

"FLOW" A TOOL FOR ANALYSIS OF POWER FLOW AND FACTS DEVICES**“FLUJOS” UNA HERRAMIENTA PARA EL ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA Y DISPOSITIVOS FACTS**

MSc. Oscar Núñez Ortega*, **MSc. Abel E. Quezada Carreón Chaparro****
Ing. Efraín Herrera Rodríguez*

* **Instituto Tecnológico de Cd. Juárez**, Cd. Juárez Chihuahua México
Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Tel.: (+52) 656 288 2500 Ext.2623, E-mail: eca@itcj.edu.mx

** **Universidad Autónoma de Ciudad Juárez**
Departamento de Eléctrica y Computación
Tel.: (+52) 656 688 4800 Ext.4741, E-mail: abquezad@uacj.mx

Abstract: This paper describes the implementation of a program called FLOW, which was developed in MATLAB and used to solve the power flow problem. In addition to the classic solution of power flow program contains the steady-state model of a FACTS device, called Static Var Compensator's. The simulator provides the flexibility to incorporate more complex models of FACTS devices and analyze their results. To test the usefulness of the simulator in this work shows a case study in which voltage problems occur and is in the Static Var Compensator's your solution.

Resumen: El presente trabajo describe la aplicación de un programa llamado FLUJOS, el cual se desarrollo en MATLAB y es utilizado para la solución del problema de flujos de potencia. Adicionalmente a la solución clásica de flujos de potencia el programa contiene el modelo en estado estacionario de un dispositivo FACTS, el llamado Compensador Estático de Var's. El simulador brinda la flexibilidad para incorporar modelos más complejos de dispositivos FACTS y analizar sus resultados. Para comprobar la utilidad del simulador en el presente trabajo muestro un casos de estudio en el cual se presentan problemas de voltaje y se encuentra en el Compensador Estático de Var's su solución.

Keywords: Power flow, Matlab, FACTS, Static Var Compensator's (CEV).

1. INTRODUCCION

El simulador FLUJOS (Núñez, 2006) es un programa de simulación de sistemas eléctricos de potencia el cual está desarrollado en MATLAB. FLUJOS resuelve el problema de flujos de potencia utilizando dos métodos de solución numérica: Newton Raphson y Desacoplado Rápido, esto debido a la naturaleza no lineal del problema de flujos de potencia. FLUJOS está

diseñada con una amigable interfaz la cual le permite al usuario ingresar datos, editarlos, observar resultados en forma de texto y en forma de gráfica. Además de generar reportes que pueden ser utilizados como bases de datos para estudios de estabilidad.

Si bien es cierto que existen en el mercado una gran diversidad de simuladores que resuelven el problema de flujos de potencia, estos no tienen la

posibilidad de incorporar modelos desarrollados por los usuarios, esto limita el desarrollo científico ya que impide que nuevas tecnologías desarrolladas en centros de investigación sean probadas. Se decide utilizar el paquete de simulación MATLAB, por su gran flexibilidad en el manejo del lenguaje de programación, pero además por su gran versatilidad para permitir el manejo de funciones matemáticas.

Si bien es cierto que el Compensador Estático de Var's fue el primer dispositivo FACTS en aparecer, en la actualidad de continua utilizando ampliamente en los sistemas eléctricos de potencia del mundo, pero el real acierto de utilizar este dispositivo consiste en sentar la bases de diseño para la incorporación de dispositivos más avanzados.

2. ESCENARIO ACTUAL DE LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA Y LOS DISPOSITIVOS FACTS

La utilización de los sistemas eléctricos de potencia en la actualidad ha entrado en una etapa de cambio debido a factores como la inversión privada, el crecimiento de los sistemas debido a la demanda de suministro de energía. Esto ha obligado a que los sistemas eléctricos de potencia operen en condiciones para las cuales inicialmente no fueron diseñados.

En el escenario de los sistemas eléctricos de potencia aparece una nueva tecnología que llegó para revolucionar la operación de los sistemas eléctricos de potencia. Esta tecnología es conocida como Sistemas de Transmisión de Corriente Alterna Flexibles (FACTS, Flexible Alternating Current Transmission Systems, por sus siglas en inglés)

(N. Hingonari, 1993). Esta tecnología opera de forma semejante a las redes de transmisión de corriente directa las cuales involucran electrónica de potencia (Principalmente Tiristores).

Esta tecnología supera las limitaciones de los antiguos controles electromecánicos (rapidez, eficiencia, durabilidad y capacidad). El uso de las tecnologías FACTS en los sistemas eléctricos de potencia incrementa la eficiencia del sistema al considerar cinco formas de funcionamiento, estas son:

1. Aumentar el control del flujo de potencia a través de rutas de transmisión preestablecidas.

2. Incremento de la cargabilidad de las líneas de transmisión a niveles cercanos a los límites térmicos.
3. Mayor habilidad para transferir potencia eléctrica entre áreas controladas, de forma que los márgenes de generación de reserva se reduzcan de 18% a 15%.
4. Prevención de apagones en cascada al evitar los efectos de fallas y de equipos dañados.
5. Disminución de las oscilaciones, lo cual puede dañar equipo y/o limitar la capacidad de transmisión de potencia eléctrica.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE FLUJOS DE POTENCIA

El problema de flujos de potencia es la herramienta de análisis más básica que se utiliza para conocer la operación en estado estacionario de un sistema eléctrico de potencia (E. Acha, *et al.*, 2004). Es definido como el proceso de solución que proporciona los voltajes en estado estacionario en todos los nodos que conforman la red eléctrica bajo análisis y con base en los cuales se calculan los flujos de potencia activa y reactiva inyectados en terminales de cada elemento de transmisión bajo la suposición de valores conocidos de potencia generada y consumida.

La manera de obtener el punto de operación estacionario de una red eléctrica en base a un análisis de flujos de potencia es determinando que la potencia de generación, la potencia de carga y la potencia que se intercambia a través de las líneas de transmisión deben sumar cero en cada uno de los nodos de la red (esto aplica para la potencia activa y para la potencia reactiva). Esto se puede expresar matemáticamente por un grupo de ecuaciones conocidas como ecuaciones de desbalance de potencias:

$$\Delta P_i = P_{Gi} - P_{Li} - P_i = P_i^{sch} - P_i = 0 \quad (1)$$

$$\Delta Q_i = Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i = Q_i^{sch} - Q_i = 0 \quad (2)$$

Donde:

- P_{Gi} y Q_{Gi} son las potencias inyectadas por el generador conectado en el nodo i de la red.
- P_{Li} y Q_{Li} son las potencias extraídas por la carga conectada en el nodo i de la red.
- P_i y Q_i son las potencias que fluyen a través de los elementos de transmisión y se calculan según las ecuaciones (3) y (4).

4. SIMULADOR FLUJOS

4.1. Estructura básica del simulador FLUJOS

FLOJOS es un simulador desarrollado en lenguaje de programación en MATLAB. Este resuelve el problema de flujos de potencia utilizando dos métodos numéricos para su solución: Newton Raphson y Desacoplado Rápido. La figura 1 muestra el diagrama de flujos del simulador incluido el compensador Estático de Var's.

$$P_i = V_i^2 G_{ii} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \cos(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) + B_{ij} \text{Sen}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (3)$$

$$Q_i = -V_i^2 B_{ii} + V_i \sum_{j=1}^n V_j (G_{ij} \text{Cos}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j) - B_{ij} \text{Cos}(\mathbf{q}_i - \mathbf{q}_j)) \quad (4)$$

*Los subíndices *i, j*. Representan los nodos de conexión del elemento de transmisión.

Debido a la evidente no linealidad de las ecuaciones (3) y (4). Un método de solución de ecuaciones no lineales es necesario para la solución del problema de flujos de potencia. Existen varios métodos entre los que destacan Gauss-Seidell, Newton-Raphson, Desacoplado Rápido, etc. El método Newton Raphson se ha utilizado como un método eficiente en cuanto a sus características de velocidad de convergencia, precisión y requerimientos de memoria (Tinney y Hart 1967).

Para poder aplicar el método Newton Raphson es necesario tener un sistema de ecuaciones simétrico es decir, igual número de incógnitas y ecuaciones. En cada nodo de la red se especifican dos variables y en función de esas variables especificadas el nodo se clasifica según la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de los nodos

Tipo de Nodo	Variables Especificadas	Variables Calculadas
Nodo Compensador.	V y ?	P y Q
Nodo PV (Nodo Gen).	P y V	Q y ?
Nodo PQ (Nodo Carga).	P y Q	V y ?

Una vez especificadas las variables adecuadas el problema se puede resolver. Linealizando alrededor de la condición inicial (P^0, Q^0), los desbalances de potencias son:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} J \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{q} \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (5)$$

Donde:

- **J** se conoce como el jacobiano y contiene las derivadas parciales de las potencias activas y reactivas con respecto a las magnitudes de los voltajes y ángulos.
- **k** representa la iteración del proceso de solución.

El método Newton Raphson es comentado ampliamente por (Tinney y Hart, 1967).

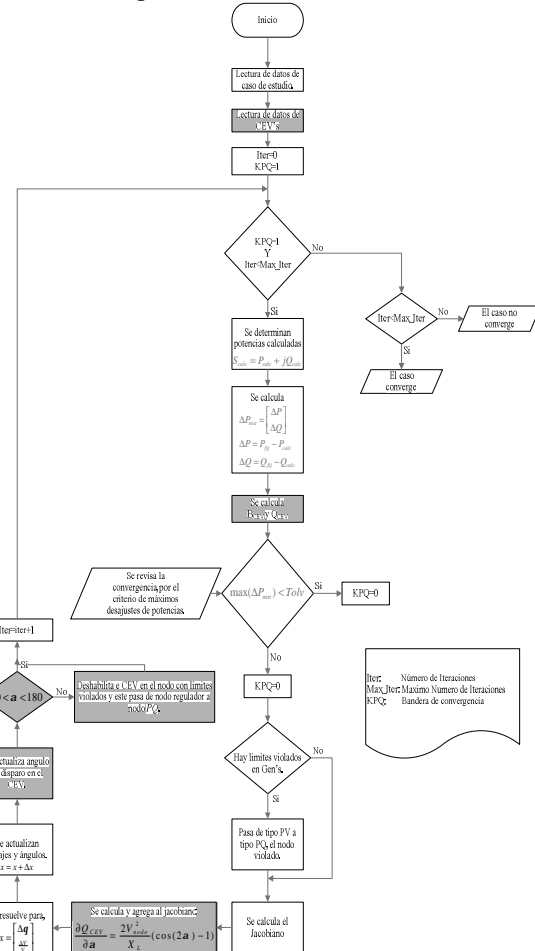


Fig. 1. Diagrama de flujo del algoritmo de cálculo para resolver el problema de flujos de potencia con el CEV

4.2. Interfaces graficas del simulador FLUJOS

El simulador está compuesto por una serie de funciones llamadas tipo “*.m” (MathWorks, 2000), las cuales contienen los algoritmos de solución y los algoritmos que construyen las interfaces graficas para el usuario llamadas GUI. La figura 2 muestra la ventana principal del simulador FLUJOS.

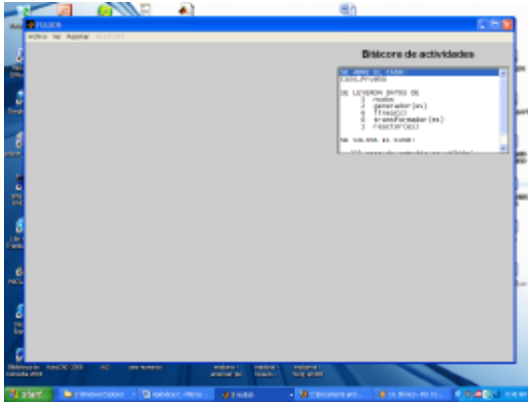


Fig. 2. Ventana principal del simulador FLUJOS, donde se aprecia la barra de menús y la ventana de bitácora de actividades

El simulador FLUJOS cuenta con la opción de ingresar datos de dos formas distintas: Directamente en la interfaz o a través de archivos binarios. Los datos que el simulador puede manejar son los siguientes: Buses de carga, Buses de generación, Líneas de Transmisión, Transformadores y Compensadores Estáticos de Var's. En la figura 3 se observa la sección de selección de datos a editar.

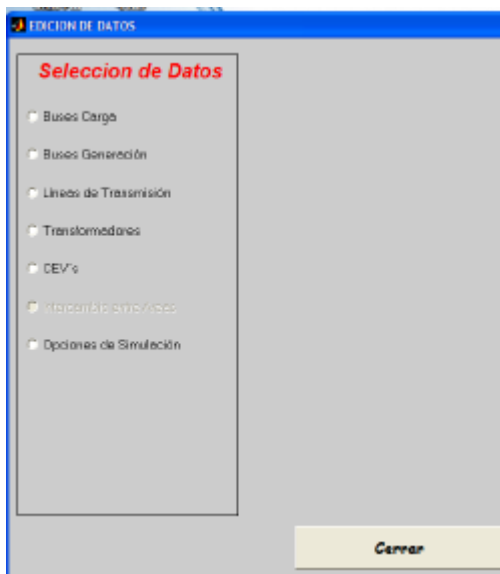


Fig. 3. Opción para seleccionar los datos a editar en el simulador FLUJOS

En la figura 4 se observa una de las ventanas de edición (nodos de carga). Y en la figura 5 la ventana de opciones de simulación donde se observa que se pueden controlar tanto el número máximo de iteraciones, los desajustes máximos de potencias activas y reactivas, la potencia base del sistema y ofrece la ventaja de arrancar las

simulaciones con perfil plano de voltaje (Acha, *et al.*, 2004).



Fig. 4. Ventana de edición y captura de datos (nodos de carga)



Fig. 5. Ventana de edición y captura para las opciones de simulación

El simulador FLUJOS genera los resultados en dos formas: Gráfica y Texto. La forma gráfica consiste en una gráfica de barras en la que muestra las magnitudes de los voltajes nodales, mientras que para la forma de texto, ofrece en forma de lista las magnitudes de los voltajes nodales y sus ángulos, los flujos de potencia entre nodos y las potencias de generación y pérdidas del sistema. Las figuras 6 y 7 muestran respectivamente los resultados.

Además de mostrar de forma grafica y texto los resultados, el simulador puede generar un reporte en formato *.txt, el cual puede ser utilizado ya sea para estudios de estabilidad u otras aplicaciones.

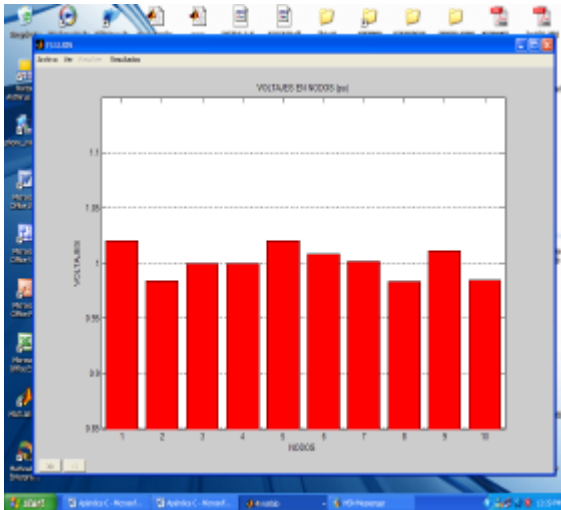


Fig. 6. Resultados gráficos generados por el simulador (Magnitudes de los voltajes nodales)

De	Nodo	l	MW	MVAR	l	0.00	0.00
3	Nodo	2	48.50	23.24			
3	Nodo	7	99.32	-14.20			
3	Nodo	9	-3.63	4.77			
De	Nodo	2	MW	MVAR	0.9844	-3.31	
3	Nodo	1	-48.80	-19.87			
3	Nodo	11	21.80	-0.12			
De	Nodo	3	MW	MVAR	1.0000	4.61	
3	Nodo	4	10.82	-8.23			
3	Nodo	5	28.24	-19.33			
3	Nodo	10	17.47	-1.84			
3	Nodo	10	17.47	-1.84			
De	Nodo	4	MW	MVAR	1.0000	3.46	
3	Nodo	3	-16.82	8.67			
3	Nodo	12	16.82	2.69			
De	Nodo	5	MW	MVAR	1.0200	0.74	
3	Nodo	1	-27.18	19.47			
3	Nodo	6	0.89	10.28			
3	Nodo	14	58.79	0.20			
3	Nodo	14	58.79	0.20			
De	Nodo	6	MW	MVAR	1.0080	0.08	
3	Nodo	5	-9.89	-10.04			
3	Nodo	12	9.89	10.04			
De	Nodo	7	MW	MVAR	1.0013	-11.72	
3	Nodo	1	-92.86	31.35			
3	Nodo	8	4.12	15.11			
3	Nodo	13	-11.26	3.55			

Figura 7. Resultados texto generados por el simulador (Flujos de cargas)

4.3. Modelo del Compensador Estático de Vars incluido en el simulador FLUJOS.

El Compensador Estático de Var's es un dispositivo regulador de voltaje el cual genera o absorbe potencia reactiva al variar la susceptancia equivalente figura 8. (H. Ambriz-Perez, et.al 2000) hablan detalladamente acerca de este dispositivo

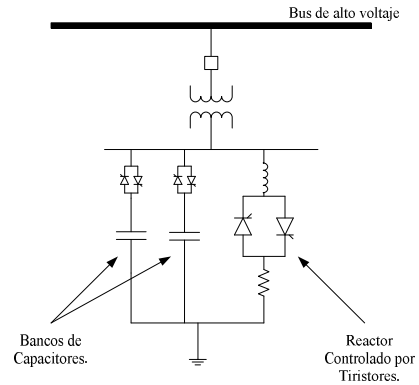


Fig. 8. Esquema típico de un Compensador Estático de Vars

En el modelo utilizado la susceptancia equivalente está en función del ángulo de disparo en los tiristores que controlan al reactor Figura 9.

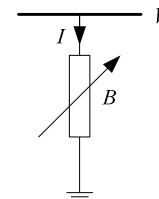


Fig. 9. Modelo de Susceptancia variable del Compensador Estático de Vars

La relación entre la susceptancia y el ángulo de disparo se expresa de la siguiente forma:

$$B = \frac{X_L - \frac{X_C}{p} (2(p-a) + \text{Sen}(2a))}{X_C \cdot X_L} \quad (6)$$

Donde:

- B es la susceptancia equivalente en el Compensador Estático de Var's.
- X_L y X_C son las reactancias capacitiva e inductiva total del Compensador Estático de Var's.
- a es el ángulo de disparo en los tiristores que controlan al reactor

La incorporación del Compensador Estático de Var's se hace considerando el ángulo de disparo a como variable de estado. Con esto la ecuación (5) se transforma en la siguiente:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial Q}{\partial a} \end{bmatrix}^k \cdot \begin{bmatrix} \Delta q \\ \Delta a \end{bmatrix}^k \quad (7)$$

Donde:

- $Q = V^2 B$ (Derivada de la figura 9).
- $\frac{\partial Q}{\partial a} = \frac{2V^2}{X_L} (\text{Cos}(2a) - 1)$ (B de la ecuación (6)).

El voltaje en el nodo donde el Compensador Estático de Var's está conectado, siempre llegara al voltaje especificado y el Compensador Estático de Var's suministrara la potencia reactiva necesaria para este fin. Los nodos con Compensador Estático de Vars tienen tres variables especificadas (V, G, B) y se consideran como un tipo especial de nodo con voltaje regulado. Los límites del ángulo de disparo son: $90^\circ < \alpha < 180^\circ$, si alguno de esos límites es violado el Compensador Estático de Var's se convierte en una susceptancia fija donde ahora la magnitud del voltaje nodal depende de las condiciones de la red y el nodo se convierte en un nodo PQ (ver tabla 1).

5. RESULTADOS

Para mostrar la utilidad del simulador FLUJOS y los excelentes resultados que ofrece, se plantea un caso de estudio el cual presenta inicialmente problemas de voltaje. Se demuestra que utilizando el Compensador Estático de Var's incluido en el simulador el voltaje se mejora notablemente.

Sistema de cinco nodos (Acha, *et al.*, 2004) mostrado en la figura 10. Sus valores iniciales se describen en las tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2. Voltajes y ángulos nodales del caso de estudio

Nodo.	Voltaje (pu).	Angulo (grad).
1 (Slack ¹).	1.06	0
2 (PV).	1.0	0
3 (PQ).	1.0	0
4 (PQ).	1.0	0
5 (PQ).	1.0	0

Tabla 3. Potencias de generación y sus límites del caso de estudio

Nodo.	P (pu).	Q (pu).	Pmax (pu).	Qmin (pu).	Qmax (pu).
1	1.3112	0.9082	2.0	-2.0	2.0
2	0.4	-0.6159	2.0	-2.0	2.0

Tabla 4. Parametros de las líneas del caso de estudio

Nodo Inicio.	Nodo Fin.	R (pu).	X (pu).	G (pu).	B (pu).
1	2	0.02	0.06	0.0	0.06
1	3	0.08	0.24	0.0	0.05
2	3	0.06	0.18	0.0	0.04
2	4	0.06	0.18	0.0	0.04
2	5	0.04	0.12	0.0	0.03
3	4	0.01	0.03	0.0	0.02
4	5	0.08	0.24	0.0	0.05

Tabla 5. Cargas del caso de estudio

Nodo.	P (pu).	Q (pu).
2	0.20	0.10
3	0.45	0.14
4	0.40	0.05
5	0.60	0.10

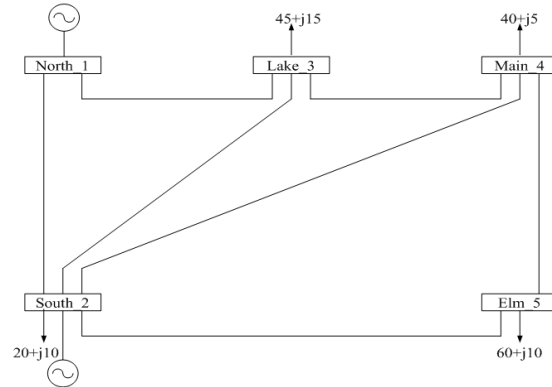


Fig. 10. Caso de estudio

Se resuelve el problema de flujos de potencia para el caso de estudio y los resultados obtenidos del archivo tipo reporte generado por flujos son los siguientes:

RESULTADOS DE FLUJOS DE POTENCIA:
SISTEMA DE 5 NODOS Bus Test Case
FECHA: 08/14/06
HORA: 14:12:42

VOLTAJES Y CARGAS NODALES:

Nodo	Voltaje (pu)	Ángulo (grados)	Carga (MW)	Carga (MVAR)
1	1.0600	0.00	0.00	0.00
2	1.0000	-2.06	20.00	10.00
3	0.9873	-4.64	45.00	15.00
4	0.9841	-4.96	40.00	5.00
5	0.9717	-5.76	60.00	10.00

Se observa que el nodo 5 tiene el valor mas bajo, por tal motivo se decide poner un CEV en ese nodo. Para elevar el voltaje en ese nodo es necesario que el CEV se comporte como una susceptancia capacitiva. Los límites de la susceptancia del CEV se determinan al agregar valores de susceptancia fija al nodo de interés, con esto se llegara al valor de susceptancia que mantendrá el voltaje al valor deseado. Después de varias pruebas se determina que una susceptancia capacitiva de $+0.32pu$ mantendrá el valor del voltaje en el nodo 5 en $1.0pu$. Con un valor de susceptancia requerido de $+0.32 (pu)$, los límites del CEV se establecen como: $-5 < B < +0.5 (pu)$. Con los límites de susceptancia definidos se calculan los valores de las reactancias capacitiva X_C e inductiva X_L del CEV.

El valor de X_C se calcula considerando que el ángulo de conducción es mínimo y la susceptancia total del CEV es la capacitiva. La susceptancia total del CEV es la combinación de la susceptancia capacitiva e inductiva, entonces:

$$B_C - B_L = B_{CEV} \quad (8)$$

La ecuación 8 se puede reescribir como:

$$\frac{1}{X_C} - \frac{1}{X_L} = B_{CEV} \quad (9)$$

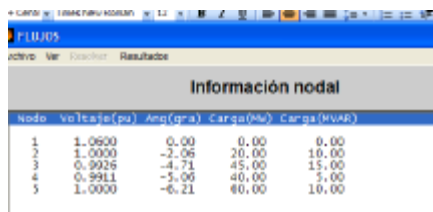
Donde: $B_{CEV} = B_{max}$, $B_{max} = +0.5(pu)$ y $1/X_L = 0$, entonces: $1/X_C = 0.5(pu)$ y por lo tanto: $X_C = 2.0(pu)$.

El valor de X_L , se calcula con la combinación de ambas partes: capacitiva e inductiva. Partiendo de la ecuación 9, con X_C y la susceptancia total del CEV igual al valor mínimo, entonces el valor de X_L es obtenido como sigue:

$$\frac{1}{2} - \frac{1}{X_L} = -0.5 \quad (10)$$

El ángulo de disparo inicial en los tiristores debe estar dentro de los límites: $90^\circ < \alpha < 180^\circ$. Un ángulo de 100° es recomendado para un buen arranque (Ambriz-Perez, *et.al*, 2000).

Las magnitudes de los voltajes nodales obtenidos de la corrida de flujos con el CEV, se muestran en la figura 12. El ángulo de disparo final del CEV calculado en el simulador es de 135.13° y la susceptancia final calculada por el simulador es de $+0.3198(pu)$. Se observa de la figura 12 que el nodo 5 tiene una magnitud de voltaje igual a 1.0pu, que fue el valor especificado. Los voltajes en los nodos 3 y 4 también se incrementaron.



Información nodal				
Nodo	Voltaje(pu)	Ang(gra)	Carga(Mw)	Carga(MVAR)
1	1.0000	0.00	0.00	0.00
2	1.0000	-2.06	20.00	10.00
3	0.9926	-4.71	45.00	15.00
4	0.9911	-5.00	40.00	5.00
5	1.0000	-6.21	40.00	10.00

Fig. 12. Magnitudes de voltaje con el CEV agregado al nodo 5

Por último se analiza la potencia reactiva. Para este caso la potencia reactiva generada por el CEV es de 31.98 MVAR's.

Los generadores absorben una potencia reactiva total de 32.16 MVAR's. La diferencia entre estas dos potencias corresponde a la capacitancia de las líneas de transmisión.

6. CONCLUSIONES

El simulador FLUJOS aunque útil para resolver el problema de flujos de potencia se continúa desarrollando con el fin de incorporar más dispositivos FACTS.

En este trabajo se comprobó el beneficio del CEV en un sistema pequeño pero en pruebas más detalladas el simulador ha respondido con gran eficiencia en sistemas con más de 100 nodos.

El simulador FLUJOS continúa desarrollándose con el fin de incorporar más dispositivos FACTS, lo que ofrecerá un excelente escenario para validar diferentes modelos de dispositivos FACTS.

REFERENCIAS.

- Acha E., Fuerte-Esquivel Claudio R., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C., "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley & Sons Ltd, England 2004.
- Ambriz-Perez, H., Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., "Advanced SVC models for Newton-Raphson Load Flow and Newton Optimal Power Flow Studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 15, No.1, Feb-2000, 129-136.
- Hingonari, N.G., 1993, "Flexible AC Transmission Systems", IEEE Spectrum, PP. 41-45, Abr-1993.
- Núñez O., Tesis: "Modelación de FACTS para estudios de flujos y estabilidad" Tecnológico de la Laguna, México 2006.
- Tinney, W.F. and Hart, C.E., 1967, "Power Solution by Newton's Method", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems PAS-86(11) 1449-1460.
- MathWorks, Inc. "Getting Started with MATLAB, Version 6". USA 2000.