

2005-12-01

## Modelación del SVC (Static Var Compensator) para cálculo de flujo de potencia en estado estable basado en el algoritmo de Newton-Raphson

Guillermo Andrés Díaz Florez  
*Universidad de La Salle, Bogotá, mastergad@lasalle.edu.co*

Fredy Andrés Murcia Castañeda  
*Universidad de La Salle, Bogotá, fredmur07@lasalle.edu.co*

Camilo Andrés Cortés  
*Universidad de La Salle, Bogotá, camilocortes@lasalle.edu.co*

Follow this and additional works at: <https://ciencia.lasalle.edu.co/ep>

---

### Citación recomendada

Díaz Florez, Guillermo Andrés; Murcia Castañeda, Fredy Andrés; and Cortés, Camilo Andrés (2005)  
"Modelación del SVC (Static Var Compensator) para cálculo de flujo de potencia en estado estable  
basado en el algoritmo de Newton-Raphson," *Épsilon*: Iss. 5 , Article 4.  
Disponible en:

This Artículos de investigación is brought to you for free and open access by the Revistas descontinuas at  
Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Épsilon by an authorized editor of Ciencia Unisalle. For more  
information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

# Modelación del SVC (*Static Var Compensator*) para cálculo de flujo de potencia en estado estable basado en el algoritmo de Newton-Raphson

Guillermo Andrés Díaz Florez\* / Fredy Andrés Murcia Castañeda\*\* /  
Camilo Andrés Cortés\*\*\*

## RESUMEN

Uno de los primeros pasos para evaluar la factibilidad de un sistema de compensación reactiva (tradicional o basado en electrónica de potencia) es el estudio de flujo de potencia en estado estable, ya que este análisis provee una perspectiva global del comportamiento del sistema debido a la influencia del dispositivo. En éste artículo se investigan nuevas alternativas de modelamiento propuestas por la literatura para la inclusión del SVC dentro de sistemas de potencia para estudios de flujo de potencia basados en el algoritmo de Newton-Raphson usando MATLAB. Los modelos y la implementación del programa planteados en esta publicación son los primeros frutos del proyecto de grado que se desarrolla actualmente en la Facultad de Ingeniería Eléctrica acerca de dispositivos FACTS<sup>1</sup>.

**Palabras clave:** SVC, flujo de potencia, Newton-Raphson, MATLAB.

## SVC (*STATIC VAR COMPENSATOR*) MODELING TO CALCULATE THE STEADY STATE POWER FLOW BASED ON THE NEWTON-RAPHSON ALGORITHM

### ABSTRACT

One of the first steps in order to evaluate the feasibility of a reactive compensation system (traditional or based on power electronics) is the study of the steady state power flow, because this analysis provides a global perspective of the system behavior due to the new element. In this paper, new modeling alternatives proposed by the literature for SVC inclusion in power systems for studies of power flow based on the Newton-Raphson algorithms are investigated using MATLAB. The models and the software outlined in this paper are the first results of the degree project of the School of Electrical Engineering regarding FACTS devices.

**Key words:** FACTS, SVC, power flow, Newton-Raphson, MATL

\* Estudiante de Ingeniería Eléctrica X semestre, realizando su práctica profesional en Siemens. Correo electrónico: mastergad@lasalle.edu.co

\*\* Estudiante de Ingeniería Eléctrica X semestre, realizando su práctica profesional en SLI Colombia. Correo electrónico: fredmur07@lasalle.edu.co

\*\*\* Ingeniero Electricista, Universidad Nacional de Colombia, Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, Profesor Asistente Ph.D. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la Salle. Correo electrónico: camilocortes@lasalle.edu.co

<sup>1</sup> Trabajo de grado «Análisis técnico para la implementación de un sistema de compensación reactiva (FACTS) a la línea de transmisión Circo-Guavio perteneciente al STN».

Fecha de recepción: octubre 25 de 2005.

Fecha de aprobación: noviembre 3 de 2005.

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de realizar una administración más eficiente de los sistemas eléctricos, ha impulsado la innovación de tecnologías en las áreas de generación y transmisión de energía. Podemos decir que el ciclo combinado es un buen ejemplo de nuevos desarrollos en generación. Por su parte, los sistemas de transmisión no podían quedar en desventaja, dando vida a una nueva gama de dispositivos de última generación llamados Sistemas Flexibles de Transmisión en Corriente Alterna, FACTS (Flexible AC Transmission Systems).

Los niveles alcanzados hoy en día por los FACTS son el resultado del desarrollo tecnológico logrado en los campos de los semiconductores para aplicaciones en potencia, y de los procesadores digitales de señales, además de las nuevas topologías de convertidores para aplicaciones en grandes potencias. En consecuencia, hoy en día se tiene la capacidad de realizar un control sin precedentes sobre el flujo de potencia en los sistemas de transmisión de energía eléctrica.

La situación económica y ambiental del país amerita que se realicen esfuerzos por buscar maneras de optimizar los procesos de transmisión de energía eléctrica. En los FACTS se tiene una excelente alternativa para llevar a cabo el desarrollo de sistemas más eficientes, estables, confiables y ambientalmente más sanos.

La Facultad de Ingeniería Eléctrica de La Universidad de La Salle se ha interesado en este tema, dando como resultado 2 proyectos de grado (Pérez y Rozo, 2003; Briñez y Martínez, 2002) enfocados al estudio de comportamiento eléctrico transitorio de es-

tos dispositivos mediante programas de simulación avanzados<sup>2</sup>.

A diferencia de los trabajos desarrollados anteriormente en la facultad sobre el tema, en éste artículo se propone la ejecución de un algoritmo en Matlab que permita obtener los resultados del problema del flujo de potencia involucrando el SVC (Compensador estático de reactivos, un tipo de FACTS).

Es importante para la Facultad de Ingeniería Eléctrica de La Universidad de La Salle investigar en el tema, debido a que es urgente su inclusión en las asignaturas de sistemas de potencia que se imparten en su programa de estudios, y a las posibilidades de investigaciones futuras para diversos organismos nacionales e internacionales, como por ejemplo: ISA, UPME, etc.

Aunque varios programas de simulación (ETAP, NEPLAN, etc.) contienen actualmente módulos con el modelado de los dispositivos FACTS, estos son cajas negras para los usuarios de los programas.

## ¿QUE SON LOS FACTS?

Son Sistemas de Transmisión en Corriente Alterna que incorporan convertidores estáticos (dispositivos FACTS) para mejorar la controlabilidad y la capacidad de transporte de potencia eléctrica entre la generación y la carga (Hingorani y Gyugyi, 1999; Song y Johns, 1999; Doña, 2001).

## RAZONES PARA USAR FACTS

Razones para la incorporación de los dispositivos FACTS en sistemas de transmisión y distribución (Paserba, 2004; Grünbaum, Sharma y Charpentier, 2000):

---

2 Alternative Transients Program (ATP).

- Estabilidad de tensión en sistemas débiles.
- Reducción de las pérdidas de transmisión.
- Incrementen la capacidad de transmisión postergando la necesidad de nuevas líneas.
- Incrementen el límite de estabilidad transitoria.
- Incrementen el amortiguamiento de pequeñas perturbaciones.
- Mejoren el control de tensión y la estabilidad.
- Amortiguamiento de las oscilaciones de potencia.
- Puede llegar más energía a los consumidores con un impacto mínimo en el medio ambiente, con plazos de ejecución de los proyectos sustancialmente inferiores y con inversiones más reducidas.

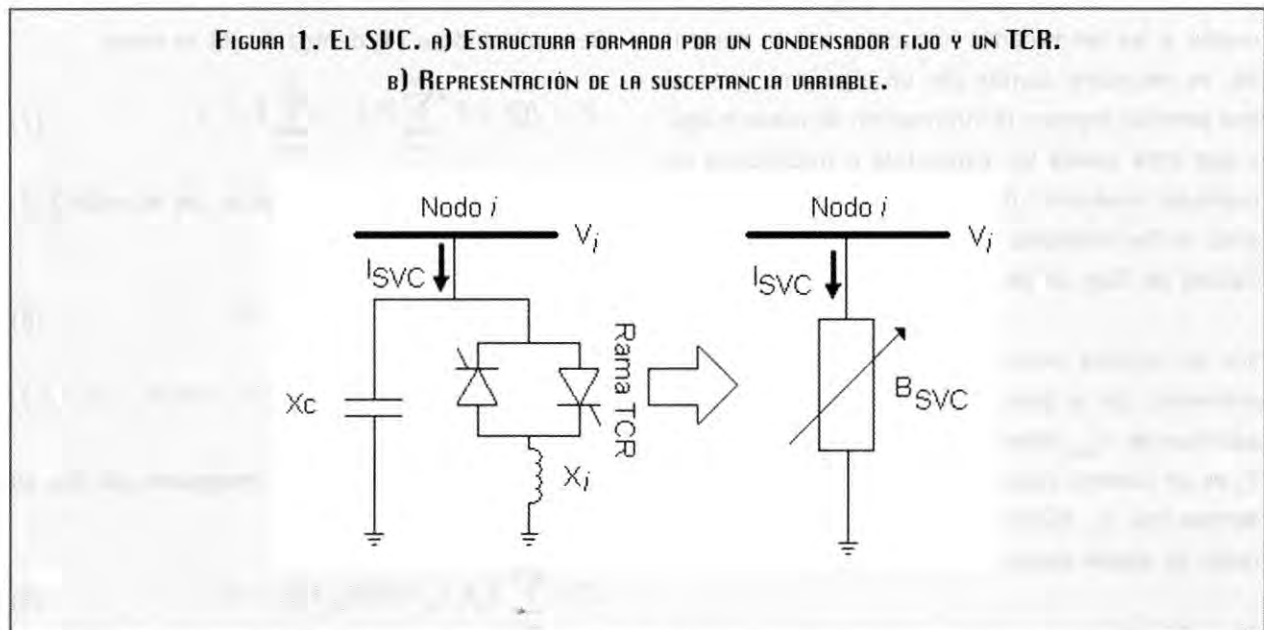
## COMPENSADOR ESTÁTICO DE REACTIVOS (SVC)

El SVC se comporta como una reactancia paralelo-variable, la cuál genera o absorbe potencia reactiva para regular la magnitud de tensión en un punto de conexión de la red. En esta forma, el SVC consiste de una rama con un reactor controlado (TCR) en

paralelo, con un banco de condensadores. Los tiristores disparan un ángulo de control permitiendo al SVC tener casi instantáneamente una velocidad de respuesta. Es usado para proveer rápidamente potencia reactiva y soporte en la regulación de tensión. Es utilizado también, para aumentar el margen de estabilidad del sistema y controlar las oscilaciones del sistema de potencia (Hingorani y Gyugyi, 1999; Geidl, 2003; Ambriz-Pérez, Acha y Fuerte-Esquivel, 2000).

En el estudio de flujos de potencia, el SVC es normalmente modelado como un generador sincrónico, con cero potencia activa de generación y con límites superiores e inferiores dados para la generación de potencia reactiva. El generador representado por el SVC es reemplazado por una admitancia constante si el SVC se mantiene en uno de sus límites (Ambriz-Pérez y Acha, y Fuerte-Esquivel, 2000; BDP Switzerland, 2004).

La representación esquemática del SVC y su circuito equivalente son mostrados en la Figura 1, donde un TCR es conectado en paralelo con un banco fijo de condensadores.



## CARACTERÍSTICAS

- Este sistema permite un mayor grado de ajuste de compensación reactiva, debido a que se pueden implementar varias etapas de condensadores y reactores.
- Los condensadores pueden entrar y salir del sistema, mientras que las inductancias pueden ser controladas mediante el encendido y apagado de los tiristores varias veces en un ciclo de la onda de voltaje.
- Los condensadores pueden servir como filtro para la distorsión que se genera por el recorte de la onda de corriente en las inductancias.

## MODELAMIENTO TEÓRICO

Primero se procederá a hacer una breve explicación del algoritmo de Newton-Raphson para solucionar el flujo de potencia normal (sin SVC).

## CONCEPTOS PRELIMINARES

Debido a que los sistemas de potencia son organizaciones dinámicas que deben adaptarse rápidamente a las necesidades impuestas por la demanda, es necesario contar con un algoritmo general que permita ingresar la información de manera ágil, y que esta pueda ser expandida o modificada en cualquier momento. Por tal motivo, a través de los años, se ha trabajado en un algoritmo general para cálculo de flujo de potencia en estado estable.

Sea un sistema hipotético de  $N$  barras, donde el elemento de la posición  $(i, j)$  de la matriz de admitancias  $Y_{bus}$  viene dado por  $Y_{ij}$ . Como se sabe  $Y_{ij}$  es un número complejo, donde su argumento se denota con  $\theta_{ij}$  (Grainger y Stevenson, 1996), por tanto se puede escribir:

$$Y_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} \quad (1)$$

Aplicando el teorema de De Moivre a la ecuación (1) se tiene:

$$Y_{ij} = Y_{ij} \cos(\theta_{ij}) + j Y_{ij} \sen(\theta_{ij}) \quad (2)$$

De manera análoga, la tensión en la barra  $j$  viene dada por:

$$V_{ij} = V_{ij} \angle \delta_{ij} = V_{ij} [\cos(\theta_{ij}) + j \sen(\theta_{ij})] \quad (3)$$

Aplicando la ley de corrientes de Kirchhoff al sistema de  $N$  nodos, se tiene que la corriente total inyectada en la barra  $i$  sería:

$$I_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (4)$$

De manera general se tiene que la potencia aparente viene dada por:

$$S_i = P_i + jQ_i = V_i I_i^* \quad (5)$$

Obteniendo el complejo conjugado de (5),

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* I_i \quad (6)$$

Reemplazando a (4) dentro de (6) se tiene,

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_i^* V_n \quad (7)$$

Expresando a (7) de manera polar, de acuerdo a (1) y (3) se tiene:

$$\begin{aligned} P_i - jQ_i &= \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \\ &= \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| [\cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) + j \sen(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i)] \end{aligned} \quad (8)$$

Separando las partes real e imaginaria de (8), se obtiene:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (9)$$



$$Q_i = -\sum_{n=1}^N Y_{in} V_i V_n \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (10)$$

(9) y (10) son las ecuaciones fundamentales de flujo de potencia para un sistema con  $N$  nodos. Como puede verse, componen un sistema no lineal de ecuaciones simultáneas, por tanto, para determinar sus soluciones, es necesario aplicar métodos numéricos que permitan aproximar el resultado de una manera lo suficientemente precisa.

Para solucionar sistemas de ecuaciones no lineales se encuentran algoritmos tales como el de Gauss-Seidel, Newton-Raphson y programación cuadrática secuencial (Palma, Pérez y Núñez, 2001). En este proyecto se implementará el algoritmo de Newton-Raphson, fundamentalmente debido a su rápida convergencia, precisión y ágil construcción.

## ALGORITMO DE NEWTON-RAPHSON

### ENTRADAS

A continuación se explicarán brevemente los datos de entrada principales para calcular un flujo de potencia mediante el algoritmo de Newton-Raphson.

### INFORMACIÓN ACERCA DEL TIPO DE BARRA

Para el cálculo de flujo de potencia se tienen en cuenta tres tipos de barras, las cuales se enumeran en la Tabla 1.

**TABLA 1. TIPOS DE BARRAS PARA CÁLCULO DE FLUJO DE POTENCIA.**

Tipo de Barra	Datos Conocidos	Comentario
Carga	$P_i, Q_i$	-
Voltaje Controlado	$P_i, V_i$	Todos los buses con generador <sup>3</sup>
Compensación (Slack)	$V_i, \delta_i$	Se asume, No bus=1, $V_i=1$ p.u., $\delta_i=0^\circ$

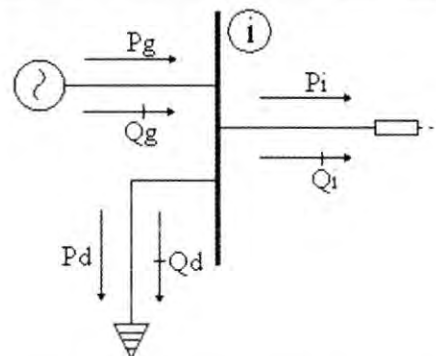
## POTENCIA PROGRAMADA EN BARRAS

Para todas las barras del sistema, en todo el proceso de flujo de potencia se deben cumplir las siguientes relaciones de acuerdo a la ilustración de la Figura 2.

$$P_i = P_{gi} - P_{di} \quad (11)$$

$$Q_i = Q_{gi} - Q_{di} \quad (12)$$

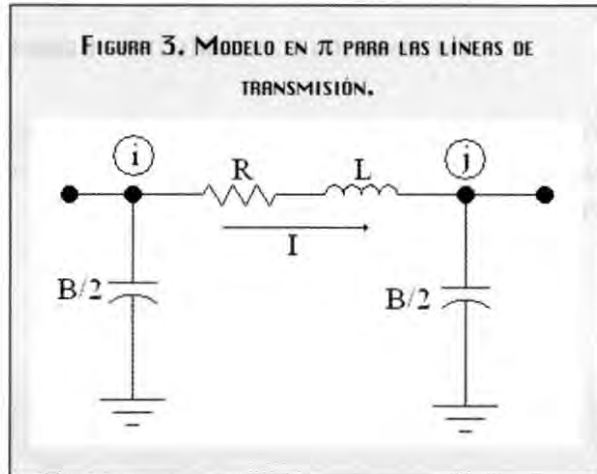
**FIGURA 2. RELACIÓN DE POTENCIAS EN BARRAS.**



<sup>3</sup> También se pueden considerar a las barras con dispositivos de control de tensión en lazo cerrado como de voltaje controlado, independientemente de que no tengan generación de potencia activa, como se mostrará en este artículo.

## TOPOLOGÍA DE LA RED

La topología de la red y la información más importante de las líneas de transmisión se encuentra contenida dentro de la matriz de admitancias  $Y_{bus}$ . Para la construcción de dicha matriz se usará el modelo en pi ( $\pi$ ) para las líneas, tal y como se ve en la Figura 3.



Los elementos de la diagonal ( $Y_{ij}$ ) representan la suma de las admitancias que concurren en el nodo  $j$ , mientras que los elementos por fuera de la diagonal ( $Y_{ij}$ ) equivale al negativo de la admitancia que se encuentre entre las barras  $i$  y  $j$ .

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{3N} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ Y_{N1} & Y_{N2} & Y_{N3} & \cdot & \cdot & \cdot & Y_{NN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

## IMPLEMENTACIÓN DEL ALGORITMO

Aprovechando las grandes capacidades de *Matlab* en el manejo de matrices de gran tamaño, su flexibilidad en la programación y su extenso uso en las asignaturas de sistemas de potencia y en general de la carrera de Ingeniería Eléctrica, se adoptó a este entorno de desarrollo como herramienta principal de modelado y simulación para esta investigación.

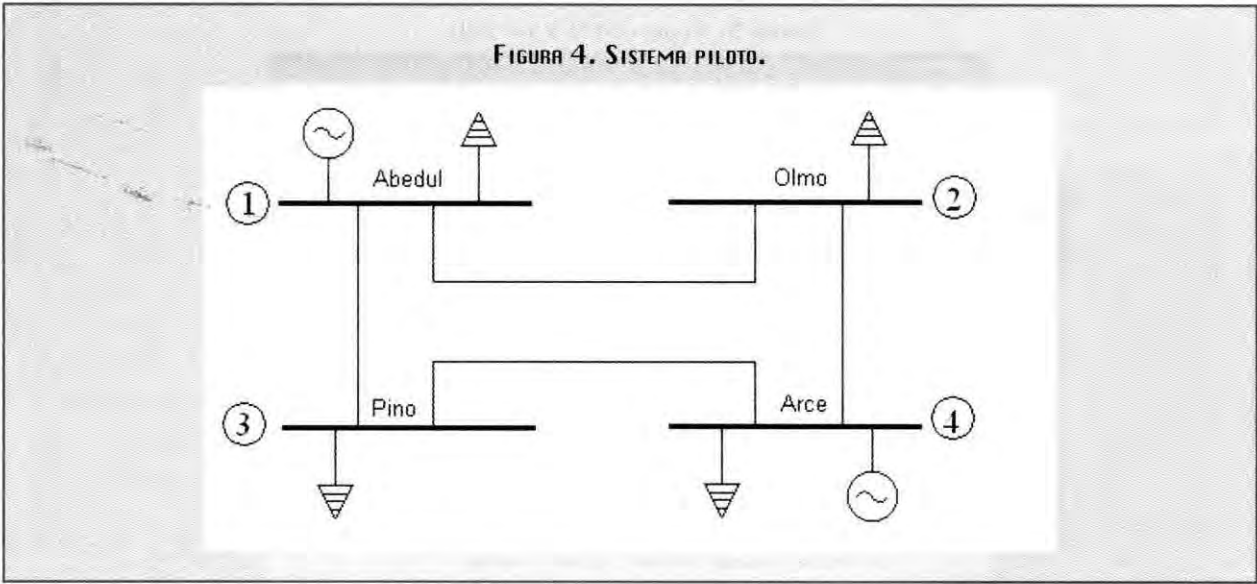
El algoritmo implementado se basó en los desarrollos propuestos en:

- *PowerFlowLab* (Saadat, 1999).
- *Matpower* (Zimmerman, Murillo-Sánchez y Gan, 2005).
- *Análisis de Sistemas de Potencia* (Graninger, Stevenson, 2001).
- *Computer Modeling of Electrical Power Systems* (Arrillaga, Arnold, Harper, 2000).

## PRUEBA Y EJECUCIÓN DEL PROGRAMA (MPFS)

Se decidió nombrar al programa como *Matlab Power Flow Solver* (MPFS), y de esta forma diferenciarlo de otros programas basados en *Matlab* destinados a calcular flujos de potencia.

Para probar la validez del programa calculando el flujo de potencia estándar (sin la modelación de dispositivos FACTS).



Fuente: Grainger y Stevenson, 2001.

### DATOS PRINCIPALES DEL SISTEMA EN CONSIDERACIÓN

Tensión del sistema 230 kV, potencia base 100 MVA.

**TABLA 2. INFORMACIÓN BÁSICA DEL SISTEMA EN CONSIDERACIÓN.**

Barra	Generación		Carga		V, por unidad		Tipo barra
	P, MW	Q,Mvar	P, MW	Q,Mvar	Magnitud	Angulo	
1	-	-	50	30.99	1	0	Slack
2	0	0	170	105.35	1	0	Carga
3	0	0	200	123.94	1	0	Carga
4	318	-	80	49.58	1.02	0	V contro.

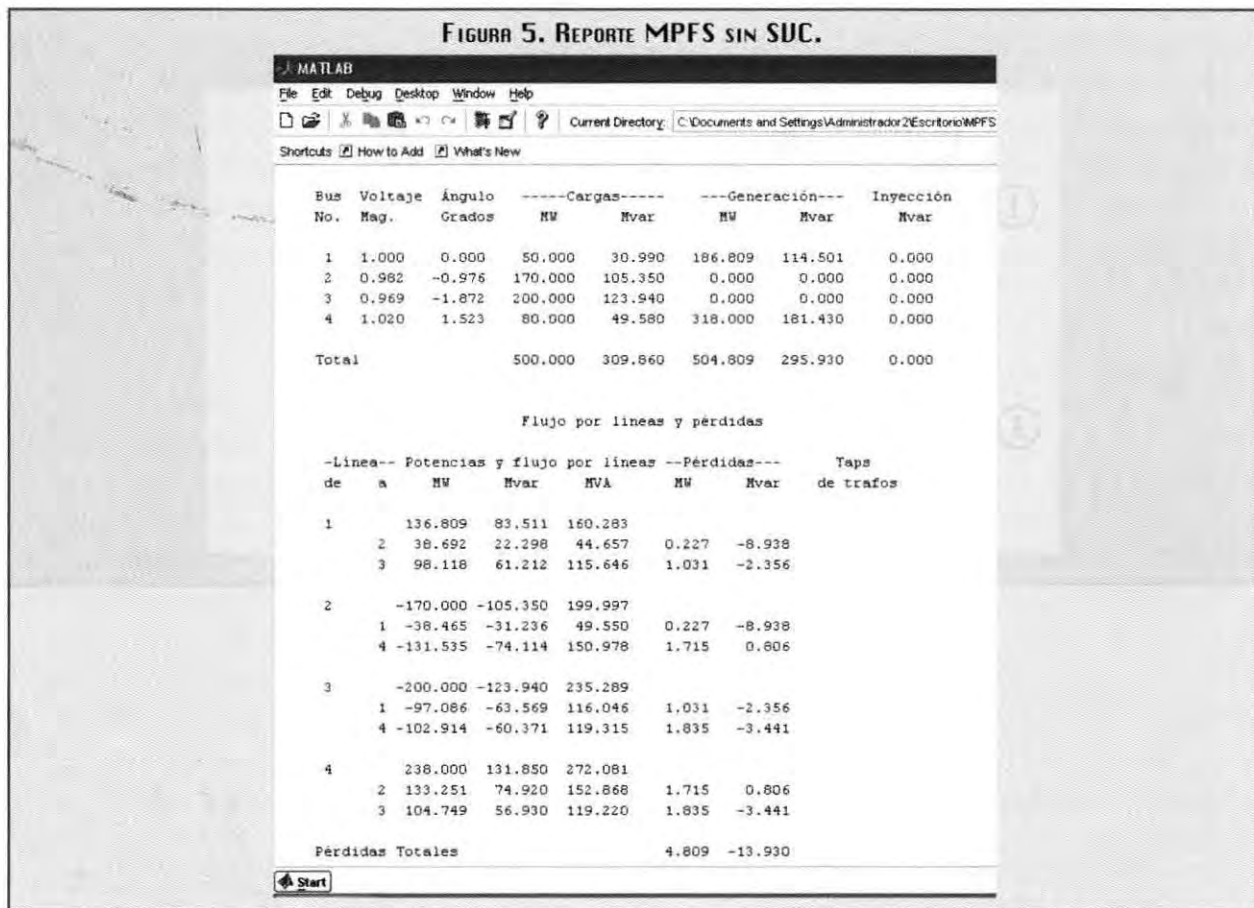
Fuente: Grainger y Stevenson, 2001.

MPFS entrega los resultados del flujo de potencia en forma de reporte dentro de la ventana de co-

mandos de Matlab, tal como se muestra en la Figura 5.



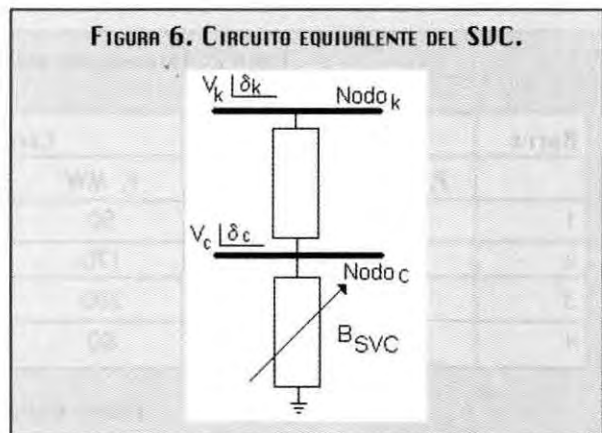
FIGURA 5. REPORTE MPFS SIN SUC.



## MODELACIÓN DEL SVC USANDO LA TÉCNICA DE INYECCIÓN DE POTENCIA

En la Figura 6 se muestra el circuito equivalente del SVC (Talebi, Ehsan y Bathaee; 2004), incluyendo transformador de acople.

FIGURA 6. CIRCUITO EQUIVALENTE DEL SVC.



A partir de las ecuaciones fundamentales de flujo de potencia (9 y 10), se puede demostrar para el circuito de la Figura 6 que las ecuaciones de inyec-

ción de potencia de un SVC conectado a una barra  $k$  del sistema son:

$$P_{kinject} = G_{SVC} V_k^2 - Y_{SVC} V_k V_c \cos(\delta_k - \delta_c - \theta_{SVC}) \quad (14)$$

$$Q_{kinject} = B_{SVC} V_k^2 - Y_{SVC} V_k V_c \sin(\delta_k - \delta_c - \theta_{SVC}) \quad (15)$$

Por razones de facilidad en el modelado, se desprecia la impedancia del transformador, y se asume que el SVC no tiene pérdidas de potencia activa, por tanto se obtienen las siguientes ecuaciones reducidas de inyección de potencia:

$$P_{kinject} = 0 \quad (16)$$

$$Q_{kinject} = B_{SVC} V_k^2 \quad (17)$$

Como se advierte en (17), la potencia reactiva inyectada depende únicamente de la susceptancia ( $B_{SVC}$ ), debido a que  $V_k$  es un valor de tensión que el SVC mantiene constante mediante su sistema de control en lazo cerrado.

El SVC opera de manera tal, que con la variación de  $B_{SVC}$  se mantenga la tensión en la barra en el valor preestablecido. De aquí se deduce que la operación del SVC en un sistema de potencia puede ser modelada como una barra de voltaje controlado con inyección de potencia activa cero.

## IMPLEMENTACIÓN DEL SVC DENTRO DEL FLUJO DE POTENCIA

Se implementó el SVC en la barra 3 del sistema piloto debido a que es la barra con la tensión más baja de todos los nodos (0,96 pu) y de acuerdo con el criterio planteado anteriormente. Se asumió como tensión objetivo 1 pu obteniendo el reporte de la Figura 7.

FIGURA 7. REPORTE MPFS CON SVC.

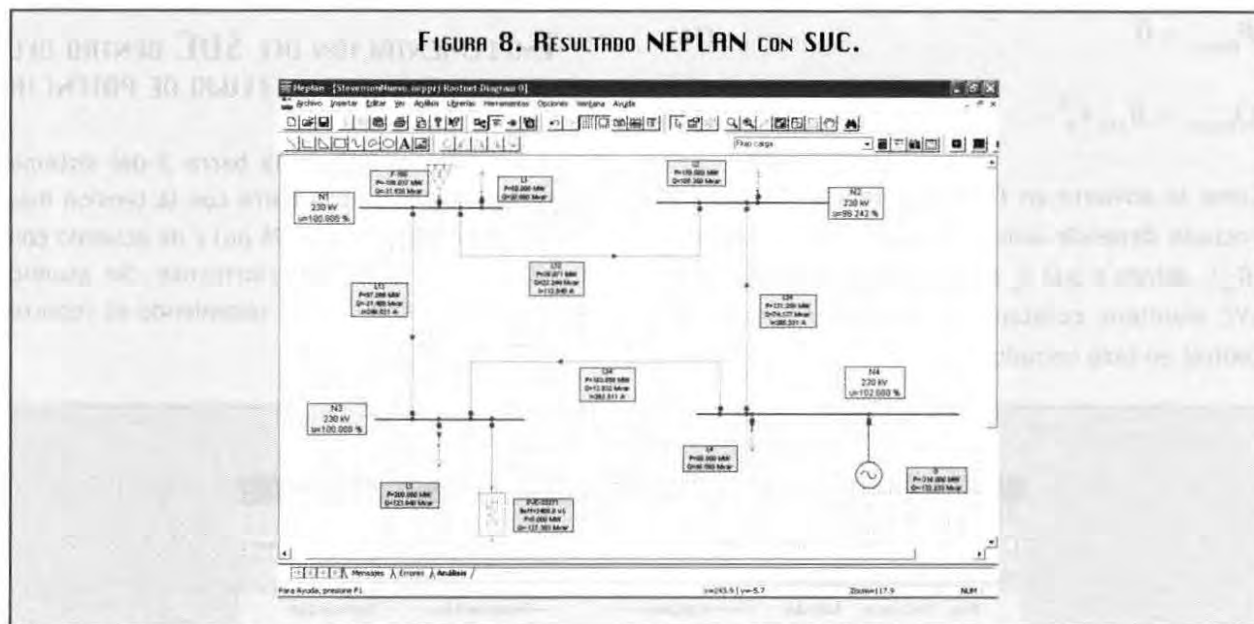
MATLAB								
File Edit Debug Desktop Window Help								
Current Directory: C:\Documents and Settings\Administrador2\Escritorio\MPFS								
Shortcuts How to Add What's New								
Bus No.	Voltaje Mag.	Ángulo Grados	---Cargas---		---Generación---		Inyección	
			MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
1	1.000	0.000	50.000	30.990	186.037	31.828	0.000	
2	0.982	-0.985	170.000	105.350	0.000	0.000	0.000	
3	1.000	-2.144	200.000	123.940	0.000	127.383	0.000	
4	1.020	1.508	80.000	49.580	318.000	132.233	0.000	
Total			500.000	309.860	504.037	291.444	0.000	
Flujo por líneas y pérdidas								
-Línea-		Potencias y flujo por líneas			-Pérdidas-		Taps	
de	a	MW	Mvar	MVA	MW	Mvar	de trafos	
1		136.037	0.838	136.039				
2		38.971	22.244	44.872	0.229	-8.928		
3		97.066	-21.406	99.398	0.724	-4.131		
2		-170.000	-105.350	199.997				
1		-38.742	-31.173	49.726	0.229	-8.928		
4		-131.258	-74.177	150.768	1.711	0.781		
3		-200.000	3.443	200.030				
1		-96.342	17.275	97.879	0.724	-4.131		
4		-103.658	-13.832	104.577	1.374	-6.138		
4		238.000	82.653	251.943				
2		132.968	74.959	152.641	1.711	0.781		
3		105.032	7.694	105.313	1.374	-6.138		
Pérdidas Totales					4.037	-18.416		

## COMPARACIÓN DE MPFS CON NEPLAN

NEPLAN es un programa comercial especializado en análisis de sistemas de potencia y distribución, ampliamente difundido alrededor del mundo.

Para comprobar la validez de los resultados de MPFS se procedió a correr el mismo flujo de potencia con SVC bajo las mismas condiciones de trabajo, obteniendo el resultado mostrado en la Figura 8.

FIGURA 8. RESULTADO NEPLAN CON SUC.



El reporte generado por NEPLAN se muestra en la Figura 9.

FIGURA 9. REPORTE NEPLAN CON SUC.

FIGURA 9. REPORTE NEPLAN CON SUC.

Neplan [Resultados Fija Carga]

Archivo Editar Formato Alumnos de Cuadrícula Ver Ver/Lista Ayuda

	Desde	Hasta	P Pérdida	Q Pérdida	P Imp	Q Imp	P Gen	Q Gen	P Carga	Q Carga	Costo G	De Parat	Q Parat	Q Comp	Pérdida				
	Área/Co	Área/Co	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar	MW	MVar			MVar	MVar					
7	Parat		4.037	-18.416	0	0	504.037	164.061	500	309.96	0	127.363	0	0					
8	Area 1		4.037	-18.416	0	0	504.037	164.061	500	309.96	0	127.363	0	0					
9	Zone 1		4.037	-18.416	0	0	504.037	164.061	500	309.96	0	127.363	0	0					
10																			
11																			
12	Bus		Pérdida	Pérdida	Pérdida	Pérdida													
13	kV		MW	MVar	MW	MVar													
14	230		4.037	-18.416	0	0													
15																			
16	El	Node	U	u	Arrendo	P Carga	Q Carga	P Gen	Q Gen	Q Parat	dCL	APG	APG	APG	Zone	Area	Pérdida		
17		Nombre	kV	%	%	MW	MVar	MW	MVar	MVar									
18	144	N1	230	100	0	50	30.99	186.037	31.826	0	0	0	0	0	Zone 1	Area 1	1		
19	148	N3	230	100	-2.3	200	123.94	0	0	-127.363	0	0	0	0	Zone 1	Area 1	1		
20	200	H4	234.6	100	1.5	80	49.58	318	132.233	0	0	0	0	0	Zone 1	Area 1	1		
21	193	42	225.957	96.24	-1	170	105.35	0	0	0	0	0	0	0	Zone 1	Area 1	1		
22																			
23	El	Node	Element	Tip	P	Q	I	Ángulo	I	Carga	P Pérdida	Q Pérdida	P Fe	P Costo	Q Comp	Tap	Retención	Sen	Res Tot
24		Nombre	Nombre		MW	MVar	kA	°	%	MW	MVar	MVar	MW	MVar	MVar			%/kV	°
25	279	N4	L4	Carga	90	49.58	0.232	-30.3											
26	269	N2	L2	Carga	170	105.35	0.511	-32.8											
27	23271	N3	SWC-332	SWC	0	-127.363	0.32	97.9											
28	33300	N1	L13	Linea	97.066	-21.406	0.25	12.4	0	0.7239	-4.1308	0	0	0	0	0.00000			
29	33300	N3	L13	Linea	-96.242	17.275	0.246	-17.2	0	0.7239	-4.1308	0	0	0	0	0.00000			
30	33300	N1	L12	Linea	36.871	-22.444	0.113	-29.7	0	0.2286	-9.9294	0	0	0	0	0.00000			
31	33308	N2	L12	Linea	-38.742	-31.173	0.127	140.2	0	0.2286	-9.9294	0	0	0	0	0.00000			
32	33316	N2	L24	Linea	-131.258	-74.177	0.395	149.5	0	1.7105	0.7812	0	0	0	0	0.00000			
33	33316	N4	L24	Linea	152.968	74.959	0.378	-27.8	0	1.7105	0.7812	0	0	0	0	0.00000			
34	33324	N4	L34	Linea	-103.859	13.832	0.263	170.3	0	1.3738	-6.1384	0	0	0	0	0.00000			
35	33724	N4	L34	Linea	105.032	7.694	0.259	-2.7	0	1.3738	-6.1384	0	0	0	0	0.00000			
36	33338	N4	0	Mesaje	-318	-132.233	0.848	158.9											
37	160	N1	F-160	Equipam	-186.037	-31.826	0.474	176.3											
38	187	N3	L3	Carga	200	123.94	0.591	-33.9											
39	258	N1	L1	Carga	50	30.99	0.148	-21.8											

Para Ayuda, presione F1

sw=77.7 yw=65.1 Zom=117.8

Comparando los reportes de las Figuras 7 y 9, y otras simulaciones hechas con punto de operación del SVC de 0,98 y 1,02 p.u., se demuestra la validez del MPFS en el cálculo del flujo de potencia con el SVC.

## CONCLUSIONES

La variación del modelo de inyección de potencia planteada en este artículo demuestra su eficacia al ser implementado en un sistema de potencia.

Al revisar los reportes antes y después de implementar el SVC se pueden resaltar los siguientes efectos eléctricos debidos a la operación del SVC:

- Se redujo la cargabilidad de la línea Abedul-Pino en un 16%.
- Se redujo la cargabilidad de la línea Pino-Arce en un 17%.
- La cargabilidad se reduce significativamente solo en las líneas conectadas a la barra que tiene el SVC.
- La generación de potencia reactiva en Abedul se reduce de 114,501 Mvar a 31,828 Mvar.

La generación de potencia reactiva en Arce se reduce de 181,43 Mvar a 132,233 Mvar.

La disminución de generación de potencia reactiva trae como consecuencia un aumento en el factor de potencia en las máquinas lo cual mejora el grado de estabilidad en la operación de los generadores.

La potencia activa generada es prácticamente igual antes y después de la implementación del SVC.

Las pérdidas de potencia activa totales del sistema se reducen en un 19,1%.

El uso exitoso de MATLAB para la modelación de un FACTS en sistemas de potencia abre la posibilidad de su uso para el aprendizaje de esta nueva tecnología en las asignaturas de Sistemas de Potencia en la Facultad de Ingeniería.

El siguiente paso en la investigación es la simulación de varios tipos de FACTS a la línea de transmisión Circo-Guavio perteneciente al STN, y el determinar sus diversas ventajas desde el punto de vista técnico.

## BIBLIOGRAFÍA

Ambriz-Perez, H.; Acha, E. y Fuerte-Esquivel, C. «Advanced SVC models for Newton-Raphson load flow and Newton optimal power flow studies». *IEEE Transactions on Power Systems* 15. 1. (2000): 129-136.

Arrillaga, J.; Arnold C. Harker B. *Computer Modeling of Electrical Power Systems*. John Wiley and Sons, 2000.

BDP Switzerland. *Modelos y datos de entrada de los elementos, guía del usuario NEPLAN V5*, Programa NEPLAN, 2004.

Bríñez, J. Martínez, M. *Análisis de sobretensiones en sistemas de potencia con dispositivos FACTS*. Proyecto de grado Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad de La Salle, 2002.

Doña, V. *Modelación de FACTS en estado estacionario*. Apuntes del Doctorado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan, Argentina, 2001.

- Geidl, M. *Implementation of FACTS in an interactive power for simulation platform*. Proyecto de grado Facultad de Ingeniería Eléctrica, Zürich: Graz University of Technology 2003.
- Grainger, J.; Stevenson, W. *Análisis de Sistemas de Potencia*; México: McGraw Hill, 1996.
- Grünbaum, R.; Sharma, R. Charpentier, J. «Improving the efficiency and quality of AC transmission systems (Draft3)» *Joint World Bank, ABB Power Systems Paper*. (2000).
- Hingorani, N. Gyugyi, L. *UNDERSTANDING FACTS concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. N.Y.: Wiley-IEEE Press, 1999.
- Palma, R.; Pérez, J.; Núñez, J. «Flujo de Potencia Óptimo con Programación Cuadrática Secuencial» *XIV Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, Antofagasta, Chile*, 2001.
- Paserba, J. «How FACTS controllers benefit AC transmission systems». *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2*. (2004): 257- 1262.
- Pérez, J. y Rozo, C. *Análisis de comportamiento eléctrico mediante la Simulación en ATP para un compensador serie (FACTS) en La interconexión Colombia - Ecuador 230kV*. Proyecto de grado Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad de La Salle, 2003.
- Saadat, H. *Power System Analysis*. Singapore: WCB, McGraw Hill, 1999.
- Song, Y. y Johns, A. *Flexible ac transmission systems (FACTS)*; U.K.: IEEE Press, 1999.
- Talebi, N.; Ehsan, M. y Bathaee, S. «An efficient Power Modeling and Sequential power Flow Algorithm for FACTS Devices» *IEEE SoutheastCon Proceedings* (2004): 488-507.
- Zimmerman, R.D.; Murillo-Sánchez, C.E.; Gan, D. *MATPOWER, A MATLAB Power System Simulation Package*, <<http://www.pserc.cornell.edu/matpower>> (consultado el 07-07-2005).