguientes significados para la palabra *método*: [18]

- a. Modo ordenado y sistemático de proceder para llegar a un resultado o fin determinado.
- b. Procedimiento que se sigue para conseguir algo

De la misma forma, en distintas páginas Web, se pueden encontrar las siguientes definiciones o conceptos, sobre la palabra *método*:

- a. Método es una palabra que proviene del término griego *methodos* (“camino” o “vía”) y que se refiere al medio utilizado para llegar a un fin. Su significado original señala el camino que conduce a un lugar. [19].
- b. La palabra Método hace referencia a ese conjunto de estrategias y herramientas que se utilizan para llegar a un objetivo preciso, el método por lo general representa un medio instrumental por el cual se realizan las obras que cotidianamente se hacen. [20].
- c. Método es un modo, manera o forma de realizar algo de forma sistemática, organizada y/o estructurada. Hace referencia a una técnica o conjunto de tareas para desarrollar una tarea. [21].

CAPITULO III

VARIABLES, HIPOTESIS Y METODOLOGIA

3.1 Identificación de variables

De acuerdo con el título y los objetivos del plan de tesis, y en relación al cálculo de tensiones de barra y flujo de potencia, se identifican las siguientes variables:

1. Variable Independiente: Método de la segmentación matricial
2. Variable de control: Métodos clásicos
3. Variable dependiente: Procedimiento de cálculo del FPE.

3.2 Operacionalización de variables

Cuadro N° 3.1

OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Variable Independiente	Definición Operacional	Variable Dependiente	Indicadores
Método de Segmentación (variable de experimentación)	Modo ordenado y sistemático de calcular el flujo de potencia eléctrica, aplicando la partición de la ecuación matricial de la corriente y la potencia de acuerdo al tipo de barra, cuyo procedimiento es calculado mediante el software de MATLAB.	Procedimiento de cálculo del flujo de potencia eléctrica.	1. Tiempo de procesamiento (mseg) 2. Cantidad de memoria demandada (GB)
Métodos clásicos (variable de control)	Modo ordenado y sistemático de calcular el flujo de potencia, mediante los métodos conocidos y utilizados normalmente en el campo académico y comercial, como Gauss-Seidel, Newton Rapson, desacoplado, y desacoplado rápido, aplicando el software de MATLAB.	Procedimiento de cálculo del flujo de potencia eléctrica.	3. Tiempo de procesamiento (mseg) 4. Cantidad de memoria demandada (GB)

3.3 Hipótesis.

3.4.1 Hipótesis general

La *segmentación matricial* de las ecuaciones para un Sistema Eléctrico de Potencia, optimizará el *procedimiento de cálculo* del flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, respecto de los *métodos clásicos*, permitiendo reducir los índices de velocidad y memoria RAM, utilizados por los Software del cálculo computacional.

3.4.2 Hipótesis específicas

- a. La segmentación ordenada de las barras del SEP, de acuerdo a los tipos de barra PQ y PV, permitirá la partición de las ecuaciones matriciales respectivas.
- b. La segmentación de las ecuaciones matriciales del SEP, permitirá desarrollar un PROGRAMA específico para calcular las tensiones de barra de dicho SEP.
- c. Los niveles de tensiones de barra, obtenidos a partir del método propuesto, aplicados a SEP conocidos de la bibliografía y la IEEE, son comparables a los obtenidos por los métodos clásicos, con la diferencia que en el primer caso se optimiza el proceso en cuanto a tiempo y cantidad de memoria computacional.

3.4 Metodología

3.4.1 Tipo de investigación

El presente estudio, de acuerdo con la clasificación señalada por Landeau Rebeca (2007), está enmarcado dentro de los siguientes tipos de investigación:

- a) Según su finalidad, es de tipo aplicada por que plantea la solución de un problema práctico, como el cálculo del flujo de

potencia en régimen permanente utilizando el concepto de segmentación matricial de las ecuaciones respectivas, como nuevo modelo o método, para optimizar el procedimiento de cálculo y comparar con el procedimiento y resultados aplicados con los métodos clásicos.

- b) Según su carácter, es de tipo experimental (causa-efecto), puesto que se someten a prueba las variables, método de la segmentación matricial y Métodos Clásicos (variable independiente y de control respectivamente), para observar y analizar los resultados o efectos sobre la variable dependiente, procedimiento de cálculo, donde se miden los indicadores como, número de iteraciones, número de la inversión de matrices, tiempo y cantidad de memoria demandadas.

Así también, de acuerdo con Carlos G. Díaz de León - Elda Ayde de León de la Garza, de la Univ. Autónoma de nueva León; México, el estudio que se plantea, es de tipo comparativa, porque trata de plantear un modelo desconocido, a partir de las conocidas, explicar e interpretar sus diferencias y destacar lo peculiar de los modelos conocidos, y distinguir las diferencias con casos similares.

- c) Según su naturaleza es de enfoque cuantitativo, porque se centra en aspectos observables y susceptibles de cuantificación del fenómeno. En nuestro caso se cuantifica los resultados del proceso aplicados al método en estudio y el de comparación o control.

3.4.2 Diseño de la investigación.

El presente trabajo de Tesis, tiene como objetivo proponer un nuevo método para el cálculo del flujo de potencia y optimizar el procedimiento respecto de los métodos clásicos. Para lograr el propósito, se utiliza el método de la investigación experimental,

para lo que se somete a prueba el método de cálculo propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA (variable independiente), y observándose los resultados del procedimiento del cálculo (variable dependiente), y llegándose a determinar los indicadores como son, el número de iteraciones, número de inversiones de la matriz de admitancias, velocidad de cálculo o tiempo demandado y cantidad de memoria (RAM) utilizada; para luego comparar con los resultados de los indicadores de los métodos clásicos (variable de control), aplicados a los mismos grupos de experimentación (Red eléctrica de diferentes número de barras).

Entonces la investigación tiene el siguiente esquema de trabajo experimental:

G ----- --> X1----- O1

G ----- --> X2-----O2

G: Grupo de experimentación (Sistema Eléctrico de potencia con un cierto número de barras, aplicado a diferentes casos).

X1: Modelo de experimentación (variable de experimentación); Método de la segmentación ordenada.

X2: Modelo de control o testigo (variable de control); Métodos clásicos.

O1: Resultados del procedimiento de cálculo (variable dependiente), aplicando X1; donde se miden los indicadores señalados.

O2: Resultados del procedimiento de cálculo (variable dependiente), aplicando X2, donde se miden los indicadores señalados.

PRUEBA DE HIPÓTESIS:

Si los indicadores de O1 tienen menores niveles que los indicadores de O2, entonces se acepta la hipótesis de investigación (trabajo), caso contrario se acepta la hipótesis nula. No se considera una hipótesis alterna.

3.4.3 Población y muestra

La población lo constituyen todos los sistemas eléctricos de potencia (SEP), cuya estructura está conformada por sistemas de transmisión o líneas clasificadas como líneas de transmisión corta, mediana y larga, con diferentes números de barras o nodos.

La muestra de ensayo lo constituyen 3 sistemas eléctricos de potencia (SEP), con diferentes números de barras, seleccionados aleatoriamente y como casos de aplicación del método propuesto. Los sistemas eléctricos que fueron utilizados para la validación del método propuesto son los siguientes:

- a). Un sistema eléctrico de 4 barras, tomado del libro: "*Análisis de Sistemas de Potencia*"; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2. [24]
- b). Un sistema eléctrico de 5 barras, tomado del libro "Sistemas de Potencia-Análisis y diseño" 3ra. Ed. Por J. Duncan y Mulukuta S. Cap. VI; Ejemplo 6.11, Pág. 287. [23]
- c). Un sistema eléctrico de 14 barras de la IEEE [27], porción del Sistema Eléctrico de Potencia Americano del año 1962, referido en el artículo "*Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data*", Vol. PAS-92, No. 6, 1973, pp. 1916-1925. Los datos se pueden encontrar en:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

3.4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

En el presente estudio, se utiliza como técnica del análisis de la investigación básicamente la *experimentación* del modelo propuesto, aplicado a los casos o muestras seleccionadas, cuyos datos están establecidos para cada caso, según los autores de las fuentes señaladas en el ítem anterior..

3.4.5 Procedimiento de recolección de datos.

Se han tomado en cuenta los datos proporcionados por los autores señalados en 3.4.3 para cada uno de los casos de estudio

Análisis de datos

El método de SEGMENTACION ORDENADA para el cálculo del flujo de potencia (variable de investigación), es sometido a prueba, para cada uno de los casos de aplicación, señalados en el ítem 3.4.3, para lo que se ha diseñado un PROGRAMA específico, utilizando la herramienta de cálculo computacional en MATLAB.

Los MÉTODOS CLÁSICOS (variable de control), son sometidos a experimentación, para los mismos casos o ejemplos aplicados con el método propuesto, para lo cual se ha diseñado un PROGRAMA específico, utilizando la herramienta de cálculo computacional MATLAB.

Cuadro N° 3.2

PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS

Método	Parámetros de Cálculo	Grado de exactitud	Herramienta de cálculo
Método de segmentación matricial	1. Tensiones de barra 2. Flujo de potencia	0.0001	Diseño de Programa específico en MATLAB
Métodos clásicos	1. Tensiones de barra. 2. Flujo de potencia	0.0001	▪ MATLAB y/o ▪ ETAP

Una vez obtenido los resultados de cálculo con un cierto nivel de exactitud, se miden los indicadores, de tiempo y memoria RAM demandados por los procedimientos de cálculo, tanto para el método propuesto, como para los métodos clásicos, mediante las herramientas de cálculo, utilizados para la experimentación (MATLAB).

Cuadro N° 3.3

PARÁMETROS DE MEDICIÓN DE INDICADORES

Indicadores	Tiempo (Seg)	Memoria Ram (Mb)
Método propuesto	T_p	M_p
Métodos clásicos	T_c	M_c

3.4.6 Verificación de hipótesis

Los indicadores de experimentación y control, son analizados comparativamente para cada uno de los casos o ejemplos de aplicación, con lo que se VERIFICA las HIPOTESIS PLANTEADAS.

Cuadro N° 3.4

VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Hipótesis	Procedimiento de cálculo	Resultado A	Resultado B
Hipótesis de trabajo	Optimizado	$T_p < T_c$	$M_p < M_c$
Hipótesis nula	Normal	$T_p > T_c$	$M_p > M_c$

CAPITULO IV

MÉTODOS CLASICOS PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE POTENCIA ELECTRICA

4.1 Método de Gauss-Seidel.

Suponiendo un vector inicial cercano a las posibles soluciones del sistema, excepto en la barra slack, donde la tensión es un dato, el método iterativo de Gauss-Seidel se utiliza para obtener un valor mejorado del vector solución actualizando sus valores respecto del valor anterior calculado. El proceso se debe repetir para cada uno de los nodos, hasta completar una iteración, así mismo, el proceso iterativo se debe repetir hasta que el vector solución converge a una precisión predeterminada. Las ecuaciones de voltaje de bus, se expresan en función de los voltajes de buses vecinos a cada bus y su potencia inyectada; [9], [10], [11].

Para un sistema de n barras se tiene, según la ecuación (2.2):

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i$$

Dónde:

$$I_i = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n \quad (4.1)$$

Entonces:

$$Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{ii}V_i + \dots + Y_{in}V_n = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (4.2)$$

Ahora, despejando V_i :

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - (Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{i,i-1}V_{i-1} + Y_{i,i+1}V_{i+1} \dots + Y_{in}V_n) \right] \quad (4.3)$$

Para: $i = 2..n$

Generalizando:

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \right] \quad (13) \quad i = 2, \dots, n \quad k \neq i \quad k \in i$$

Iterativamente, esta ecuación se puede expresar del siguiente modo:

$$V_i^{(l+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V^l)^*} - \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} V_k^{l+1} - \sum_{k=i+1}^n Y_{ik} V_k^{(l)} \right] \quad (4.4)$$

Cuando: $i = 2, \dots, n \quad k \neq i \quad k \in i$

Para las barras tipo PV:

$$Q_i^{(l+1)} = -\text{Imag} \left\{ \left(V_i^{(l)} \right)^* \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} V_k^{(l+1)} + \left(V_i^{(l)} \right)^* \sum_{k=i}^n Y_{ik} V_k^{(l)} \right\} \quad (4.5)$$

Con este valor se obtiene el valor de $V_i^{(l+1)}$.

Para iniciar el proceso iterativo, se supone un valor inicial de los voltajes de 1.0 por unidad y un ángulo de cero grados.

El proceso iterativo continúa hasta que:

$$\left| \Delta V_i^{(l+1)} \right| = \left| V_i^{(l+1)} - V_i^{(l)} \right| < \varepsilon \quad (16) \quad i = 2, 3, \dots, n$$

Las restricciones a tomarse en cuenta son:

$$|V_i|_{\min} \leq |V_i| \leq |V_i|_{\max} \quad \text{Siendo: } V_i = \pm(5 - 10)\%$$

$$|\delta_i - \delta_k| \leq \left| |\delta_i - \delta_k| \right|_{\max}$$

$$Q_{Gi, \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi, \max}$$

$$\text{Si: } Q_i^{(l+1)} < Q_{i, \min}$$

$$\Rightarrow Q_i^{(l+1)} = Q_{i, \min} ; \text{ y la barra es considerada como PQ.}$$

4.2 Método de Newton Rapson

Este es un método confiable, con menos iteraciones que el método Gauss Seidel, pero de menor velocidad y mayor demanda de memoria computacional. Se basa en la expansión en series de Taylor para una función de dos o más variables para resolver el problema de flujos de potencia [22], [23], [25].

La formulación del Método de Newton-Raphson es directa porque en esencia el cálculo de los voltajes nodales de la red, se realiza, tomando en cuenta inyecciones de potencias en cada nodo de la red. Dichas inyecciones constituyen las variables, mientras que las funciones evaluadas en los valores de las incógnitas obtenidas en la i-ésima iteración son las expresiones de las potencias.

Para un sistema de ecuaciones no lineales de la forma:

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) = y_1$$

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) = y_2$$

⋮

$$f_n(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) = y_n$$

El sistema de ecuaciones para la solución por el método Newton Rapson, basada en la serie de Taylor, tiene la siguiente forma matricial:

$$\begin{bmatrix} y_1 - f_1(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) \\ y_2 - f_2(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) \\ \vdots \\ y_i - f_i(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) \\ \vdots \\ y_n - f_n(x_1, x_2, \dots, x_i \dots x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_i}{\partial x_1} & \frac{\partial f_i}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_i}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_i} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \Delta x_2 \\ \vdots \\ \Delta x_i \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

El sistema de ecuaciones no lineales que definen las potencias de un sistema eléctrico son las siguientes:

$$P_i = |V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.7)$$

$$Q_i = -|V_i| \sum_{k=1}^n |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.8)$$

Expresando la ecuación matricial de Newton Rapson, en términos de las variables del flujo de potencia, y considerando que la barra 1 (uno) es de tipo SLACK se configura el siguiente sistema de ecuaciones matriciales:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \vdots \\ \nabla P_n \\ \nabla Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \vdots \\ \nabla Q_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{array} \right) & \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial P_3}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_n}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_3} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{array} \right) & \left(\begin{array}{ccc} \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_3|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{array} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

De manera resumida y de forma iterativa, el sistema de ecuaciones anterior se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(l)} \\ \Delta Q^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(l)} & J_2^{(l)} \\ J_3^{(l)} & J_4^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Dónde:

(l) : *l-ésima iteración*

$\begin{bmatrix} J_1^{(l)} & J_2^{(l)} \\ J_3^{(l)} & J_4^{(l)} \end{bmatrix}$: *Matriz Jacobiana*

$\begin{bmatrix} \Delta P^{(l)} \\ \Delta Q^{(l)} \end{bmatrix}$: Matriz de los desajustes de potencias

$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix}$: Matriz corrector de tensiones

Siendo:

$$\Delta P_i^{(l)} = P_i^{espec} - P_i^{(l)} \qquad \Delta Q_i^{(l)} = Q_i^{espec} - Q_i^{(l)}$$

El cálculo iterativo se inicia con:

$$\bar{V}_{inicial} = \bar{V}_{slack} \Rightarrow |V_{inicial}| = 1.0; \quad \delta_i = 0$$

Por el método de la triangularización de la matriz Jacobiana, se resuelve el sistema de ecuaciones para el vector corrector de tensiones:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix}$$

Los nuevos valores de la magnitud de voltaje y el ángulo, son calculados por medio de las ecuaciones:

$$\delta_i^{(l+1)} = \delta_i^{(l)} + \Delta \delta_i^{(l)} \quad (4.9)$$

$$|V_i^{(l+1)}| = |V_i^{(l)}| + \Delta |V_i^{(l)}| \quad (4.10)$$

El proceso iterativo es desarrollado hasta que los desajustes de $\Delta P_i^{(l)}$ y $\Delta Q_i^{(l)}$ cumplan con el criterio de convergencia ε especificado:

$$|\Delta P_i^{(l)}| \leq \varepsilon \quad ; \quad |\Delta Q_i^{(l)}| \leq \varepsilon \quad (4.11)$$

Lograda la convergencia, se procede al cálculo del flujo de potencia y las pérdidas, en las respectivas líneas del sistema.

4.3 Método desacoplado normal

Para sistemas de transmisión de un número considerable de nodos, este método resulta ser una alternativa para mejorar la eficiencia computacional y reducir los requerimientos de memoria. [22], [23], [25].

El método desacoplado, está basada en el de Newton Rapson, tomando en cuenta las siguientes consideraciones, en las líneas de transmisión:

Un cambio en el Angulo de voltaje en una barra, afecta principalmente al flujo de potencia real P, y muy poco a la potencia reactiva Q, lo que significa que:

$$\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \gg \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}$$

Un cambio en el módulo del voltaje V en una barra afecta principalmente al flujo de potencia reactiva Q en las líneas y muy poco a la potencia activa P. Por lo que:

$$\frac{\partial V_n}{\partial |V_n|} \gg \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}$$

Tomando en cuenta, las consideraciones antes señaladas, tenemos:

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(l)} \\ \Delta Q^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(l)} & 0 \\ 0 & J_4^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O bien:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$\begin{bmatrix} V_2 \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & V_n \frac{\partial Q_2}{\partial V_n} \\ V_2 \frac{\partial Q_n}{\partial V_2} & \dots & V_n \frac{\partial Q_n}{\partial V_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\Delta V_2}{V_2} \\ \vdots \\ \frac{\Delta V_n}{V_n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

De esta forma, quedan dos sistemas de ecuaciones desacopladas que pueden resolverse de forma independiente. Las correcciones del ángulo del voltaje $\Delta\delta$ se calculan usando solo los errores de la potencia real ΔP , y las correcciones de la magnitud del voltaje se calculan usando solo los errores de ΔQ .

4.4 Método desacoplado rápido

En las matrices Jacobianas, se pueden realizar algunas otras simplificaciones, dando lugar al Método “DESACOPLADO RAPIDO”. Las simplificaciones son las siguientes: [22], [23], [25].

- Los cosenos de los desfases se pueden aproximar a la unidad, debido a que las diferencias angulares de las tensiones nodales de nudos interconectados suelen ser valores muy pequeños.
- Los senos de los desfases, por la misma razón, son muy pequeños y pueden despreciarse.
- No se consideran las reactancias en derivación ni transformadores con tomas distintas de la nominal en el problema activo.
- Se desprecian las resistencias en serie, ya que en las redes de transporte el valor de las reactancias de las líneas es mucho mayor que el de las resistencias, también en el problema activo.

Tomando en cuenta las simplificaciones señaladas anteriormente, y haciendo los arreglos necesarios, se obtienen las siguientes ecuaciones finales:

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & \dots & -B_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ -B_{n2} & \dots & -B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_2}{|V_2|} \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_n}{|V_n|} \end{bmatrix}; \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} -B_{22} & \dots & -B_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ -B_{n2} & \dots & -B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta|V_2| \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta|V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_2}{|V_2|} \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{\Delta Q_n}{|V_n|} \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

La matriz B generalmente es simétrica con elementos constantes y diferentes de cero y además reales, e iguales al negativo de las susceptancias de Y_{bus} . Su cálculo y triangularización se realiza una sola vez durante el proceso iterativo, con lo que se obtienen cálculos mucho más rápidas. En las barras de voltaje controlado, la potencia reactiva Q no se especifica y ΔV es cero; las filas y columnas que corresponden a estas barras no son llevadas en cuenta en la segunda ecuación final planteada.

CAPITULO V

SEGMENTACION DE ECUACIONES MATRICIALES EN UN SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA

5.1 Numeración ordenada de barras en modo segmentado.

El método de la SEGMENTACION ORDENADA para el cálculo del flujo de potencia, requiere que la numeración de las barras del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) sea de **Modo Segmentado**, lo que permite que la solución de las ecuaciones se realice utilizando la sub división o *segmentación matricial*. La numeración segmentada, se inicia con la barra Slack como 1, luego se numeran de manera secuencial todas las barras tipo PQ, y luego todas las barras tipo PV. Entonces:

- a). Barra slack: 1
- b). Barras PQ: 2, 3, m
- c). Barras PV: $m+1$, $m+2$, n

Donde m es el número de barras tipo PQ y n es el número total de barras del Sistema eléctrico de potencia.

El diagrama unifilar mostrado en la Fig. 5.1, pág. 49, pertenece al sistema de 14 barras del modelo de la IEEE [27], donde las barras están numeradas de manera indistinta o NO SEGMENTADO (color celeste), siendo así:

- a). Barra slack: 1
- b). Barras PQ: 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14
- c). Barras PV: 2, 3, 6, 8

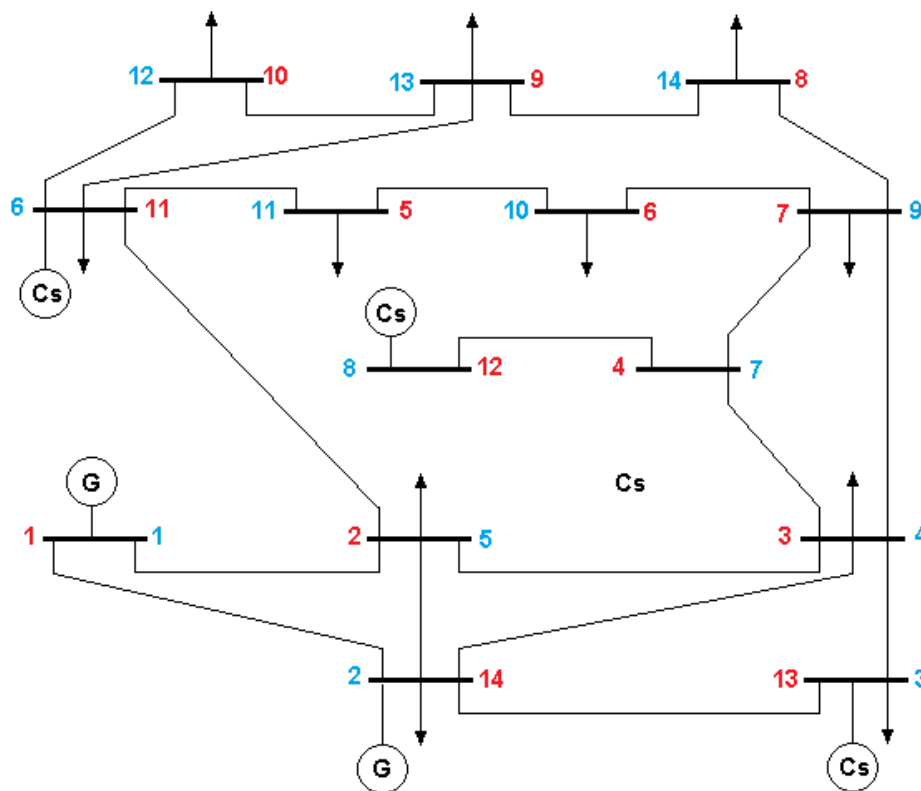
Aquí se puede observar que las barras PQ y PV, no están numeradas de manera secuencial, por lo que se replantea esta

numeración en MODO SEGMENTADO (color rojo) de la siguiente forma:

- a) Barra Slack: 1
- b) Barra PQ: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- c) Barra PV: 11, 12, 13, 14

Figura 5.1

NUMERACIÓN EN ORDEN SEGMENTADO DE LAS BARRAS DEL SEP DE LA IEEE EN COLOR ROJO.



5.2 Ecuaciones matriciales para N barras con segmentación ordenada.

El sistema de ecuaciones para las corrientes de un sistema eléctrico de potencia (SEP) de N nodos, son planteadas a partir de la barra 2, puesto que la tensión en la barra 1 o slack, ya es conocida:

$$S_2^*/V_2^* = -V_1Y_{21} + V_2Y_{22} - V_3Y_{23} \dots - V_mY_{2m} - V_{m+1}Y_{2(m+1)} \dots - V_nY_{2n}$$

$$S_3^*/V_3^* = -V_1Y_{31} - V_2Y_{32} + V_3Y_{33} \dots - V_mY_{3m} - V_{m+1}Y_{3(m+1)} \dots - V_nY_{3n}$$

$$S_m^*/V_m^* = -V_1Y_{m1} - V_2Y_{m2} + V_3Y_{m3} \dots - V_mY_{mm} - V_{m+1}Y_{m(m+1)} \dots - V_nY_{mn}$$

$$S_{m+1}^*/V_{m+1}^* = -V_1Y_{(m+1)1} - V_2Y_{(m+1)2} + V_3Y_{(m+1)3} \dots - V_{m+1}Y_{(m+1)m} \\ + V_{m+1}Y_{m+1(m+1)} \dots - V_nY_{(m+1)n}$$

$$S_n^*/V_n^* = -V_1Y_{n1} - V_2Y_{n2} + V_3Y_{n3} \dots + V_mY_{nm} - V_{m+1}Y_{n(m+1)} \dots - V_nY_{nn}$$

Dónde, por segmentación ordenada:

a) Barras PQ: 2, 3, ..., m

b) Barras PV: m+1, m+2, ..., n

Reordenando el sistema de ecuaciones para las corrientes, se tiene:

$$\begin{aligned} V_2Y_{22} - V_3Y_{23} \dots - V_mY_{2m} - V_{m+1}Y_{2(m+1)} \dots - V_nY_{2n} &= S_2^*/V_2^* + V_1Y_{21} \\ -V_2Y_{32} + V_3Y_{33} \dots - V_mY_{3m} - V_{m+1}Y_{3(m+1)} \dots - V_nY_{3n} &= S_3^*/V_3^* + V_1Y_{31} \\ -V_2Y_{m2} + V_3Y_{m3} \dots - V_mY_{mm} - V_{m+1}Y_{m(m+1)} \dots - V_nY_{mn} &= S_m^*/V_m^* + V_1Y_{m1} \\ -V_2Y_{(m+1)2} + V_3Y_{(m+1)3} \dots - V_{m+1}Y_{(m+1)m} + V_{m+1}Y_{m+1(m+1)} \dots - V_nY_{(m+1)n} &= S_{m+1}^*/V_{m+1}^* + V_1Y_{(m+1)1} \\ -V_2Y_{n2} - V_3Y_{n3} \dots - V_mY_{nm} - V_{m+1}Y_{n(m+1)} \dots + V_nY_{nn} &= S_n^*/V_n^* + V_1Y_{n1} \end{aligned} \quad (5.1)$$

Expresando en forma matricial, el sistema de ecuaciones para las corrientes, tenemos:

$$\begin{bmatrix}
Y_{22} & -Y_{23} & \cdots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \cdots & -Y_{2n} \\
-Y_{32} & Y_{33} & \cdots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \cdots & -Y_{3n} \\
& & & \vdots & & & \\
& -Y_{m2} & -Y_{m3} & \cdots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \cdots & -Y_{mn} \\
-Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \cdots & Y_{(m+1)m} & -Y_{(m+1)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)n} \\
& & & \vdots & & & \\
& -Y_{n2} & -Y_{n3} & \cdots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \cdots & Y_{nn}
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix}
V_2 \\
V_3 \\
\vdots \\
V_m \\
V_{m+1} \\
\vdots \\
V_n
\end{bmatrix} =
\begin{bmatrix}
S_2^*/V_2^* \\
S_3^*/V_3^* \\
\vdots \\
S_m^*/V_m^* \\
S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\
\vdots \\
S_n^*/V_n^*
\end{bmatrix}
+ V_1
\begin{bmatrix}
Y_{21} \\
Y_{31} \\
\vdots \\
Y_{m1} \\
Y_{(m+1)1} \\
\vdots \\
Y_{n1}
\end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Asignando variables simbólicas a cada uno de los términos de la ecuación matricial:

$$[Y_{bs}] * [V] = [S^*/V^*] + [V_1 Y_1] \quad (5.3)$$

Despejando la variable \mathbf{V} de la ecuación (5.3), obtenemos las tensiones en todas las barras del SEP:

$$[\mathbf{V}] = [\mathbf{Y}_{bs}]^{-1} \cdot [\mathbf{S}^*/\mathbf{V}^* + \mathbf{V}_1 \cdot \mathbf{Y}_1] \quad (5.4)$$

Dónde:

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}; \text{ Matriz de tensiones en las barras del SEP}; \quad (5.5)$$

$$\mathbf{S}^*/\mathbf{V}^* = \begin{bmatrix} S_2^*/V_2^* \\ S_3^*/V_3^* \\ \vdots \\ S_m^*/V_m^* \\ S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\ \vdots \\ S_n^*/V_n^* \end{bmatrix}; \text{ Matriz de corrientes en barras del SEP}; \quad (5.6)$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}; \text{ Matriz de tensiones en las barras del SEP}; \quad (5.7)$$

$$\mathbf{S^*/V^*} = \begin{bmatrix} S_2^*/V_2^* \\ S_3^*/V_3^* \\ \vdots \\ S_m^*/V_m^* \\ S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\ \vdots \\ S_n^*/V_n^* \end{bmatrix}; \text{ Matriz de corrientes en barras del SEP}; \quad (5.8)$$

$$\mathbf{V_1 Y_1} = V_1 \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \\ \vdots \\ Y_{m1} \\ Y_{(m+1)1} \\ \vdots \\ Y_{n1} \end{bmatrix}; \text{ Matriz de corrientes inyectadas en la barra Slack}; \quad (5.9)$$

Matriz Ybus:

$$\mathbf{Y_{bs}} = \begin{bmatrix} Y_{22} & -Y_{23} & \cdots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \cdots & -Y_{2n} \\ -Y_{32} & Y_{33} & \cdots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \cdots & -Y_{3n} \\ & & & \vdots & & & \\ -Y_{m2} & -Y_{m3} & \cdots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \cdots & -Y_{mn} \\ -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \cdots & Y_{(m+1)m} & -Y_{(m+1)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)n} \\ & & & \vdots & & & \\ -Y_{n2} & -Y_{n3} & \cdots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

NOTA: Esta matriz tiene una dimensión de $k \times k$; siendo $k = n-1$

5.3 Segmentación de ecuaciones matriciales en un sistema eléctrico de potencia de N barras.

La numeración de las barras del SEP en MODO SEGMENTADO, permite plantear las ecuaciones, en forma MATRICIAL Y SEGMENTADA para el grupo de barras tipo PQ, como para el grupo de barras tipo PV, admitiendo que la solución de las ecuaciones no lineales sean planteadas mediante la partición o SEGMENTACION DE LAS ECUACIONES MATRICIALES.

Tomando en cuenta la ecuación (5.3) de corrientes, con variables simbólicas:

$$[Y_{bs}] * [V] = [S^*/V^*] + [V_1 Y_1]$$

Esta ecuación de manera desarrollada viene dado por la ecuación (5.2), la misma que se utiliza para sub dividir y obtener las ECUACIONES MATRICIALES SEGMENTADAS correspondientes a la barras PQ y PV, que son el fundamento para el cálculo de las tensiones y flujo de potencia del sistema eléctrico mediante el método de la SEGMENTACION ORDENADA.

$$\begin{bmatrix}
 Y_{22} & -Y_{23} & \cdots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \cdots & -Y_{2n} \\
 -Y_{32} & Y_{33} & \cdots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \cdots & -Y_{3n} \\
 & & & \vdots & & & \\
 -Y_{m2} & -Y_{m3} & \cdots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \cdots & -Y_{mn} \\
 \hline
 -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \cdots & Y_{(m+1)m} & -Y_{(m+1)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)n} \\
 & & & \vdots & & & \\
 -Y_{n2} & -Y_{n3} & \cdots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \cdots & Y_{nn}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 V_2 \\
 V_3 \\
 \vdots \\
 V_m \\
 \hline
 V_{m+1} \\
 \vdots \\
 V_n
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 S_2^*/V_2^* \\
 S_3^*/V_3^* \\
 \vdots \\
 S_m^*/V_m^* \\
 \hline
 S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\
 \vdots \\
 S_n^*/V_n^*
 \end{bmatrix}
 + V_1
 \begin{bmatrix}
 Y_{21} \\
 Y_{31} \\
 \vdots \\
 Y_{m1} \\
 \hline
 Y_{(m+1)1} \\
 \vdots \\
 Y_{n1}
 \end{bmatrix}
 \quad (5.11)$$

5.3.1 Segmentación de la matriz de admitancias Y1 concurrentes en la barra 1

En la ecuación (5.2), la matriz de admitancias concurrentes $[Y_1]$ en la barra 1 (slack); se descompone en dos matrices SEGMENTADAS, correspondientes a las barras PQ y PV:

En la ecuación (5.10), segmentando la matriz Y1, tanto para las barras PQ, como para las barras PV, se tiene:

$$[Y_1] = \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \\ \vdots \\ Y_{m1} \\ \hline Y_{(m+1)1} \\ \vdots \\ Y_{n1} \end{bmatrix} \longrightarrow Y_{Q1} = \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \\ \vdots \\ Y_{m1} \end{bmatrix} \quad Y_{V1} = \begin{bmatrix} Y_{(m+1)1} \\ \vdots \\ Y_{n1} \end{bmatrix}$$

Siendo: $[V_1 Y_1] = V_1 \begin{bmatrix} Y_{Q1} \\ Y_{V1} \end{bmatrix}$ (5.12)

Dónde:

Y_{Q1} : Admitancias concurrentes en la barra 1 en barras tipo PQ.

Y_{V1} : Admitancias concurrentes en la barra 1 en barras tipo PV.

5.3.2 Segmentación de la matriz de corrientes, S^*/V^*

En la ecuación (5.10), segmentando la matriz S^*/V^* , para las barras PQ y PV:

$$S^*/V^* = \begin{bmatrix} S_2^*/V_2^* \\ S_3^*/V_3^* \\ \vdots \\ S_m^*/V_m^* \\ \hline S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\ \vdots \\ S_n^*/V_n^* \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{matrix} \text{Para barras PQ:} & (S_Q/V_Q)^* = \begin{bmatrix} S_2^*/V_2^* \\ S_3^*/V_3^* \\ \vdots \\ S_m^*/V_m^* \end{bmatrix} \\ \text{Para barras PV:} & (S_V/V_V)^* = \begin{bmatrix} S_{m+1}^*/V_{m+1}^* \\ \vdots \\ S_n^*/V_n^* \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Siendo: $S^*/V^* = \begin{bmatrix} (S_Q/V_Q)^* \\ (S_V/V_V)^* \end{bmatrix}$ (5.13)

5.3.3 Segmentación de la matriz de tensiones

La matriz de tensiones $[V]$ de la ecuación (5.2); se descompone en dos matrices de tensiones SEGMENTADAS, correspondientes a las tensiones de las barras PQ y PV:

Entonces:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{m+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad \text{Para barras PQ:} \quad \mathbf{V}_Q = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix} \quad \text{Para barras PV} \quad \mathbf{V}_V = \begin{bmatrix} V_{m+1} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

Siendo: $[V] = \begin{bmatrix} V_Q \\ V_V \end{bmatrix} \quad (5.14)$

Dónde:

V_Q : Matriz de tensiones segmentadas correspondiente a las barras tipo PQ.

V_V : Matriz de tensiones segmentadas correspondiente a las barras tipo PV.

5.3.4 Segmentación de la matriz de admitancias, Y_{bus}

Segmentando la ecuación (5.10), se tiene:

$$[Y_{bus}] = \begin{bmatrix} Y_{22} & -Y_{23} & \cdots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \cdots & -Y_{2n} \\ -Y_{32} & Y_{33} & \cdots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \cdots & -Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{m2} & -Y_{m3} & \cdots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \cdots & -Y_{mn} \\ \hline -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \cdots & Y_{(m+1)m} & -Y_{(m+1)(m+1)} & \cdots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n2} & -Y_{n3} & \cdots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

Asignando variables segmentadas, para barras PQ:

$$Y_{QQ} = \begin{bmatrix} Y_{22} - Y_{23} \dots - Y_{2m} \\ -Y_{32} + Y_{33} \dots - Y_{3m} \\ \dots \\ -Y_{m2} - Y_{m3} \dots + Y_{mm} \end{bmatrix} \quad Y_{QV} = \begin{bmatrix} Y_{2(m+1)} \dots Y_{2n} \\ Y_{3(m+1)} \dots Y_{3n} \\ \dots \\ Y_{m(m+1)} \dots Y_{mn} \end{bmatrix}$$

Asignando variables segmentadas, para barras PV:

$$Y_{VV} = \begin{bmatrix} Y_{(m+1)(m+1)} & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -Y_{n(m+1)} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad Y_{VQ} = \begin{bmatrix} Y_{(m+1)2} & Y_{(m+1)3} & \dots & Y_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nm} \end{bmatrix}$$

Por consiguiente la matriz Ybus, segmentada será:

$$[Y_{bs}] = \begin{bmatrix} Y_{QQ} & -Y_{QV} \\ -Y_{VQ} & Y_{VV} \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

5.3.5 Determinación de las ecuaciones segmentadas para las barras tipos PQ y PV.

Reemplazando las ecuaciones (5.12), (5.113), (5.14) y (5.15), en la ecuación (5.3), obtenemos el sistema de ecuaciones matriciales en MODO SEGMENTADO:

$$\begin{bmatrix} Y_{QQ} & -Y_{QV} \\ -Y_{VQ} & Y_{VV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_Q \\ V_V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_Q/V_Q)^* \\ (S_V/V_V)^* \end{bmatrix} + V_1 \begin{bmatrix} Y_{Q1} \\ Y_{V1} \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Desarrollando la ecuación (5.16), obtenemos las ecuaciones segmentadas, para las barras PQ y PV:

Para barras PQ:

$$Y_{QQ} * V_Q - Y_{QV} * V_V = (S_Q/V_Q)^* + V_1 * Y_{Q1} \quad (5.17)$$

Para barras PV:

$$-Y_{VQ}V_Q + Y_{VV} * V_V = (S_V/V_V)^* + V_1 * Y_{V1} \quad (5.18)$$

5.3.6 Ecuaciones segmentadas para las potencias en barras PV.

En la ecuación (5.18), reordenamos y multiplicamos por la conjugada de V_V :

$$S_V^* + V_V^*(V_1 * Y_{V1}) = V_V^*(Y_{VV} * V_V - Y_{VQ} * V_Q)$$

Desarrollando el segundo miembro de la ecuación:

$$\begin{aligned} V_V^*(Y_{VV} * V_V - Y_{VQ} * V_Q) &= V_V^*(Y_{VV} * V_V) - V_V^*(Y_{VQ} * V_Q) \\ &= |V_V|^2 Y_{iiV} + V_V^*(-Y_{bVV} * V_V) - V_V^*(Y_{VQ} * V_Q) \\ &= |V_V|^2 Y_{iiV} - V_V^*(Y_{bVV} * V_V + Y_{VQ} * V_Q) \end{aligned}$$

Siendo: $Y_{bVV} = Y_{VV} - Y_{iiV}$

Y_{bVV} : Admitancia residuo de Y_{VV}

Y_{iiV} : Diagonal de la admitancia segmentada Y_{VV}

$|V_V|$: Módulo de las tensiones en barras tipo PV

Por consiguiente:

$$S_V^* + V_V^*(V_1 * Y_{V1}) = |V_V|^2 Y_{iiV} - V_V^*(Y_{bVV} * V_V + Y_{VQ} * V_Q)$$

Despejando S_V :

$$S_V = |V_V|^2 Y_{iiV}^* - V_V(Y_{bVV} * V_V + Y_{VQ} * V_Q + V_1 * Y_{V1})^* \quad (5.19)$$

En la ecuación (5.19), hacemos:

$$SA_V = |V_V|^2 Y_{iiV}^* \quad B_V = (Y_{bVV} * V_V + Y_{VQ} * V_Q + V_1 * Y_{V1})^* \quad (5.20)$$

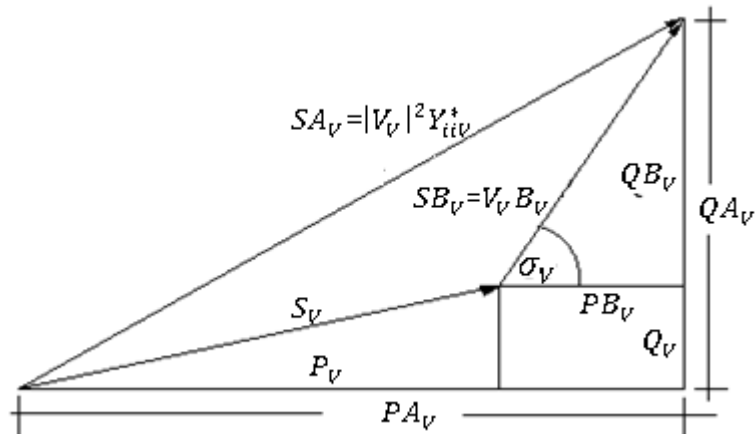
$$SB_V = V_V * B_V$$

Por consiguiente: $S_V = SA_V - SB_V \quad (5.21)$

Graficando la ecuación (5.21):

Figura N° 5.2

DIAGRAMA DE POTENCIAS SEGMENTADAS EN BARRAS PV



i) **Potencias activas segmentadas**

Matricialmente:

$$[P_V] = [P_{GV}] - [P_{CV}] \quad (5.22)$$

P_V : Son las potencias activas netas en barras tipo PV

P_{GV} : Potencias activas de generación que ingresan a las barras PV

P_{CV} : Potencias activas de las cargas que salen de las barras PV

En la Fig. 5.2: $P_{BV} = \text{real}(|V_V|^2 Y_{iiV}^*) - P_V$

Entonces: $P_{BV} = P_{AV} - P_V \quad (5.23)$

También: $P_{BV} = |V_V| |B_V| \cos \sigma_V$

De donde: $\cos \sigma_V = (P_{AV} - P_V) / |V_V| |B_V| \quad (5.24)$

Siendo: $\sigma_V = \delta_V + \beta_V \quad (5.25)$

Dónde: δ_V ángulo de V_V y β_V : ángulo de B_V

ii) Potencia reactiva Q_V

Según la Fig. 5.2: $Q_V = QA_V - QB_V$

Siendo: $QA_V = \text{imag}(|V_V|^2 Y_{iiV}^*)$ y $QB_V = |V_V||B_V| \text{sen } \sigma_V$

Entonces: $Q_V = QA_V - |V_V||B_V| \text{sen } \sigma_V$ (5.26)

5.3.7 Matriz de tensiones segmentadas en barras tipo PV.

De la ecuación (5.25): $\sigma_V = \delta_V + \beta_V$

De donde: $\delta_V = \sigma_V - \beta_V$ (5.27)

Por consiguiente: $V_V = |V_V|(\cos \delta_V + j \text{sen } \delta_V)$ (5.28)

CAPITULO VI

CÁLCULO ITERATIVO DE TENSIONES Y FLUJO DE POTENCIA POR EL METODO DE SEGMENTACION ORDENADA.

6.1 Proceso del cálculo.

El cálculo iterativo de las tensiones en barras de un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) y el Flujo de carga correspondiente, aplicando el METODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA, comprende el siguiente orden procedimental:

- i)* Asignación numérica de barras, en orden secuencial de acuerdo al tipo de barra
- ii)* Segmentación de las matrices de admitancias y tensiones
- iii)* Calculo de las tensiones segmentadas tipo PQ
- iv)* Cálculo de las tensiones segmentadas tipo PV
- v)* Cálculo de las potencias en barras tipo PV
- vi)* Integración de las tensiones y potencias segmentadas
- vii)* Reajuste de las tensiones integradas
- viii)* Cálculo del error tolerable
- ix)* Calculo de las potencias nodales
- x)* Cálculo del flujo de potencia

6.2 Asignación numérica de barras en modo ordenado y segmentado.

De acuerdo al ítem 5.1 del capítulo anterior, se realiza la asignación numérica de las barras del SEP segmentado en función del tipo de barras, en forma secuencial y en el siguiente orden:

- a).** Barra de compensación o slack : 1
- b).** Barras de carga o tipo PQ : 2, 3, 4, ... m
- c).** Barras de voltaje controlado o tipo PV : $m + 1, m + 2, \dots n$

6.3 Segmentación de las matrices de admitancias y tensiones

Se construye la matriz de admitancias a partir del nodo 2 hasta el último nodo n :

$$Y_{bs} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & -Y_{23} & \dots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \dots & -Y_{2n} \\ -Y_{32} & +Y_{33} & \dots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \dots & -Y_{3(m+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{m2} & -Y_{m3} & \dots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \dots & -Y_{mn} \\ -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \dots & Y_{(m+1)m} & Y_{(m+1)(m+1)} & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n2} & -Y_{n3} & \dots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \dots & +Y_{nn} \end{bmatrix}$$

a) Segmentación de la matriz de admitancias

La matriz de admitancias Y_{bs} , es segmentada o subdividida en 4 partes:

$$Y_{bs} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & -Y_{23} & \dots & -Y_{2m} & -Y_{2(m+1)} & \dots & -Y_{2n} \\ -Y_{32} & +Y_{33} & \dots & -Y_{3m} & -Y_{3(m+1)} & \dots & -Y_{3(m+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{m2} & -Y_{m3} & \dots & Y_{mm} & -Y_{m(m+1)} & \dots & -Y_{mn} \\ -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \dots & Y_{(m+1)m} & Y_{(m+1)(m+1)} & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n2} & -Y_{n3} & \dots & -Y_{nm} & -Y_{n(m+1)} & \dots & +Y_{nn} \end{bmatrix}$$

La segmentación de Y_{bs} da lugar a las siguientes sub-matrices:

$$Y_{QQ} = \begin{bmatrix} Y_{22} & -Y_{23} & \dots & -Y_{2m} \\ -Y_{32} & Y_{33} & \dots & -Y_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{m2} & -Y_{m3} & \dots & Y_{mm} \end{bmatrix}; \quad Y_{QV} = \begin{bmatrix} -Y_{2(m+1)} & \dots & -Y_{2n} \\ -Y_{3(m+1)} & \dots & -Y_{3(m+1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{m(m+1)} & \dots & -Y_{mn} \end{bmatrix}$$

$$Y_{VQ} = \begin{bmatrix} -Y_{(m+1)2} & -Y_{(m+1)3} & \dots & -Y_{(m+1)m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n2} & -Y_{n3} & \dots & -Y_{nm} \end{bmatrix};$$

$$Y_{VV} = \begin{bmatrix} Y_{(m+1)(m+1)} & \dots & -Y_{(m+1)n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -Y_{n(m+1)} & \dots & +Y_{nn} \end{bmatrix}$$

b) Segmentación de la matriz de tensiones

La matriz completa de tensiones es segmentada en 3 partes:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_m \\ V_{(m+1)} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \longrightarrow V_1; \quad V_Q = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ \vdots \\ V_m \end{bmatrix}; \quad V_V = \begin{bmatrix} V_{(m+1)} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

6.4 Calculo iterativo de las tensiones segmentadas V_Q en barras PQ.

Las tensiones V_Q segmentadas, que corresponden a las barras PQ, se calculan de manera iterativa a partir de la ecuación (5.17):

$$Y_{QQ} * V_Q - Y_{QV} * V_V = (S_Q/V_Q)^* + V_1 * Y_{Q1}$$

Despejando V_Q , y expresando de modo iterativo:

$$V_Q^{(i+1)} = (Y_{QQ})^{-1} * (S_Q^*/V_Q^{*(i)} + V_1 * Y_{Q1} + Y_{QV} * V_V^{(i)}) \quad (6.1)$$

6.5 Calculo iterativo de las tensiones segmentadas (V_V) en barras PV.

En la Fig. 5.2, pág. 58, y la ecuación (5.24), se tiene:

$$\cos(\sigma_V) = \frac{PA_V - P_V}{|V_V| * |B_V|}$$

Luego:

$$\sigma_V = \text{acos} \left(\frac{PA_V - P_V}{|V_V| * |B_V|} \right)$$

Iterativamente:

$$\sigma_V^{(i+1)} = \text{acos} \left(\frac{PA_V - P_V}{|V_V| * |B_V|^{(i+1)}} \right) \quad (6.2)$$

Según la ecuación (5.20):

$$B_V = (Y_{bVV} * V_V + Y_{VQ} * V_Q + V_1 * Y_{V1})^*$$

Entonces en la ecuación (6.2):

$$|B_V|^{(i+1)} = \left| (Y_{VQ} * V_Q^{(i+1)} + Y_{bVV} * V_V^{(i)} + V_1 * Y_{V1}) \right| \quad (6.3)$$

El ángulo de B_V iterativamente, será: $\beta_V^{(i+1)} = \text{ang}(B_V^{(i+1)})$

Según la ecuación (5.27): $\delta_V^{(i+1)} = \sigma_V^{(i+1)} - \beta_V^{(i+1)} \quad (6.4)$

Por tanto:

$$V_V^{(i+1)} = |V_V| * [\cos(\delta_V) + j\text{sen}(\delta_V)]^{(i+1)} \quad (6.5)$$

6.6 Cálculo iterativo de las potencias segmentadas en barras PV

De la Fig. 5.2, pág. 58 y la ecuación (5.26), se tienen:

$$Q_V = QA_V - |V_V| |B_V| \text{sen } \sigma_V$$

Iterativamente: $Q_V^{(i+1)} = QA_V - |V_V| |B_V|^{(i+1)} \text{sen } \sigma_V^{(i+1)} \quad (6.6)$

Dónde: $QA_V = \text{imag}(|V_V|^2 Y_{iiV}^*)$

Por tanto:

$$S_V^{(i+1)} = P_V + jQ_V^{(i+1)} \quad (6.7)$$

6.7 Integración de las tensiones y potencias segmentadas

Una vez determinadas las tensiones segmentadas $V_Q^{(i+1)}$ y $V_V^{(i+1)}$, así como la potencia $S_V^{(i+1)}$, integramos ambas variables para la iteración correspondiente:

$$V^{(i+1)} = \begin{bmatrix} V_Q^{(i+1)} \\ V_V^{(i+1)} \end{bmatrix} \quad (6.8) \quad S^{(i+1)} = \begin{bmatrix} S_Q \\ S_V^{(i+1)} \end{bmatrix} \quad (6.9)$$

Dónde:

V : Matriz integrada de las tensiones.

S : Matriz de la potencia integrada

S_Q : Sub-matriz segmentada de las potencias en barras PQ

S_V : Sub-matriz segmentada de las potencias en las barras PV

6.8 Reajuste iterativo de las tensiones integradas.

a) Reajuste de las tensiones integradas

Teniendo en cuenta la ecuación (5.4):

$$[V^{(i+1)}] = [Y_{bs}]^{-1} \cdot [S^{*(i+1)} / V^{*(i+1)} + V_1 * Y_1] \quad (6.10)$$

Donde $V^{(i+1)}$ y $S^{(i+1)}$ del 2do miembro, son determinadas por las ecuaciones (6.8) y (6.9) respectivamente.

b) Reajuste de las tensiones segmentadas V_V :

Reajustada la tensión integrada, esta se vuelve a segmentar $V^{(i+1)}$, y luego determinar el ángulo de la tensión V_V :

$$V^{(i+1)} = \begin{bmatrix} V_Q^{(i+1)} \\ V_V^{(i+1)} \end{bmatrix} \quad \Rightarrow \quad \delta_{Vr}^{(i+1)} = \text{angle}(V_V^{(i+1)}) \quad (6.11)$$

Luego, la tensión reajustada de $V_{Vr}^{(i+1)}$ será:

$$V_{Vr}^{(i+1)} = |V_V| * \left[(\cos(\delta_{Vr}^{(i+1)})) + j \text{sen}(\delta_{Vr}^{(i+1)}) \right] \quad (6.12)$$

Finalmente:
$$V^{(i+1)} = \begin{bmatrix} V_Q^{(i+1)} \\ V_{Vr}^{(i+1)} \end{bmatrix}$$

6.9 Determinación de la diferencial y finalización de la iteración.

El cálculo iterativo, se realiza hasta que:

$$\Delta V = |V^{(i+1)}| - |V^{(i)}| \leq 1 * 10^{-4} \quad (6.13)$$

6.10 Cálculo de la potencia nodales

A la matriz de las tensiones solución (última iteración), se integra la tensión de la barra slack V_1 , obteniéndose la tensión fina V_f .

Teniendo en cuenta que: $S = V_f * \text{conj}(I)$

Entonces:
$$S_f = V_f * \text{conj}(V_f * Y_{bus}) \quad (6.14)$$

Luego la potencia de Generación será:
$$S_G = S_C + S_f \quad (6.15)$$

Donde S_C , es la matriz de las cargas en barras, incluido la slack.

6.11 Cálculo del flujo de potencia.

La corriente por una determinada rama viene dado por:

$$I_{ij} = (V_i - V_j) * Y_{ij} \quad (6.16)$$

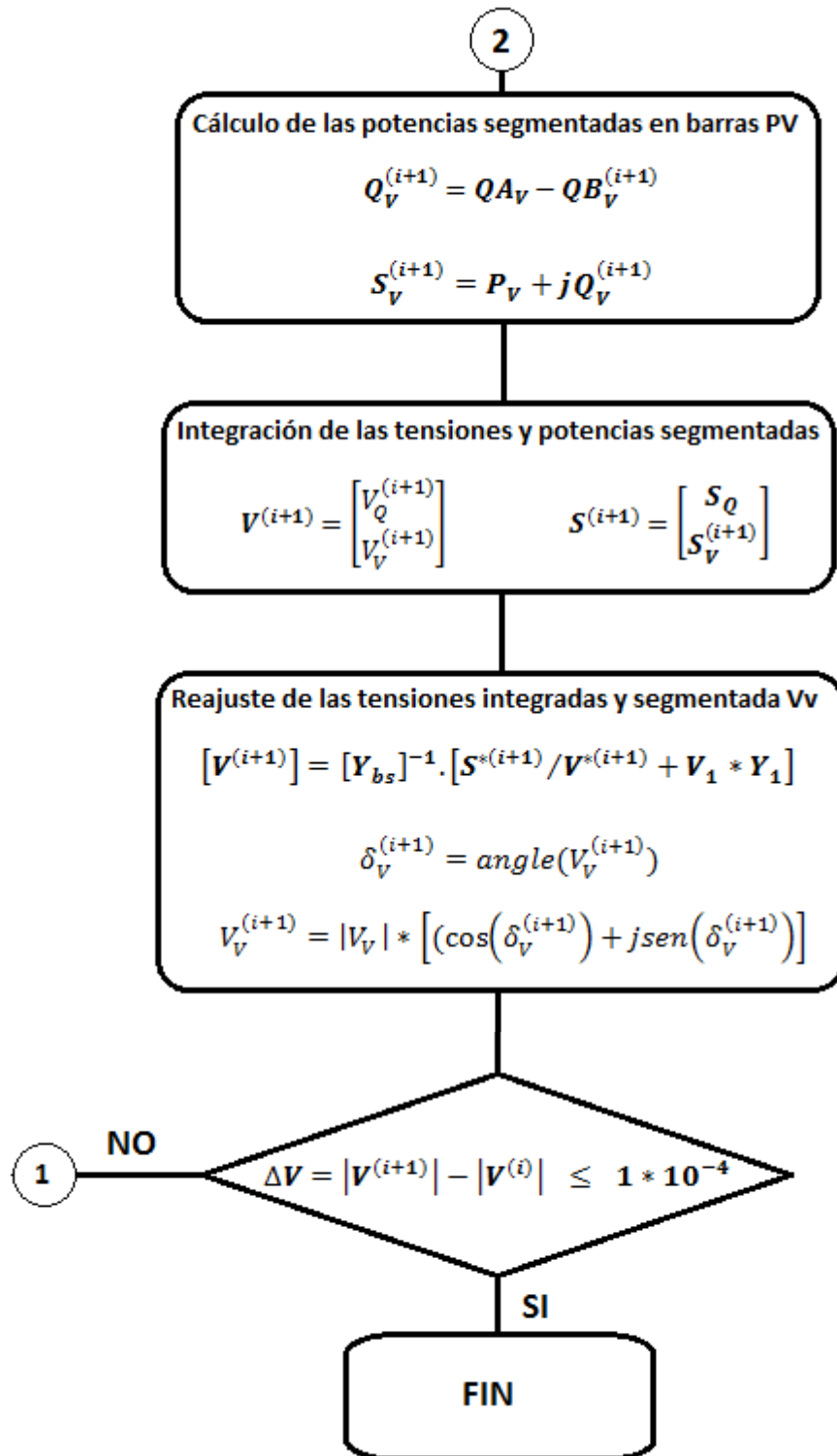
Dónde:

$(V_i - V_j)$: Tensión final (solución) entre los nodos contiguos i-j

Y_{ij} : Admitancia de la rama entre los nodos i-j

Entonces, el flujo de las potencias positiva y negativa, son:

$$S_{ij} = +V_i * \text{conj}(I_{ij}) \quad (6.17) \quad S_{ji} = -V_j * \text{conj}(I_{ij}) \quad (6.18)$$



CAPITULO VII

RESULTADOS

7.1 Estudio de casos aplicados por el método de la segmentación ordenada para el cálculo de tensiones de barra y flujo de Potencia.

7.1.1 Aplicación para un SEP de 4 barras.

Aplicación del método de *segmentación ordenada* al SEP de 4 barras del libro; “*Análisis de Sistemas de Potencia*”; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2. [24]

En el SEP de 4 barras que se muestra en la Fig. 7.1, los generadores están conectados a las barras 1 y 4, mientras las cargas se indican en todas las cuatro barras. Los valores base para el sistema de transmisión son 100 MVA y 230 KV. Los datos se dan en las tablas 7.1 y 7.2.

Figura 7.1

DIAGRAMA UNIFILAR PARA EL CASO DE 4 BARRAS

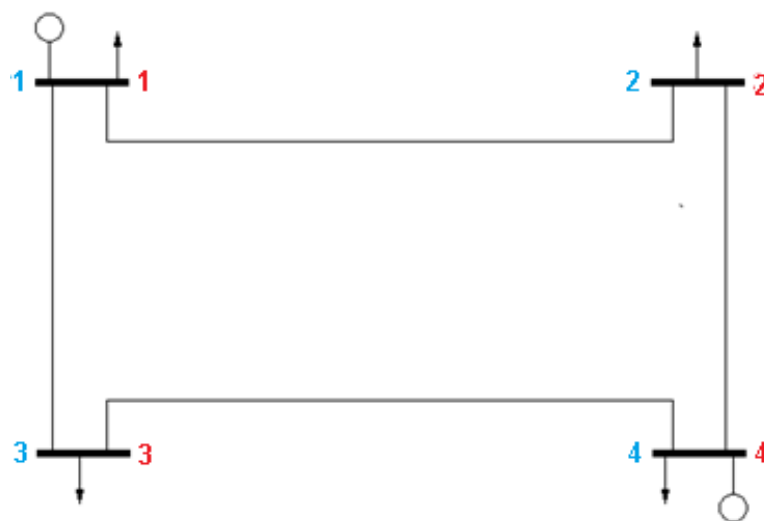


Tabla N° 7.1

DATOS DE BARRAS PARA EL CASO DE 4 BARRAS

Barra	Generación		Carga		V	Tipo de Barra
	P	Q	P	Q		
1	-	-	50	30.99	1.00	Slack
2	0	0	170	105.35	1.00	PQ
3	0	0	200	123.94	1.00	PQ
4	318	-	80	49.58	1.02	PV

Tabla N° 7.2

DATOS DE LÍNEAS PARA EL CASO DE 4 BARRAS

Barras	R	X	Cargab Mvar	Y/2
1-2	0.01008	0.05040	10.25	0.05125
1-3	0.00744	0.03720	7.75	0.03875
2-4	0.00744	0.03720	7.75	0.03875
3-4	0.01272	0.06360	12.75	0.06375

SOLUCION

a) Asignación numérica de las barras por segmentación ordenada.-

Para el caso en aplicación, las barras tiene el siguiente orden numérico:

- i) Barras slack: 1
- ii) Barras tipo PQ: 2, 3
- iii) Barras tipo PV: 4

b) Segmentación de la matriz de la admitencia Ybs.

Se construye las matrices de admitancias Y_{bs} , Y_{ii} y Y_b a partir de la barra 2; puesto que la tensión en la barra de referencia o slack, es conocida:

$$Y_{bs} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{32} & +Y_{33} & -Y_{34} \\ -Y_{42} & -Y_{43} & +Y_{44} \end{bmatrix}; \quad Y_{ii} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & 0 & 0 \\ 0 & +Y_{33} & 0 \\ 0 & 0 & +Y_{44} \end{bmatrix}$$

$$Y_b = Y_{bs} - Y_{ii} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{32} & 0 & -Y_{34} \\ -Y_{42} & -Y_{43} & 0 \end{bmatrix}$$

Segmentando la matriz Y_{bs} , se tiene:

$$Y_{bs} = \left[\begin{array}{cc|c} +Y_{22} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{32} & +Y_{33} & -Y_{34} \\ \hline -Y_{42} & -Y_{43} & +Y_{44} \end{array} \right]$$

Dónde, las matrices segmentadas son:

$$Y_{QQ} = \begin{bmatrix} Y_{22} & -Y_{23} \\ -Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad Y_{QV} = \begin{bmatrix} -Y_{24} \\ -Y_{34} \end{bmatrix}$$

$$Y_{VQ} = \begin{bmatrix} -Y_{42} & -Y_{43} \end{bmatrix} \quad Y_{VV} = \begin{bmatrix} Y_{44} \end{bmatrix}$$

También, determinamos otras admitancias segmentadas necesarias:

$$Y_{Q1} = \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \end{bmatrix}; \quad Y_{V1} = \begin{bmatrix} Y_{41} \end{bmatrix}$$

$$Y_{iiv} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & 0 \\ 0 & +Y_{33} \end{bmatrix}; \quad Y_{bvv} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{23} \\ -Y_{32} & 0 \end{bmatrix}$$

El valor numérico de Y_{bs} , es:

$$Y_{bs} = \begin{bmatrix} 8.9852 - 44.8360i & 0.0000 + 0.0000i & -5.1696 + 25.8478i \\ 0.0000 + 0.0000i & 8.1933 - 40.8638i & -3.0237 + 15.1185i \\ -5.1696 + 25.8478i & -3.0237 + 15.1185i & 8.1933 - 40.8638i \end{bmatrix}$$

Luego el valor numérico de las matrices segmentadas, será

$$Y_{QQ} = \begin{bmatrix} Y_{22} & -Y_{23} \\ -Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.9852 - 44.8360i & 0.0000 + 0.0000i \\ 0.0000 + 0.0000i & 8.1632 - 40.8762i \end{bmatrix}$$

$$Y_{QV} = \begin{bmatrix} -Y_{24} \\ -Y_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5.1696 + 25.8478i \\ -3.0237 + 15.1185i \end{bmatrix}$$

$$Y_{VQ} = [-5.1696 + 25.8478i \quad -3.0237 + 15.1185i]$$

$$Y_{VV} = [8.1933 - 40.8638i]$$

También se tienen las siguientes matrices de admitancias segmentadas:

$$Y_{Q1} = \begin{bmatrix} Y_{21} \\ Y_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.8226 - 19.0752i \\ 5.1439 - 25.8585i \end{bmatrix}; \quad Y_{V1} = [Y_{41}] = [0.0000 + 0.0000i]$$

$$Y_{bVV} = \begin{bmatrix} 0 & -Y_{23} \\ -Y_{32} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0.0000 + 0.0000i \\ 0.0000 + 0.0000i & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_{iiv} = \begin{bmatrix} +Y_{22} & 0 \\ 0 & +Y_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 8.9852 - 44.8360i & 0 \\ 0 & 8.1933 - 40.8638i \end{bmatrix}$$

c) Asignación de valores iniciales para las tensiones del SEP:

$$V_1 = 1.0 + j0, \quad V^{(0)} = \begin{bmatrix} V_2^{(0)} \\ V_3^{(0)} \\ V_4^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 + j0 \\ 0.0 + j0 \\ 1.02 + j0 \end{bmatrix}$$

$$\text{Segmentando: } V_Q^{(0)} = \begin{bmatrix} V_2^{(0)} \\ V_3^{(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0 + j0.0 \\ 0.0 + j0.0 \end{bmatrix} \quad V_V^{(0)} = [V_4^{(0)}] = 1.02 + j0.0$$

d) Cálculo de las tensiones segmentadas en barras PQ (V_Q), en la 1ra iteración

Para V_Q en la 1ra iteración, aplicando la ecuación (6.1), tenemos:

$$V_Q^{(1)} = (Y_{QQ})^{-1} * (S_Q^*/V_Q^{*(0)} + V_1 * Y_{Q1} + Y_{QV} * V_V^{(0)})$$

Siendo S_Q las potencias en barras PQ, conocidos según los datos (en p.u):

$$S_Q = \begin{bmatrix} S_{G2} \\ S_{G3} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{C2} \\ S_{C3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 + j0 \\ 0 + j0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 1.70 + j1.054 \\ 2 + j1.24 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.70 - j1.054 \\ -2 - j1.24 \end{bmatrix}$$

$$\implies V_Q^{(1)} = \begin{bmatrix} V_2^{(1)} \\ V_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9836 - 0.0323i \\ 0.9713 - 0.0417i \end{bmatrix}$$

e) Cálculo de las tensiones segmentadas V_V , en barras PV en la 1ra iteración:

Calculamos V_V en la 1ra iteración, mediante la ecuación (6.5):

$$V_V^{(1)} = |V_V| * [\cos(\delta_V) + j\text{sen}(\delta_V)]^{(1)}$$

Donde δ_V , es calculado a partir de la ecuación (6.4):

$$\delta_V^{(1)} = \sigma_V^{(1)} - \text{angle}(B_V)^{(1)} ; \quad \text{Donde: } \sigma_V^{(1)} = \arccos\left(\frac{PB_V}{|V_V| * |B_V|^{(1)}}\right)$$

Siendo:

$$|B_V|^{(1)} = \left| \left(Y_{VQ} * V_Q^{(1)} + Y_{bVV} * V_V^{(0)} + V_1 * Y_{V1} \right) \right|$$

Remplazando valores, tenemos:

$$|B_V|^{(1)} = 40.9354 \quad \implies \quad \cos(\sigma_V)^{(1)} = 0.1464 \quad \implies \quad \delta_V^{(1)} = 0.0132$$

Luego, de acuerdo a la ecuación (6.5), tenemos:

$$V_V^{(1)} = 1.0199 + 0.0134i$$

f) Cálculo de las potencias segmentadas S_V en barras PV, en la 1ra iteración:

Calculamos la potencia reactiva segmentada Q_V , mediante la ecuación (6.6):

$$Q_V^{(1)} = Q_{A_V} - Q_{B_V}^{(1)}$$

Siendo:

$$Q_{A_V} = |V_V|^2 * |Y_{iiV}| * \text{sen}(\delta_{iiV}) = 42.5276i$$

$$Q_{B_V}^{(1)} = |V_V| * |B_V|^{(1)} * \text{sen}(\sigma_V)^{(1)} = 41.3042$$

Luego:

$$Q_V^{(1)} = Q_{A_V} - Q_{B_V}^{(1)} = 1.2234$$

Por tanto la potencia S_V , será:

$$S_V^{(1)} = P_V + jQ_V^{(1)} = 2.3800 + 1.2234i$$

g) Integración de las tensiones y potencias segmentadas.

Integrando las tensiones segmentadas de la 1ra iteración, mediante la ecuación (6.8), obtenemos las tensiones en las barras PQ y PV del SEP:

$$V^{(1)} = \begin{bmatrix} V_Q^{(1)} \\ V_V^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9836 - 0.0323i \\ 0.9713 - 0.0417i \\ 1.0199 + 0.0134i \end{bmatrix}$$

Integrando las potencias segmentadas para la 1ra iteración, mediante la ecuación (6.9), tenemos:

$$S^{(1)} = \begin{bmatrix} S_Q \\ S_V^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1.70 - j1.054 \\ -2 - j1.24 \\ 2.3800 + 1.2234i \end{bmatrix}$$

h) Reajuste de la tensión integrada.

Reajustamos, el valor $V^{(1)}$, mediante la ecuación (6.10):

$$V^{(1)} = [Y_{bs}]^{-1} \cdot [S^{*(1)}/V^{*(1)} + V_1 * Y_1]$$

Reemplazando valores:

$$V^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.9796 - 0.0157i \\ 0.9668 - 0.0308i \\ 1.0158 + 0.0280i \end{bmatrix}$$

Segmentando $V^{(1)}$:

$$V_Q^{(1)} = \begin{bmatrix} 0.9796 - 0.0157i \\ 0.9668 - 0.0308i \end{bmatrix}; \quad V_V^{(1)} = 1.0158 + 0.0280i$$

Determinamos el ángulo de la tensión segmentada $V_V^{(1)}$, y volvemos a calcular su valor:

$$\delta_V = \text{angle}(V_V^{(1)}) \quad \Rightarrow \quad V_V^{(1)} = |V_V|(\cos(\delta_V) + j\text{sen}(\delta_V))$$

$$\delta_V = 0.0275 \quad \Rightarrow \quad V_V^{(1)} = 1.0196 + 0.0281i$$

Finalmente, volvemos a integrar la tensión $V^{(1)}$, con los valores reajustados de $V_V^{(1)}$:

$$V^{(1)} = \begin{bmatrix} V_Q^{(1)} \\ V_V^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9796 - 0.0157i \\ 0.9668 - 0.0308i \\ 1.0196 + 0.0281i \end{bmatrix}$$

i) Cálculo de la diferencial.

Las iteraciones, se ejecutan hasta que la diferencia sea menor a la tolerancia definida:

$$dV = |V^{(i+1)} - V^{(i)}| \leq 1 * 10^{-4}$$

Para el caso del SEP de 4 barras en estudio, se tiene:

$$dV = |V^{(1)} - V^{(0)}| = \begin{bmatrix} 0.0257 \\ 0.0453 \\ 0.0281 \end{bmatrix}$$

j) Cálculo iterativo.

Se realiza el cálculo iterativo a partir de los resultados $V^{(1)}$, siguiendo todo el procedimiento descrito anterior, teniéndose los siguientes resultados:

2da iteración:

$$V^{(2)} = \begin{bmatrix} 0.9824 - 0.0168i \\ 0.9686 - 0.0317i \\ 1.0196 + 0.0271i \end{bmatrix}; \quad dV = |V^{(2)} - V^{(1)}| = \begin{bmatrix} 0.0030 \\ 0.0020 \\ 0.0010 \end{bmatrix}$$

3ra iteración

$$V^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.9823 - 0.0167i \\ 0.9685 - 0.0317i \\ 1.0196 + 0.0271i \end{bmatrix}; \quad dV = |V^{(3)} - V^{(2)}| = \begin{bmatrix} 0.8999 \\ 0.5904 \\ 0.2878 \end{bmatrix} * 10^{-4}$$

k) Resultado final para las tensiones.

Se alcanza el resultado final cuando $dV \leq 1 * 10^{-4}$, que para el caso del SEP de 4 barras, como se observa se obtiene en 3 iteraciones:

$$V^{(3)} = \begin{bmatrix} 0.9823 - 0.0167i \\ 0.9685 - 0.0317i \\ 1.0196 + 0.0271i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Integrando la tensión de la barra slack, obtenemos las tensiones en barras de todo el sistema eléctrico:

$$V_f = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.0000 - 0.0000i \\ 0.9823 - 0.0167i \\ 0.9685 - 0.0317i \\ 1.0196 + 0.0271i \end{bmatrix}$$

l) Cálculo de las potencias nodales

Teniendo en cuenta la ecuación (6.8):

$$S_f = V_f * conj(V_f * Y_{bus})$$

Las potencias nodales de todo el SEP, será:

$$S_f = \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.3679 + 0.8344i \\ -1.7000 - 1.0535i \\ -2.0000 - 1.2394i \\ 2.3800 + 1.3188i \end{bmatrix}$$

Así mismo, Integrando la potencia de carga de la barra slack, obtenemos las potencias de carga en todo el SEP:

$$S_{CT} = \begin{bmatrix} S_{C1} \\ S_{C2} \\ S_{C3} \\ S_{C4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5000 + 0.3100i \\ 1.7000 + 1.0535i \\ 2.0000 + 1.2394i \\ 0.8000 + 0.4958i \end{bmatrix}$$

Finalmente, obtenemos las potencias de generación de todo el sistema eléctrico, tomando en cuenta la siguiente relación:

$$S_G = S_{CT} + S_f$$

Reemplazando valores, obtenemos:

$$S_G = \begin{bmatrix} S_{G1} \\ S_{G2} \\ S_{G3} \\ S_{G4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.8679 + 1.1445i \\ 0.0000 + 0.0000i \\ -0.0000 + 0.0000i \\ 3.1800 + 1.8146i \end{bmatrix}$$

m) Cálculo del flujo del potencia

Tomando en cuenta la ecuación (6.16): $I_{ij} = (V_i - V_j) * Y_{ij}$ El flujo de las potencias positiva y negativa, son calculados mediante las ecuaciones (6.17) y (6.18):

$$S_{ij} = +V_i * conj(I_{ij}) \quad S_{ji} = -V_j * conj(I_{ij})$$

Reemplazando valores, tenemos:

Cuadro 7.1

RESULTADOS DEL CÁLCULO DE FLUJO DE POTENCIA PARA 4 BARRAS

Ni - Nf	+S _{ij}	-S _{ji}
1 - 2	0.39 + j0.27	-0.38 - j0.26
1 - 3	0.98 + j0.65	-0.97 - j0.60
2 - 4	-1.32 - j0.70	1.33 + j0.79
3 - 4	-1.03 - j0.54	1.05 + j0.64

n) Determinación de los indicadores de análisis

- i) *Numero de iteraciones:* 2; se obtiene del programa
- ii) *Tiempo:* Del programa, con el comando tic – toc de Mat Lab

Tiempo de la 1ra parte	Elapsed time is 3.4435e-004 seconds.
Tiempo de la 2da parte	Elapsed time is 0.0022 seconds.
Tiempo total empleado por el programa	Elapsed time is 0.00234 seconds.

- iii) *Memoria:* Se obtiene mediante el comando whos de Mat Lab

```
>> whos
Name          Size          Bytes  Class  Attributes

A1            3x1            48  double  complex
A1q           2x1            32  double  complex
A1v           1x1             8  double
Bv            1x1            16  double  complex
COSGv         1x1             8  double
Gv            1x1             8  double
Km            1x1             8  double
Lineas        4x5            160  double
NL            1x1             8  double
Nodos         4x12           384  double
Pc            3x1            24  double
Pc1           1x1             8  double
Pcv           1x1             8  double
Pg            3x1            24  double
Pggq          2x1            16  double
```

Continúa... Sumando todos los Bytes, se obtiene: 2.896 KB

En Resumen, para el caso de 4 barras se tienen los indicadores:

Nº de Iteraciones	Tiempo	Memoria
2	2.34 mseg	2.896 KB

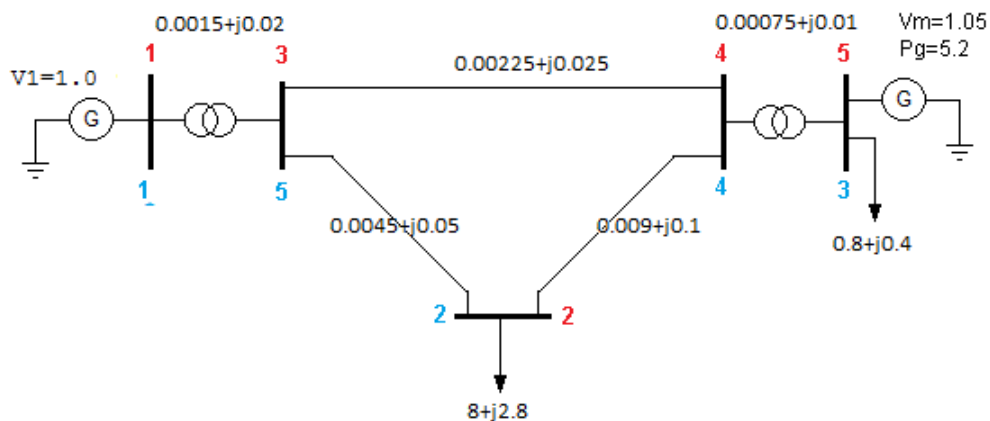
7.1.2 Aplicación para un SEP de 5 barras.

Aplicación del método de segmentación ordenada al SEP de 5 barras del libro “*Sistemas de potencia: Análisis y diseño*”, por J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. SARMA, 3ra. Edic. pág. 277; Ejerc 6.9, [23]

La Fig. 7.1 muestra el diagrama unifilar del sistema de potencia de cinco barras. Los datos de entrada se dan en las tablas 7.3 y 7.4. El bus 1, es el bus compensador. El bus 3, es un bus de voltaje controlado. Los buses 2, 4 y 5 son buses de carga. Determinar las tensiones de barra y el flujo de potencias correspondientes.

Figura N° 7.2

DIAGRAMA UNIFILAR PARA EL CASO DE 5 BARRAS



a) Asignación numérica de las barras por segmentación ordenada.-

En la Fig, 7.1, se observa que la numeración original asignada por la bibliografía está en forma aleatoria sin ningún orden, y de color azul turquesa. Esta numeración ha sido reordenada, tomando en cuenta la segmentación del SEP:

- i) Barra Slack: 1
- ii) Barras PQ: 2, 3, 4
- iii) Barras PV: 5

b) Registro de datos del sistema, de acuerdo a la asignación numérica de las barras.

Tabla N° 7.3

DATOS DE BARRAS PARA EL CASO DE 5 BARRAS

Barra	Generación		Carga		V	Tipo de Barra
	P	Q	P	Q		
1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	8	2.8	1	2
3	0	0	0	0	1	2
4	0	0	0	0	1	2
5	5.2	0	0.8	0.4	1.05	3

Tabla N° 7.4

DATOS DE LÍNEAS PARA EL CASO DE 5 BARRAS

Barras	R	X	Mvar	Y/2
1 - 3	0.0015	0.0200	110.50	0
2 - 3	0.0045	0.0500	115.20	0.4400
2 - 4	0.0090	0.1000	86.23	0.8600
3 - 4	0.0023	0.0250	132.10	0.2200
4 - 5	7.5000e-04	0.0100	96.50	0

7.1.3 Aplicación para un SEP de 14 barras de la IEEE.

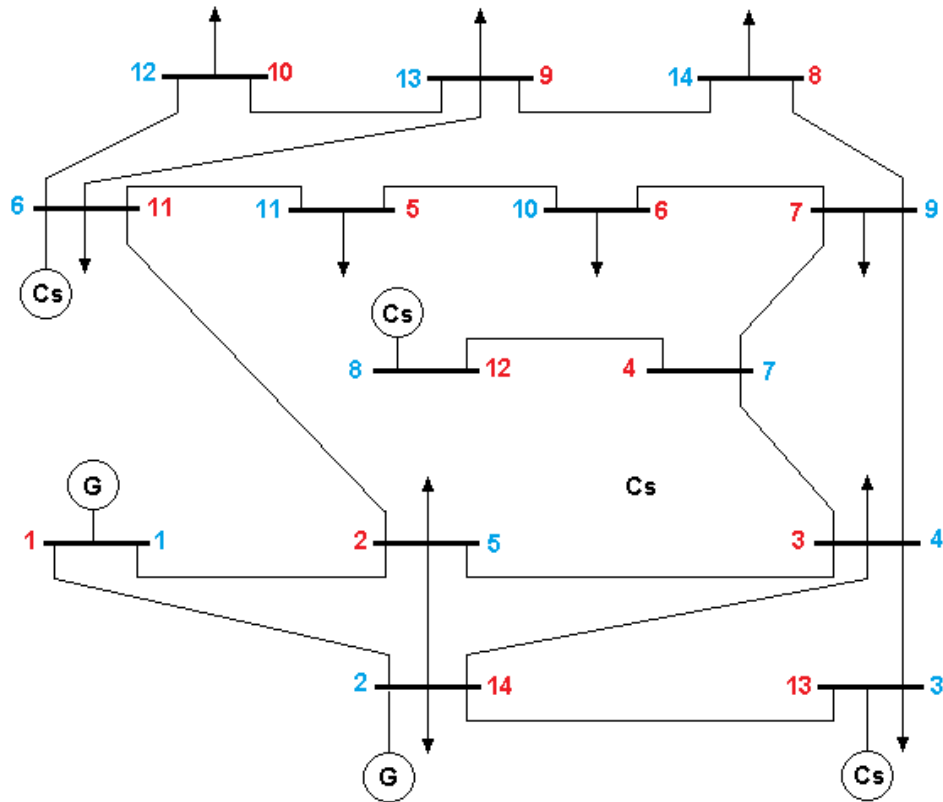
El caso de estudio IEEE de 14 barras [27], representa una porción del Sistema Eléctrico de Potencia Americano, de 1962 que incluye varios nodos con capacidad de control de voltaje. Los archivos pueden ser obtenidos en:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

La Fig. 13, muestra el diagrama unifilar de la red redibujado, donde se puede observar que la numeración ha sido reordenada para el cálculo del flujo de potencia por el método de la segmentación ordenada. Los datos se encuentran en los archivos que se indican en la dirección electrónica señalada.

Figura N° 7.3

SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA DE 14 BARRAS DE LA IEEE



a) Asignación numérica de las barras por segmentación ordenada.-

En la Fig. 7.3, se observa que la numeración original asignada está en forma aleatoria sin ningún orden, y de color azul turquesa. Esta numeración ha sido reordenada, tomando en cuenta la segmentación del SEP:

- i) Barra Slack: 1
- ii) Barras PQ: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10
- iii) Barras PV: 11, 12, 13, 14

b) Datos del sistema, de acuerdo a la nueva numeración de barras.

Tabla N° 5

DATOS DE BARRAS PARA EL CASO 14 BARRAS DE LA IEEE

bus i	type	Pg	Qg	Pd	Qd	Vm	Va	baseKV
1	1	0	0	0	0	1.0605	0	100
2	2	0	0	0.076	0.016	1	0	100
3	2	0	0	0.478	-0.039	1	0	100
4	2	0	0	0	0	1	0	100
5	2	0	0	0.035	0.018	1	0	100
6	2	0	0	0.09	0.058	1	0	100
7	2	0	0	0.295	0.166	1	0	100
8	2	0	0	0.149	0.05	1	0	100
9	2	0	0	0.135	0.058	1	0	100
10	2	0	0	0.061	0.016	1	0	100
11	3	0	0	0.112	0.075	1.07	0	100
12	3	0	0	0	0	1.09	0	100
13	3	0	0	0.942	0.19	1.01	0	100
14	3	0.3986	0	0.217	0.127	1.045	0	100

Tabla N° 6

DATOS DE LÍNEAS PARA EL CASO 14 BARRAS DE LA IEEE

Ni	Nf	R	X	Bsh/2	Ni	Nf	R	X	Bsh/2
1	14	0.0194	0.0592	0.0264	11	5	0.095	0.1989	0
1	2	0.054	0.223	0.0246	11	10	0.1229	0.2558	0
14	13	0.047	0.198	0.0219	11	9	0.0662	0.1303	0
14	3	0.0581	0.1763	0.0187	4	12	0	0.1762	0
14	2	0.057	0.1739	0.017	4	7	0	0.11	0
13	3	0.067	0.171	0.0173	7	6	0.0318	0.0845	0
3	2	0.0134	0.0421	0.0064	7	8	0.1271	0.2704	0
3	4	0	0.2091	0	6	5	0.0821	0.1921	0
3	7	0	0.5562	0	10	9	0.2209	0.1999	0
2	11	0	0.252	0	9	8	0.1709	0.348	0

7.1.4 Resumen de resultados aplicando el método de la segmentación ordenada

Cuadro N° 7.2

RESULTADOS DE TENSIONES Y POTENCIAS NODALES CON SEGMENTACIÓN ORDENADA

Barr	Vm (p.u)	Ang (°)	Pot. Gen (p.u)	Pot. Result (p.u)
4	(1) 1.0000	0	1.8679 + 1.1445i	1.3679 + 0.8345i
	(2) 0.9824	-0.9765	-0.0000 - 0.0001i	-1.7000 - 1.0536i
	(3) 0.9690	-1.8730	0.0000 - 0.0001i	-2.0000 - 1.2395i
	(4) 1.0200	1.5238	3.1800 + 1.8147i	2.3800 + 1.3189i
5	(1) 1.0000	0	3.9485 + 1.1428i	3.9485 + 1.1428i
	(2) 0.8338	-22.4066	-0.0001 + 0.0002i	-8.0001 - 2.7998i
	(3) 0.9743	-4.5480	0.0000 - 0.0000i	0.0000 - 0.0000i
	(4) 1.0193	-2.8341	-0.0000 - 0.0003i	-0.0000 - 0.0003i
	(5) 1.0500	-0.5975	5.2000 + 3.3749i	4.4000 + 2.9749i
14	(1) 1.0605	0	2.3267 - 0.2183i	2.3267 - 0.2183i
	(2) 1.0335	-8.9487	-0.0000 + 0.0000i	-0.0760 - 0.0160i
	(3) 1.0271	-10.3700	0.0000 + 0.0000i	-0.4780 + 0.0390i
	(4) 1.0453	-13.4512	0.0000 + 0.0000i	0.0000 + 0.0000i
	(5) 1.0451	-15.2098	0.0000 + 0.0000i	-0.0350 - 0.0180i
	(6) 1.0279	-15.3172	-0.0000 + 0.0000i	-0.0900 - 0.0580i
	(7) 1.0281	-15.0701	-0.0000 + 0.0000i	-0.2950 - 0.1660i
	(8) 1.0177	-16.3911	-0.0000 + 0.0000i	-0.1490 - 0.0500i
	(9) 1.0463	-15.7326	0.0000 + 0.0000i	-0.1350 - 0.0580i
	(10) 1.0531	-15.7131	0.0000 + 0.0000i	-0.0610 - 0.0160i
	(11) 1.0700	-14.8727	-0.0000 + 0.4858i	-0.1120 + 0.4108i
	(12) 1.0900	-13.4512	0.0000 + 0.2768i	0.0000 + 0.2768i
	(13) 1.0100	-12.6174	-0.0000 + 0.1831i	-0.9420 - 0.0069i
	(14) 1.0450	-4.9474	0.3986 + 0.2861i	0.1816 + 0.1591i

Cuadro N° 7.3

RESULTADOS DE INDICADORES DE ANÁLISIS PARA SEGMENTACIÓN ORDENADA

Barras	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
4	2	2.34 mseg	2.896 KB
5	6	3.55 mseg	4.08 KB
14	4	4.3 mseg	22.984 KB

7.2 Estudio de casos mediante los métodos clásicos

Para la aplicación de los denominados métodos clásicos, y realizar el análisis comparativo correspondiente, se toman los mismos casos estudiados en el apartado 7.1

7.2.1 Aplicación del método Gauss Seidel

Según la ecuación (4.4):

$$V_i^{(l+1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V^l)^*} - \sum_{k=1}^{i-1} Y_{ik} V_k^{l+1} - \sum_{k=i+1}^n Y_{ik} V_k^{(l)} \right]$$

a) Caso de un SEP de 4 barras

Aplicación para el SEP de 4 barras del libro; “*Análisis de Sistemas de Potencia*”; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2. [6]

b) Caso de un SEP de 5 barras

Aplicación del método de segmentación ordenada al SEP de 5 barras del libro “*Sistemas de potencia: Análisis y diseño*”, por J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. SARMA, 3ra. Edic. pág. 277; Ejerc 6.9 [1]

c) Caso de un SEP de 14 barras

El caso de estudio IEEE de 14 barras [27], representa una porción del Sistema Eléctrico de Potencia Americano, del año 1962, referido en el artículo “*Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data*”, Vol. PAS-92, No. 6, 1973, pp. 1916-1925.

Los datos se pueden encontrar en:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Para todos los casos, se utiliza el diagrama unifilar, los datos y la numeración del caso estudiado por el método de la segmentación.

d) Resumen de resultados aplicando el método de Gauss Seidel

Cuadro N° 7.4:

TENSIONES Y POTENCIAS NODALES CON GAUSS SEIDEL

Barras	Vm (p.u)	Ang (°)	Pot. Gen (p.u)	Pot. Result (p.u)
4	(1) 1.0000	0	1.8710 + 1.1438i	1.3710 + 0.8338i
	(2) 0.9825	-0.9815	-0.0018 + 0.0005i	-1.7018 - 1.0530i
	(3) 0.9690	-1.8762	-0.0011 + 0.0003i	-2.0011 - 1.2391i
	(4) 1.0200	1.5192	3.1799 + 1.8146i	2.3799 + 1.3188i
5	(1) 1.0000	0	3.9323 + 1.1418i	0
	(2) 0.8338	-22.3769	0.0020 - 0.0008i	8.0000 + 2.8000i
	(3) 0.9743	-4.5289	0.0037 - 0.0004i	0
	(4) 1.0193	-2.8010	0.0101 - 0.0012i	0
	(5) 1.0500	-0.5644	5.2001 + 3.3746i	0.8000 + 0.4000i
14	(1) 1.0605	0	2.3180 - 0.2172i	2.3180 - 0.2172i
	(2) 1.0336	-8.9123	0.0017 - 0.0002i	-0.0743 - 0.0162i
	(3) 1.0272	-10.3310	0.0009 - 0.0001i	-0.4771 + 0.0389i
	(4) 1.0453	-13.3889	0.0014 + 0.0000i	0.0014 + 0.0000i
	(5) 1.0451	-15.1369	0.0008 - 0.0004i	-0.0342 - 0.0184i
	(6) 1.0279	-15.2454	0.0009 - 0.0004i	-0.0891 - 0.0584i
	(7) 1.0281	-15.0038	0.0003 - 0.0001i	-0.2947 - 0.1661i
	(8) 1.0177	-16.3206	0.0002 - 0.0001i	-0.1488 - 0.0501i
	(9) 1.0463	-15.6620	0.0008 - 0.0005i	-0.1342 - 0.0585i
	(10) 1.0530	-15.6436	0.0003 - 0.0001i	-0.0607 - 0.0161i
	(11) 1.0700	-14.8088	0.0002 + 0.4862i	-0.1118 + 0.4112i
	(12) 1.0900	-13.3889	0.0000 + 0.2766i	0.0000 + 0.2766i
	(13) 1.0100	-12.5860	0.0002 + 0.1825i	-0.9418 - 0.0075i
	(14) 1.0450	-4.9289	0.3987 + 0.2837i	0.1817 + 0.1567i

Cuadro N° 7.5:

INDICADORES DE ANÁLISIS PARA GAUSS SEIDEL

Barras	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
4	9	2.4 mseg	2.248 KB
5	26	3.4 mseg	2.936 KB
14	75	17.3 mseg	12.280 KB

7.2.2 Aplicación del método Newton Rapson

Se utiliza la ecuación (4.8):

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(l)} \\ \Delta Q^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(l)} & J_2^{(l)} \\ J_3^{(l)} & J_4^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix}$$

a) Caso de un SEP de 4 barras

Aplicación para el SEP de 4 barras del libro; “*Análisis de Sistemas de Potencia*”; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2. [6]

Se utiliza el diagrama unifilar, los datos y la numeración del caso estudiado por el método de la segmentación.

b) Caso de un SEP de 5 barras

Aplicación del método de segmentación ordenada al SEP de 5 barras del libro “*Sistemas de potencia: Análisis y diseño*”, por J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. SARMA, 3ra. Edic. pág. 277; Ejerc 6.9 [1]

c) Caso de un SEP de 14 barras

El caso de estudio IEEE de 14 barras [27], representa una porción del Sistema Eléctrico de Potencia Americano, del año 1962, referido en el artículo "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Vol. PAS-92, No. 6, 1973, pp. 1916-1925. Los datos se pueden encontrar en:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Para los casos (b) y (c):

- Se utiliza el diagrama unifilar y los datos para el caso estudiado por el método de la segmentación.
- Se utiliza la numeración aleatoria indicada en la bibliografía.

d) Resultados aplicando el método de Newton Rapson

Cuadro N° 7.6

**RESULTADOS DE TENSIONES Y POTENCIAS NODALES CON
NEWTON RAPSON**

Barr	Vm (p.u)	Ang (°)	Pot. Gen (p.u)	Pot. Result (p.u)
4	(1) 1.0000	0	1.8678 + 1.1443i	1.3678 + 0.8343i
	(2) 0.9825	-0.97	0.0000 + 0.0000i	-1.7000 - 1.0535i
	(3) 0.9690	-1.87	0.0001 + 0.0002i	-1.9999 - 1.2392i
	(4) 1.0200	1.52	3.1800 + 1.8145i	2.3800 + 1.3187i
5	(1) 1.0000 (1)	0	3.9484 + 1.1428	3.9484 + 1.1428i
	(2) 0.8338 (2)	-22.40	0.0000 + 0.0000	-8.0000 - 2.8000i
	(3) 1.0500 (5)	-0.59	5.2000 + 3.3748	4.4000 + 2.9748i
	(4) 1.0193 (4)	-2.83	-0.0000 + 0.0000	-0.0000 + 0.0000i
	(5) 0.9743 (3)	-4.54	-0.0000 + 0.0000	-0.0000 + 0.0000i
14	(1) 1.0605 (1)	0	2.7064 - 0.2848	2.7064 - 0.2848i
	(2) 1.0450 (14)	-5.99	0.0401 + 0.4606	-0.1769 + 0.3336i
	(3) 1.0100 (13)	-13.57	0.0001 + 0.2025	-0.9419 + 0.0125i
	(4) 1.0240 (3)	-11.15	0.0001 + 0.0005	-0.4779 - 0.0385i
	(5) 1.0314 (2)	-9.67	0.0004 + 0.0011	-0.0756 - 0.0149i
	(6) 1.0700 (11)	-15.64	0.0001 + 0.4989	-0.1119 + 0.4239i
	(7) 1.0439 (4)	-14.23	-0.0000 + 0.0003	-0.0000 + 0.0003i
	(8) 1.0900 (12)	-14.23	0 + 0.2854	0 + 0.2854i
	(9) 1.0267 (7)	-15.85	-0.0003 + 0.0001	-0.2953 - 0.1659i
	(10) 1.0268 (6)	-16.09	-0.0000 + 0.0000	-0.0900 - 0.0580i
	(11) 1.0446 (5)	-15.98	0.0001 + 0.0001	-0.0349 - 0.0179i
	(12) 1.0530 (10)	-16.48	0.0000 + 0.0000	-0.0610 - 0.0160i
	(13) 1.0461 (9)	-16.50	0.0001 + 0.0001	-0.1349 - 0.0579i
	(14) 1.0168 (8)	-17.17	-0.0000 + 0.0000	-0.1490 - 0.0500i

Cuadro N° 7.7

**RESULTADOS DE INDICADORES DE ANÁLISIS PARA NEWTON
RAPSON**

Barras	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
4	2	10.2 mseg	4.12 KB
5	4	9.9 mseg	6.192 KB
14	3	16 mseg	41.400 KB

7.2.3 Aplicación del método desacoplado normal

Se utiliza la ecuación (4.12):

$$\begin{bmatrix} \Delta P^{(l)} \\ \Delta Q^{(l)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1^{(l)} & 0 \\ 0 & J_4^{(l)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(l)} \\ \Delta |V|^{(l)} \end{bmatrix}$$

a) Caso de un SEP de 4 barras

Aplicación para el SEP de 4 barras del libro; “*Análisis de Sistemas de Potencia*”; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2. [24]

Se utiliza el diagrama unifilar, los datos y la numeración del caso estudiado por el método de la segmentación.

b) Caso de un SEP de 5 barras

Aplicación del método de segmentación ordenada al SEP de 5 barras del libro “*Sistemas de potencia: Análisis y diseño*”, por J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. SARMA, 3ra. Edic. pág. 277; Ejerc 6.9 [23]

c) Caso de un SEP de 14 barras

El caso de estudio IEEE de 14 barras [27], representa una porción del Sistema Eléctrico de Potencia Americano, del año 1962, referido en el artículo "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Vol. PAS-92, No. 6, 1973, pp. 1916-1925. Los datos se pueden encontrar en:

<http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

Para los casos (b) y (c):

- Se utiliza el diagrama unifilar y los datos para el caso estudiado por el método de la segmentación.
- Se utiliza la numeración aleatoria indicada en la bibliografía.

d) Resumen de resultados aplicando el método desacoplado Normal

Cuadro N° 7.8

TENSIONES Y POTENCIAS NODALES CON DESACOPLADO NORMAL

Barr	Vm (p.u)	Ang (°)	Pot. Gen (p.u)	Pot. Result (p.u)
4	(1) 1.0000	0	1.8653 + 1.1434i	1.3653 + 0.8334i
	(2) 0.9825	-0.97	0.0022 + 0.0005i	-1.6978 - 1.0530i
	(3) 0.9691	-1.86	0.0025 + 0.0008i	-1.9975 - 1.2386i
	(4) 1.0200	1.52	3.1778 + 1.8137i	2.3778 + 1.3179i
5	(1) 1.0000 (1)	0	3.9481 + 1.1415i	3.9481 + 1.1415i
	(2) 0.8339 (2)	-22.40	0.0013 + 0.0004i	-7.9987 - 2.7996i
	(3) 1.0500 (5)	-0.59	5.2001 + 3.3732i	4.4001 + 2.9732i
	(4) 1.0193 (4)	-2.83	-0.0005 + 0.0001i	-0.0005 + 0.0001i
	(5) 0.9743 (3)	-4.54	-0.0008 + 0.0002i	-0.0008 + 0.0002i
14	(1) 1.0605 (1)	0	2.7064 - 0.2848i	2.7064 - 0.2848i
	(2) 1.0450 (14)	-5.99	0.0401 + 0.4606i	-0.1769 + 0.3336i
	(3) 1.0100 (13)	-13.57	0.0001 + 0.2025i	-0.9419 + 0.0125i
	(4) 1.0239 (3)	-11.15	0.0001 + 0.0005i	-0.4779 - 0.0385i
	(5) 1.0313 (2)	-9.68	0.0004 + 0.0011i	-0.0756 - 0.0149i
	(6) 1.0700 (11)	-15.65	0.0001 + 0.4989i	-0.1119 + 0.4239i
	(7) 1.0438 (4)	-14.23	-0.0000 + 0.0003i	-0.0000 + 0.0003i
	(8) 1.0900 (12)	-14.23	0 + 0.2854i	0 + 0.2854i
	(9) 1.0267 (7)	-15.85	-0.0003 + 0.0001i	-0.2953 - 0.1659i
	(10) 1.0268 (6)	-16.09	-0.0000 + 0.0000i	-0.0900 - 0.0580i
	(11) 1.0445 (5)	-15.98	0.0001 + 0.0001i	-0.0349 - 0.0179i
	(12) 1.0521 (10)	-16.49	0.0000 + 0.0000i	-0.0610 - 0.0160i
	(13) 1.0463 (9)	-16.50	0.0001 + 0.0001i	-0.1349 - 0.0579i
	(14) 1.0170 (8)	-17.16	-0.0000 + 0.0000i	-0.1490 - 0.0500i

Cuadro N° 7.9

RESULTADOS DE INDICADORES DE ANÁLISIS PARA DESACOPLADO NORMAL

Barras	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
4	4	3.9 mseg	4.088 KB
5	12	4.8 mseg	6.160 KB
14	8	12.8 mseg	41.200 KB

CAPITULO VIII

DISCUSION DE RESULTADOS

8.1 Análisis de resultados: Caso SEP de cuatro (4) barras

a). Asignación numérica de barras

En este caso, la numeración de barras asignados por la bibliografía (AL), coinciden con la asignación numérica que plantea el método de la SEGMENTACION ORDENADA, es decir la asignación numérica de las barras sigue el siguiente orden:
Barra Slack, Barras PQ y Barras PV

b). Análisis de las tensiones y potencias

Cuadro N° 8.1:

TENSIONES Y POTENCIAS DE GENERACIÓN PARA EL CASO
DE 4 BARRAS

Métodos	N° OR BARR	Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
SEGMENTAC ORDENADA	(1)	1.0000	0	2.1906
	(2)	0.9824	-0.9765	0.0001
	(3)	0.9690	-1.8730	0.0001
	(4)	1.0200	1.5238	3.6614
GAUSS SEIDEL	(1)	1.0000	0	2.1929
	(2)	0.9825	-0.9815	0.0019
	(3)	0.9690	-1.8762	0.0011
	(4)	1.0200	1.5192	3.6612
NEWTON RAPSON	(1)	1.0000	0	2.1904
	(2)	0.9825	-0.9764	0.0001
	(3)	0.9690	-1.8728	0.0002
	(4)	1.0200	1.5238	3.6612
DESACOPLADO NORMAL	(1)	1.0000	0	2.1879
	(2)	0.9825	-0.9738	0.0022
	(3)	0.9691	-1.8697	0.0026
	(4)	1.0200	1.5239	3.6590

Gráfico N° 8.1:

COMPARACION DE TENSIONES PARA 4 BARRAS

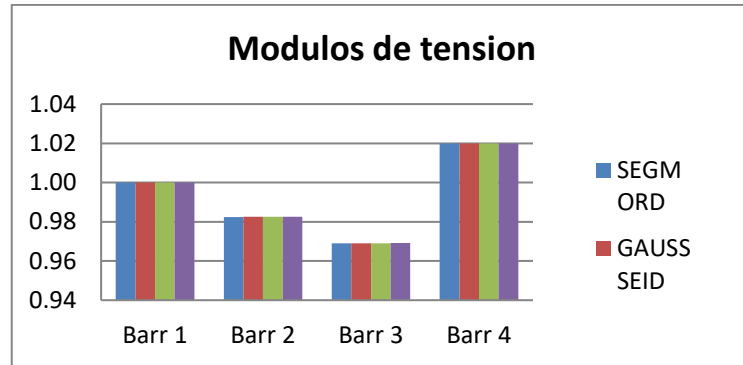
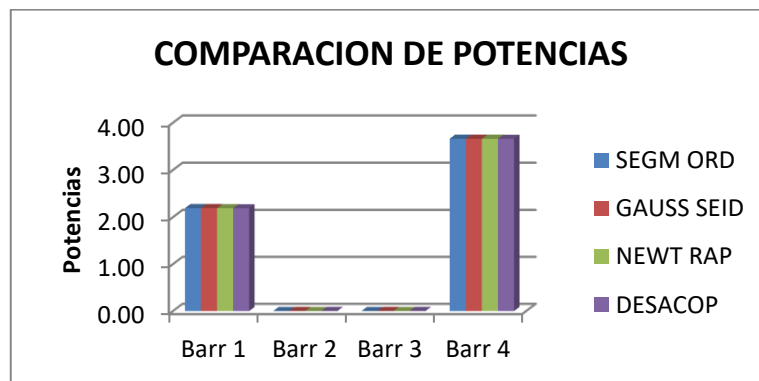


Gráfico N° 8.2

COMPARACIÓN DE POTENCIAS PARA 4 BARRAS



Cuadro N° 8.2

DIFERENCIA DE RESULTADOS PARA EL CASO DE 4 BARRAS

Métodos	N° OR	Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
SEGM – GAUSS	(1)	0	0	0.002
	(2)	0.0001	0.0001	0.001
	(3)	0	0.000	0.001
	(4)	0	0.000	0.002
SEGM – NEW RAP	(1)	0	0	0.000
	(2)	0.0001	0.000	0
	(3)	0	0.000	0.000
	(4)	0	0	0.002
SEGM - DESACOP	(1)	0	0	0.003
	(2)	0.0001	0.0001	0.002
	(3)	0.0001	0.0001	0.002
	(4)	0	0.000	0.000

El cuadro N° 8.1, muestra que los resultados para los módulos y ángulos de tensión, así como para la potencia, obtenidos mediante el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, coinciden prácticamente al 100 % con los calculados mediante los METODOS CLASICOS, tal como los muestran también los gráficos 1 y 2. El cuadro N° 8.2 muestra que las diferencias son mínimas y del orden de apenas el 0.1 milésimas.

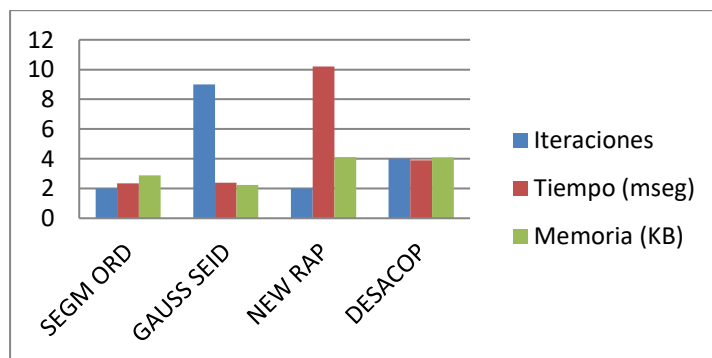
Los resultados obtenidos para el SEP de 4 barras, muestran que el MÉTODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA propuesto, tiene la misma efectividad que los Métodos Clásicos, en cuanto se refiere al cálculo de tensiones y potencias, para el caso en estudio del SEP de 4 barras.

c). Análisis de indicadores

**Cuadro N° 8.3:
RESULTADOS DE INDICADORES DE ANÁLISIS PARA EL
CASO DE 4 BARRAS**

Método	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
Segm Ordenada	2	2.34 mseg	2.896 KB
Gauss Seidel	9	2.4 mseg	2.248 KB
New Rap	2	10.2 mseg	4.12 KB
Desacop. Norm	4	3.9 mseg	4.088 KB

**Grafico N° 8.3:
COMPARACIÓN DE INDICADORES PARA 4 BARRAS**



Los resultados del cuadro N° 8.3 y el gráfico N° 8.3; muestran que:

- a) El número de iteraciones para el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, es mucho menor que los métodos clásicos de Gauss Seidel y Desacoplado, siendo igual que para el caso de NEWTON RAPSON.
- b) En cuanto al tiempo de ejecución y la cantidad de memoria utilizada por el método de la SEGMENTACIÓN ORDENADA resultan ser mucho menores que los métodos clásicos de Newton Rapson y Desacoplado, siendo algo menor para el caso de Gauss Seidel.

Estos resultados nos muestran que el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, para el caso del SEP de 4 barras en análisis, tiene una mayor efectividad de cálculo en cuanto a VELOCIDAD y ESPACIO DE MEMORIA respecto de los METODOS CLASICOS

8.2 Análisis de resultados para el caso del SEP de cinco (5) barras

a). Asignación numérica de barras

De la Fig. 7.2, pág. 78 se tiene la siguiente asignación numérica:

- i) Para la solución por el método de Gauss Seidel, la numeración de barras es similar al de Segmentación ordenada (OR)
- ii) Para la solución por los métodos de Newton Rapson y Desacoplado normal, la numeración de las barras es de forma aleatoria (AL). La correspondencia o equivalencia entre ambas formas de asignación numérica de barras es la siguiente:

CUADRO N° 8.4:
EQUIVALENCIA DE LA ASIGNACIÓN NUMÉRICA PARA 5 BARRAS

	Slack	PQ			PV
ORD	1	2	3	4	5
AL	1	2	5	4	3

b). Análisis de las tensiones y potencias

Cuadro N° 8.5:

TENSIONES Y POTENCIAS DE GENERACIÓN PARA EL CASO DE 5 BARRAS

Métodos	Num. barras		Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
	OR	AL			
SEGMENTAC ORDENADA	1		1.0000	0	4.1105
	2		0.8338	-22.4066	0.0002
	3		0.9743	-4.5480	0.0000
	4		1.0193	-2.8341	0.0003
	5		1.0500	-0.5975	6.1992
GAUSS SEIDEL	1		1.0000	0	4.0947
	2		0.8338	-22.3769	0.0021
	3		0.9743	-4.5289	0.0037
	4		1.0193	-2.8010	0.0101
	5		1.0500	-0.5644	6.1991
NEWTON RAPSON	1	1	1.0000	0	4.1104
	2	2	0.8338	-22.4063	0.0000
	3	5	0.9743	-4.5479	0.0000
	4	4	1.0193	-2.8340	0.0000
	5	3	1.0500	-0.5973	6.1991
DESACOPLADO NORMAL	1	1	1.0000	0	4.1098
	2	2	0.8339	-22.4006	0.0013
	3	5	0.9743	-4.5476	0.0008
	4	4	1.0193	-2.8336	0.0005
	5	3	1.0500	-0.5969	6.1983

Gráfico N° 8.4:
COMPARACION DE TENSIONES PARA 5 BARRAS

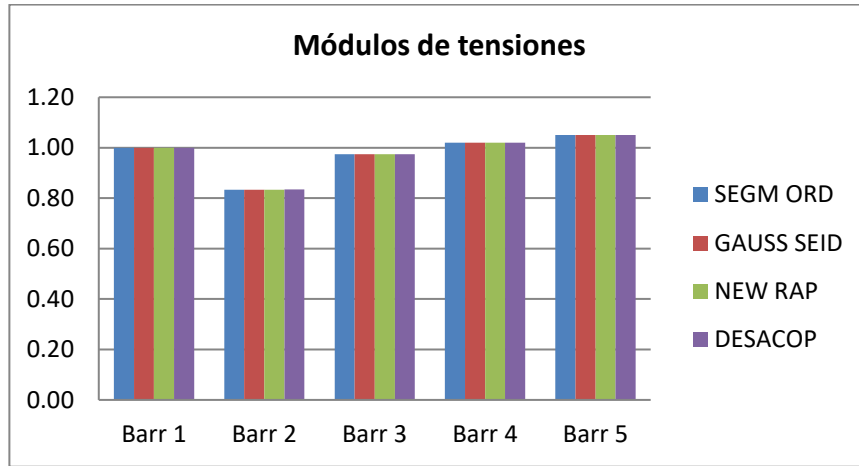
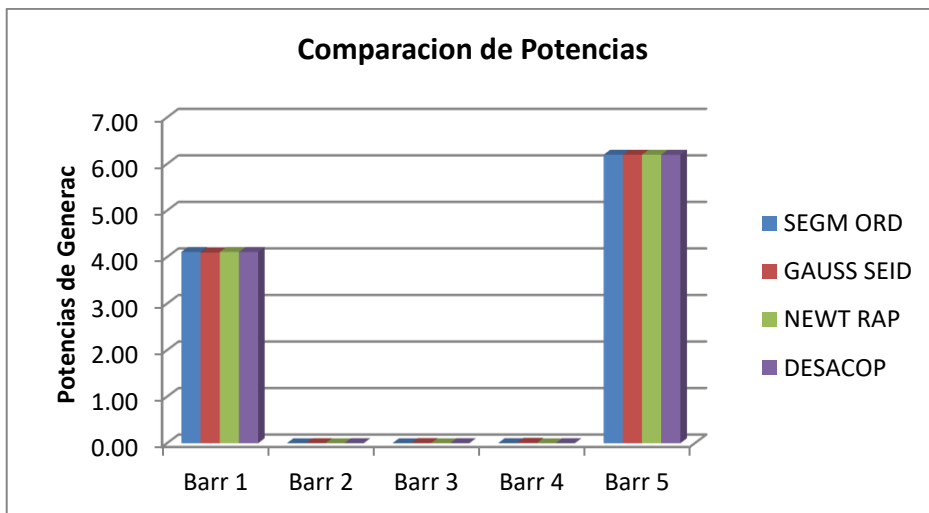


Gráfico N° 8.5:
COMPARACION DE POTENCIAS PARA 5 BARRAS



Cuadro N° 8.6:
DIFERENCIA DE RESULTADOS PARA EL CASO DE 5
BARRAS

Métodos	N° OR BARR	Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
SEGM - GAUSS	1	0	0,000	0,016
	2	0	0,030	0,002
	3	0	0,191	0,004
	4	0	0,331	0,010
	5	0	0,033	0,000
SEGM – NEW RAP	1	0	0,000	0,000
	2	0	0,000	0,000
	3	0	0,001	0,000
	4	0	0,001	0,000
	5	0	0,000	0,000
SEGM - DESAC	1	0	0,000	0,001
	2	0.0001	0,006	0,001
	3	0	0,004	0,001
	4	0	0,005	0,000
	5	0	0,001	0,001

El cuadro N° 8.5, pág. 93, muestra que los resultados para los módulos y ángulos de tensión, así como para la potencia, obtenidos mediante el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, coinciden prácticamente al 100 % con los calculados mediante los METODOS CLASICOS, tal como lo muestran también los gráficos 8.4 y 8.5. El cuadro N° 8.6 muestra que las diferencias son mínimas y del orden de apenas de las milésimas.

Estos resultados obtenidos para el SEP de 5 barras en análisis, muestran que el MÉTODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA propuesto, tiene la misma efectividad que los MÉTODOS CLÁSICOS, en cuanto se refiere al cálculo de tensiones y potencias.

c). **Análisis de indicadores**

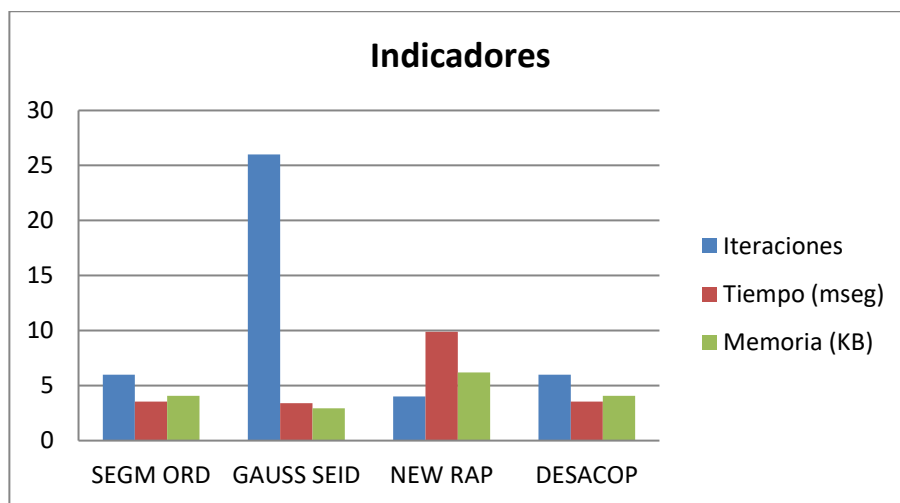
Cuadro N° 8.7:

RESULTADO DE INDICADORES DE ANALISIS PARA EL
CASO DE 5 BARRAS

Método	N° iteraciones	Tiempo (mseg)	Memoria (KB)
Segm Ordenada	6	3.55	4.08
Gauss Seidel	26	3.4	2.936
New Rapson	4	9.9	6.192
Desacopla Norm	6	3.55	4.08

Gráfico N° 8.6:

COMPARACIÓN DE INDICADORES PARA 5 BARRAS



De acuerdo a los resultados del cuadro N° 8.7 y el gráfico N° 8.6; se infiere lo siguiente:

- El número de iteraciones para el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, es mucho menor que el método Gauss Seidel, siendo igual para el caso DESACOPLADO y ligeramente mayor para NEWTON RAPSON.

- b) En cuanto al tiempo de ejecución y la cantidad de memoria utilizada, en el caso de la SEGMENTACIÓN ORDENADA resultan ser mucho menores que los utilizados por el método clásico de Newton Rapson, siendo casi similares para los métodos Gauss Seidel y Desacoplado.

Estos resultados nos muestran que el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, para el caso del SEP de 5 barras en análisis, tiene una mayor efectividad de cálculo en cuanto a VELOCIDAD y ESPACIO DE MEMORIA respecto del método NEWTON RAPSON y de igual efectividad que los otros dos METODOS CLASICOS. Sin embargo, el método de la SEGMENTACION ORDENADA, tiene un mayor nivel de confianza sobre el Desacoplado, ya que este es una versión simplificada del método Newton Rapson, y frente al método Gauss Seidel tiene un número mucho menor de iteraciones.

8.3 Análisis de resultados para el caso de catorce (14) barras de la IEEE.

a). Asignación numérica de barras

De acuerdo a la Fig. 7.3, pág.80 se tiene la siguiente asignación numérica:

- i) Para la solución por el método de Gauss Seidel, la numeración de barras es similar al de Segmentación ordenada (ORD)
- ii) Para la solución por los métodos de Newton Rapson y Desacoplado, la numeración de las barras es de forma aleatoria (AL). La correspondencia o equivalencia entre ambas formas de asignación numérica de barras es la siguiente:

Cuadro N° 8.8:
EQUIVALENCIA DE LA ASIGNACIÓN NUMÉRICA PARA 14 BARRAS

	Slack	PQ									PV			
ORD	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
AL	1	2	4	7	11	10	9	14	13	12	6	8	3	2

d). Análisis de las tensiones y potencias

Cuadro N° 8.9:
TENSIONES Y POTENCIAS DE GENERACIÓN PARA EL CASO DE 14
BARRAS DE LA IEEE

Métodos	Num. barras		Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
	ORD	AL			
SEGMENTAC ORDENADA	1		1.0605	0	2.3359
	2		1.0315	-8.9249	0.0002
	3		1.0239	-10.3286	0.0001
	4		1.0438	-13.4207	0.0002
	5		1.0445	-15.1954	0.0002
	6		1.0268	-15.2936	0.0000
	7		1.0267	-15.0424	0.0000
	8		1.0168	-16.3740	0.0000
	9		1.0461	-15.7253	0.0003
	10		1.0529	-15.7086	0.0002
	11		1.0700	-14.8688	0.4998
	12		1.0900	-13.4206	0.2856
	13		1.0100	-12.6379	0.2022
	14		1.0450	-4.9511	0.5092
GAUSS SEIDEL	1		1.0605	0	2.3274
	2		1.0316	-8.8890	0.0017
	3		1.0241	-10.2901	0.0009
	4		1.0439	-13.3587	0.0014
	5		1.0446	-15.1229	0.0009
	6		1.0268	-15.2221	0.0010
	7		1.0267	-14.9763	0.0003
	8		1.0169	-16.3038	0.0003
	9		1.0461	-15.6552	0.0010
	10		1.0529	-15.6396	0.0003
	11		1.0700	-14.8053	0.4995
	12		1.0900	-13.3587	0.2852
	13		1.0100	-12.6070	0.2015
	14		1.0450	-4.9329	0.5076

NEWTON RAPSON	1	1	1.0605	0	2.7213
	2	5	1.0314	-9.6793	0.0011
	3	4	1.0240	-11.1568	0.0005
	4	7	1.0439	-14.2374	0.0003
	5	11	1.0446	-15.9864	0.0001
	6	10	1.0268	-16.0984	0.0000
	7	9	1.0267	-15.8531	0.0003
	8	14	1.0168	-17.1725	0.0000
	9	13	1.0461	-16.5074	0.0001
	10	12	1.0530	-16.4885	0.0000
	11	6	1.0700	-15.6464	0.4989
	12	8	1.0900	-14.2374	0.2854
	13	3	1.0100	-13.5711	0.2025
	14	2	1.0450	-5.9977	0.4623
DESACOPLA DO NORMAL	1	1	1.0605	0	2.7222
	2	5	1.0313	-9.6816	0.0001
	3	4	1.0239	-11.1588	0.0001
	4	7	1.0438	-14.2384	0.0000
	5	11	1.0445	-15.9884	0.0006
	6	10	1.0268	-16.0992	0.0002
	7	9	1.0267	-15.8536	0.0004
	8	14	1.0170	-17.1696	0.0004
	9	13	1.0463	-16.5042	0.0054
	10	12	1.0521	-16.4952	0.0067
	11	6	1.0700	-15.6506	0.5020
	12	8	1.0900	-14.2384	0.2856
	13	3	1.0100	-13.5747	0.2029
	14	2	1.0450	-5.9998	0.4632

Gráfico N° 8.7

COMPARACION DE MÓDULOS DE TENSION PARA 14 BARRAS DE LA IEEE

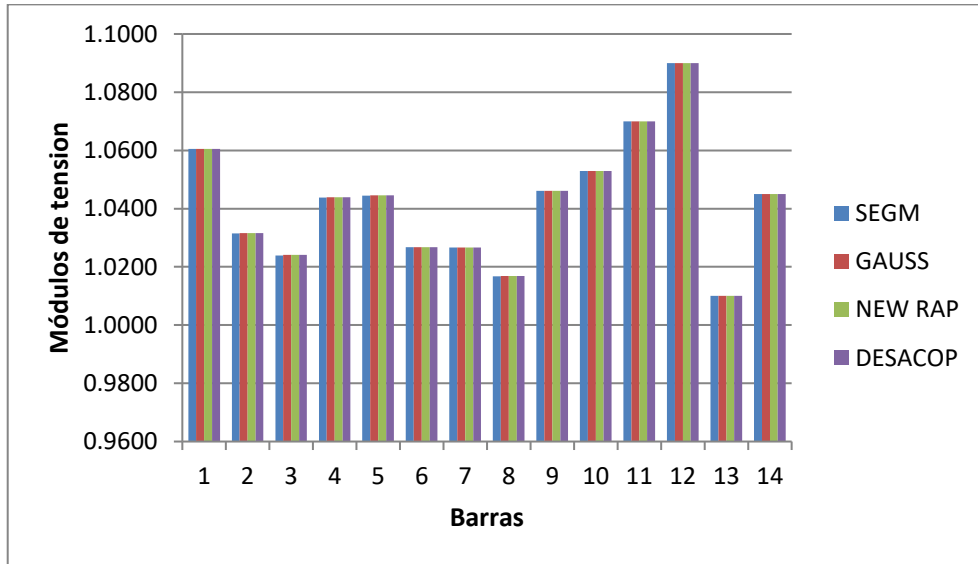
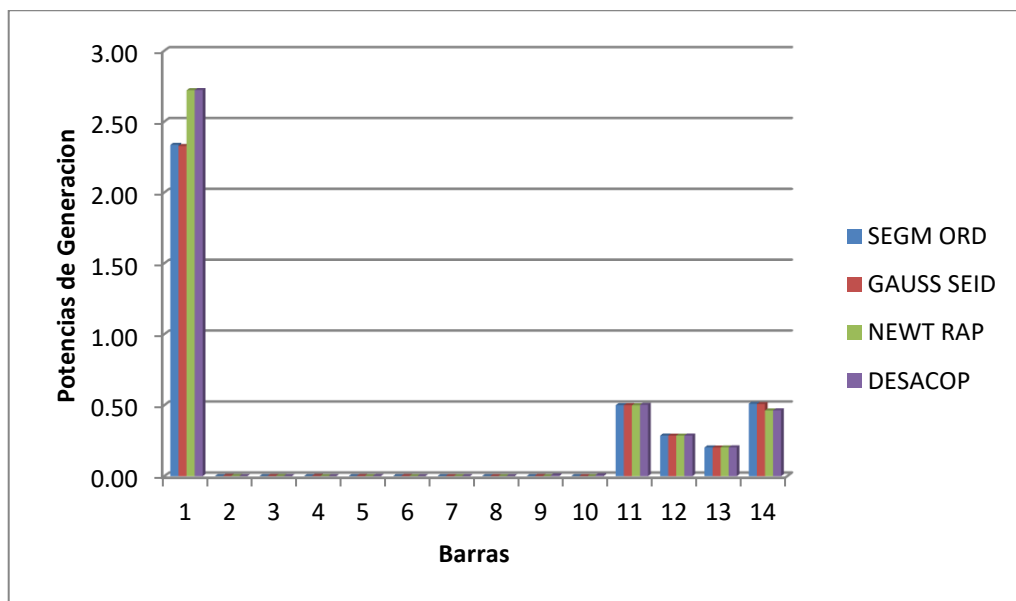


Gráfico N° 8.8

COMPARACIÓN DE LOS MÓDULOS DE POTENCIAS PARA 14 BARRAS DE LA IEEE



Cuadro N° 8.10
DIFERENCIA DE RESULTADOS PARA EL CASO DE 14
BARRAS DE LA IEEE

Métodos	N° OR BARR	Vm (p.u) módulos	Ang (°)	Pot. Gen (p.u) módulos
SEGM - GAUSS	1	0	0	0.0085
	2	0.0001	0.0359	0.0015
	3	0.0002	0.0385	0.0008
	4	0.0001	0.062	0.0012
	5	0.0001	0.0725	0.0007
	6	0	0.0715	0.001
	7	0	0.0661	0.0003
	8	0.0001	0.0702	0.0003
	9	0	0.0701	0.0007
	10	0	0.069	0.0001
	11	0	0.0635	0.0003
	12	0	0.0619	0.0004
	13	0	0.0309	0.0007
	14	0	0.0182	0.0016
SEGM – NEW RAP	1	0	0	0.3854
	2	0.0001	0.7544	0.0009
	3	0.0001	0.8282	0.0004
	4	0.0001	0.8167	0.0001
	5	0.0001	0.791	0.0001
	6	0	0.8048	0
	7	0	0.8107	0.0003
	8	0	0.7985	0
	9	0	0.7821	0.0002
	10	0.0001	0.7799	0.0002
	11	0	0.7776	0.0009
	12	0	0.8168	0.0002
	13	0	0.9332	0.0003
	14	0	1.0466	0.0469
SEGM - DESAC	1	0	0	0.3863
	2	0.0002	0.7567	0.0001
	3	0	0.8302	0
	4	0	0.8177	0.0002
	5	0	0.793	0.0004
	6	0	0.8056	0.0002
	7	0	0.8112	0.0004
	8	0.0002	0.7956	0.0004
	9	0.0002	0.7789	0.0051
	10	0.0008	0.7866	0.0065
	11	0	0.7818	0.0022
	12	0	0.8178	0
	13	0	0.9368	0.0007
	14	0	1.0487	0.046

El cuadro N° 8.9, pág. 98, muestra que los resultados para los módulos de tensión y potencia, obtenidos mediante el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, coinciden prácticamente al 100 % con los calculados mediante los METODOS CLASICOS, tal como lo muestran también los gráficos 8.7 y 8.8. En cuanto a los ángulos de tensión hay una pequeña diferencia respecto de los métodos New Rapson y Desacoplado, pero que no sobrepasa el 6 % en promedio, tal como lo muestra el cuadro N° 8.10 de las diferencias.

Estos resultados obtenidos para el SEP de 14 barras en análisis, muestran que el MÉTODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA propuesto, tiene la misma efectividad que los MÉTODOS CLÁSICOS, en cuanto se refiere al cálculo de tensiones y potencias.

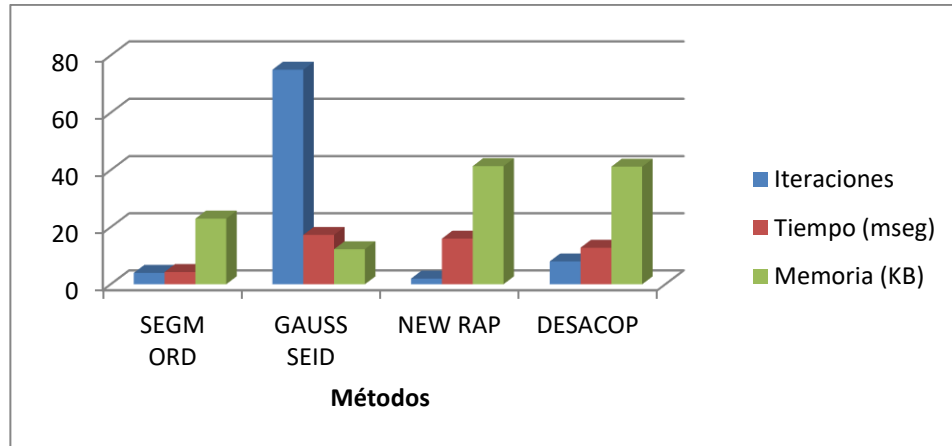
e). Análisis de indicadores

Cuadro N° 8.11

RESULTADO DE INDICADORES DE ANALISIS PARA EL
CASO DE 14 BARRAS DE LA IEEE

Método	N° iteraciones	Tiempo	Memoria
SEGM ORD	4	4.3 mseg	22.984 KB
GAUSS SEID	75	17.3 mseg	12.280 KB
NEW RAP	3	16 mseg	41.400 KB
DESACOP	8	12.8 mseg	41.200 KB

Gráfico N° 8.9
COMPARACIÓN DE INDICADORES PARA 14 BARRAS DE LA IEEE



De acuerdo a los resultados del cuadro N° 8.11 y el gráfico N° 8.9; se infiere lo siguiente:

- c) El número de iteraciones para el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, es mucho menor que el método Gauss Seidel y Desacoplado, siendo ligeramente mayor que Newton Rapson,
- d) En cuanto al tiempo de ejecución y la cantidad de memoria utilizada por el método de la SEGMENTACIÓN ORDENADA resultan ser mucho menores que los utilizados por el método clásico de Newton Rapson y Desacoplado normal, siendo algo mayores que para el método Gauss Seidel

Estos resultados nos muestran que el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, para el caso del SEP de 14 barras en análisis, tiene una mayor efectividad de cálculo en cuanto a VELOCIDAD respecto de los MÉTODOS CLASICOS.

En cuanto a la cantidad de MEMORIA utilizada, el METODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA utiliza espacios de almacenamiento mucho menores que los METODOS clásicos de NEWTON RAPSON y DESACOPLADO normal, siendo algo mayor que para GAUSS SEIDEL.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

1. Se ha logrado desarrollar un nuevo método de cálculo para el estudio del flujo de potencia, utilizando el concepto de la segmentación ordenada lo que da lugar a la segmentación matricial de las ecuaciones no lineales que gobiernan a los sistemas eléctricos de potencia en régimen permanente.
2. El método propuesto permite plantear las ecuaciones no lineales de los Sistemas Eléctricos de Potencia, en forma de bloques segmentados, es decir que se plantean un bloque de ecuaciones matriciales de tipo vectorial para las barras tipo PQ y otro bloque de ecuaciones matriciales de tipo vectorial para las barras tipo PV, para luego integrar ambos bloques en un solo sistema de ecuaciones matriciales y vectoriales que permite el cálculo integral de tensiones.
3. El método propuesto admite desarrollar programas computacionales en MAT LAB, mucho más ágiles y eficiente respecto de los METODOS CLASICOS, toda vez que su cálculo se desarrolla desde el punto de vista vectorial y matricial, sin utilizar durante el proceso el cálculo de los Jacobianos que son necesarios en el caso de los métodos clásicos de Newton Rapson y Desacoplado, que son los métodos más utilizados por la comunidad académica y otros.
4. Para los casos estudiados y analizados, el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA tiene la misma efectividad que los MÉTODOS CLÁSICOS, en cuanto se refiere al cálculo de tensiones y potencias; vale decir que los resultados de tensión y potencia que se obtienen por el método de la SEGMENTACION ORDENADA prácticamente son iguales en valor respecto de los obtenidos por los METODOS CLASICOS,

con pequeñas diferencias que no sobrepasan los milésimos y/o centésimos en promedio.

5. Así mismo para los casos estudiados y analizados, el método de la SEGMENTACION ORDENADA que se propone, tiene mejor efectividad en el procedimiento de cálculo del flujo de potencia, permitiendo reducir la VELOCIDAD Y CANTIDAD DE MEMORIA computacional utilizada, respecto de los METODOS CLASICOS, confirmando así la hipótesis planteada en el presente trabajo de tesis doctoral
6. Finalmente, teniendo en cuenta los resultados obtenidos para los INDICADORES estudiados y analizados, nos permite concluir que el método propuesto resultaría ser más ÓPTIMO y EFICAZ en el cálculo de tensiones y potencias de generación de un determinado Sistema Eléctrico de Potencia, respecto de los METODOS CLASICOS.

Recomendaciones

1. Se recomienda analizar y evaluar el método propuesto de la SEGMENTACION ORDENADA, aplicado a otros casos de mayor complejidad como pueden ser el estudio de fallas y el cálculo óptimo del flujo de potencias.
2. Se debe continuar analizando la efectividad del método propuesto, aplicado a otros casos donde se incluyan mayor número de barras, así como transformadores con TAP, y mayor número de sistemas de generación de voltaje controlado.
3. Se recomienda utilizar el método de la SEGMENTACION ORDENADA, para plantear el procedimiento de cálculo para el flujo de potencia mediante los MÉTODOS CLASICOS y evaluar su efectividad, tanto en tiempo como en espacios de memoria.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- [1]. James E. Van Ness; John H. Griffin; "*Elimination Methods for Load-Flow Studies*"; Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part III; Power Apparatus and Systems Volume: 80, Pages: 299–302; April 1961.
- [2]. H. E. Brown, G. K. Carter, H. H. Happ y C. E. Person, "*Power Flow Solution by Matrix Impedance Method*," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 82, Pages 1-10; 1963.
- [3]. W. F. Tinney y Clifford E. Hart, "*Power Flow Solution by Newton's Method*," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-86, pp. 1449-1456, Nov.1967.
- [4]. B. Stott y O. Alsac, "*Fast decoupled load flow*," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. PAS-93, pp. 859-869, Nov. 1967.
- [5]. D. Rajicic y A. Bose, "*A Modification to the Fast Decoupled Power Flow for Networks with High R/X Ratios*" IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 3, No. 2, pp. 743-746, Mayo. 1988.
- [6]. R. A. M. Amerongen, "*A General-Purpose Version of the Fast Decoupled Load Flow*," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 4, No. 2, pp. 760-770, Mayo. 1989.
- [7]. H. L. Nguyen, "*Newton-Raphson Method in Complex Form*," IEEE Trans. Power App. Syst., vol. 4, No. 2, pp. 591-595, Mayo. 1996.
- [8]. Lu. Wang and X Rong Li, "*Robust Fast decoupled power flow*", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 15, no. 1, pp. 208-215, February 2000.
- [9]. Eduardo Revollo E; Tesis "*Flujo de carga: Un método alternativo para su solución*"; Universidad. Industrial de Santander, Escuela de Ings. Eléctrica, Electrónica y Telecomunic; Bucaramanga 2004.

- [10]. J. Duncan Glover, Mulukuta S. Sarma And Thomas J. Overbye; “*Power System: Analysis and Design*”; 5ta Ed; CENGAGE Learning; Print U.S.A 2012.
- [11]. Carmen L. Tancredo B. “*Análise de Sistemas de Potência*”; EE- Universidad Federal de Rio de Janeiro; Departamento de Electrotécnica; Brasil; Marzo del 2005.
- [12]. Julio C. Fernández G. y Ever E. Fuentes L; Tesis: “*Modelo De Flujo Óptimo De Potencia Utilizando Técnicas De Optimización*”; Universidad Centroamericana “José Simeón Cañas”; 2011, el Salvador.
- [13]. Stevenson William D; “*Análisis de Sistemas eléctricos de Potencia*”; 2ª Ed. Edit. Mc Graw Hill; México 1985.
- [14]. Segmentación; diccionario de la lengua española (DLE); disponible en: <http://dle.rae.es/?id=XSIC56Z/>. Consultado: 15 enero del 2018, 21.00 horas.
- [15]. Segmentación De Mercado, Concepto y Enfoque. Disponible en: <https://es.slideshare.net/jquijanoc/segmentacion-y-mercados-metavirtualizacion>. Consultado el 18 de enero del 2018.
- [16]. “Segmentación y mercados meta virtualización”; Jesús Enrique Quijano Caicedo; disponible en: <https://es.slideshare.net/jquijanoc/segmentacion-y-mercados-metavirtualizacion>. Consultado el 18 de enero del 2018.
- [17]. THĒMIS-Revista de Derecho; PUCP; Roberto Santivañez, “*Mercado Eléctrico Peruano: Principios y Mecanismos De Operación y Sistemas De Precios*”. Disponible en: revistas.pucp.edu.pe/index.php/themis/article/download/11699/12253
- [18]. método. (n.d.) *Gran Diccionario de la Lengua Española*. (2016). Retrieved January 17 2018 from <https://es.thefreedictionary.com/método>

- [19]. "método" (s.f). En: *Definición.com* Disponible en: <https://definicion.de/metodo/> Consultado: 18 de enero del 2018, 9:20 am.
- [20]. "método" (s.f). En: *ConceptoDefinición.de* Disponible en: <https://conceptoDefinicion.de/metodo/> Consultado: 18 de enero del 2018, 9:30 am.
- [21]. "método" (s. f.). En: *Significados.com*. Disponible en: <https://www.significados.com/?s=método/>, Consultado: 18 de enero del 2018, 9:10 am.
- [22]. D. P. Kothari y I.J.Nagrath "*Modern Power System Analysis*"; 3rd Edt. Tata McGraw Hill Education Private Limited; New Delhi, La india 2009.
- [23]. J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma And Thomas J. Overbye: "*Sistemas de potencia: Análisis y diseño*", 3ra. Ed. THOMSON Learning; Print in México 2004.
- [24]. Grainger Jhon J, and Stevenson William D. "*Análisis de sistemas de potencia*". 1^a Ed; McGraw Hill; México 2001.
- [25]. J. Arrillaga And C.P. Arnold; "*Computer Analysis of Power Systems*". University of Canterbury, Christchurch, New Zealand; Edit. John Wiley & Sons, New Delhi, La india, Setiembre.1994.
- [26]. Alcir José Monticelli; "*Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*"; Centro de Pesquisas de Energia Elétrica_Petrobras; Edit. Edgar Blucher Ltda, Sao Paulo; Brasil 1983.
- [27]. Power Systems Test Case Archive: University of Washington. (On line) Available at: <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>

ANEXOS

ANEXO A

MATRIZ DE CONSISTENCIA

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA
<p>Problema General ¿Cómo optimizar el procedimiento del cálculo de flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, utilizando la segmentación matricial, y superar las dificultades que presentan los métodos clásicos, en cuanto a tiempo y cantidad de memoria computacional?</p> <p>Problemas Específicos</p> <p>a. Las ecuaciones matriciales para el cálculo del flujo de potencia, son planteadas considerando al SEP como un todo, y de manera indistinta para, las barras de tipo PV y PQ, lo que trae consigo que la solución del sistema de ecuaciones debe ser también como un todo.</p> <p>b. El sistema de ecuaciones clásico, para la solución del flujo de potencia, dificulta el desarrollo de programas computacionales ágiles y óptimos.</p> <p>c. Los métodos clásicos para calcular las tensiones en las barras del SEP, son ineficientes en cuanto a tiempo y cantidad de memoria computacional.</p>	<p>Objetivo General Desarrollar un método matemático para optimizar el procedimiento del cálculo del flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, que permita reducir el tiempo y la cantidad de memoria computacional, requeridos por los métodos clásicos, aplicando el concepto de la segmentación matricial de las ecuaciones de un SEP.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>d. Obtener las ecuaciones matriciales particionadas para las tensiones del SEP, a partir de la segmentación ordenada de las barras del SEP, en función de los tipos de barras PQ y PV.</p> <p>e. Desarrollar un PROGRAMA específico en MATLAB óptimo y ágil, para la prueba experimental del método de segmentación matricial para el cálculo de las tensiones en las barras del SEP.</p> <p>f. Aplicar el método propuesto a casos de SEP conocidos de la bibliografía y la IEEE, y calcular los niveles de tensión en las barras del SEP, y comparar con los obtenidos por los métodos clásicos, para los mismos casos, y contrastar los procedimientos en cuanto a cantidad de memoria y tiempos computacionales.</p>	<p>Hipótesis General La segmentación matricial de las ecuaciones de un SEP, optimizará el procedimiento de cálculo del flujo de potencia eléctrica en régimen permanente, y permitirá reducir el tiempo y la cantidad de memoria computacional, requeridos por los métodos clásicos.</p> <p>Hipótesis Específicas</p> <p>a. La segmentación ordenada de las barras del SEP, de acuerdo a los tipos de barra PQ y PV, permitirá la partición de las ecuaciones matriciales respectivas.</p> <p>b. La segmentación de las ecuaciones matriciales del SEP, permitirá desarrollar un PROGRAMA específico para calcular las tensiones de barra.</p> <p>c. Los niveles de tensiones de barra, obtenidos a partir del método propuesto, aplicados a SEP conocidos de la bibliografía y la IEEE, son comparables a los obtenidos por los métodos clásicos, con la diferencia que en el primer caso se optimiza el proceso en cuanto a tiempo y cantidad de memoria computacional.</p>	<p>1.0 V1: VARIABLE INDEPENDIENTE (Causa-Experiment): Método de Segmentación matricial</p> <p>1.1 VARIABLE DEPENDIENTE (efecto) Proceso de cálculo del flujo de potencia eléctrica.</p> <p>1.1.1 Indicadores -Tiempo de proceso -Cantidad de memoria</p> <p>2.0 V2: VARIABLE INDEPENDIENTE (Causa-Control): Método clásico</p> <p>2.1 VARIABLE DEPENDIENTE (Efecto) Proceso de cálculo del flujo de potencia eléctrica.</p> <p>2.1.1 Indicadores -Tiempo de proceso -Cantidad de memoria</p>	<p>Tipo de Investigación</p> <p>a) Según su finalidad, es de tipo aplicada</p> <p>b) Según su carácter, es de tipo experimental (causa-efecto)</p> <p>c) Según su naturaleza es de enfoque cuantitativo</p> <p>Método de Investigación Para lograr el propósito de la investigación, se plantea utilizar el <i>método de la investigación experimental</i>,</p> <p>Diseño de la Investigación La investigación tendrá el siguiente esquema de trabajo experimental: G ----- --> X1----- O1 G ----- --> X2----- O2 G: Grupo de experimentación (Sistema Eléctrico de potencia con n barras). X1: <i>Modelo de experimentación:</i> Método de la segmentación matricial. X2: <i>Modelo de control:</i> Métodos Clásicos. O1: <i>Resultados del procedimiento de cálculo: Variable V1</i> O2: <i>Resultados del procedimiento de cálculo: Variable V2</i></p>

ANEXO B

RESULTADOS DE LOS INDICADORES OBTENIDOS PARA LOS CASOS EN ESTUDIO

1. Determinación del tiempo de ejecución en función del perfilamiento del programa en MATLAB

a. Caso de 4 barras

Profile Summary

Generated 26-May-2018 19:50:07 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Segm 4N	1	0.809 s	0.010 s	
Dat_Segm4N	1	0.799 s	0.010 s	
xlsread	2	0.789 s	0.320 s	
actxserver	2	0.459 s	0.459 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:38:37 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Gauss 4N	1	0.811 s	0.010 s	
Datos_Gaus4N	1	0.791 s	0.020 s	
xlsread	2	0.771 s	0.290 s	
actxserver	2	0.450 s	0.450 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:16:01 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Newrap 4N	1	0.830 s	0.030 s	
DatosNR 4N	1	0.800 s	0.010 s	
xlsread	2	0.790 s	0.300 s	
actxserver	2	0.460 s	0.460 s	

b. Caso de 5 barras

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:28:42 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Segm_5N	1	0.813 s	0.020 s	
Dat_Segm5N	1	0.793 s	0.010 s	
xlsread	2	0.783 s	0.311 s	
actxserver	2	0.462 s	0.462 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:08:54 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Gauss_5N	1	0.829 s	0.010 s	
Datos_Gaus5N	1	0.799 s	0.010 s	
xlsread	2	0.789 s	0.319 s	
actxserver	2	0.449 s	0.449 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:19:02 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Newrap_5N	1	0.832 s	0.000 s	
DatosNR_5N	1	0.822 s	0.040 s	
xlsread	2	0.782 s	0.291 s	
actxserver	2	0.461 s	0.461 s	

c. Caso de 14 barras

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:03:15 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Segm 14N	1	0.821 s	0.010 s	
xlsread	2	0.801 s	0.330 s	
Dat Segm14N	1	0.801 s	0.000 s	
actxserver	2	0.450 s	0.450 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:12:04 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Gauss 14N	1	0.863 s	0.060 s	
xlsread	2	0.793 s	0.321 s	
Datos Gaus14N	1	0.793 s	0.000 s	
actxserver	2	0.452 s	0.452 s	

Profile Summary

Generated 26-May-2018 20:21:28 using cpu time.

Function Name	Calls	Total Time	Self Time*	Total Time Plot (dark band = self time)
Newrap 14N	1	0.885 s	0.010 s	
DatosNR 14N	1	0.875 s	0.070 s	
xlsread	2	0.805 s	0.332 s	
actxserver	2	0.453 s	0.453 s	

2. Determinación de la cantidad de memoria utilizada por los programas en MATLAB por el Método de la Segmentación Ordenada: Caso de 4 barras

```
>> whos
```

Name	Size	Bytes	Class	Attributes
A1	3x1	48	double	complex
A1q	2x1	32	double	complex
A1v	1x1	8	double	
Bv	1x1	16	double	complex
COSGv	1x1	8	double	
Gv	1x1	8	double	
Km	1x1	8	double	
Lineas	4x5	160	double	
NL	1x1	8	double	
Nodos	4x12	384	double	
Pc	3x1	24	double	
Pc1	1x1	8	double	
Pcv	1x1	8	double	
Pg	3x1	24	double	
Pgq	2x1	16	double	
Pgv	1x1	8	double	
Pv	1x1	8	double	
Qc	3x1	24	double	
Qc1	1x1	8	double	
Qcv	1x1	8	double	
Qgq	2x1	16	double	
Qv	1x1	8	double	
S	3x1	48	double	complex
SC	4x1	64	double	complex
SF	4x1	64	double	complex
SG	4x1	64	double	complex
Sc	3x1	48	double	complex
Sc1	1x1	16	double	complex
Scq	2x1	32	double	complex
Scv	1x1	16	double	complex
Sgq	2x1	16	double	
Siiv	1x1	16	double	complex
Sq	2x1	32	double	complex
Sv	1x1	16	double	complex
V1	1x1	8	double	
Va	3x1	48	double	complex
Vb	3x1	48	double	complex
Vf	4x1	64	double	complex

Vf	4x1	64	double	complex
Vi	3x1	48	double	complex
Vm	4x1	32	double	
Vq	2x1	32	double	complex
Vqi	2x1	32	double	complex
Vs	3x1	48	double	complex
Vv	1x1	16	double	complex
Vvi	1x1	16	double	complex
Vvm	1x1	8	double	
Y1	3x1	48	double	complex
Yb	3x3	144	double	complex
Ybij	1x1	16	double	complex
Ybs	3x3	144	double	complex
Ybus	4x4	256	double	complex
Ybv	1x3	48	double	complex
Yii	3x1	48	double	complex
Yiiv	1x1	16	double	complex
Yqq	2x2	64	double	complex
Yqv	2x1	32	double	complex
Zlinea	4x1	64	double	complex
av	4x1	32	double	
dV	3x1	24	double	
dp	1x1	8	double	
dv	1x1	8	double	
i	1x1	8	double	
it	1x1	8	double	
j	1x1	8	double	
k	1x1	8	double	
m	1x1	8	double	
n	1x1	8	double	
q	1x1	8	double	
tol	1x1	8	double	
z	3x3	144	double	complex
zqq	2x2	64	double	complex

SON: DOS MIL OCHOCIENTOS NOVENTA YSEIS BAYTES = 2.896 KB

3. Resumen de la determinación de la cantidad de memoria utilizada por los programas en MATLAB

METODO DE LA SEGMENTACION		
ITEM	CASO	MEMORIA
1	SEP DE 4 BARRAS	2.896 KB
2	SEP DE 5 BARRAS	4.08 KB
3	SEP DE 14 BARRAS	22.984 KB

METODO GAUSS SEIDEL		
ITEM	CASO	MEMORIA
1	SEP DE 4 BARRAS	2.248 KB
2	SEP DE 5 BARRAS	2.936 KB
3	SEP DE 14 BARRAS	12.280 KB

METODO NEWTON RAPSON		
ITEM	CASO	MEMORIA
1	SEP DE 4 BARRAS	4.12 KB
2	SEP DE 5 BARRAS	6.192 KB
3	SEP DE 14 BARRAS	41.400 KB

METODO NEWTON RAPSON DESACOPLADO		
ITEM	CASO	MEMORIA
1	SEP DE 4 BARRAS	4.088 KB
2	SEP DE 5 BARRAS	6.160 KB
3	SEP DE 14 BARRAS	41.200 KB

ANEXO C

RESUMEN DE RESULTADOS OFICIALES DEL CÁLCULO POR NEWTON RAPSON SEGÚN LA BIBLIOGRAFÍA Y LA IEEE PARA LOS CASOS APLICADOS.

- Resultados del cálculo de Tensiones y Potencias Para el Caso de 4 Barras Según el libro; “*Análisis de Sistemas de Potencia*”; por Jhon J. Grainger y William D. STEVENSON; Cap. IX; pág. 317; Ej. 9.2.

X-----Información de barras-----X				X-----Flujo de líneas-----X								
No. de barra	Nombre	Volts (p.u.)	Ángulo (grados)	X-----Generación-----X		X-----Carga-----X		Tipo de barra	A la Barra Nombre	Flujo de líneas		
				(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)			(MW)	(Mvar)	
1	Abedul	1.000	0.	186.81	114.50	50.00	30.99	compensación	2	Olmo	38.69	22.30
									3	Pino	98.12	61.21
2	Olmo	0.982	-0.976	0.	0.	170.00	105.35	PQ	1	Abedul	-38.46	-31.24
									4	Arce	-131.54	-74.11
3	Pino	0.969	-1.872	0.	0.	200.00	123.94	PQ	1	Abedul	-97.09	-63.57
									4	Arce	-102.91	-60.37
4	Arce	1.020	1.523	318.00	181.43	80.00	49.58	PV	2	Olmo	133.25	74.92
									3	Pino	104.75	56.93
Totales del área				504.81	295.93	500.00	309.86					

FIGURA 9.4

Solución de flujos de potencia por Newton-Raphson para el sistema del ejemplo 9.5. La base es de 230 kV y 100 MVA. En las tablas 9.2 y 9.3 se muestran los datos de las líneas y de las barras, respectivamente.

DE FLUJOS DE POTENCIA

2. Resultados del cálculo de Tensiones y Potencias Para el Caso de 5 Barras Según el libro; “Sistemas de potencia: Análisis y diseño”, por J. DUNCAN GLOVER, MULUKUTLA S. 3ra. Edic. pág. 277; Ejerc 6.9

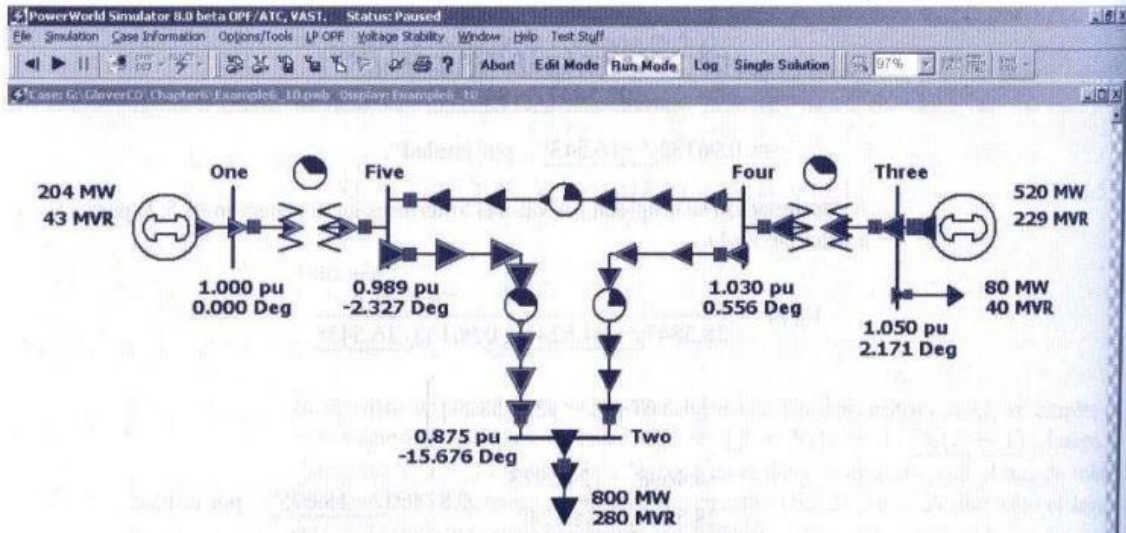


TABLA 6.6

Datos de salida del bus para el sistema de potencia dado en el ejemplo 6.9

Bus #	Magnitud del voltaje (por unidad)	Ángulo de fase (grados)	Generación		Carga		0.95 > V > 1.05
			PG (por unidad)	QG (por unidad)	PL (por unidad)	QL (por unidad)	
1	1.000	0.000	3.948	1.144	0.000	0.000	
2	0.834	-22.407	0.000	0.000	8.000	2.800	****
3	1.050	-0.597	5.200	3.376	0.800	0.400	
4	1.019	-2.834	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.974	-4.548	0.000	0.000	0.000	0.000	
TOTAL			9.148	4.516	8.800	3.200	

TABLA 6.7

Datos de salida de la línea para el sistema de potencia dado en el ejemplo 6.9

Línea #	Bus a bus		P	Q	S	Capacidad nominal excedida
	1	2				
1	2	4	-2.920	-1.392	3.232	
	4	2	3.036	1.216	3.272	
2	2	5	-5.080	-1.408	5.272	
	5	2	5.256	2.632	5.876	
3	4	5	1.344	1.504	2.016	
	5	4	-1.332	-1.824	2.260	

TABLA 6.8

Datos de salida del transformador para el sistema de potencia dado en el ejemplo 6.9

Trans. #	Bus a bus		P	Q	S	Capacidad nominal excedida
	1	2				
1	1	5	3.948	1.144	4.112	
	5	1	-3.924	-0.804	4.004	
2	3	4	4.400	2.976	5.312	
	4	3	-4.380	-2.720	5.156	

3. Resultados del cálculo de Tensiones y Potencias Para el Caso de 14 Barras Según la IEEE, obtenidos en: <https://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/ieee14cdf.txt>

```

08/19/93 UW ARCHIVE          100.0 1962 W IEEE 14 Bus Test Case
BUS DATA FOLLOWS          14 ITEMS
 1 Bus 1      HV 1 1 3 1.060  0.0      0.0      0.0      232.4  -16.9   0.0  1.060  0.0  0.0  0.0  0.0  0
 2 Bus 2      HV 1 1 2 1.045 -4.98    21.7     12.7     40.0   42.4   0.0  1.045  50.0 -40.0  0.0  0.0  0
 3 Bus 3      HV 1 1 2 1.010 -12.72   94.2     19.0     0.0   23.4   0.0  1.010  40.0  0.0  0.0  0.0  0
 4 Bus 4      HV 1 1 0 1.019 -10.33   47.8     -3.9     0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
 5 Bus 5      HV 1 1 0 1.020  -8.78    7.6      1.6      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
 6 Bus 6      LV 1 1 2 1.070 -14.22   11.2     7.5      0.0    12.2   0.0  1.070  24.0 -6.0  0.0  0.0  0
 7 Bus 7      ZV 1 1 0 1.062 -13.37    0.0      0.0      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
 8 Bus 8      TV 1 1 2 1.090 -13.36    0.0      0.0      0.0   17.4   0.0  1.090  24.0 -6.0  0.0  0.0  0
 9 Bus 9      LV 1 1 0 1.056 -14.94   29.5     16.6     0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.19 0
10 Bus 10     LV 1 1 0 1.051 -15.10    9.0      5.8      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
11 Bus 11     LV 1 1 0 1.057 -14.79    3.5      1.8      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
12 Bus 12     LV 1 1 0 1.055 -15.07    6.1      1.6      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
13 Bus 13     LV 1 1 0 1.050 -15.16   13.5     5.8      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
14 Bus 14     LV 1 1 0 1.036 -16.04   14.9     5.0      0.0    0.0   0.0  0.0    0.0  0.0  0.0  0.0  0
-999
BRANCH DATA FOLLOWS      20 ITEMS
 1  2 1 1 1 0 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 1  5 1 1 1 0 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 2  3 1 1 1 0 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 2  4 1 1 1 0 0.05811 0.17632 0.0340 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 2  5 1 1 1 0 0.05695 0.17388 0.0346 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 3  4 1 1 1 0 0.06701 0.17103 0.0128 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 4  5 1 1 1 0 0.01335 0.04211 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 4  7 1 1 1 0 0.0 0.20912 0.0 0 0 0 0 0 0.978 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 4  9 1 1 1 0 0.0 0.55618 0.0 0 0 0 0 0 0.969 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 5  6 1 1 1 0 0.0 0.25202 0.0 0 0 0 0 0 0.932 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 6 11 1 1 1 0 0.09498 0.19890 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 6 12 1 1 1 0 0.12291 0.25581 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 6 13 1 1 1 0 0.06615 0.13027 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 7  8 1 1 1 0 0.0 0.17615 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 7  9 1 1 1 0 0.0 0.11001 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 9 10 1 1 1 0 0.03181 0.08450 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 9 14 1 1 1 0 0.12711 0.27038 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
10 11 1 1 1 0 0.08205 0.19207 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
12 13 1 1 1 0 0.22092 0.19988 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
13 14 1 1 1 0 0.17093 0.34802 0.0 0 0 0 0 0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
-999

```

4. Resultados para el caso de 14 barras de la IEEE, obtenidos en la tesis “Compatibilidad de Métodos de Cálculo de Flujos AC y DC en Sistemas de Potencia” por Sebastián J. Oliva Henríquez, del Departamento de Ingeniería Eléctrica, de la Universidad de Chile, 2008.

IEEE14

Newton's method power flow converged in 2 iterations.
Converged in 0.02 seconds

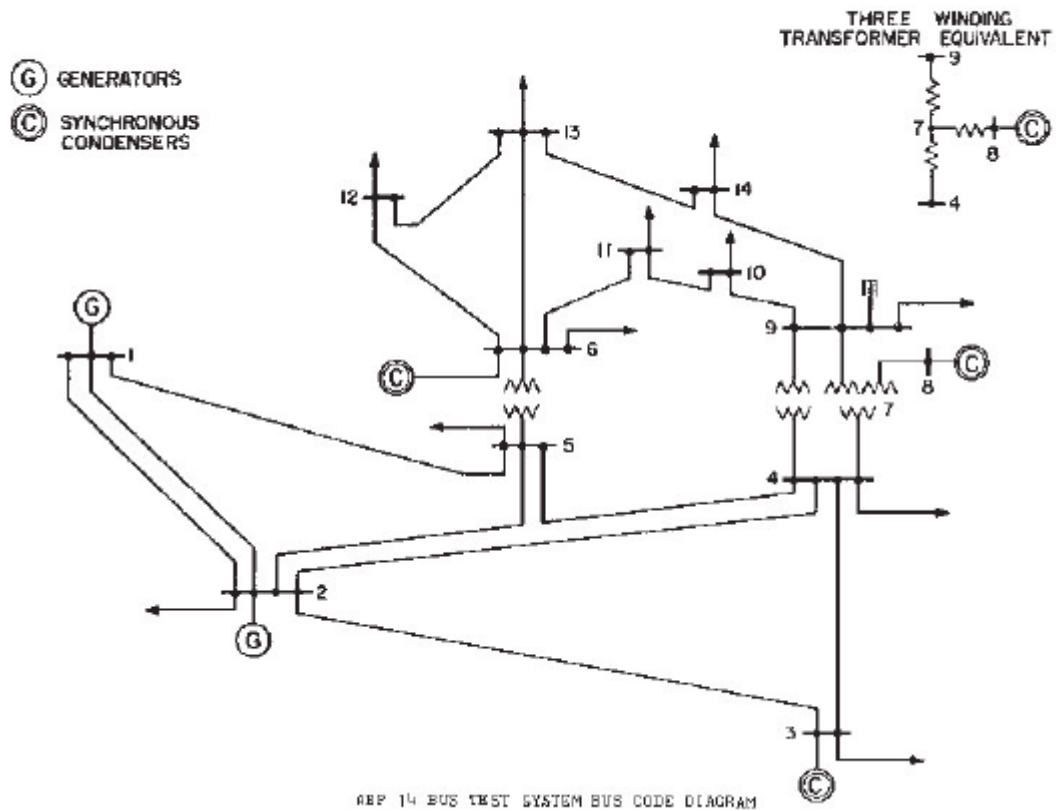
Bus Data

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag (pu)	Ang (deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.0677	0.0000	232.39	0.00	-	-
2	1.0450	-4.8078	39.86	28.09	21.70	12.70
3	1.0100	-12.5434	0.00	24.52	94.20	19.00
4	1.0186	-10.1479	-	-	47.80	-3.90
5	1.0210	-8.6200	-	-	7.60	1.60
6	1.0700	-14.0530	0.00	11.89	11.20	7.50
7	1.0619	-13.1936	-	-	-	-
8	1.0900	-13.1936	0.00	17.36	-	-
9	1.0563	-14.7728	-	-	29.50	16.60
10	1.0513	-14.9312	-	-	9.00	5.80
11	1.0571	-14.6239	-	-	3.50	1.80
12	1.0552	-14.9075	-	-	6.10	1.60
13	1.0504	-14.9887	-	-	13.50	5.80
14	1.0358	-15.8667	-	-	14.90	5.00
Total:			272.25	81.86	259.00	73.50

Branch Data

Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus Injection		To Bus Injection		Loss (I ² * Z)	
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1	2	156.8191	-6.75	-152.6360	13.63	4.183	12.77
2	1	5	75.5742	6.75	-72.8240	-0.77	2.750	11.35
3	2	3	73.1758	3.57	-70.8564	1.58	2.319	9.77
4	2	4	56.1097	-2.08	-54.4344	3.55	1.675	5.08
5	2	5	41.5076	0.27	-40.6066	-1.22	0.901	2.75
6	3	4	-23.3436	3.94	23.7155	-4.31	0.372	0.95
7	4	5	-61.2814	14.41	61.7913	-12.80	0.510	1.61
8	4	7	28.1019	-9.43	-28.1019	11.12	0.000	1.69
9	4	9	16.0984	-0.32	-16.0984	1.63	0.000	1.30
10	5	6	44.0394	13.19	-44.0394	-8.75	0.000	4.44
11	6	11	7.3266	3.48	-7.2720	-3.36	0.055	0.11
12	6	12	7.7802	2.49	-7.7085	-2.34	0.072	0.15
13	6	13	17.7326	7.17	-17.5211	-6.76	0.211	0.42
14	7	8	-0.0000	-16.91	0.0000	17.36	0.000	0.45
15	7	9	28.1019	5.79	-28.1019	-4.99	0.000	0.80
16	9	10	5.2533	4.30	-5.2402	-4.26	0.013	0.03
17	9	14	9.4469	3.66	-9.3300	-3.41	0.117	0.25
18	10	11	-3.7598	-1.54	3.7720	1.56	0.012	0.03
19	12	13	1.6085	0.74	-1.6023	-0.74	0.006	0.01
20	13	14	5.6234	1.70	-5.5700	-1.59	0.053	0.11
Total:							13.250	54.08

Sistema IEEE de 14 barras - IEEE14



ANEXO D

CODIGO DEL PROGRAMA EN MATLAB PARA EL CÁLCULO DEL FLUJO DE POTENCIA POR EL METODO DE LA SEGMENTACION ORDENADA

```
*****
%CALCULO DEL FLUJO DE POTENCIA PARA 4 BARRAS POR SEGMENTACION ORDENADA
*****
clear; clc
Dat_Segm4N
%Se forma la matriz Ybus
Zlinea=Lineas(:,3)+1i*Lineas(:,4); Ybus=zeros(n,n);
for m=1:NL
    Ybij=-1/Zlinea(m); i=Lineas(m,1); j=Lineas(m,2);
    Ybus(i,j)=Ybij; Ybus(j,i)=Ybij;
end
%Elementos de la diagonal
for i=1:n
    for j=1:NL
        if i==Lineas(j,1), Ybus(i,i)=Ybus(i,i)+(1/Zlinea(j))+1i*Lineas(j,5); end
        if i==Lineas(j,2), Ybus(i,i)=Ybus(i,i)+(1/Zlinea(j))+1i*Lineas(j,5); end
    end
end
Y1=-Ybus(2:n,1); Ybs=Ybus(2:n,2:n); Yii=diag(Ybs); %Y1 se positivizan;
Yb=-(Ybs+diag(Yii)); A1=Y1*Y1; % Yb se positivizan; A1 son positivas
%Segmentacion de Ybus y Ydiag:
A1q=A1(1:q); A1v=A1(q+1:k);
Yqq=Ybs(1:q,1:q); Yqv=Ybs(1:q,q+1:k); Yiiv=Yii(q+1:k); Ybv=Yb(q+1:k,1:k);
%Constantes:
z=Ybs\diag(ones(k,1)); zqq=Yqq\diag(ones(q,1));
Siiv=conj(diag(Yiiv)*Vvm.^2);
tol=0.0001;
%Valores iniciales
Vi=Vm.*ones(k,1); Vqi=Vi(1:q); Vvi=Vvm;
it=0;
while it<=50
    Vq=zqq*(conj(diag(Vqi)\Sq)+A1q-Yqv*Vvi); Va=[Vq; Vvi]; %MVq
    Bv=conj(Ybv*Va+A1v); Km=diag(Vvm)*abs(Bv); COSGv=diag(Km)\dp;
    Gv=acos(COSGv); Qv=imag(Siiv)-diag(Km)*sin(Gv); Sv=Pv+1i*Qv; S=[Sq; Sv];
    dv=Gv-angle(Bv); Vv=diag(Vvm)*(cos(dv)+1i*sin(dv)); Vb=[Vq; Vv];
    %Reajuste de Vb:
    Vb=z*(conj(diag(Vb)\S)+A1); Vq=Vb(1:q); Vv=Vb(q+1:k);
    dv=angle(Vv); Vv=diag(Vvm)*(cos(dv)+1i*sin(dv)); Vs=[Vq; Vv]; dV=abs(Vi-Vs)
    %Vqi=Vq; Vvi=Vv; Vi=[Vqi; Vvi];
    if dV<tol
        Vs;
        break %Si la respuesta es SI, se llego a la convergencia,
    else
        Vqi=Vq; Vvi=Vv; Vi=[Vqi; Vvi]; %Si la respuesta es NO,se continua las iter
    end
    it=it+1;
end
Flujpot
*****
```