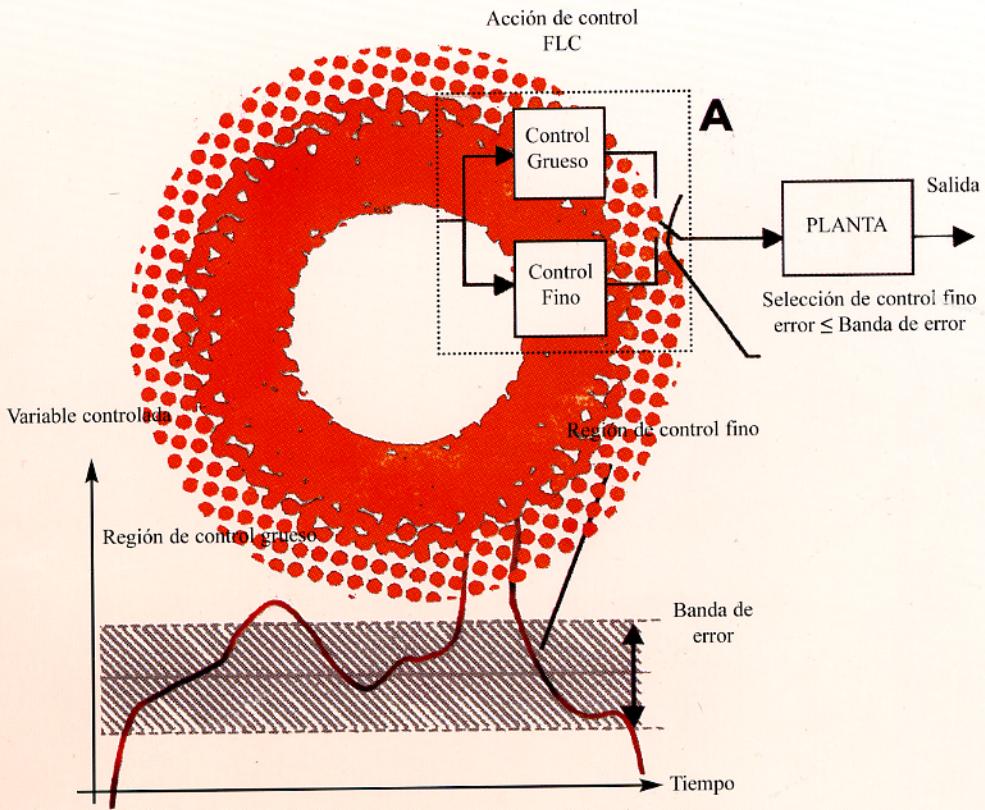


# Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica  
Enero/Diciembre 1999 VOLUMEN 9 Nos. 1 y 2



# INGENIERIA

Revista Semestral de la Universidad de Costa Rica  
Volumen 9, Enero/Diciembre 1999 Números 1 y 2

## DIRECTOR

Rodolfo Herrera J.

## CONSEJO EDITORIAL

Víctor Hugo Chacón P.

Ismael Mazón G.

Domingo Riggioni C.

## CORRESPONDENCIA Y SUSCRIPCIONES

Editorial de la Universidad de Costa Rica  
Apartado Postal 75  
2060 Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

## CANJES

Universidad de Costa Rica  
Sistema de Bibliotecas, Documentación e Información  
Unidad de Selección y Aquisiciones-CANJE  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio  
San José, Costa Rica

### Suscripción anual:

Costa Rica: ₡ 1 000,00

Otros países: US \$ 30,00

### Número suelto:

Costa Rica: ₡ 750,00

Otros países: \$ 20,00



# COORDINACIÓN DE PSS Y SVC PARA MEJORAR LA ESTABILIDAD DINÁMICA

Eddie A. Araya P.<sup>1</sup>

## Resumen

Este trabajo constituye un aporte para mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones de baja frecuencia (OBF) que se encuentran en el ámbito de 0.1 a 0.7 Hz y que son conocidas como oscilaciones entre áreas. Algunos de los dispositivos para amortiguar las OBF son el estabilizador de sistemas de potencia (PSS: *Power Systems Stabilizers*) y el compensador estático de potencia reactiva (SVC: *Static VAR Compensators*). El objetivo de este trabajo es la coordinación de las señales estabilizantes de los PSS y SVC existentes en un sistema eléctrico multimáquina para mejorar el amortiguamiento de las OBF. Para alcanzar tal propósito, se utiliza la teoría del control óptimo lineal combinado con el análisis modal. La efectividad del método propuesto se demuestra usando como ejemplo la red de alta tensión en 500 kV del sistema argentino de interconexión (SADI), en donde los resultados obtenidos son satisfactorios.

## Summary

This work constitutes a contribution to improve the damping of the Low Frequency Oscillations (LFO) found at 0.1 to 0.7 Hz and that they are known like oscillations inter-area. Some of the devices used for damping LFO are the Power System Stabilizer (PSS) and the Static Var Compensators (SVC). The aim of this work is the coordination of PSS and SVC stabilizing signal present in a multimachine electric system, so as to improve the damping of the LFO. To meet this purpose the lineal optimal control theory was applied with the modal analysis. In order to show the effectiveness of the proposed method, the 500 kV high voltage transmission network of the Interconnected Argentine System (IAS) is used as example, in where the results obtained are satisfactory.

## 1. INTRODUCCIÓN

En los sistemas de potencia débilmente mallados, los problemas de estabilidad, regulación de tensión y de frecuencia están siempre presentes, por lo que, durante la operación se les debe prestar particular atención. Si además, dentro de estos sistemas se tienen subsistemas de muy diferente potencia instalada, los cuales están vinculados por líneas de transmisión de reducida capacidad, entonces surgen problemas adicionales de oscilaciones de la potencia transmitida. Estos problemas están motivados por las variaciones de carga y por las reacciones de los reguladores de velocidad ante las desviaciones de frecuencia en los subsistemas vinculados. Por citar algunos ejemplos, estas oscilaciones de potencia ocurren en el sistema centroamericano, argentino y mejicano.

La forma más efectiva para amortiguar las OBF es alterar las características inherentes del sistema. A la fecha, muchas investigaciones se han llevado a cabo para disminuir las OBF en los sistemas de potencia débiles. Los métodos de solución propuestos en sistemas ac (ac: *alternating current*) utilizan los estabilizadores de sistemas de potencia PSS y los compensadores estáticos de potencia reactiva SVC.

En los sistemas ac, el PSS, independientemente de cual sea la señal de control que se use, es efectivo para amortiguar las OBF en el ámbito de frecuencia de las oscilaciones locales (0.8 a 2.5 Hz).

En el caso del SVC, el dispositivo puede amortiguar oscilaciones locales si se instala cerca de las unidades generadoras, u oscilaciones entre áreas, si se le ubica en la línea de enlace, dando su mayor aporte al amortiguamiento si está a la

<sup>1</sup> Ing., Dr., Prof. Esc. Ing. Eléctrica, Fac. Ing. Univ. de Costa Rica

mitad del vínculo ac. Por tanto, la efectividad depende de su ubicación en la red, así como de las condiciones de operación de la misma.

## 2. INVESTIGACIONES REALIZADAS

A partir de la literatura analizada, a continuación se presentan breves comentarios sobre la temática.

### 2.1 COORDINACIÓN DE LOS PSS

Se ha demostrado que los PSS ayudan a mejorar el amortiguamiento de las oscilaciones entre áreas si las cargas del sistema eléctrico son representadas como impedancias constantes. Por otro lado, si la carga se modela como potencia constante el efecto de amortiguamiento del PSS es ahora menos notable. Por tanto, la efectividad depende del tipo de carga.

En [de Mello, F. P., 1980] se presenta un procedimiento para identificar la localización más efectiva de los PSS, utilizando la técnica del análisis de autovalores. Para cada autovalor se calcula un autovector. Cada componente del autovector indica con que magnitud y en que sentido se mueve cada máquina durante la oscilación. El componente de mayor magnitud indica el generador candidato para instalar el PSS. Sin embargo, se reconoce que para sistemas geográficamente muy extendidos y con la presencia de muchos modos de oscilación pobremente amortiguados podría resultar dificultoso la aplicación del método propuesto.

En [Abdalla, O. H., 1984] por medio de la ecuación de oscilación de cada generador, considerando a una máquina sincrónica por vez, se introduce un término adicional de amortiguamiento ( $K_d \Delta \omega$ ). Se mide ahora la repercusión de este término adicional en las partes reales de los autovalores del sistema eléctrico. A partir de esta sensibilidad se determina cuál es la máquina candidata para instalar en ella un PSS. En la discusión del artículo se menciona que este método puede no

dar buenos resultados en casos complicados en que la estabilización de una máquina pueda interactuar con otras máquinas a través de términos de acoplamiento, es decir, en casos en que el cambio de la excitación de una máquina no solamente cambia la potencia activa de la misma sino también la de otras, del sistema.

En [Gooi, H. B., 1981] se utilizan los coeficientes de los pares de sincronización y amortiguamiento para ajustar los parámetros (constantes de tiempo y ganancias) de los PSS. La desventaja de este método radica en que el coeficiente de amortiguamiento se especifica únicamente por el lazo mecánico de cada generador a través del vector de estado  $X^T = [\Delta \delta \quad \Delta \omega]$ , despreciando los efectos que ejerce sobre él la interacción entre el lazo de control mecánico y el lazo de control eléctrico del resto del sistema. De modo que no todos los lazos de control de las máquinas tienen el mismo efecto sobre el cálculo de los autovalores, puesto que se desprecia el aporte del sistema eléctrico a los componentes del par de sincronización y amortiguamiento.

Combinando autovalores, análisis de sensibilidad y programación lineal en [Doi, A., 1984] se propone un método para diseñar en forma coordinada todos los PSS. La sensibilidad de los autovalores a la instalación de un PSS se calcula mediante análisis modal considerando la función de transferencia entre la señal de referencia del regulador automático de tensión y potencia eléctrica del generador sin el PSS. Conocida la sensibilidad de los autovalores para cada generador y las especificaciones de mejoramiento del amortiguamiento, el conjunto de PSS se diseña en forma coordinada mediante programación lineal minimizando la suma de las ganancias estáticas de todos los PSS.

### 2.2 COORDINACIÓN DE LOS SVC

En [Messina, A. R., 1993] se determina el ajuste del control minimizando las partes reales de los autovalores que originan OBF no amortiguadas o

pobremente amortiguadas, sujeto a ciertas restricciones en los controles. Los resultados obtenidos con este método no son óptimos ya que el lazo de control de amortiguamiento utiliza la modulación de la tensión de referencia. Este lazo de control puro del SVC mejora solamente el par de sincronización y no provee un amortiguamiento apropiado a las OBF. Por otro lado, no se indica dónde localizar los SVC en el sistema de potencia para alcanzar un efecto más notorio sobre el amortiguamiento.

### 2.3 COORDINACIÓN ENTRE PSS Y SVC

En [Simões Costa, J. A., 1994] se presentan dos estrategias para el ajuste coordinado de los controles de los dispositivos PSS y SVC. La primera se basa en localizar nuevamente los polos que presentan modos de oscilación electromecánicos por medio del control descentralizado. El segundo método es un proceso de coordinación global basado en el control óptimo restringido estructuralmente (las restricciones estructurales son: *salida retroalimentada y descentralización*). Estos métodos presentan las siguientes características:

- El control descentralizado utiliza variables de entrada y salida locales de modo que cada actuador es el más influyente sobre el generador local.
- El control óptimo que además de estar restringido estructuralmente, utiliza un *Regulador Cuadrático Lineal*, en el cual los elementos de la matriz  $Q$  deben ser elegidos mediante prueba y error para alcanzar resultados satisfactorios.

De lo anterior se concluye que actualmente, no existe una coordinación óptima de las acciones de los elementos de control disponibles (PSS y SVC), para amortiguar las OBF entre áreas, en sistemas ac débilmente interconectados.

### 3. ESTRATEGIA DE COORDINACIÓN

Considérese un sistema controlable invariante en el tiempo modelado en variables de estado como:

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta U \quad (1)$$

donde  $X$  y  $U$  son el vector de estado y el de control respectivamente.  $A$  y  $B$  son matrices constantes de dimensiones apropiadas.

La teoría del control óptimo lineal establece que el vector de control se obtiene de la expresión

$$\Delta U = -F\Delta X, \quad (2)$$

donde  $F$  es la matriz del lazo de realimentación de (1), la cual se calcula con el criterio de minimizar el índice cuadrático de funcionamiento definido por:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (X^T Q X + U^T R U) \cdot dt \quad (3)$$

Este índice representa el gasto de energía de las funciones del tiempo  $x_i(t)$  y  $u_j(t)$  para  $i = 1, 2, \dots, n$  y  $j = 1, 2, \dots, m$ , en las cuales no hay restricciones. Las matrices  $Q$  y  $R$ , que en principio son desconocidas, se denominan matrices de peso.

Reemplazando (2) en (1) surge la expresión para el sistema operando a lazo cerrado:

$$\Delta \dot{X} = (A - BF)\Delta X \quad (4)$$

Los autovalores de la matriz  $A-BF$ , denotados por  $\Lambda(A-BF)$ , deberán localizarse en el semiplano izquierdo del plano  $s$  para que el sistema sea estable.

La teoría del control óptimo lineal muestra también que si la ganancia  $F$  del lazo de realimentación (2) surge de la siguiente expresión:

$$F = R^{-1}B^T P, \quad (5)$$

en donde  $P$  es una matriz simétrica definida positiva, que se obtiene resolviendo la ecuación matricial algebraica de Riccati presentada a continuación:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (6)$$

entonces efectivamente todos los autovalores de la matriz  $(A-BF)$  se ubican en el semiplano izquierdo del plano complejo. Este procedimiento en la mayoría de los casos mantiene prácticamente inalteradas las frecuencias propias de oscilación del sistema.

Para calcular la matriz incógnita  $P$  se conocen en (6) las matrices  $A^T$ ,  $B$  y  $B^T$  de (1) y deben asumirse valores para los elementos de las matrices  $Q$  y  $R$ .

La acción de coordinación de las señales de control  $u_j$  surge de la expresión (2). En efecto observando esta expresión se ve que cada señal de control  $u_j$  es obtenida combinando información del estado de todo el sistema (vector  $\Delta X$ ) mediante la correspondiente fila de la matriz  $F$ .

En la práctica del diseño de los sistemas óptimos lineales, la matriz  $F$  se calcula aproximadamente asignando valores a las matrices de peso en forma acorde al razonamiento físico, es decir, por prueba y error hasta lograr los efectos deseados. Para el caso de sistemas grandes y sobre todo cuando no se conocen suficientemente las reacciones del sistema, resulta muy complicado asignar valores a todos los elementos de las matrices  $Q$  y  $R$ . Por esta razón es una práctica común elegir a estas matrices como matrices diagonales.

Si el comportamiento dinámico de un sistema, representado por (1) con autovalores  $\lambda_1, \dots, \lambda_m, \lambda_{m+1}, \dots, \lambda_n$ , es insatisfactorio a causa de que, por ejemplo, los  $m$  autovalores  $\lambda_1$

a  $\lambda_m$  tienen componentes reales positivas, entonces el objetivo del control óptimo lineal, instrumentado mediante las ecuaciones (4), (5) y (6) es reubicar esos  $m$  autovalores en el semiplano izquierdo del plano complejo, manteniendo prácticamente inalteradas las frecuencias naturales de oscilación del sistema. Los autovalores de la matriz  $A$  que inicialmente estaban situados en el semiplano izquierdo del plano complejo permanecen en ese semiplano, ya que este procedimiento afecta fundamentalmente a las partes reales de los autovalores de la matriz  $A$  ubicados inicialmente en el semiplano derecho del plano complejo.

En [Moussa, A. M., 1972; Yu, Y., 1972] que emplean este método, la matriz  $R$  se toma como diagonal e igual a la identidad y los elementos de la matriz  $Q$  se determinan mediante un procedimiento iterativo de prueba y error para lograr en los autovalores que inicialmente eran débilmente amortiguados un desplazamiento de las partes reales hacia valores cada vez más negativos sin modificar significativamente las partes imaginarias.

También en este trabajo se toma a la matriz  $R$  como la matriz identidad, con lo cual se asigna igual peso a las  $m$  señales de control y se logra que cada una de ellas actúe en forma independiente. Para el tratamiento de la matriz  $Q$  se sigue el camino propuesto en [Kawasaki, N., 1983; Shieh, L. S., 1986].

Este camino consiste en no utilizar la matriz  $Q$  y en reubicar los autovalores  $\lambda_1$  a  $\lambda_m$  del sistema de lazo abierto en el semiplano izquierdo del plano complejo y a una distancia  $h_1 \geq 0$  del origen de coordenadas (Figura No. 1-a), manteniendo inalterados los autovalores  $\lambda_{m+1}$  a  $\lambda_n$  ubicados inicialmente en el semiplano izquierdo del plano complejo. El valor  $h_1$  representa el grado deseado de estabilidad del sistema eléctrico. Para lograr esta reubicación de autovalores, la matriz  $F$  del lazo de realimentación (2) toma ahora el valor

$$\tilde{F} = R^{-1}B^T\tilde{P}, \quad (7)$$

con lo cual la matriz del sistema a lazo cerrado (4), denominada ahora  $A_C$ , resulta:

$$A_C = A - BR^{-1}B^T\tilde{P} \quad (8)$$

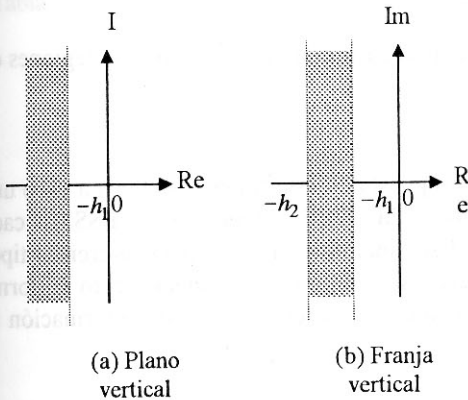
La matriz  $\tilde{P}$  se obtiene resolviendo la siguiente ecuación matricial de Riccati

$$(A+h_1I_n)^T\tilde{P} + \tilde{P} \quad (9)$$

$$(A+h_1I_n) - \tilde{P}BR^{-1}B^T\tilde{P} = 0$$

en la cual puede verse que no interviene la matriz de peso  $Q$ .

La acción de control instrumentada con las ecuaciones (7) a (9) ha logrado modificar las componentes reales de los autovalores  $\lambda_1$  a  $\lambda_m$  del sistema eléctrico a lazo abierto (Matriz  $A$  en (1)) llevándolas a posiciones ubicadas a la izquierda de la línea vertical  $(-h_1)$  indicada en la figura No. 1-a. Sin embargo, como existen restricciones técnicas sobre los parámetros reales (constantes de tiempo y ganancias), debe limitarse la ubicación de los autovalores  $\lambda_1$  a  $\lambda_m$ , a una región definida como la indicada en la figura 1-b.



(a) Plano vertical

(b) Franja vertical

Figura No. 1: Plano complejo s.

Asumiendo que  $h_1$  y  $h_2$  son dos valores reales positivos ( $h_2 > h_1$ ) que definen una franja vertical  $(-h_2, -h_1)$  de espesor  $(h_2 - h_1)$  según se muestra en la figura No. 1-b y siendo la matriz  $A = A + h_1I_n$ , para lograr este propósito, la ley de control debe modificarse a:

$$\Delta U = -\rho \cdot \tilde{F}\Delta X \quad (10)$$

en donde la ganancia del lazo cerrado de retroalimentación  $F$  surge de (7) y la matriz  $\tilde{P}$  es la solución de la ecuación de Riccati modificada

$$\tilde{A}^T\tilde{P} + \tilde{P}\tilde{A} - \tilde{P}BR^{-1}B^T\tilde{P} = 0, \quad (11)$$

que coincide con la ecuación (9).

Según [Shieh, L. S., 1986] la ganancia  $\rho$  se selecciona con la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{1}{2} + (h_2 - h_1)/2tr(\tilde{A}) =$$

$$\frac{1}{2} + (h_2 - h_1)/2tr(B\tilde{F}) \quad (12)$$

siendo:

$$tr(\tilde{A}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i = \frac{1}{2}tr(B\tilde{F})$$

$\lambda_i (i = 1, \dots, m)$  los autovalores (complejos conjugados) de  $\tilde{A}$  ubicados en el semiplano derecho del plano  $s$ . De este modo, el sistema óptimo de lazo cerrado es en consecuencia:

$$\Delta \dot{X} = (A - \rho B\tilde{F})\Delta X \quad (13)$$

Esto facilita la acción de coordinación de los dispositivos susceptibles de ser ajustados para mejorar el amortiguamiento de las OBF.

#### 4. PRUEBA CON EL SISTEMA ARGENTINO DE INTERCONEXIÓN (SADI)

Para llevar a cabo una serie de pruebas con un sistema eléctrico de tamaño considerable, con el fin de observar la contribución de los elementos de control estabilizantes (PSS y SVC) sobre el amortiguamiento de las OBF, se utilizará como modelo de prueba la red de alta tensión en 500 kV del sistema argentino de interconexión (SADI) mostrado en la figura No. 2, por cuanto este sistema presenta una estructura radial y se cataloga como un sistema débilmente interconectado.

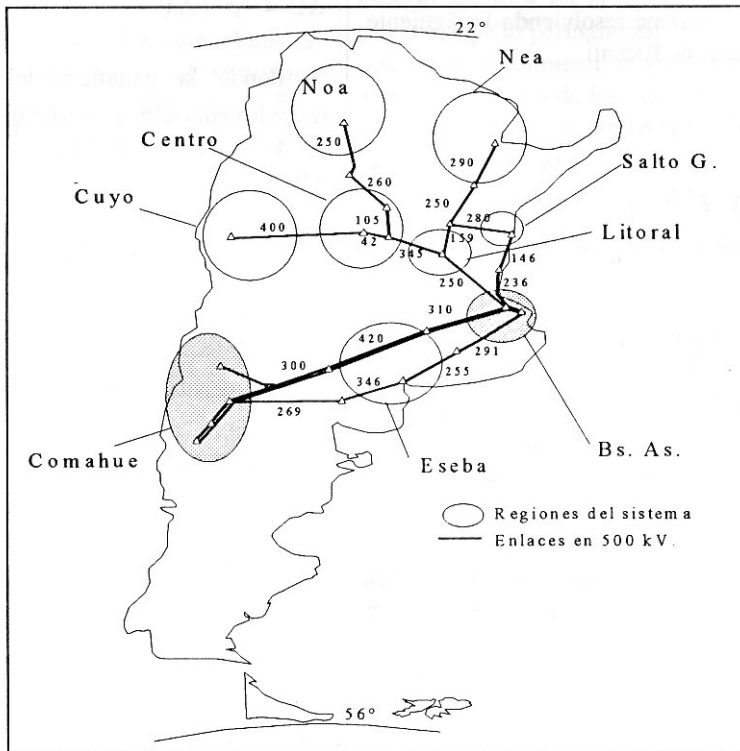


Figura No. 2: Redes regionales del sistema eléctrico argentino<sup>1</sup>. En el año 1995 entre las regiones de Comahue y Buenos Aires se manifestaron OBF.

Con el fin de constatar la efectividad de la metodología propuesta en este trabajo, se lleva a cabo una secuencia de estudios para mejorar el amortiguamiento de las OBF. Se instala un PSS en cada generador equivalente y un SVC en la región de Eseba. Este análisis se realiza para diferentes tipos de carga y diversos elementos de control. En todos los casos se asume un amortiguamiento uniforme  $D=0.00$  p.u. para todas las máquinas sincrónicas equivalentes del sistema. Con esta información se elaboran las siguientes tablas.

<sup>1</sup> Distancias en Km.



Tabla No. 1: Amortiguamiento relativo logrado por la coordinación de los PSS y SVC. Carga a impedancia constante.

Sistema sin señales estabilizantes		Sistema con señales estabilizantes coordinadas	
Autovalores (rad/s) $0 \leq \zeta \leq 1\%$	$\zeta$ relativo en %	Nuevo $\zeta$ relativo en %	
		PSS	PSS + SVC
-0,090234 $\pm j 10,951$	0,8240	8,965	8,955
-0,076905 $\pm j 10,705$	0,7184	9,174	9,124
-0,052540 $\pm j 8,8043$	0,5968	11,28	11,26
-0,035144 $\pm j 7,0469$	0,4987	13,60	13,89

Tabla No. 2: Amortiguamiento relativo logrado por la coordinación de los PSS y SVC. Carga a corriente constante.

Sistema sin señales estabilizantes		Sistema con señales estabilizantes coordinadas	
Autovalores (rad/s) $0 \leq \zeta \leq 1\%$	$\zeta$ relativo en %	Nuevo $\zeta$ relativo en %	
		PSS	PSS + SVC
-0,080368 $\pm j 10,895$	0,7377	9,033	9,010
-0,071945 $\pm j 10,621$	0,6774	9,179	9,794
-0,072199 $\pm j 8,6983$	0,8300	11,15	11,27
-0,035242 $\pm j 7,0442$	0,5003	13,84	13,76

Tabla No. 3: Amortiguamiento relativo logrado por la coordinación de los PSS y SVC. Carga a potencia constante.

Sistema sin señales estabilizantes		Sistema con señales estabilizantes coordinadas	
Autovalores (rad/s) $0 \leq \zeta \leq 1\%$	$\zeta$ relativo en %	Nuevo $\zeta$ relativo en %	
		PSS	PSS + SVC
-0,075479 $\pm j 10,860$	0,6950	9,074	9,072
-0,059223 $\pm j 10,536$	0,5621	9,227	9,223
-0,059735 $\pm j 8,9637$	0,6664	10,92	10,87
-0,035427 $\pm j 7,0409$	0,5032	13,89	13,92

Una vez que se aplica la metodología de coordinación y se examinan los autovalores que eran débilmente amortiguados ( $0 \leq \zeta \leq 1\%$ ), éstos presentan ahora un amortiguamiento relativo superior para cada modo de oscilación, cualquiera sea la combinación de dispositivos empleada en la acción de coordinación. Comparando los elementos de las últimas cuatro columnas en las tablas No. 1 a 3 se observa que presentan igual orden de magnitud. Este resultado era de esperar ya que se está comparando la acción estabilizante constituida solamente por dispositivos PSS presentes en todos los generadores del sistema eléctrico analizado, con aquellas que resultan de incorporar a la situación anterior un dispositivo SVC. En efecto, por una parte existe una gran superioridad numérica de los dispositivos PSS; y por otra, el método de cálculo acota el amortiguamiento a lograr, ya que la franja vertical en la cual se ubican los autovalores después de la acción de coordinación ha sido tomada de igual manera en todos los casos analizados.

En esta etapa del análisis se pone de manifiesto el efecto del regulador automático de tensión lento (IEEE, tipo 1) y la influencia de la acción coordinada de 35 PSS y 1 SVC. En todas las tablas, los autovalores obtenidos a través de la coordinación de los dispositivos de control, presentan un mejor rendimiento en cuanto a su amortiguamiento relativo, manteniendo (aproximadamente) constante la frecuencia de oscilación.

## 5. CONCLUSIONES

En la propuesta contenida en este trabajo se ha elegido también a la matriz  $R$  como matriz identidad, con la cual los  $m$  elementos de control participan en forma independiente unos de otros y con igual peso en la acción de control a realizar. En cuanto a la matriz  $Q$  se ha prescindido de ella y en lugar se ha empleado un método de traslación de autovalores que afecta solamente a aquellos autovalores cuyas partes

reales son positivas. El efecto es tal que modifica solamente las partes reales de los autovalores manteniendo (aproximadamente) constantes las respectivas partes imaginarias. Las partes reales nuevas de los autovalores, por efecto de la traslación lograda, quedan ubicadas en el semiplano izquierdo del plano complejo y dentro de una franja vertical de ancho especificado a priori

La efectividad de esta propuesta de coordinación de las acciones de control de los PSS y SVC para mejorar el amortiguamiento de las OBF ha sido constatada mediante cálculo en un sistema eléctrico de potencia de envergadura, como lo es el sistema argentino de interconexión (SADI) en 500 kV. En todos los casos el mejoramiento logrado en los modos de oscilación que inicialmente eran pobremente amortiguados ha sido notable.

Al implementar esta propuesta en programas de cálculo digital, los diferentes componentes dinámicos del sistema eléctrico han sido incluidos en forma modular. Esto constituye una ventaja, pues permite, en caso de ser necesario, actualizar cómodamente los modelos del generador, del regulador automático de tensión y de los dispositivos PSS y SVC. Además, la inclusión de nuevos componente dinámicos tales como los dispositivos FACTS (FACTS: *Flexible ac Transmission Systems*) resultaría muy sencilla.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Abdalla, O. H.; et al. *Coordinated Stabilization of a Multimachine Power System*. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 3, March 1984, pp. 483-494.
- [2] De Mello, F. P. et al. *Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems*. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No. 3, May/June 1980, pp. 892-901.

- [3]. Doi, A. and Abe, S. *Coordinated Synthesis of Power System Stabilizers in Multimachine Power Systems*. IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-103, No. 6, June 1984, pp. 1473-1479.
- [4]. Gooi, H. B. et al. *Coordinated Multimachine Stabilizer Settings without Eigenvalue Drift*. IEEE Transactions on PAS, Vol. PAS-100, No. 8, August 1981, pp. 3879-3887.
- [5]. Kawasaki, N. and Shimemura, E. *Determining Quadratic Weighting Matrices to Locate Poles in a Specified Region*. Automática, Vol. 19, No. 5, 1983, pp. 557-560.
- [6]. Klein M. et al. *Analytical Investigation of Factors Influencing Power Systems Stabilizers Performance*. IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No. 3, September 1992, pp. 382-390.
- [7]. Laub, A. J. *A Schur Method for Solving Algebraic Riccati Equations*. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-24, No. 6, December 1979, pp. 913-921.
- [8]. Martins, N. and Lima, L. T. G. *Determination of Suitable Locations for Power System Stabilizers and Static VAR Compensators for Damping Electromechanical Oscillations in Large Scale Power Systems*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 4, November 1990, pp. 1455-1469.
- [9]. Messina, R. *Experience with the Analysis of Small Signal Stability in Longitudinal Systems: a Case Study with the Mexican Interconnected System*. Electric Power & Energy Systems, Vol. 17, No. 5 (1995), pp. 291-299.
- [10]. Messina, A. R. and Cory, B. J. *Enhancement of Dynamic Stability by Coordinated Control of Static VAR Compensators*. Electric Power & Energy Systems, Vol. 15, No. 2, 1993, pp. 85-93.
- [11]. Molina, D. *Diagnóstico de la Estabilidad Oscilatoria del SADI - Criterios Prácticos - Análisis Modal - Estudios y Equipos Complementarios*. CIGRE, VII Encuentro Regional Latinoamericano, Puerto Iguazú - Argentina, Mayo 1997.
- [12]. Moussa, A. M. and Yu, Y. *Optimal Power Systems Stabilization through Excitation and/or Governor Control*. IEEE Transaction on PAS, May/June 1972, pp. 1166-1174.
- [13]. Ogata, K. Ingeniería de Control Moderna. Prentice-Hall, 1993.
- [14]. Quesada, R. *Estudio de Estabilidad Dinámica en el Dominio de la Frecuencia para el Sistema Interconectado Costa Rica-Panamá*. Tesis de Maestría, DIPFI, UNAM, México 1986.
- [15]. Sancho, J. *Metodología para Realizar Estudios de Seguridad Operativa en el Sistema Interconectado Centroamericano*. Tesis de Maestría, Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR, Costa Rica 1998.
- [16]. Shieh, L. S.; et al. *Linear Quadratic Regulators with Eigenvalue Placement in a Vertical Strip*. IEEE Trans. on Automatic Control, Vol. AC-31, No. 3, March 1986, pp. 241-243.
- [17]. Simões Costa, J. A., et al. *Coordinated Setting, of Stabilizers for Synchronous Generators and Static VAR Compensators in Multimachine Systems*. IV SEPOPE, IV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Foz do Iguaçu- Brasil, Maio 1994, pp. 1-6.
- [18]. Yu, Y. and Moussa, A. M. *Optimal Stabilization of a Multi-Machine Systems*. IEEE Transaction on PAS, May/June 1972, pp. 1174-1182.

- [19]. Zhou, E. Z. *Application of Static Var Compensators to Increase Power System Damping*. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 8, No 2, May 1993, pp. 655-661.

## 8. SIMBOLOGÍA

- A: Matriz de estado
- B: Matriz de control
- D: Constante de amortiguamiento
- F: Matriz de retroalimentación
- J: Índice de rendimiento
- Q: Matriz de peso
- R: Matriz de peso
- U: Vector de control
- X: Vector de estado
- $\lambda$ : Autovalor
- $\delta$ : Angulo del rotor de la máquina sincrónica
- $\Delta$ : Prefijo que indica un pequeño cambio
- $\omega$ : Velocidad angular del rotor