

# Herramienta de Cálculo de Flujo de Potencia

Modulo Implementado para el Analizador de Sistemas de Potencia –ASP– de la UNEFA

Frednides Guillén Guerra<sup>(1)</sup>

Ingeniero Electricista, *Profesor Instructor*

+58 (416) 3420893

[frednides@hotmail.com](mailto:frednides@hotmail.com)

Francisco M. Gonzáles-Longatt<sup>(1) (2)</sup>

Ingeniero Electricista, *Profesor Asistente*

+58 (414) 453-2014

[fglongatt@hotmail.com](mailto:fglongatt@hotmail.com)

<sup>(1)</sup>Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada UNEFA  
Maracay, Venezuela +58 (243) 5546954, Fax: +58 (243) 5546318

<sup>(2)</sup> Actualmente está de permiso completando el Doctorado en Ingeniería en la Universidad Central de Venezuela, Caracas Venezuela, +58 (212) 6053231, [flongatt@elecrisc.ing.ucv.ve](mailto:flongatt@elecrisc.ing.ucv.ve)

**Resumen.** *En este trabajo se describe la aplicación para la simulación del flujo de potencia empleando la herramienta computacional ASP: Analizador de Sistemas de Potencia. Ésta está en la capacidad de efectuar cálculos de fallas, flujo de carga y estabilidad transitoria multimáquina. Para el flujo de potencia puede seleccionar entre tres métodos: Newton-Raphson, desacoplado rápido y Gauss-Seidel acelerado. Para demostrar la utilidad y precisión del ASP, se ha tomado un ejercicio académico típico, un sistema de tres barras, cuyos resultados están validados y se efectuó la simulación con el ASP y el programa Winflu, presentándose el contraste en los resultados.*

**Palabras claves:** *Sistema de Potencia, flujo de potencia, software, simulación, Analizador de Sistemas de Potencia –ASP–.*

## I. INTRODUCCIÓN

La planeación, diseño y operación de sistemas de potencia comerciales e industriales requiere estudios de ingeniería para evaluar el comportamiento, confiabilidad, seguridad y aspectos económicos del sistema en el presente como en el futuro. Pero complejidad presente en los modernos sistemas de potencia hace los estudios difíciles, tediosos, y consumidores de tiempo si son efectuados manualmente. Ante esto, la computadora digital ofrece a los ingenieros una poderosa herramienta para efectuar estudios en forma eficiente, permitiendo el

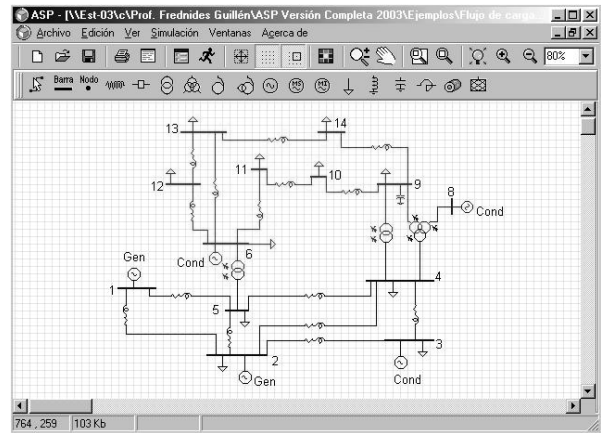
diseño óptimo a mínimo costo sin importar la complejidad del sistema [1]. Los avances en la tecnología de computación, como la introducción de la computadora personal con sus excelentes capacidades graficas, no solo han reducido los costos de cálculo, sino también el tiempo de ingeniería para el uso del programa. Por todas estas ventajas en el año 2000 surgió la propuesta de un Trabajo Especial de Grado (TEG) titulado "Diseño e Implementación de un Programa para el Análisis y Simulación de Cortocircuito y Flujo de Carga en los Sistemas de Potencias" [2], con el objetivo de proveer a la Universidad Nacional Experimental Politécnica de la Fuerza Armada (UNEFA) de un programa para acometer los estudios básicos necesarios en los sistemas de potencia, dando origen al programa de simulación denominado: Analizador de Sistemas de Potencia, ASP. Para septiembre de 2001, la UNEFA crea la línea de investigación: Simulación de Sistemas de Potencia, la cual tiene como objetivo principal: actualizar, desarrollar y proponer modelos y métodos

computacionales para el análisis de sistemas de potencia. El ASP, posee una concepción ambivalente: es una herramienta de uso didáctico que sirve a los estudiantes para reforzar los conocimientos teóricos adquiridos y, además provee a la UNEFA de un campo fértil para efectuar trabajos de investigación.

La estructura modular abierta del ASP le permite su fácil actualización y mejora, actualmente se dispone de los módulos: cortocircuito, flujo de carga y estabilidad transitoria; este último surgió del TEG "Diseño e Implementación del Módulo de Estabilidad Transitorio Multimáquina" [3], y existen prometedoras áreas para continuar investigando. Las características principales de ASP su capacidad para simular grandes sistemas son la rapidez y confiabilidad en los cálculos, facilidad de empleo y alta calidad gráfica, lo que hace al programa altamente visual y amigable al usuario.

## II. ESTRUCTURA MODULAR DEL SIMULADOR

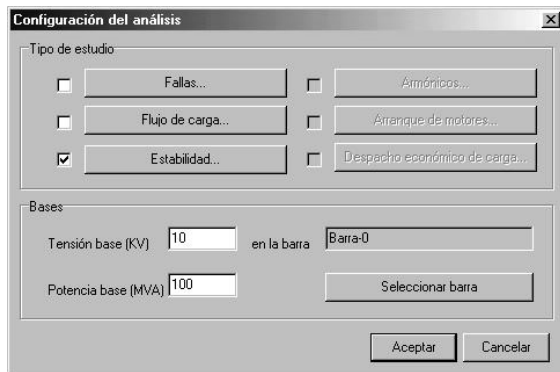
El ASP está diseñado para trabajar en un computador personal con mínimos requerimientos en forma monousuario bajo ambiente Microsoft Windows™ para proveer una excelente interfaz grafica al usuario (IGU) altamente amigable. Fue desarrollado con ayuda del compilador Delphi™ 4, cuyo lenguaje de programación es Object Pascal para Windows 4. La IGU del ASP consiste en un ambiente de trabajo donde se construye el diagrama unifilar del sistema a estudiar a partir de los elementos ubicados en la barra de componentes, y con la ayuda de menús interactivos se introducen los datos de los elementos y se programa son presentados a través de reportes ya sean impresos o exportables: datos del sistema y resultados. Además brinda la posibilidad de exportar el diagrama unifilar en formato EMF (Microsoft Windows™ Metafile).



**Figura 1. Vista del Ambiente de trabajo de  
ASP**

En la figura 1 se muestra el ambiente principal del programa, este consta de un área de dibujo del diagrama unifilar, un menú, una barra estándar y una barra de herramientas. En la barra estándar se encuentran los iconos de abrir, cerrar, guardar, imprimir, y las herramientas del zoom. En la barra de componentes se encuentran los distintos elementos de un sistema de potencia (barras, nodos, líneas, cables, interruptores, transformadores de dos y tres devanados, generador sincrónico, motor sincrónico, cargas, reactores shunt capacitivos e inductivos, reactores serie y sistema exterior). En el menú *Simular/Configuración* se puede seleccionar

el tipo de estudio a realizar, para cada uno existen ventanas para configurar parámetros y/o métodos del análisis.



**Figura 2. Cuadro de diálogo de la configuración del análisis**

Se puede configurar también las bases del sistema; por defecto sugiere la primera barra dibujada como la barra base, la tensión base igual al voltaje nominal de la barra y una potencia base de 100 MVA; estos pueden ser ajustados por el usuario. Esto tiene buena aplicación a pedagógica ya que se genera un reporte con los datos del sistema de potencia en estudio, calculados en por unidad sobre las bases previamente configuradas.

El ASP actualmente consta de tres módulos de análisis:

A. Fallas.

B. Flujo de carga

C. Estabilidad transitoria multimáquina

### A. Fallas

Este módulo permite realizar el estudio de fallas shunt y serie. Las fallas shunt consideradas son por cortocircuito: trifásico, bifásico a tierra, bifásico y monofásico, permitiendo incluir impedancia de falla. El cortocircuito cumple con la IEC 60909. Para las fallas serie solamente se considera la ruptura de línea: una y dos fases.

### B. Flujo de carga

En este módulo se puede calcular el flujo de carga de un sistema de potencia, por los métodos de Newton Raphson, Desacoplado Rápido y Gauss Seidel acelerado. Para ellos se configura la tolerancia o margen de error y el número máximo de iteraciones, para el método de Gauss Seidel se configura además el factor de aceleración. Este modulo genera un reporte de la tensión de operación en cada barra del sistema, y los flujos de potencia a través de las líneas y transformadores.

### C. Estabilidad transitoria multimáquina

Este modulo permite efectuar las simulaciones para analizar la estabilidad transitoria de un sistema de potencia cuando ocurre una perturbación por falla trifásica en barra o en línea y los eventos de estudio son: falla sin despeje, falla con despeje exitoso sin cambio en la configuración de la red, falla en extremo de línea con despeje exitoso y falla en línea con despeje exitoso. Este módulo emplea para la resolución de las ecuaciones diferenciales, el método de Runge-Kutta de cuarto orden, ya que los métodos de cuarto orden han sido los mas comúnmente utilizados en el análisis de estabilidad transitoria y tienen la ventaja que el error por redondeo es minimizado [4].

### III. MÉTODOS DE SOLUCIÓN DEL FLUJO DE CARGA EMPLEADO POR EL ASP:

El flujo de potencia se refiere a la distribución, a lo largo del sistema de transmisión hasta las cargas, de la potencia eléctrica producida en los centros de generación. En general, el flujo de potencia

es obtener la solución eléctrica en condiciones de régimen permanente, es decir, para poder determinar bajo ciertas condiciones de generación carga, las tensiones y las corrientes en aquellas partes del sistema de interés [5].

**Método de Gauss-Seidel.** Es el más sencillo de todos los, métodos de flujo de potencia; la cantidad de operaciones aritméticas que se realizan en el proceso iterativo es relativamente pequeña (la aritmética es basada en variables complejas); aunque este realiza cada iteración en menos tiempo, su convergencia es lenta (requiere de muchas iteraciones) y es proporcional al número de barras; un factor de aceleración apropiado ayuda en la convergencia reduciendo el número de iteraciones hasta a un 75% [6]. Una de las ventajas de éste método es que los requerimientos de memoria no son tan exigentes como en los otros métodos. Este método consiste en calcular los voltajes en las barras del sistema a partir de los valores estimados de voltaje en las otras barras, y

de las potencias  $P_i$  y  $Q_i$  totales inyectadas a través de la barra  $i$ . Luego se repite este procedimiento.

La ecuación de voltaje en las barras del sistema es [7]:

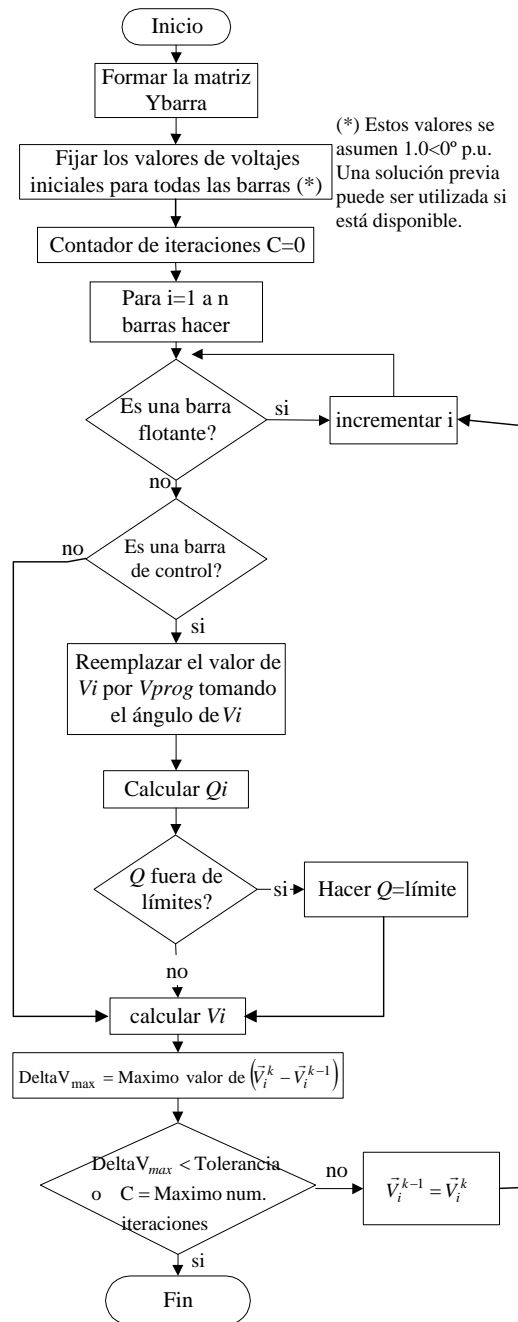
$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left( \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \right) \quad (1)$$

Para minimizar los tiempos de ejecución, de la ecuación (1) se calcula y almacena previamente al proceso iterativo en un vector, los siguientes términos:

$$A_i = \frac{P_i - jQ_i}{Y_{ii}} \quad (2)$$

El elemento  $Y_{ii}$  corresponde al elemento de la columna  $i$  y fila  $i$  de la matriz de admitancia de barra. Esto se ha implementado ya que los valores almacenados en el vector  $A$  se calculan una sola vez y antes del proceso iterativo, a excepción cuando  $i$  corresponde a la barra compensación (slack), o a una barra de control. El vector  $A$  se actualiza sistemáticamente para las barras de control ya que  $Q$  debe ser actualizada para estas barras a través de la siguiente ecuación:

$$Q_i = -Im(V_i^* \sum_{j=1}^n Y_{ij} V_j) \quad (3)$$



**Figura 3. Diagrama de Flujo del método de Gauss-Seidel [9]**

Para acelerar la convergencia del método de Gauss-Seidel, se hace es que a la solución

actual de voltajes  $\vec{V}^{(k)}$ , se le aplica factor de aceleración  $\alpha$  de la siguiente manera:

$$V_i^{(k)} \text{ acelerado} = V_i^{(k-1)} + \alpha(V_i^{(k)} \text{ no acelerado} - V_i^{(k-1)}) \quad (4)$$

Donde  $\vec{V}^{(k-1)}$  es le vector de solución de voltajes de la iteración anterior. Si  $\alpha=1$  implica que no hay aceleración alguna. El criterio empleado para la convergencia es: al final de cada iteración, se almacena en una variable de tipo real *De1taVmax*, la mayor diferencia que existe entre la solución actual acelerada y la anterior. Dicha diferencia se compara con la precisión establecida por el usuario y cuando es menor, la solución ha sido alcanzada. Un conteo de las iteraciones es llevado con la finalidad de abortar el proceso iterativo cuando la solución no converge o no logra alcanzar la precisión requerida; el número máximo de iteraciones lo establece el usuario. En la figura 3 se muestra diagrama de bloques del método de solución Gauss-Seidel implementado en el ASP.

### Técnica iterativa de Newton-Raphson.

Este puede aplicarse para resolver el

problema de flujo de carga al expresar la ecuación de potencia en la barra en forma polar [6]:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \\ Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i V_j Y_{ij}| \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \end{cases} \quad (5)$$

Donde  $i$  toma todos los valores excepto el número de la barra snack u oscilante,  $P_i$  es la potencia real y  $Q_i$  es la potencia reactiva, totales que entran a la red a través de una barra típica  $i$  [6]. Entonces el conjunto de ecuaciones lineales que relaciona los cambios en las potencias con los cambios en las magnitudes de las tensiones y sus ángulos puede ser escrito [7]:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [J_1] & [J_2] \\ [J_3] & [J_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} \quad (6)$$

En los sistemas de potencia altamente inductivos,  $P_i$  está estrechamente relacionado con el ángulo  $\delta_i$  del voltaje y  $Q_i$  está estrechamente relacionado con  $|V_i|$ ; por lo tanto los elementos de  $[J_1]$  y  $[J_4]$  tienden a ser mayores en magnitud que los elementos de  $[J_2]$  y  $[J_3]$ .  $[J]$  se denomina matriz

Jacobiano cuyos elementos se calculan

como sigue:

Para  $[J_1]$ :

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i V_j Y_{ij}| \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad \text{para } i \neq j$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_p V_q Y_{pq}| \text{sen}(\theta_{pq} + \delta_p - \delta_q)$$

Para  $[J_2]$ :

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad \text{para } i \neq j$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

Para  $[J_3]$ :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad \text{para } i \neq j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_i V_j Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

Para  $[J_4]$ :

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i Y_{ij}| \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j) \quad \text{para } i \neq j$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = 2|V_i Y_{ii}| \text{sen} \theta_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |V_j Y_{ij}| \text{sen}(\theta_{ij} + \delta_i - \delta_j)$$

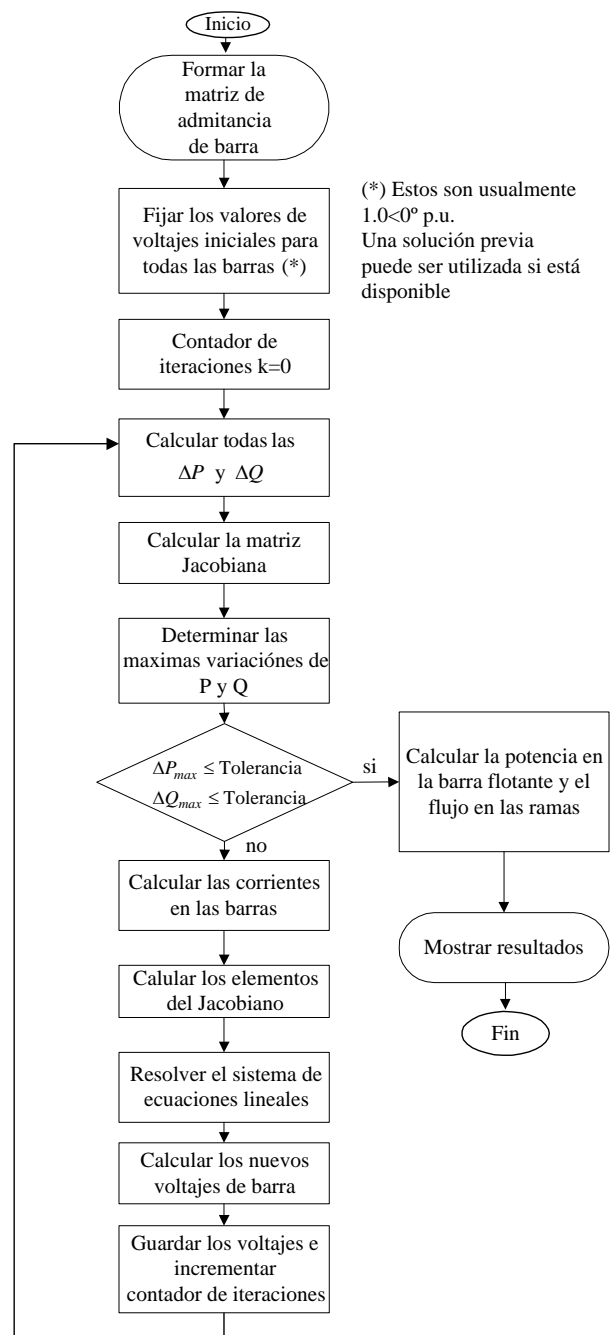


Figura 4. Diagrama de flujo del método de

**Newton-Raphson [9]**

**Método Desacoplado Rápido.** Cuando se resuelven sistemas de transmisión de potencia de gran escala este método es una



alternativa para mejorar la eficiencia computacional y reducir los requisitos de memoria [5]. El hace uso de una versión aproximada del procedimiento de Newton-Raphson en el que se anulan las submatrices Jacobianas  $[J_2]$  y  $[J_3]$ . Esto se justifica por medio de las dos observaciones siguientes [6]: un cambio en el ángulo del voltaje afecta principalmente a los flujos de potencia activa en las líneas de transmisión mientras que la potencia reactiva no se ve afectada relativamente; un cambio en la magnitud del voltaje en una barra afecta principalmente al flujo de reactivos en las líneas de transmisión, dejando sin cambio significativo a la potencia real. El hecho de anular a  $J_2$  y  $J_3$  trae consigo tres ventajas importantes: primero, se requiere de menos memoria ya que sólo se almacena a  $J_1$  y  $J_4$ ; segundo, el tiempo de ejecución por iteración se ve drásticamente reducido; y tercero, las ecuaciones están desacopladas, es decir, se tienen dos sistemas de ecuaciones prácticamente independientes [6].

$$[J_1] \begin{bmatrix} \Delta\delta_k \\ \vdots \\ \Delta\delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta P_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$[J_4] \begin{bmatrix} \Delta V_k \\ |V_k| \\ \vdots \\ \Delta V_n \\ |V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

En un sistema de transmisión de potencia que está bien diseñado y apropiadamente operado se tiene que:

- Las diferencias angulares entre dos barras típicas del sistema son generalmente tan pequeñas que:

$$\cos(\delta_1 - \delta_2) \approx 1 \text{ y } \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) \approx \delta_1 - \delta_2 \quad (9)$$

- Las susceptancias de las líneas  $B_{ij}$  son muchas veces más grandes que las conductancias  $G_{ij}$ ;

$$G_{ij} \text{sen}(\delta_1 - \delta_2) \ll B_{ij} \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (10)$$

- La potencia reactiva  $Q_i$  que se inyecta a cualquier barra  $i$  del sistema durante la operación normal es mucho menor que la potencia reactiva que fluiría si todas las líneas de la barra estuvieran cortocircuitadas a tierra.

$$Q_i \ll |V_i|^2 B_{ij} \quad (11)$$

Con las observaciones anteriores se llega rápidamente a la conclusión que los elementos de  $J_1$  y  $J_4$  pueden simplificarse a:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_j| \frac{\partial Q_j}{\partial |V_j|} \cong -|V_i V_j| B_{ij} \quad (12)$$

Cuando se multiplica la primera fila de  $J_1$  por el vector de correcciones angulares y se iguala a la corrección de potencia real

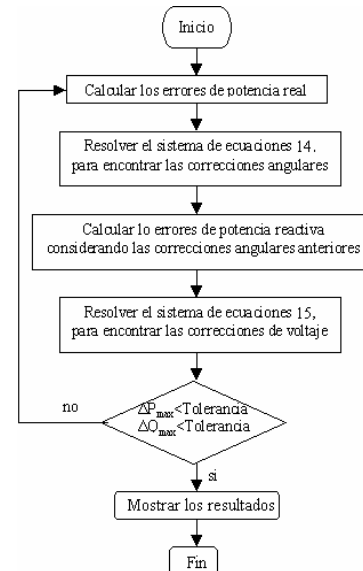
$$-|V_k V_k| B_{kk} \delta_k - |V_k V_j| B_{kh} \Delta \delta_j \dots = \Delta P_k \quad (13)$$

Se observa que una simplificación adicional puede llevarse a cabo al dividir ambos miembros de la ecuación entre el voltaje  $V_k$ . Esta simplificación lleva a concluir que la matriz  $[J_1]$  y  $[J_4]$  ya no son derivadas parciales sino que sus elementos están compuestos por las susceptancias de la matriz  $[Y_{barra}]$ . El problema de los flujos de potencia se ha reducido a resolver separadamente los siguientes sistemas de ecuaciones lineales:

$$\begin{bmatrix} -B_{11} & \dots & -B_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -B_{n1} & \dots & -B_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_1 \\ \vdots \\ \Delta \delta_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta P_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta P_n}{|V_n|} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -B_{11} & \dots & -B_{13} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ -B_{31} & \dots & -B_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta |V_1| \\ \vdots \\ \Delta |V_n| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta Q_1}{|V_1|} \\ \vdots \\ \frac{\Delta Q_n}{|V_n|} \end{bmatrix} \quad (15)$$

La estrategia empleada para la solución es [6]:



### Condiciones iniciales

Los métodos numéricos aplicados a la solución del flujo, requieren de valores iniciales de voltaje para comenzar el proceso iterativo. Los valores de magnitud y ángulo del voltaje ( $V$  y  $\theta$ ) dados inicialmente como “*semillas*” al proceso iterativo, estos influyen directamente en la rapidez con que se obtienen (convergen) los resultados, pueden incluso afectar la convergencia. Para establecer “*semillas*” o valores iniciales adecuados se recurrió a la estrategia siguiente: (1) El usuario indica si desea

emplear los valores de tensión y ángulos de las barras, que han sido dados como condiciones iniciales por el usuario y en caso de no ser definido entonces se tomará 1 en p.u. para el módulo de la tensión y cero para el ángulo o (2) Si se decide por los valores fijos, el módulo de las tensiones iniciales (excepto el de las barras de control) se asumen como 1 en p.u. y el ángulo de todas las tensiones se asume como cero. Esto es una práctica común debido a la suposición del perfil uniforme de voltajes [5] y se le conoce como inicio plano. Si el usuario lo especifica, los valores obtenidos en la última corrida de flujo de carga pasarán a ser las condiciones iniciales en las barras, de manera que en una próxima corrida, la solución se obtendrá en muy pocas iteraciones. Esta metodología permite acelerar la convergencia en grandes sistemas, si se corre el flujo de carga a medida que el sistema va creciendo.

Construcción de la matriz admitancia de barra [Ybarra] para el flujo de carga. Para el estudio de flujo de carga solo se emplean

los parámetros de secuencia positiva, y en principio, sólo se incluyen los elementos que interconectan a las barras, es decir, las líneas de transmisión, los cables, los reactores serie y los transformadores. Esta matriz es muy dispersa y puede no ser simétrica si los cambiadores de tomas están fuera de su posición central [5].

#### **IV. EJEMPLO DEMOSTRATIVO PARA MÓDULO FLUJO DE CARGA**

Para ilustrar el poder de cálculo del ASP, se presenta la simulación del flujo de potencias de un sistema de potencia de tres barras [4], cuyos resultados son contrastados con los obtenidos de la referencia documental [4] y de los resultados del programa Winflu [9].

El programa Winflu fue desarrollado por el Magíster en Sistemas de Potencia Percy Alan, Paján Lan, graduado en la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú. WINFLU es un software para la simulación de sistemas de potencia [10], programado en Visual C/C++ bajo el entorno Windows de Microsoft<sup>TM</sup>, con una capacidad 800 barras.

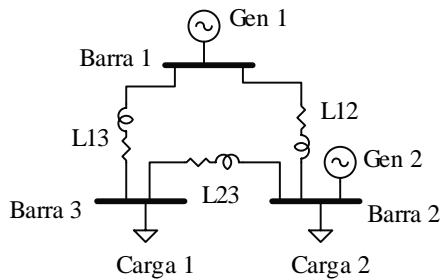


Figura 5. Diagrama unifilar de ejemplo

Datos de los generadores:

Nombre	V (KV)	P (MW)	Tipo	Qmax	Qmin
Gen1	239.2		Slack		
Gen2	234.6	200	Control	230	-100

Para todos los casos se toma la barra 1 de tipo slack, y la línea de transmisión es simulada por su modelo Pi nominal. El límite de generación de reactivos fue considerado en función del caso específico en estudio.

Datos de las líneas de transmisión:

Nombre	R (Ω/KM)	X (Ω/KM)	B (*)	L (KM)
L120	0.08	0.477	1,70647·E-6	180
L23	0.08	0.477	1,70647·E-6	120
L13	0.08	0.477	1,70647·E-6	80

Datos de las cargas:

Nombre	P (MW)	Q (MVAR)	Fp
Carga1	250	100	0.729
Carga2	450	200	0.936

**Caso 1:** Se obtiene la solución de los voltajes en las barras y los flujos de potencia a través de las líneas, sin tomar en cuenta los límites de potencia reactiva del

generador Gen2, de modo que la Barra 2 es tratada como una barra de control, o PV. En el caso del ASP, se produjo la resolución empleando el método de Newton-Raphson, empleando el arranque plano, y para la solución con Winflu se tomó primera iteración de Gauss y sin parámetros distribuidos. En ambos programas se tomó como tolerancia del error  $10^{-3}$ . Los resultados arrojados por el ASP y por el Winflu, se muestran en las Tablas I y II respectivamente, en ambos casos los programas han sido instruidos para obviar el límite de potencia reactiva del generador Gen2.

Tabla I. Solución con el programa ASP, Caso 1

ASP Versión 3.0 Mayo de 2003					
Datos de operación de las barras					
Nombre	Tipo	Tensión KV	Ángulo	Estado	
Barra 1	Slack	239.200	0	Normal	
Barra 2	Cntrl	234.600	-17.57	Normal	
Barra 3	Carga	220.393	-12.93	Normal	
Datos de operación de los generadores					
Nombre	Pgen MW	Qgen MVAR			
Gen 1	524.459	82.848			
Gen 2	200.000	292.846			
Flujo a través de líneas, y transformadores					
Barra A	Barra B	A→B		B→A	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
Barra 3	Barra 1	-312.6	-27.8	325.5	90.5
Barra 1	Barra 2	198.9	-7.6	188.9	32.7
Barra 3	Barra 2	62.6	-72.2	-61.1	60.2
Total pérdidas =		24.459 MW	75.695 MVAR		

**Tabla II. Solución con el programa Winflu, Caso 1**

Datos de operación de las barras				
Nombre	Tipo	Tensión KV	Ángulo	Estado
Barra 1	Slack	239.200	0	Normal
Barra 2	Cntrl	234.600	-17.57	Normal
Barra 3	Carga	220.393	-12.93	Normal

Datos de operación de los generadores		
Nombre	Pgen MW	Qgen MVAR
Gen 1	524.459	82.848
Gen 2	200.000	292.846

Flujo a través de líneas					
Barra A	Barra B	A→B		B→A	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
Barra 3	Barra 1	-312.6	-27.8	325.5	90.5
Barra 1	Barra 2	198.9	-7.6	188.9	32.7
Barra 3	Barra 2	62.6	-72.2	-61.1	60.2

Total pérdidas = 24.459 MW 75.695 MVAR

Al comparar los resultados entre el ASP, Winflu, se evidencia que los resultados son idénticos en los primeros cuatro decimales, y que en forma general, analizando tensiones en magnitud y ángulo, potencia activa y reactiva, y las perdidas, el máximo error corresponde a la solución del ángulo de tensión, donde se aprecia un margen de error menor al 0.01%.

**Tabla III. Solución de [5], Caso 1**

Datos de operación de las barras				
Nombre	Tipo	Tensión KV	Ángulo	Estado
Barra 1	Slack	239.200	0	Normal
Barra 2	Cntrl	234.600	-17.57	Normal
Barra 3	Carga	220.393	-12.93	Normal

Datos de operación de los generadores		
Nombre	Pgen MW	Qgen MVAR
Gen 1	524.46	82.85
Gen 2	200.000	292.84

Los resultados mostrados en [5], poseen solo dos decimales (ver Tabla III), de modo que la comparación con el ASP, se efectuó ante tan restringida condiciones, mostrándose que nuevamente coinciden exactamente los resultados. Por otra parte, los resultados muestra que el generador Gen2 inyecta una potencia reactiva de 292.846 MVAR, pero la realidad es que tiene un límite máximo de 230 MVAR. De modo que la teoría indica que la Barra 2 debería pasar de tipo PV a tipo PQ, donde la potencia reactiva inyectada a la barra sea la máxima posible del generador 2.

**Caso 2:** Se resuelve el flujo de potencia, para calcular los voltajes en las barras y los flujos de potencia a través de las líneas, tomando en cuenta los límites de potencia reactiva del generador Gen2. En este caso, ASP y Winflu, resuelven el flujo de potencia y al ser violada la restricción de potencia reactiva efectúa el cambio del tipo de la barra 2.

**Tabla IV. Solución con el programa ASP, Caso 2**

ASP Versión 3.0 Mayo de 2003					
Datos de operación de las barras					
Nombre	Tipo	Tensión KV	Ángulo	Estado	
Barra 1	Slack	239.200	0	Normal	
Barra 2	Cntrl	221.339	-17.93	Normal	
Barra 3	Carga	214.525	-13.12	Bajo	
Datos de operación de los generadores					
Nombre	Pgen MW	Qgen MVAR			
Gen 1	525.514	155.957			
Gen 2	200.000	230.000			
Flujo a través de líneas, y transformadores					
Barra A	Barra B	A→B		B→A	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
Barra 3	Barra 1	-313.9	-57.2	327.9	127.0
Barra 1	Barra 2	197.6	29.0	-187.2	0.2
Barra 3	Barra 2	63.9	-42.8	-62.8	29.8
Total pérdidas =		25.514 MW	85.957 MVAR		

ángulo de tensión, donde se aprecia un margen de error menor al 0.01%. Es importante observar que el generador Gen 2 entrega una potencia activa de 200 MW y una potencia reactiva de 230 MVAR su límite máximo de reactivos. La barra 2, pasa a ser una barra de carga (PQ), fijando las potencias del generador y trayendo como consecuencia que la magnitud del voltaje disminuyera de 234.6 KV a 221.339 KV.

**Tabla IV. Solución con el programa Winflu, Caso 2**

Datos de operación de las barras					
Nombre	Tipo	Tensión KV	Ángulo	Estado	
Barra 1	Slack	239.200	0	Normal	
Barra 2	Cntrl	221.339	-17.93	Normal	
Barra 3	Carga	214.525	-13.12	Bajo	
Datos de operación de los generadores					
Nombre	Pgen MW	Qgen MVAR			
Gen 1	525.514	155.957			
Gen 2	200.000	230.000			
Flujo a través de líneas					
Barra A	Barra B	A→B		B→A	
		P MW	Q MVAR	P MW	Q MVAR
Barra 3	Barra 1	-313.9	-57.2	327.9	127.0
Barra 1	Barra 2	197.6	29.0	-187.2	0.2
Barra 3	Barra 2	63.9	-42.8	-62.8	29.8

Comparando los resultados entre el ASP, Winflu, se evidencia que los resultados son idénticos en los primeros cuatro decimales, al observar tensiones en magnitud y ángulo, potencia activa y reactiva, y las perdidas, el máximo error corresponde a la solución del

## V. CONCLUSIONES

La relevancia de este trabajo radica, demostrar la efectividad de los resultados de flujo de potencia logrados por el programa Analizador de Sistemas de Potencia –ASP-. En este trabajo se ha resuelto un sistema típico de tres barras [5], con y sin control de potencia reactiva (caso 1 y 2, respectivamente). En ambos casos, se evaluó los resultados, empleando los mismos criterios, entre el ASP, el conocido programa Winflu [10] y la literatura [5], obteniéndose un error casi nulo en el peor de los casos (menos de 0.01%).

Finalmente, al haber conjugado resultados confiables, una excelente interfaz grafica de usuario y facilidad de utilización, se ha obtenido un programa para el análisis de sistemas de potencia de alto rendimiento y bajo costo que viene a proporcionar a la UNEFA, una herramienta didáctica y que al mismo tiempo permite la generación de tecnología propia.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE, IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis". IEEE Press, 1997
- [2] Guillén F., Urdaneta J. "Diseño e Implementación de un Programa para el Análisis y Simulación de Cortocircuito y Flujo de Carga en los Sistemas de Potencias". Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Electricista. UNEFA. Maracay, 2000.
- [3] Cadena K., Verenzuela L. "Diseño e Implementación del Módulo de Estabilidad Transitorio Multimáquina". Trabajo de grado para optar al título de
- Ingeniero Electricista. UNEFA. Maracay, 2001.
- [4] Arrillaga J. Arnold C., Harker B. "Computer modelling of electrical power systems". John Wiley & Sons, 1990.
- [5] Marti, J. "Análisis de Sistemas de Potencia". Tercera sección, Estudios de Flujo de Carga en sistemas de potencia. Universidad Central de Venezuela, 1975.
- [6] Stevenson W., Grainger J. "Análisis de Sistemas de Potencia". McGraw Hill, 1996.
- [7] Brown H. "Solution of Large Networks by Matrix Methods". John Wiley & Sons, 1975.
- [8] Stagg W., El-Abiad A. "Computer Methods in Power System Analysis". McGraw Hill, 1968.
- [9] Wood A., Wollenberg B. "Power Generation, Operation and Control" John Wiley & Sons, 1984.
- [10] <http://www.geocities.com/winflu23>