



**SISTEMA INFORMÁTICO PARA ANÁLISIS MODAL. CÁLCULO DE LA MATRIZ A
USANDO MODELOS DE GENERADORES, AVR Y PSS.**

**C. E. Biteznik* J. L. Agüero* M. C. Beroqui*
R. Canalis* S. Barbero***

*** Instituto de Investigaciones Tecnológicas en Redes y Equipos Eléctricos
Laboratorio de Alta Tensión – Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata**

RESUMEN

En este trabajo se presentan la segunda etapa de desarrollo del *Sistema Informático para Análisis Modal* (SIAM), en la cual se incorpora, a sus características ya presentadas en [1], el cálculo de la matriz de estado A del sistema, basado en los datos de flujo y en los datos de los modelos linealizados de Generador, AVR y PSS. Asimismo, se realiza una comparación de resultados entre el SIAM y el PSS/E para un caso de referencia publicado.

PALAVRAS-CLAVE

“Análisis Modal” – “Oscilaciones Electromecánicas” – “SIAM” – “Matriz de estado” – “Modos de oscilación”

1. INTRODUCCIÓN

La incorporación de nuevas líneas de 500 kV durante los últimos años en el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) y el Sistema Interconectado Patagónico (SIP), ha transformado la estructura radial característica de este sistema en una estructura que comienza a ser mallada. Esta modificación estructural trae aparejado cambios en el comportamiento dinámico del sistema, ya que cambian los modos dominantes de oscilaciones electromecánicas, o sea los modos de oscilación entre máquinas sincrónicas con más bajos amortiguamientos.

Para analizar las nuevas condiciones de funcionamiento del SADI-SIP se deben realizar estudios para determinar estos modos de oscilación y sus amortiguamientos. Estos estudios pueden ser hechos en el dominio de Laplace (Análisis Modal). El Análisis Modal determina los Autovalores o modos de oscilación del sistema, expresándolos en función de su frecuencia y amortiguamiento. Para realizar el Análisis Modal se requiere la matriz de estados A del sistema, que vincula a las derivadas temporales de las Variables de Estado con las respectivas Variables de Estado. En la actualidad, para estudios del sistema argentino, esta matriz A se obtiene con la actividad ASTR del módulo para estudios de dinámica del programa PSS/E a partir del modelo no lineal, del SADI-SIP utilizado para simulaciones temporales en estudios de estabilidad. La base de datos de estos modelos es administrada por CAMMESA y se encuentra disponible para el programa PSS/E.

Para realizar el Análisis Modal mediante el procesamiento de la matriz de estado A se utiliza, el módulo LSYSAN del programa PSS/E. Por su parte, para llevar adelante este procesamiento, el IITREE-LAT ha desarrollado un programa en MATLAB denominado SIAM (Sistema Informático de

Análisis Modal). Ambos programas permiten obtener todos los Autovalores del sistema y, a su vez, permiten calcular los Factores de Participación y los Autovectores asociados a cada Autovalor.

En este trabajo se presentan la segunda etapa de desarrollo del SIAM, la cual permite calcular la matriz de estado A del sistema, basados en los datos de flujo y en los datos de los modelos linealizados de Generador, AVR y PSS.

Con esta ampliación de las prestaciones del SIAM se pretende obtener una herramienta más versátil para la realización de estudios estabilidad de pequeña señal del SADI-SIP. Como sólo se precisan datos de flujo, ya que la base de datos de modelos de Generadores, AVR y PSS es la misma que utiliza CAMMESA, la potencialidad de esta herramienta para su uso en centros de control es muy grande, tanto para predicción off-line como así también una posible alternativa de implementación on-line.

2. SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES ALGEBRAICAS

El comportamiento dinámico de un sistema eléctrico puede ser descrito por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales denominado *Ecuaciones Diferenciales Algebraicas* (DAE - *differential-algebraic equations*) mostrado en la ecuación (1).

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= f(x_d, x_a, u) \\ 0 &= g(x_d, x_a, u) \\ y &= h(x_d, x_a, u) \end{aligned} \quad (1)$$

Las dos primeras ecuaciones de (1) representan el comportamiento del sistema, mientras que la tercera muestra el comportamiento de una o varias variables de salida.

En la descripción que se desarrolla a continuación, no se tienen en cuenta las salidas (y) y se supone que no existen variables independientes o entradas (u) en el sistema a analizar. Las variables de estado (VE) x_d corresponden a aquellas asociadas a los modelos correspondientes a los generadores y elementos del control existentes en el sistema, tales como reguladores automáticos de tensión (RAT o AVR de sus siglas en inglés) y estabilizadores de sistemas de potencia (ESP ó PSS de sus siglas en inglés). Las variables algebraicas x_a elegidas para el análisis consisten en las corrientes inyectadas por los generadores (I_g) al sistema y las tensiones en todos los nodos (U) del mismo.

Como se mencionó, la función f representa la característica dinámica de los elementos componentes del sistema mientras que g representa las ecuaciones no lineales de la red. A su vez g está compuesta por dos funciones, una que describe el vínculo entre el estator del generador y la red (g_1), y otra correspondiente a las relaciones entre nodos de la red (g_2). Denominaremos a estas dos funciones: *Ecuación de estator* y *Ecuación de red* respectivamente.

Tomando las premisas anunciadas anteriormente, la expresión (1) puede ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, I_g, U) \\ 0 &= g_1(x, I_g, U) \\ 0 &= g_2(x, I_g, U) \end{aligned} \quad (2)$$

Si se linealiza la expresión anterior para un dado punto de trabajo, y se escribe en forma matricial, se tiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_1 & D_2 \\ C_2 & D_3 & D_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta I_g \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.1 Ecuación de estator

Para comenzar con el análisis del sistema, se debe primero encontrar una representación adecuada que muestre las relaciones existentes entre el modelo del generador y el modelo de la red. Estas relaciones

se describen a través de la ecuación del estator, la cual vincula la tensión del generador y la corriente del mismo inyectada a la red, es decir, su potencia entregada [2].

En estado estacionario, la derivada del flujo es nula, por lo tanto, la tensión de bornes del *i-ésimo* generador está dada por el producto del flujo por la velocidad menos la caída de tensión en la resistencia de estator. En valores por unidad ($\omega=1$), la tensión es igual a:

$$U_{di} + jU_{qi} = (-\psi_{qi} + j\psi_{di}) - R_{ei}(I_{di} + jI_{qi}) \quad (4)$$

Si consideramos un generador de rotor liso con arrollamientos amortiguadores, el flujo en cada eje, en función de las inductancias transitorias (L') y subtransitorias (L''), esta dado por las ecuaciones (5) y (6):

$$\text{Eje directo } \psi_{di} = \psi_{1di} \frac{L'_{di} - L''_{di}}{L'_{di} - L_{ti}} + \frac{E'_{qi}}{\omega} \frac{L''_{di} - L_{ti}}{L'_{di} - L_{ti}} - L''_{di} I_{di} = \psi''_{di} - L''_{di} I_{di} \quad (5)$$

$$\text{Eje en cuadratura } -\psi_{qi} = -\psi_{2qi} \frac{L'_{qi} - L''_{qi}}{L'_{qi} - L_{ti}} - \frac{E'_{di}}{\omega} \frac{L''_{qi} - L_{ti}}{L'_{qi} - L_{ti}} + L''_{qi} I_{qi} = -\psi''_{qi} + L''_{qi} I_{qi} \quad (6)$$

Al expresarse los parámetros en valores por unidad, y siendo $\omega=1$ pu la frecuencia en radianes por segundo, los valores de L coinciden con los de X . Se asume además que $X''_{di} = X''_{qi} = X''_i$. Reemplazando (5) y (6) en (4) e igualando a cero, se tiene:

$$\begin{aligned} (U_{di} + jU_{qi}) - [(-\psi''_{qi} + X''_i I_{qi}) + j(\psi''_{di} - X''_i I_{di})] + R_{ei}(I_{di} + jI_{qi}) &= 0 \\ (U_{di} + jU_{qi}) - (-\psi''_{qi} + j\psi''_{di}) + (I_{di} + jI_{qi})(R_{ei} + jX''_i) &= 0 \end{aligned} \quad (7)$$

En la Figura 1 se muestra el circuito equivalente estátorico. Debido a que las coordenadas dq de los generadores está referenciado a la *f.m.m.* del mismo, para vincular las ecuaciones del generador con el sistema debemos realizar un cambio de referencia, para lo cual rotamos las variables tensión, flujo y corriente un ángulo $(\delta_i - \pi/2)$, donde δ_i es el ángulo de rotor del *i-ésimo* generador respecto a la referencia del sistema. Los subíndices en mayúsculas indican que las componentes rectangulares se encuentran rotadas.

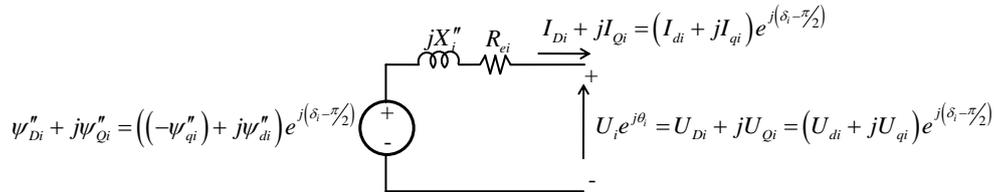


Figura 1: Circuito equivalente para la resolución de la ecuación de estator.

Reescribiendo (7) en función del cambio de referencia se tiene:

$$U_i e^{j\theta_i} - (-\psi''_{qi} + j\psi''_{di}) e^{j(\delta_i - \pi/2)} + (R_{ei} + jX''_i)(I_{di} + jI_{qi}) e^{j(\delta_i - \pi/2)} = 0 \quad (8)$$

El conjunto de ecuaciones de todos los generadores del sistema constituyen la función g_i del sistema de ecuaciones (2).

2.2 Ecuación de red

Las ecuaciones de la red pueden plantearse en base al balance de potencia en los nodos. Se considera que tanto los generadores como las cargas inyectan potencia al sistema. En el caso de las cargas esta inyección será negativa cuando se trate de una carga pasiva e inductiva [2].

Para expresar las ecuaciones de balance en los nodos se emplea la matriz de admitancia nodal de la red, resultando para la *i-ésima* barra:

$$U_i e^{j\theta_i} (I_{di} - jI_{qi}) e^{-j(\delta_i - \pi/2)} + P_{Li} + jQ_{Li} = \sum_{k=1}^n U_i e^{j\theta_i} U_k e^{-j\theta_k} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}} \quad (9)$$

Donde $U_i e^{j\theta_i} (I_{di} - jI_{qi}) e^{-j(\delta_i - \pi/2)} \square P_{Gi} + jQ_{Gi}$ es la potencia inyectada por el generador en la barra i e $Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}}$ es el elemento $i-k$ de la matriz de admitancia nodal del sistema. Igualando a cero la expresión anterior, se tiene:

$$U_i e^{j\theta_i} (I_{di} - jI_{qi}) e^{-j(\delta_i - \pi/2)} + P_{Li} + jQ_{Li} - \sum_{k=1}^n U_i e^{j\theta_i} U_k e^{-j\theta_k} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}} = 0 \quad (10)$$

Se debe tener en cuenta que P_{Li} y Q_{Li} pueden ser funciones no lineales de la magnitud de la tensión. El modelo de carga comúnmente usado resulta:

$$P_{Li}(U_i) = P_{L0i} + k_{P1i} U_i + k_{P2i} U_i^2 \quad (11)$$

$$Q_{Li}(U_i) = Q_{L0i} + k_{Q1i} U_i + k_{Q2i} U_i^2 \quad (12)$$

Las constantes P_{L0i} y Q_{L0i} representan las componentes de “potencia constante”, k_{P1i} y k_{Q1i} representan las componentes de “corriente constantes a factor de potencia constante” y k_{P2i} y k_{Q2i} representan las componentes de “impedancia constante”.

En aquellas barras donde no exista generación, las corrientes serán nulas, por lo tanto se suprime el primer término de la ecuación (10). En caso de no existir carga, se suprimirá el segundo término.

El conjunto de ecuaciones de todos los nodos del sistema constituyen la función g_2 del sistema de ecuaciones (2).

3. LINEALIZACION DEL SISTEMA

Para obtener el sistema linealizado de la expresión (3) debemos obtener las expresiones correspondientes a las derivar las funciones f , g_1 y g_2 de (2). Para la linealización se supone parámetros contantes con la frecuencia.

3.1 Ecuación diferenciales

Para poder obtener las ecuaciones linealizadas de la función f se deben hallar los elementos constitutivos de las matrices A , B_1 y B_2 de la expresión (3). A su vez, cada una de estas matrices está constituida por submatrices, independientes las unas de las otras, que representan la linealización de cada uno de los modelos empleados. Tanto A como B_1 son matrices diagonales y están constituidas por m submatrices, siendo m el número de barras con generación. La matriz B_2 sólo posee submatrices en las ubicaciones $i-j$, siendo i el número de generador y j el número de barra.

Siendo a su vez:

$$A_{Plantai} = \begin{bmatrix} A_{GEN} & A_{GEN-AVR} & A_{GEN-PSS} \\ A_{AVR-GEN} & A_{AVR} & A_{AVR-PSS} \\ A_{PSS-GEN} & A_{PSS-AVR} & A_{PSS} \end{bmatrix} \quad B_{1Plantai} = \begin{bmatrix} B_{1GEN} \\ B_{1AVR} \\ B_{1PSS} \end{bmatrix} \quad B_{2Plantai} = \begin{bmatrix} B_{2GEN} \\ B_{2AVR} \\ B_{2PSS} \end{bmatrix} \quad (13)$$

La matriz A de una planta contiene en su diagonal las matrices propias de cada componente: generador, AVR y PSS. La matriz propia contiene las derivadas de las VE de cada componente generadas por las VE propias del componente. Las matrices fuera de la diagonal, determinan las relaciones entre los distintos componentes de una planta, por ejemplo, como las VE del generador perturban a las derivadas de las VE del AVR o del PSS.

Las matrices B_1 y B_2 determinan como las variables algebraicas (corrientes y tensiones) asociadas a esa barra afectan a las derivadas de las VE de los distintos componentes de la planta.

3.2 Ecuación de estator

Para derivar la ecuación de estator correspondiente al i -ésimo generador, primero se descompone la expresión (8) en las dos direcciones de los ejes dq para luego derivarse, resultando:

$$\begin{aligned}
 0 &= \cos \theta_{io} \Delta U_i - U_{io} \sin \theta_{io} \Delta \theta_i + (R_{ei} \sin \delta_{io} + X_i'' \cos \delta_{io}) \Delta I_{di} + (R_{ei} \cos \delta_{io} - X_i'' \sin \delta_{io}) \Delta I_{qi} - \\
 &\quad - \cos \delta_{io} \Delta \psi_{di}'' - \sin \delta_{io} \Delta (-\psi_{qi}'') + U_{io} \sin \theta_{io} \Delta \delta_i \\
 0 &= \sin \theta_{io} \Delta U_i + U_{io} \cos \theta_{io} \Delta \theta_i + (-R_{ei} \cos \delta_{io} + X_i'' \sin \delta_{io}) \Delta I_{di} + (R_{ei} \sin \delta_{io} + X_i'' \cos \delta_{io}) \Delta I_{qi} - \\
 &\quad - \sin \delta_{io} \Delta \psi_{di}'' + \cos \delta_{io} \Delta (-\psi_{qi}'') - U_{io} \cos \theta_{io} \Delta \delta_i
 \end{aligned} \tag{14}$$

El flujo subtransitorio y el ángulo δ dependen de las VE del generador, por lo tanto la ecuación (14) se puede escribir:

$$\begin{aligned}
 &\left\{ \begin{bmatrix} -\cos \delta_{io} & -\sin \delta_{io} \\ -\sin \delta_{io} & \cos \delta_{io} \end{bmatrix} A_{\psi''x} + \begin{bmatrix} U_{io} \sin \theta_{io} \\ -U_{io} \cos \theta_{io} \end{bmatrix} A_{\delta x} \right\} |\Delta x_i| + \\
 &+ \begin{bmatrix} R_{ei} \sin \delta_{io} + X_i'' \cos \delta_{io} & R_{ei} \cos \delta_{io} - X_i'' \sin \delta_{io} \\ -R_{ei} \cos \delta_{io} + X_i'' \sin \delta_{io} & R_{ei} \sin \delta_{io} + X_i'' \cos \delta_{io} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_{di} \\ \Delta I_{qi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -U_{io} \sin \theta_{io} & \cos \theta_{io} \\ U_{io} \cos \theta_{io} & \sin \theta_{io} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta U_i \end{bmatrix} = 0
 \end{aligned} \tag{15}$$

Las matrices $A_{\psi''x}$ y $A_{\delta x}$ dependen del modelo de generador empleado. O bien, en forma compacta:

$$[c_{1ii}] |\Delta x_i| + [d_{1ii}] \Delta I_{gi} + [d_{2ii}] \Delta U_i = 0 \tag{16}$$

Donde $\Delta I_{gi} = \begin{bmatrix} \Delta I_{di} & \Delta I_{qi} \end{bmatrix}^T$ y $\Delta U_i = \begin{bmatrix} \Delta \theta_i & \Delta U_i \end{bmatrix}^T$.

Procediendo de igual manera a la descripta para los m generadores, se obtiene la linealización de g_1 como se muestra a continuación:

$$C_1 \Delta x + D_1 \Delta I_g + D_2 \Delta U = 0 \tag{17}$$

Tanto C_1 como D_1 son matrices diagonales y están constituidas por m submatrices. La matriz D_2 sólo posee submatrices en las ubicaciones $i-j$, siendo i el número de generador y j el número de barra.

3.3 Ecuación de red

De igual modo como se procedió para el caso de g_1 , la linealización de g_2 se realiza a partir de la derivación de las ecuaciones de red descriptas por (10).

$$\begin{aligned}
 &\left(jU_{io} e^{j\theta_{io}} (I_{dio} - jI_{qio}) e^{-j(\delta_{io} - \pi/2)} - j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n U_{io} e^{j\theta_{io}} U_{ko} e^{-j\theta_{ko}} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}} \right) \Delta \theta_i + \\
 &+ \left(e^{j\theta_{io}} (I_{dio} - jI_{qio}) e^{-j(\delta_{io} - \pi/2)} + \frac{\partial P_{Li}(U_i)}{\partial U_i} + j \frac{\partial Q_{Li}(U_i)}{\partial U_i} - \sum_{k=1}^n e^{j\theta_{io}} U_{ko} e^{-j\theta_{ko}} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}} \right) \Delta U_i + \\
 &+ j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (U_{io} e^{j\theta_{io}} U_{ko} e^{-j\theta_{ko}} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}}) \Delta \theta_k - \sum_{k=1}^n (U_{io} e^{j\theta_{io}} e^{-j\theta_{ko}} Y_{ik} e^{-j\alpha_{ik}}) \Delta U_k - \\
 &- jU_{io} e^{j\theta_{io}} (I_{dio} - jI_{qio}) e^{-j(\delta_{io} - \pi/2)} \Delta \delta_i + U_{io} e^{j\theta_{io}} e^{-j(\delta_{io} - \pi/2)} \Delta I_{di} - jU_{io} e^{j\theta_{io}} e^{-j(\delta_{io} - \pi/2)} \Delta I_{qi} = 0
 \end{aligned} \tag{18}$$

Recordando que $|\Delta \delta_i| = A_{\delta x} |\Delta x_i|$, la ecuación anterior expresada en forma matricial compacta, resulta:

$$[c_{2ij}] |\Delta x_i| + [d_{3ij}] \Delta I_{gi} + [d_{4i1}] \Delta U_1 + \dots + [d_{4ik}] \Delta U_k + \dots + [d_{4in}] \Delta U_n = 0 \tag{19}$$

Procediendo de igual manera a la descripta para los n nodos, se obtiene la linealización de g_2 como se muestra a continuación:

$$C_2 \Delta x + D_3 \Delta I_g + D_4 \Delta U = 0 \tag{20}$$

Tanto C_2 como D_3 posee submatrices en las ubicaciones $i-j$, siendo i el número de generador y j el número de barra. La matriz D_4 se conoce como el Jacobiano de la red y posee las expresiones de las derivadas de la potencia activa y reactiva respecto al módulo y ángulo de la tensión.

4. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

Para poder construir la matriz completa del sistema DAE mostrado en la ecuación (3) se utilizan dos programas, el programa PSS/E (PTI-SIEMENS) y un programa desarrollado en MATLAB (MathWorks Inc.) denominado SIAM (*Sistema Informático de Análisis Modal*).

La estructura general del método para hallar la matriz se describe en la Figura 2.

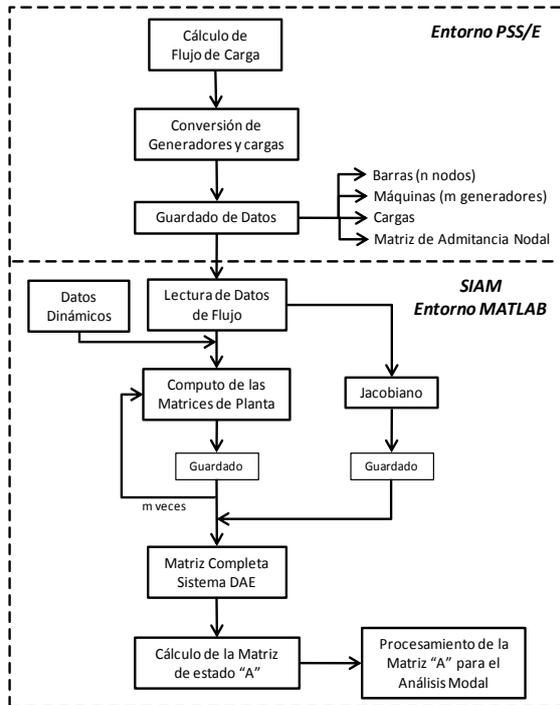


Figura 2: Estructura de cálculo.

Para el cálculo de los coeficientes de las diferentes submatrices que constituyen el sistema es necesario contar con información referente a los resultados del flujo de carga del caso a analizar. Estos resultados son obtenidos en el entorno del PSS/E. Previamente a la obtención de los datos, todos los generadores deben ser convertidos a generadores de corriente con impedancia de salida igual a la impedancia del estator de cada uno. Las cargas deben ser convertidas, teniendo en cuenta el valor de tensión del nodo, a cargas de admitancias constantes, corriente constante o potencia constante según corresponda.

Con los datos obtenidos del PSS/E se ingresa al SIAM. En una primera etapa el programa ordena los datos de flujo e incorpora a cada generador los modelos correspondientes con sus ajustes.

En este punto, el SIAM ya dispone de todos los datos necesarios para la construcción de la matriz. El armado de la misma se realiza computando las submatrices $A_{Planta\ i}$, $B_{1Planta\ i}$, $B_{2Planta\ i}$, C_{1ii} , C_{2ij} , D_{1ii} , D_{2ii} y D_{3ij} correspondientes a las m barras de generación, además del Jacobiano (matriz D_4).

Una vez finalizado el cálculo de todas las submatrices, las cuales fueron siendo guardadas en sus posiciones específicas, se completa con matrices nulas para así formar la matriz del sistema DAE.

Para obtener la matriz de estado, se deben eliminar las variables algebraicas, obteniéndose una ecuación de la forma:

$$\Delta \dot{x} = A_{sist} \Delta x \tag{21}$$

Obtenida la matriz de estado (A_{sist}), se realiza el análisis modal mediante el cálculo de los autovalores y autovectores de la misma, así como el cálculo de los factores de participación [1].

5. EJEMPLO NUMÉRICO

Para el ejemplo numérico se toma el caso de 2 áreas, 11 barras y 4 generadores presentados en la pag. 813 de la referencia [3]. El modelo de generador empleado corresponde al de rotor liso con un arrollamiento amortiguador en cada eje (modelo de librería GENROU del programa PSS/E [4]), que posee seis VE. Los datos de ajuste de los modelos, como así también los parámetros de los elementos de sistema se encuentran en la referencia [3]. La Figura 3 muestra el diagrama unifilar del caso propuesto.

Como se explica en el inciso anterior, la resolución del flujo de carga se realiza en el entorno PSS/E. A posteriori se calcula la matriz de estado mediante dos procedimientos, mediante el SIAM y mediante la actividad ASTR del módulo para estudios dinámicos del programa PSS/E. El SIAM proporciona en forma directa los autovalores de sistema, mientras que para el caso de la matriz obtenida mediante el programa PSS/E se debe emplear el módulo Lysan que forma parte del mismo.

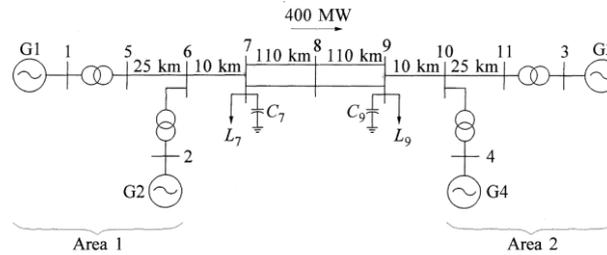


Figura 3: Diagrama unifilar del caso ejemplo ([3] pag. 813).

La actividad ASTR calcula la matriz de estado mediante la aplicación de una perturbación porcentual en cada una de las VE para luego obtener su derivada (método incremental). Al existir alinealidades en los modelos empleados, este método es muy sensible a la elección de la amplitud de la perturbación. En la Figura 4 se muestran los autovalores obtenidos mediante la actividad ASTR y para distintas amplitudes de perturbación (0.1%, 1% y 10%). De acuerdo a la experiencia obtenida en diversos estudios sobre el sistema argentino, el valor a utilizar es del 1%. Este valor evita grandes excursiones de las variables de estado, lo cual nos aparta del punto de trabajo, o excursiones muy pequeñas que se pierden en ruido numérico del cálculo. La Figura 5 muestra los resultados obtenidos para una perturbación del 1% en el entorno PSS/E y los valores obtenidos del cálculo de la matriz de estado en forma analítica mediante el SIAM.

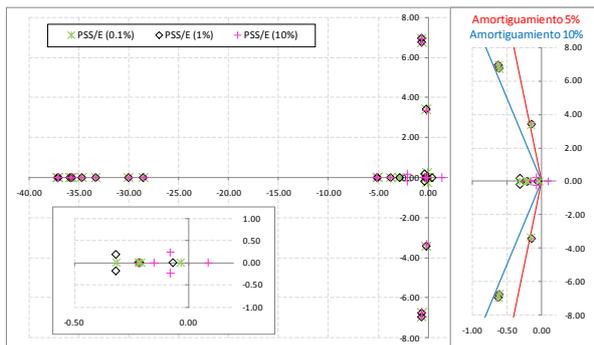


Figura 4: Autovalores mediante la actividad ASTR y diferentes amplitudes de perturbación de las variables.

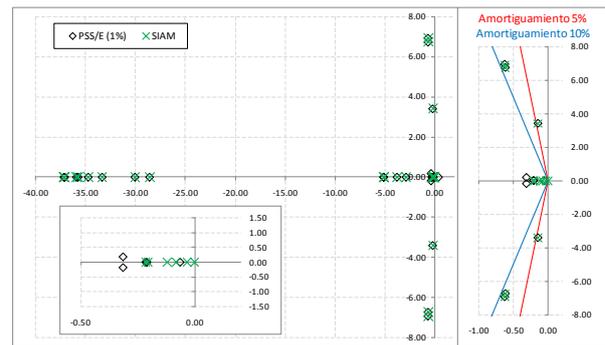


Figura 5: Comparación de los resultados obtenidos mediante el PSS/E (1%) y el SIAM.

La frecuencia de oscilación y el amortiguamiento de los modos más relevantes obtenidos por ambos programas se muestran en la Tabla I. La relevancia de los modos depende de su amortiguamiento, considerándose importantes a aquellos que posean valores inferiores al 10%. Los modos 1, 2 y 3, 4 corresponden a modos intra-área entre los generadores 1-2 y 3-4 respectivamente. Existe un modo inter-área con frecuencia de 0.543 Hz y amortiguamiento del 4.4%. Esto se determinan en base a los factores de participación de las VE en cada modo (cálculo ya implementado en el SIAM [1]).

Tabla I: Modos de oscilación sólo con modelos de generador.

Modo	PSS/E				SIAM			
	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]
1, 2	-0.61579	±6.75320	0.09081	1.07480	-0.61307	±6.75369	0.09040	1.07488
3, 4	-0.62711	±6.94860	0.08988	1.10590	-0.62435	±6.94574	0.08953	1.10545
5, 6	-0.15158	±3.41730	0.04432	0.54388	-0.15142	±3.41714	0.04427	0.54386

Al incorporarse el regulador automático de tensión, se puede apreciar como el amortiguamiento de los distintos modos disminuye. El modelo empleado para en AVR es el IEEE1 [4] con los ajustes proporcionados en [3]. Los autovalores para este caso se muestran en la Figura 7 y la frecuencia de oscilación y el amortiguamiento de los modos obtenidos por ambos programas de muestran en la Tabla II.

Para mejorar el amortiguamiento, se incorpora un PSS a cada uno de los generadores. El modelo empleado se muestra en la Figura 6. Los ajustes del mismo se eligen para lograr valores de amortiguamientos mayores o iguales al 10%, resultando: $T_1=5s$, $T_2=2s$, $T=0.1s$, $T_3=T_5=0.4s$, $T_4=T_6=0.05s$, $K_{ss}=10$, $K_r=1$ y $M=2H$ de cada generador. Aunque $T_1=5s$ es un valor alto para su

utilización en sistemas reales, existe un segundo wash-out con $T_2=2s$. La Figura 8 muestra los autovalores para este caso. La frecuencia de oscilación y el amortiguamiento de los modos obtenidos por ambos programas de muestran en la Tabla II.

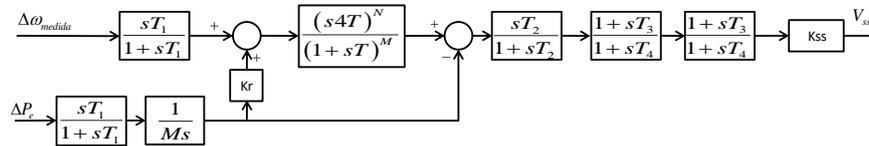


Figura 6: Modelo empleado de PSS.

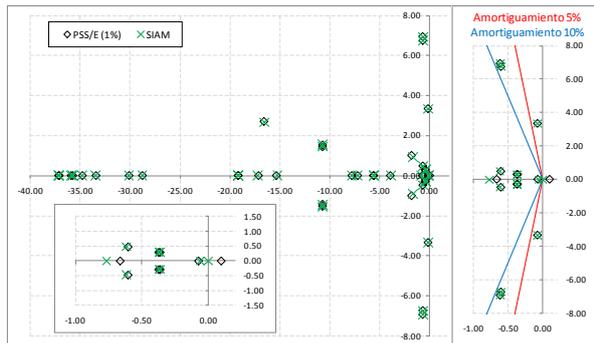


Figura 7: Comparación de los resultados obtenidos mediante el PSS/E (1%) y el SIAM incluyendo los AVR.

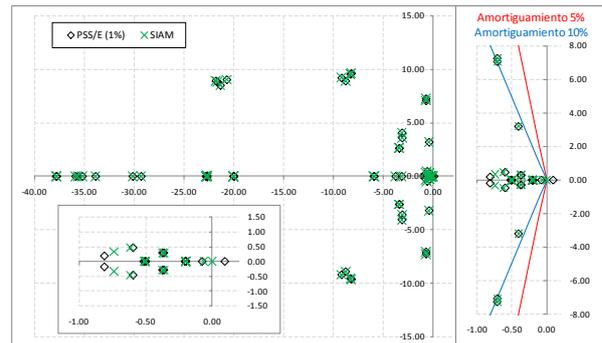


Figura 8: Comparación de los resultados obtenidos mediante el PSS/E (1%) y el SIAM incluyendo los PSS.

Tabla II: Modos de oscilación incluyendo los AVR.

Modo	PSS/E				SIAM			
	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]
1, 2	-0.60196	±6.74180	0.08893	1.07300	-0.59926	±6.74243	0.08853	1.07309
3, 4	-0.61466	±6.93650	0.08827	1.10400	-0.61198	±6.93362	0.08792	1.10352
5, 6	-0.07861	±3.34250	0.02351	0.53198	-0.07893	±3.34183	0.02361	0.53187

Tabla III: Modos de oscilación incluyendo los AVR y PSS.

Modo	PSS/E				SIAM			
	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]	Real	Imaginario	Amortiguamiento	Frec. [Hz]
1, 2	-0.70526	±7.08110	0.09911	1.12700	-0.70365	±7.08130	0.09888	1.12702
3, 4	-0.70737	±7.27780	0.09674	1.15830	-0.70606	±7.27493	0.09660	1.15784
5, 6	-0.40324	±3.20590	0.12480	0.51024	-0.40112	±3.20695	0.12411	0.51040

6. CONCLUSIÓN

Como se puede ver en el ejemplo numérico, mediante la construcción de la matriz de estado utilizando el SIAM se obtienen resultados similares a los logrados con el programa PSS/E, siendo dicho programa ampliamente reconocido a nivel mundial para la realización de esta clase de estudios. Al utilizar el método que aplica perturbaciones en las distintas VE para obtener el valor de las derivadas, como lo hace el programa PSS/E, se producen errores numéricos que se reflejan en autovalores espurios en el semiplano derecho. Debido a que el SIAM obtiene la matriz en base al cálculo analítico de las derivadas en el punto de trabajo del sistema y todos sus componentes, no aparecen autovalores espurios en el semiplano derecho de lugar de raíces.

La disponibilidad de la matriz completa del sistema, mostrada en la ecuación (3), permite realizar cálculos adicionales a la obtención de autovalores, autovectores y factores de participación, como ser el cálculo de índices de controlabilidad y observabilidad, que serán reportados en futuras contribuciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.L. Agüero, et al. "Análisis modal. Expansión del sistema de transmisión en 500 kv del SADI-SIP". Décimo Cuarto Encuentro Iberoamericano del CIGRÉ, XIV ERIAC. 2011.
- [2] P. Sauer, M. Pai. "Power System Dynamics and Stability". Printice Hall. 1998. Cap. 6 y 7.
- [3] P. Kundur. "Power System Stability and Control". McGraw-Hill. Inc. 1994.
- [4] PSS/E 30.2. "Program Operation Manual. Volumen II". SIEMENS-PTI. 2005.