



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

## **Flujo de Carga con Interfaz Gráfica**

**Esteban Federico Vargas Correa, Anastacio Sebastián Arce Encina**

**Facultad Politécnica – UNE, Itaipu Binacional**

**Paraguay**

### **RESUMEN**

Los estudios de flujo de carga son aplicados tanto en las etapas de planeamiento de la expansión, de la operación, inclusive en la operación de tiempo real.

Los primeros estudios de flujos de carga eran realizados a través de simuladores analógicos, que emulaban un sistema específico, diseñados a través de resistores, capacitores, inductores cuyos parámetros, en escala inferior, representaban los elementos reales conectados en la misma topología del sistema eléctrico en estudio. Estos sistemas llenaban varias habitaciones, consumían una cantidad importante de energía y se tenían que cablear de nuevo cuando se deseaba hacer cualquier modificación o estudio. Con el surgimiento de las computadoras y las metodologías para la resolución del problema mucho se ha avanzado en términos de modelado y precisión de los resultados de los estudios. La rápida evolución de los procesadores permitió también mejorar el tiempo de procesamiento para la resolución del problema, la entrada y salida de datos.

En este trabajo se presenta un programa para simulación del cálculo de flujo de carga, desarrollado inicialmente para fines didácticos, cuyo objetivo es permitir a través de un interfaz gráfica, la entrada, salida de datos y elección una de las diferentes metodologías para el cálculo del flujo de carga.

Ejemplos de aplicación sobre sistema didácticos típicos de la IEEE, opciones de método de solución que incluye Newton, Desacoplado, Desacoplado Rápido y Flujo CC, mostraron ser esta una alternativa válida.

### **PALABRAS CLAVES**

Flujo de carga, interfaz gráfico, simulación.



## 1. UNA BREVE HISTORIA DEL FLUJO DE POTENCIA

La economía y confiabilidad mejoradas se reconocieron hace más de medio siglo como los beneficios de usar una red interconectada para el transporte de potencia eléctrica. Pero lo fundamental para su realización fue (y aún es) la capacidad para predecir los voltajes y flujos en los componentes en la red. A medida que se transformaron las redes, el problema fue desarrollar una herramienta que permitiera producir esta información crítica. El flujo de carga, conforme se fue conociendo dicha herramienta, predice los flujos y voltajes de la red cuando se les da el estado de generadores y cargas. Es la herramienta que mas ampliamente utilizan los ingenieros de potencia.

Los primeros flujos de carga se resolvieron usando lo que se conocía como tarjetas de cálculos. Estos tableros eran un tipo de computadora analógica, ya que emulaban un sistema específico por medio de la síntesis física del resistor-inductor-capacitor de parámetros agrupados del sistema real, con los componentes conectados en la misma topología. Para un sistema real, estos tableros llenaban varias habitaciones, consumían una cantidad importante de energía y se tenían que cablear de nuevo cuando se deseaba hacer cualquier modificación. Puesto que los estudios a menudo requerían equipos de ingenieros trabajando simultáneamente ajustando perillas y posiciones y leyendo los resultados en voz alta, era evidente la necesidad de una alternativa más flexible.

Luego vino la moderna computadora digital, que, de hecho, debe mucho del ímpetu en su desarrollo original a la necesidad de los ingenieros de potencia por contar con una forma de resolver los flujos de carga. En los primeros días de la computación, el negocio de la energía eléctrica era por mucho el usuario comercial más grande (e incluso promotor) de las máquinas digitales. No era extraño que una empresa gastara varios millones de dólares en el desarrollo del hardware digital y software. Mientras que IBM Corp. avanzaba en los diseños de máquinas con unidad central, los teóricos estaban publicando los primeros documentos sobre algoritmos de flujo de carga.

Los primeros algoritmos se basaban en el método de Gauss Seidel, que hizo posible, por primera vez, resolver el problema de flujo de carga para sistemas relativamente grandes. Sin embargo, adolecía relativamente de malas características de convergencia. Luego, se desarrolló el algoritmo de Newton para mejorar la convergencia del algoritmo de Gauss Seidel, pero al principio se pensó que era impráctico para sistemas de dimensiones reales, debido a los problemas de calculo con redes grandes. El problema subyacente para el método iterativo de Newton es la solución de una ecuación matricial de gran dimensión.

En la década de 1960, Bill Tinney y colaboradores en la Bonneville Power Administration observaron que, aunque la matriz principal era muy grande, era también muy dispersa, esta observación dio lugar al desarrollo de los métodos de dispersidad. El concepto hizo posible aplicar el método de Newton a sistemas de tamaño arbitrario, para obtener por primera vez tanto velocidad como características excelentes de convergencia.

Desde la década de 1960, se hicieron numerosos avances y extensiones a los métodos de flujo de carga. En la década de 1970 llego el flujo de carga desacoplado rápido, el cual incremento la velocidad de cálculo. Las ampliaciones al flujo de carga fueron la representación de los componentes, como las líneas de transmisión en corriente directa de alta tensión (HVDC); mejores métodos para el calculo de pérdidas, solución del flujo de potencia optimo, y problemas

de estimación de estados; la continuación del flujo de potencia, y la determinación de precios spot de electricidad en presencia de restricciones, por supuesto, el desarrollo de mejores formas de visualizar y presentar los resultados de flujo de carga [1].

## 2. OBJETIVO

En este trabajo se presenta un programa para simulación del cálculo de flujo de carga, desarrollado inicialmente para fines didácticos, cuyo objetivo es permitir a través de una interfaz gráfica, la entrada, salida de datos y elección de las diferentes metodologías para el cálculo del flujo de carga.

## 3. INTRODUCCIÓN

El simulador fue desarrollado con ayuda del MATLAB cuyo nombre corresponde a la abreviatura de MATrix LABoratory (laboratorio de matrices). Se trata de un software matemático muy versátil que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M) y disponible para las plataformas Unix, Windows y Apple. La figura 1, muestra la pantalla de presentación.



**Fig. 1 Pantalla de presentación del simulador**

La interfaz gráfica, a continuación de la pantalla de presentación, presenta dos opciones principales, las cuales son el análisis del flujo de potencia por el modelo AC o el análisis sobre la base del modelo CC. [2]

Se presentan dos opciones, que permiten analizar redes de prueba, las cuales consisten en un modelo de red de 4 barras, un modelo de red de 14 barras y otro modelo de red de 30 barras; o la introducción de datos vía teclado de usuario, donde uno puede dimensionar la red deseada, teniendo en cuenta la cantidad de barras, líneas de transmisión, transformadores en fase o desfases, generadores síncronos y cargas en las barras.

En la misma pantalla de elección de modelos de prueba, existe la opción de seleccionar el método de solución del problema de flujo de potencia, entre los cuales citamos al método de Gauss-Seidel, Newton-Raphson, Desacoplado, Desacoplado Rápido XB y el Desacoplado Rápido BX. [2]

Este Simulador 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. El reporte se genera en un documento en formato “.doc”, el cual puede ser accedido con el fin de analizar los resultados de la simulación. Los resultados también pueden ser observados en la pantalla del simulador, o en el mismo Command Window del Matlab, o sea, ofrece tres vías de acceso a los resultados.



Fig. 2 Principales Opciones del Simulador

#### 4. CASOS DE PRUEBA

En esta sección se describe la utilización del software desarrollado para el estudio de casos con datos de sistemas típicos. En este sentido cada uno de las redes de prueba, poseen datos ya almacenado en el sistema.

- Los datos del sistema de 4 barras fueron extraídos del libro "Power System Analysis", John Grainger, Jr., William Stevenson, McGraw-Hill, 1994 [3].
- 14 Bus Power Flow Test Case IEEE. [4].
- 30 Bus Power Flow Test Case IEEE. [4].

##### 4.1. Análisis del Sistema de 4 Barras.

En la figura 3, se puede observar el sistema a ser analizado, donde se puede identificar los datos iniciales del estado de la red para cada una de las barras.

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

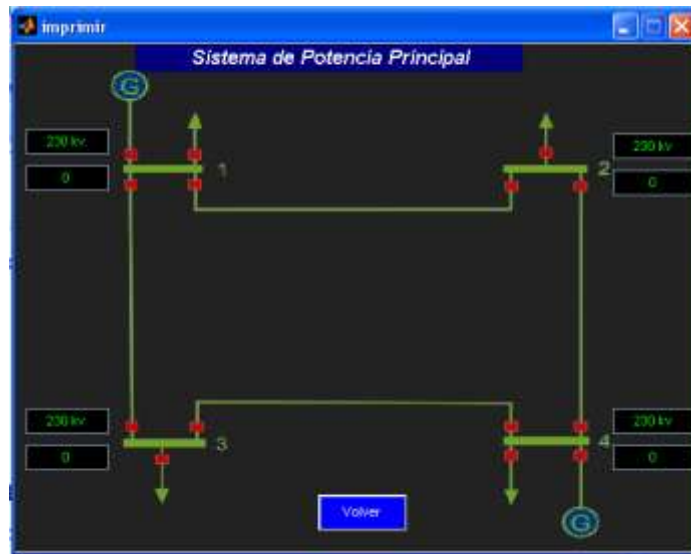


Fig. 3 Estado Inicial de la Red

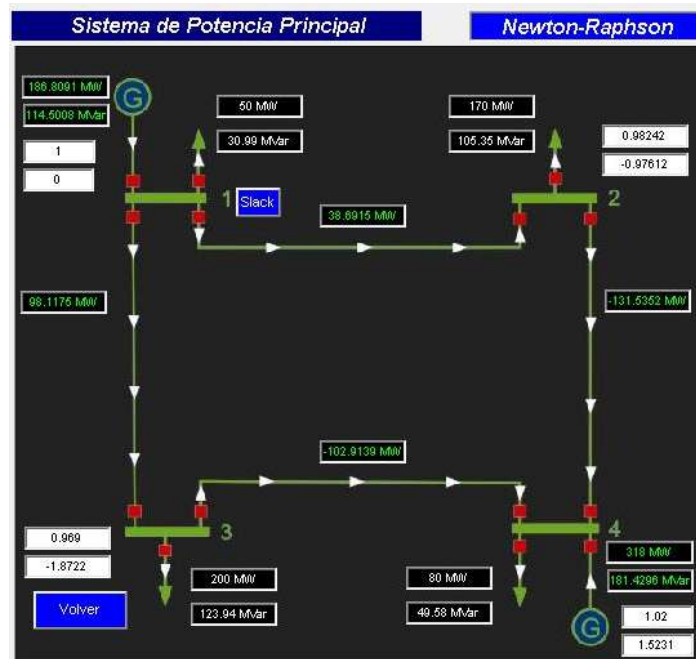


Fig. 4 Resultados del Flujo de Carga

La figura 4 muestra el sistema de 4 barras resuelto por el método de Newton-Raphson. Por medio de las opciones del simulador se puede escoger otros métodos de solución, ya citados, como también definir la tolerancia especificada. Se logran observar los resultados del estado de la red asociadas a cada barra, como también el flujo de potencia en cada ramo del circuito. El sentido de flujo en cada ramo del circuito fue previamente diseñado y el cálculo del mismo realizado en la misma secuencia.

La figura 5, similarmente a los datos mostrados en la figura 4, es presentado en forma de tabla. En esta tabla se muestra el tiempo de procesamiento como el número de iteraciones necesarias para la convergencia, los cuales podrán ser utilizados para realizar comparaciones entre los

VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

diferentes métodos de solución para conocer los contrastes entre los mismos, precisión, sus ventajas y desventajas en relación al tiempo de procesamiento o número de iteraciones.



**Sistema Electrico de Potencia**

Datos de las barras:

#	Mag(kv)	Ang(º)	Pg	Qg	Pd	Qd
1	230 kv	0	106.8091 MW	114.3000 MVar	80 MW	30.99 MVar
2		-0.97612	0 MW	0 MVar	170 MW	185.35 MVar
3		-1.8722	0 MW	0 MVar	200 MW	123.94 MVar
4	230 kv	1.5231	318 MW	181.4295 MVar	80 MW	49.58 MVar

Datos de las líneas:

de	a	P(MW)	Q(MVar)	Pper(MW)	Qper(MVar)
1	2	38.6915	22.2985	0.22671	1.1335
1	3	98.1175	61.2124	1.0314	5.1572
2	4	-121.8382	-74.1137	1.7165	8.5174
3	4	-102.9139	-60.3713	1.8355	9.1773

TOTAL DE PERDIDAS : 4.8091    24.9454

Fig. 5 Tabla de Resultados

Como complemento se genera un reporte de los resultados de la simulación los cuales son enviados a un archivo de texto creado en el ordenador.

4.2. Análisis del Sistema de 14 Barras.

El segundo análisis de caso consiste en un sistema de 14 barras de la IEEE, donde se presenta el estado de la red, y todos los flujos de potencia en las líneas. La figura 6 muestra la pantalla de salida de los resultados.

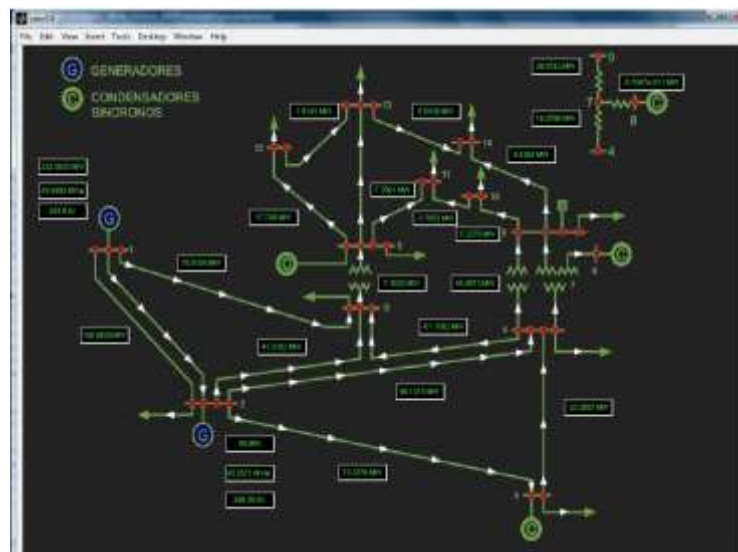


Fig. 6 Resultados del Flujo de Carga

Sistemas mayores con un número mayor de barras pueden requerir un desdoblamiento del mapa, debido a la imposibilidad de representar en una única página todo el circuito.



#### 4.3. Análisis del Sistema de 30 Barras.

En las opciones de casos de prueba también se cuenta con un ejemplo didáctico típico, el cual consiste en la red de 30 barras, donde se analiza el estado en todas las barras y los flujos de potencia en las líneas, teniendo en cuenta los transformadores desfasadores ya establecidos y sus generadores síncronos conectados a la red.

Similarmente al caso de 4 barras, el programa genera los resultados en el propio circuito como también en forma de tabla y archivo de salida con extensión “.doc”.

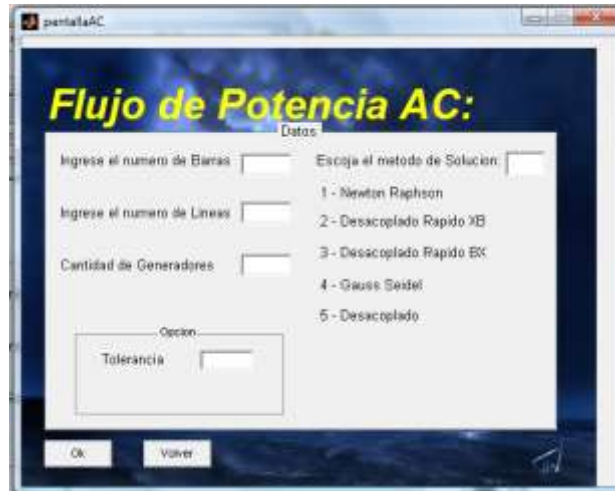


Fig. 7 Resultados del Flujo de Carga

#### 5. ENTRADA DE DATOS VÍA TECLADO DE USUARIO

El software desarrollado posee también la opción para el estudio de casos donde el usuario introduce los datos de cualquier sistema que desee simular. El procedimiento consiste en introducir la cantidad de barras, cantidad de líneas, cantidad de generadores, la tolerancia y por último escoger el método de solución para el problema de flujo de potencia. La figura 8 muestra la pantalla.

Una vez definido el número de barras, de líneas, de generadores, el método de solución y la tolerancia, se debe especificar la base de potencia de la red a ser simulada y todos los datos relacionados a cada uno de los elementos del circuito. La figura 9, muestra la imagen de esta pantalla.



**Fig. 8 Pantalla de entrada de datos**

En este caso, la opción de visualización de resultados se realiza por medio del Command Window del Matlab, y por un documento en formato “.doc”.



**Fig. 9 Entrada de parámetros de la Red**

Los datos de entrada están especificados a continuación:

Formato de datos de líneas

- r, Resistencia (p.u.)
- x, Reactancia (p.u.)
- b, Carga total en la línea (p.u.)
- relación, relación de transformación (= 0 para líneas)
- ángulo, ángulo del transformador desfasador (grados), positivo => adelanto
- estado, estado de la línea 1 – en servicio, 0 – fuera de servicio

Formato de datos de barras

- Tipo de barra
  - Barra PQ = 1
  - Barra PV = 2



VIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ  
29, 30 y 31 de Octubre de 2008

---

Barra Slack = 3

- Pd, Potencia activa demandada (MW)
- Qd, Potencia reactiva demandada (MVar)
- Gs, Conductancia shunt (MW (demandada)  $V = 1.0$  p.u.)
- Bs, Susceptancia shunt (MVar (inyectada)  $V = 1.0$  p.u.)
- Vm, Magnitud del voltaje (p.u.)
- Va, Angulo del voltaje (grados)
- Vmax, Máxima magnitud de voltaje (p.u.)
- Vmin, Mínima magnitud de voltaje (p.u.)

Formato de datos de generadores

- Pg, Potencia activa generada (MW)
- Qg, Potencia reactiva generada (MVar)
- Qmax, Potencia reactiva generada máxima (MVar)
- Qmin, Potencia reactiva generada mínima (MVar)
- Vg, Voltaje generado especificado (p.u.)
- estado, 1 – maquina en servicio, 0 – maquina fuera de servicio
- Pmax, Potencia activa generada máxima (MW)
- Pmin, Potencia activa generada mínima (MW)

Ahora bien el reporte del simulador entrega los mismos resultados que en el caso de redes de prueba, en formato “.doc”.

Los ensayos realizados, muestran que la opción de entrada de datos vía teclado es indicado a sistemas de pequeño porte, principalmente para fines didácticos.

## 6. CONCLUSIÓN

La relevancia de este trabajo radica en demostrar la efectividad de los resultados de flujo de potencia obtenidos por el simulador desarrollado, además la importancia en tener una interfaz gráfica amigable para la introducción de datos y lectura de resultados para el usuario.

En esta etapa del proyecto se da mayor énfasis en la evaluación de las ventajas que propiciará el programa de flujo de potencia en el análisis de los resultados, la facilidad de entrada y salida de datos. Todos los algoritmos e interfaz fueron desarrollados en ambiente Matlab. En una etapa siguiente se deberá implementar todos los algoritmos en un lenguaje más eficiente.

## 7. REFERENCIAS

- [1] J. Duncan Glover, Mulukutla S. Sarma; Sistemas de potencia: Análisis y diseño, (Cengage Learning, 2004, páginas 260-261).
- [2] Alcir José Monticelli; Fluxo de carga em redes de energia elétrica, (Edgar Blucher Ltda, 1983, páginas 1-100).
- [3] J. Grainger, W. Stevenson; Power System Analysis, (McGraw-Hill, 1994, páginas 309-352).
- [4] College of Engineering at the University of Washington, Power Systems Test Case Archive, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>.