
ANÁLISIS MODAL. EXPANSIÓN DEL SISTEMA DE TRANSMISIÓN EN 500 KV DEL SADI-SIP

J.L. AGÜERO*
IITREE-FI-UNLP**
Argentina

V.F. CORASANITI
IITREE-FI-UNLP
Argentina

C.E. BITEZNIK
IITREE-FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHERE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J.C. BARBERO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

Resumen – Luego de varios años sin ampliaciones significativas, el Sistema Argentino de Interconexión (SADI) y el Sistema Interconectado Patagónico (SIP) están incorporando nuevas líneas de 500 kV. Particularmente, cuando entren en servicio las líneas Comahue-Cuyo y NOA-NEA la actual estructura radial del SADI se transformará en una estructura que empieza a ser mallada. Este cambio estructural del SADI trae aparejado el cambio en su comportamiento dinámico ya que cambian los modos dominantes de oscilaciones electromecánicas, o sea los modos de oscilación entre máquinas sincrónicas con más bajos amortiguamientos. Por tal razón, se realizaron un conjunto de estudios que permiten caracterizar el comportamiento dinámico del SADI con el ingreso de las líneas Comahue-Cuyo y NOA-NEA.

Para estos estudios se utiliza como herramienta el Análisis Modal, para lo cual fue previamente necesario linealizar los modelos de la Base de Datos del SADI-SIP. A partir de esta nueva Base de Datos con modelos linealizados, es posible obtener la matriz A correctamente conformada. Esta matriz A caracteriza el comportamiento de pequeña señal del SADI-SIP y se obtiene con la actividad ASTR del módulo para estudios de dinámica del programa PSS/E. La versión 30 del programa PSS/E tiene un módulo externo denominado Lsysan que permite realizar Análisis Modal. Por otra parte, se ha desarrollado en Matlab un programa denominado SIAM (Sistema Informático de Análisis Modal). Con este programa SIAM se determinan los Autovalores o modos de oscilación del sistema. Para cada Autovalor es posible obtener el correspondiente Autovector o Factor de Forma, que indica como cada máquina sincrónica participa de la oscilación, como así también los Factores de Participación.

Palabras clave: SADI-SIP – Interconexiones 500 kV – NOA-NEA – Oscilaciones Electromecánicas – Análisis Modal – SIAM.

1 INTRODUCCIÓN

En el SADI y en el SIP se están realizando nuevas obras de interconexión en 500 kV. La denominada Interconexión NOA-NEA vincula las áreas noroeste y noreste del SADI. La denominada Interconexión Comahue-Cuyo conecta las áreas Comahue y Cuyo del SADI. En Fig. 1 se muestra un esquema topológico del SADI incorporando las mencionadas interconexiones. Se observa como la actual estructura radial del SADI se transformará en una estructura que empieza a ser mallada.

La Interconexión Comahue-Cuyo está conformada por los tramos de líneas entre las EETT Agua del Cajón – Río Diamante – Gran Mendoza. La Interconexión NOA-NEA está conformada por los tramos de líneas entre las EETT Resistencia – Roque Sáenz Peña – Monte Quemado – Cobos – Bracho, y dos vínculos radiales, uno entre las EETT Resistencia y Formosa, y el otro entre las EETT Cobos y Sanjuancito. La obra posee 2

* 48 y 116 S/N. La Plata. Buenos Aires. B1900AMF. Argentina. – e-mail: jla@iitree-unlp.org.ar

** Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos – Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de La Plata.

etapas. La primera denominada Configuración 1, ver tramos de líneas verdes en Fig.1, corresponde al verano del 2010/2011 e invierno 2011, donde solamente se incorporan los tramos entre las EETT Resistencia-Formosa y las EETT COBOS y Bracho.

En esta etapa de la obra no se encuentra en servicio la línea Comahue-Cuyo. La etapa final denominada Configuración 2, ver tramos de líneas azules en la Fig. 1, es cuando se completan todos los tramos de la Interconexión NOA-NEA en el Verano 2011 / 2012. En esta etapa de la obra se encuentra en servicio la línea Comahue-Cuyo. Dicho cambio estructural del SADI produce un cambio en su comportamiento dinámico ya que cambian los modos dominantes de oscilaciones electromecánicas, o sea los modos de oscilación entre máquinas sincrónicas con más bajos amortiguamientos.

Por tal razón, fueron realizados estudios de estabilidad oscilatoria en distintos escenarios de invierno y verano y escenarios de máximas transferencias en condiciones de estado N para ambas configuraciones. A su vez se analizaron escenarios en condiciones N-1 del sistema.

En este caso la herramienta utilizada para los estudios fue el Análisis Modal para lo cual se desarrolló en MATLAB un programa denominado SIAM. El Análisis Modal determina los Autovalores o modos de oscilación del sistema, expresados como partes real e imaginaria, o como frecuencia y amortiguamiento. Para cada Autovalor es posible obtener el correspondiente Autovector o Factor de Forma, cuyas componentes Ángulo Rotórico indican la fase relativa con que cada máquina sincrónica participa de la oscilación. También se presentan los Factores de Participación.

En esta publicación se presentan los resultados del Análisis Modal obtenidos con el programa SIAM.

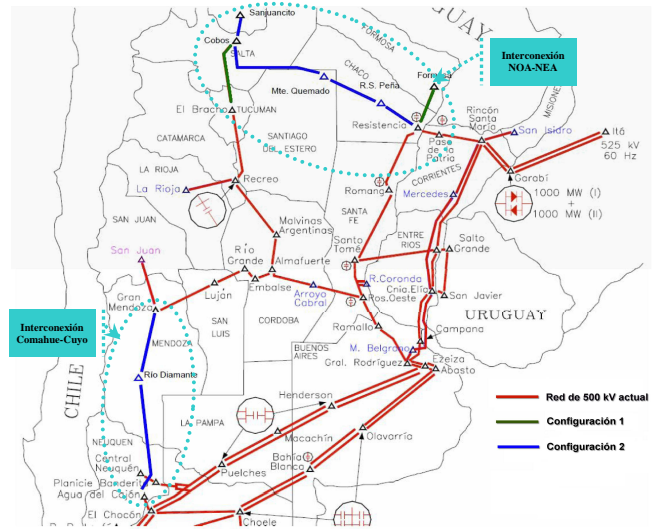


Fig. 1. SADI. Topología.

2 ESTABILIDAD DE PEQUEÑA SEÑAL-ANÁLISIS MODAL

La estabilidad de pequeña señal es la capacidad del sistema para mantener el equilibrio estable cuando se somete a pequeñas perturbaciones. Para pequeñas perturbaciones la respuesta del sistema tendrá un comportamiento lineal es decir las ecuaciones que describen la respuesta resultante del sistema pueden ser linealizadas para el propósito de los análisis [1-3]. El Análisis Modal [1-2] se realiza a partir de la matriz A que vincula a las derivadas temporales de las Variables de Estado con las respectivas Variables de Estado:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

Esta matriz A se obtiene con la actividad ASTR del módulo para estudios de dinámica del programa PSS/E, utilizando la “Base de Datos de Análisis Modal” que está conformada con los modelos de: Máquinas Sincrónicas, Reguladores Automáticos de Tensión, Estabilizadores de Potencia, Controles Conjuntos de Reactivo, Controles Dinámicos de Reactores y Cargas de Aluar. Esta “Base de Datos para Análisis Modal” fue obtenida a partir de la “Base de Datos de Modelos no lineales” del SADI-SIP utilizada para estudios de estabilidad que es proporcionada por CAMMESA.

Para obtener la matriz A se requiere linealizar el sistema en el punto de trabajo (determinado por el flujo de potencia). Para ello, los modelos de máquinas sincrónicas de la base de datos que son todos modelos de librería del programa PSS/E (GENROU, GENROE, GENSAL) no requirieron ningún tipo de adecuación.

Todos los modelos de sistemas de excitación y su control (AVR) como así también los de los estabilizadores de potencia (PSS), controles conjuntos de tensión (CCT), compensadores sincrónicos (CS) y compensadores estáticos (CE) y cargas con dinámica asociada - rectificadores electrolíticos de Aluar (CA) - requirieron reajuste de parámetros y/o modificación del programa para que operen linealmente [4].

Para realizar el Análisis Modal mediante el procesamiento de la matriz A se utilizaron dos programas, el módulo LSYSAN del programa PSS/E y un programa desarrollado por el IITREE-FI-UNLP en MATLAB

denominado SIAM. Ambos programas permiten obtener los Autovalores del sistema y, a su vez, permiten calcular los Factores de Participación y los Autovectores asociados a cada Autovalor. Los resultados obtenidos con ambos programas resultaron similares.

3 AUTOVALORES

Los autovalores (λ_i) representan los modos de oscilación (polos) del sistema de potencia linealizado [1]. Los autovalores son las raíces de la siguiente ecuación característica del sistema:

$$\text{Det}[A - sI] = 0 \quad (2)$$

donde: A = matriz de estados, I = matriz Identidad y s = frecuencia compleja (Variable de Laplace)

Para un par de autovalores complejos conjugados $\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$ resulta:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad \text{y} \quad \xi_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (3)$$

donde: f_i = frecuencia de oscilación del modo [Hz] y ξ_i = amortiguamiento.

Existen oscilaciones del sistema de control, o simplemente Oscilación de Control, y Oscilaciones Electromecánicas. I) Oscilación de Control: modo de oscilación donde las variables de estado que más participan pertenecen a sistemas de control. II) Oscilación Electromecánica: modo de oscilación donde las variables de estado que más participan son el Desvío de Velocidad (Δspeed) y el Ángulo Rotórico (Angle) de máquinas sincrónicas.

Los autovalores correspondientes a modos de oscilación electromecánicos del sistema pueden ser tipificados como [5-6]:

- Modo Local: oscilación electromecánica de una o más máquinas sincrónicas de una planta generadora versus una gran cantidad de unidades generadores del resto del sistema eléctrico de potencia.
- Modo Inter-Unidad: oscilación electromecánica entre 2 o más generadores de una misma planta generadora o de plantas generadoras cercanas (pertenecientes a la misma área eléctrica).
- Modo Inter-Área: oscilación electromecánica entre generadores pertenecientes a un área eléctrica o conjunto de áreas eléctricas versus generadores pertenecientes a otra área eléctrica u otro conjunto de áreas eléctricas.

4 AUTOVECTORES

Un dado autovector indica como cada variable de estado del dominio modal contribuye a la conformación de una dada variable de estado del sistema real. Por ello, al Autovector, también se lo denomina Factor de Forma porque para cada variable de estado del sistema real indica el residuo, módulo y fase, calculado para el correspondiente Autovalor. La relación entre las variables de estado del sistema real y las variables de estado desacopladas o variables de estado del dominio modal es:

$$x(t) = T \cdot y(t) \quad (4)$$

donde x : vector de variables de estado en dominio real,

y : vector de Estado en dominio modal

T : Matriz de Autovectores a derecha, cuyas columnas son los Autovectores de A .

Los elementos de cada autovector se presentan normalizados respecto del mayor de los elementos, dando un valor normalizado máximo igual a 1.

5 FACTORES DE PARTICIPACION

Indica la participación de las distintas variables de estado en la conformación de un dado autovalor. El factor de participación de la i -ésima variable de estado sobre el k -ésimo autovalor se determinan con:

$$P_{ik} = |t_{ik} \cdot z_{ki}| \quad (5)$$

donde: t_{ik} / z_{ki} = Elemento de la i -ésima fila y k -ésima columna de la matriz T / T^{-1}

Los Factores de Participación se presentan normalizados respecto del mayor factor de participación y ordenados (de mayor a menor).

6 PROGRAMA PARA ANÁLISIS MODAL

Para realizar el Análisis Modal mediante el procesamiento de la matriz A se utilizaron dos programas, el módulo LSYSAN del programa PSS/E y un programa desarrollado en MATLAB denominado SIAM. A través del procesamiento de la matriz A, ambos programas permiten obtener todos los Autovalores o Modos de Oscilación del sistema, los Factores de Participación y los Autovectores asociados a cada Autovalor.

El programa SIAM se ejecuta en el ambiente de MATLAB y requiere que el dato de entrada sea el archivo con la matriz A obtenida con la actividad ASTR en el ambiente de dinámica del programa PSS/E versión 30. Consta de una interfaz gráfica que facilita el ingreso de toda la información necesaria para su ejecución con la mínima intervención del usuario. Las salidas del procesamiento son representaciones gráficas en pantalla, archivos en formato texto (*.txt) y archivos binarios en formato MATLAB (*.mat).

Con los Factores de Participación el programa determina el tipo de modo de oscilación: de control o electromecánico Local, Inter-Unidad o Inter-Área. Como criterio para la determinación del tipo de modo electromecánico se utiliza un umbral, por ejemplo 0.1 p.u., en el valor de la componente Ángulo Rotórico de máquina sincrónica del Factor de Participación correspondiente a los distintos generadores que participan en el modo. O sea, aquellos generadores con Factores de Participación de la componente Ángulo Rotórico entre 0.1 p.u. y 1p.u. determinarán si se trata de un modo Local, Inter-Unidad o Inter-Área. En Tabla I se muestra un resumen de las variables de estado de los 3 modelos de máquinas sincrónicas (GENROU, GENROE y GENSAL) existentes en la Base de Datos del SADI-SIP.

TABLA I. VARIABLES DE ESTADO DE GENERADORES

VARIABLE DE ESTADO	GENROU / GENROE	GENSAL
STATE (K)	E'_q	E'_q
STATE (K+1)	E'_d	Ψ_{kd}
STATE (K+2)	Ψ_{kd}	Ψ_q
STATE (K+3)	Ψ_{kq}	$\Delta speed$
STATE (K+4)	$\Delta speed$	Angle
STATE (K+5)	Angle	----

Como resultado del análisis se presentan los Autovalores, Factores de Participación y Autovectores.

En el caso de los Autovalores y Autovectores los mismos se pueden presentar en forma de Tablas o Gráficos.

En el caso de los Factores de Participación sólo se presentan en forma de Tablas.

- **Autovalores:** se presenta partes real [Real] e imaginaria [Imag] en radianes por segundo, amortiguamiento [D (pu)] en por unidad, la frecuencia [f (Hz)] en Hertz, y Observaciones.
- **Factores de Participación:** se presentan normalizados respecto al mayor Factor de Participación (valor normalizado máximo igual a 1). Las tablas contienen: el valor del factor de participación [Factor], el número de fila en la matriz A de la variable de estado [Row Nr], el nombre de la barra en donde se encuentra el generador o máquina que posee dicho modelo [Machine], el número de dicha barra [Bus], el modelo al cual corresponde la variable de estado [Model] y la denominación de la variable de estado dentro del modelo correspondiente [State].
- **Autovectores:** Solamente se presentan en forma gráfica - Magnitud y Fase - las componentes Ángulos Rotóricos de máquinas sincrónicas del Autovector.

7 RESULTADOS DEL ANÁLISIS MODAL

Los estudios de Análisis Modal de la INTERCONEXION NOA-NEA 500 KV del SADI-SIP comprenden el análisis de 21 escenarios o flujos de potencia en condición N (sistema de transmisión completo), y 119 escenarios en condición N-1 (sistema de transmisión con un elemento serie fuera de servicio). A modo de ejemplo, de todos los escenarios analizados se presentan un Autovalor o Modo de Oscilación de cada tipo, uno Local, uno Inter-Unidad, y otro Inter-Área. Para cada uno de ellos se presenta los Factores de Participación y el Autovector y se realiza un análisis detallado.

Finalmente, se presenta la comparación de los resultados obtenidos con el Análisis Modal y con el Análisis de Prony. Los Análisis de Prony se realizan utilizando la Base de Datos de modelos (no lineales) del SADI-SIP, originalmente suministrada por CAMMESA, que se utiliza para estudios de estabilidad. De este modo se efectúa la validación tanto de los resultados obtenidos con la herramienta de Análisis Modal como así también, de todas las modificaciones realizadas a la base de datos original para transformarla en la Base de Datos de Análisis Modal. El Análisis de Prony se realiza con el módulo para graficar del programa PSS/E

denominado PSS PLT [7] y se basa en la descomposición de la evolución temporal de una dada señal en una suma de exponenciales y sinusoides amortiguadas, de las cuales se obtiene la componente correspondiente al modo analizado.

Para realizar el Análisis de Prony se aplicó una perturbación en el sistema de forma tal de excitar el modo a analizar. En todos los casos, la variable analizada fue el Ángulo Rotórico de la máquina síncrona cuyas Variables de Estado tienen los mayores valores del Factor de Participación en el Autovalor analizado.

7.1 Ejemplos de distintos tipos de modos de oscilación electromecánicos

Los ejemplos han sido obtenidos del escenario de condición N denominado “PV12-NOA-NEA-2395-C3”. Este escenario corresponde a un pico de verano del año 2012 con una demanda bruta del SADI de 23544MW, para la configuración 2 o sea la Interconexión NOA-NEA completa y la línea Comahue-Cuyo en servicio y con una máxima transferencia de Oeste (NOA) a Este (NEA) del sistema de 2395MW.

A continuación se presentan los 3 tipos de modos obtenidos del Análisis Modal de dicho flujo.

7.1.1 Modo Local

En Tabla II se observa que la frecuencia este Modo es aproximadamente 1Hz y que es inestable porque tiene amortiguamiento negativo. Este Modo Local corresponde al generador de la barra N° 1634 de Filo Morado.

TABLA II. AUTOVALOR. MODO LOCAL

N° de autovalor	Real	Imag	D(pu)	f(Hz)	Observaciones
1920	0.039	6.138	-0.006	0.977	Modo Local / 1634 FILO TG3

En Tabla III se observa que las únicas variables de estado que tienen Factores de Participación significativos son el Ángulo Rotórico y el Desvío de Velocidad del modelo GENROU del generador, determinando un tipo de Modo Local.

En Fig. 2 se muestran las componentes Ángulo Rotórico del Autovector. Se observa como el Ángulo Rotórico de la máquina de FILOTG3 está prácticamente en oposición de fase con los Ángulos Rotóricos de la mayoría de los generadores del sistema, verificando que se trata de un Modo Local de oscilación.

TABLA III. FACTORES DE PARTICIPACIÓN

Factor	Row Nr	Machine	Bus	Model	State
1	339	FILOTG3	1634	GENROU	K+5
0.97933	338	FILOTG3	1634	GENROU	K+4
0.30307	334	FILOTG3	1634	GENROU	K
0.11921	4642	FILOTG3	1634	EXDC2	K+3
0.06957	337	FILOTG3	1634	GENROU	K+3
0.05596	335	FILOTG3	1634	GENROU	K+1

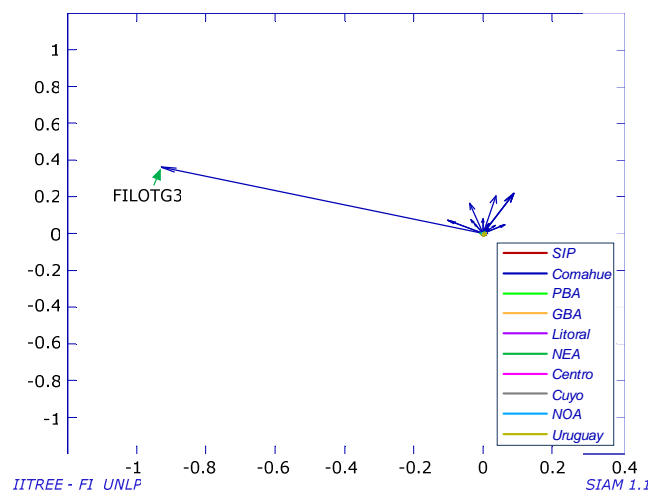


Fig. 2. Autovector. Modo Local

A fin de validar los resultados arrojados por el Análisis Modal, se efectúa el Análisis de Prony. La oscilación fue excitada provocando durante 0.1 segundo una variación de -0.1 pu en la reactancia longitudinal del transformador de Step-Up de la máquina síncrona de la barra N° 1634 de FILO TG3. En Fig. 3 se presenta la evolución temporal del Ángulo Rotórico de dicho generador al aplicarse la perturbación mencionada. Se observa que el modo local resulta inestable verificando que tiene amortiguamiento negativo. En Tabla IV se presenta el Análisis de Prony del Ángulo Rotórico del generador de la Fig.3 donde se observan las distintas componentes que forman esta variable. La Tabla IV presenta sólo las componentes de mayor magnitud y contiene el N° de cada componente [COMP NO], las partes Real [REAL] e Imaginaria [IMAGINARY] del autovalor, la magnitud [MAGNITUDE] y ángulo [ANGLE] del autovector y la frecuencia del autovalor [FREQ]. La componente N° 2 corresponde al modo local en análisis que tiene una frecuencia de 0.976 Hz, y con los valores de la parte Real e Imaginaria se obtiene un amortiguamiento de -0.006 p.u. O sea que el Autovalor obtenido con el Análisis de Prony es similar al obtenido con el Análisis Modal.

TABLA IV. ANÁLISIS DE PRONY

MODAL COMPONENTS					
COMP. N°	EIGENVALUE		EIGENVECTOR		REMARKS
	REAL	IMAGINARY	MAGNITUDE	ANGLE	
1	2.12E-04	-----	21.929	-----	-----
2	3.81E-02	6.13372	0.43501	-148.54	FREQ.: 0.976 HZ.
3	-2.18545	-----	-2.32E-02	-----	TCNST: 0.458 SC.
4	-5.64237	3.41724	7.00E-03	-45.38	FREQ.: 0.544 HZ.

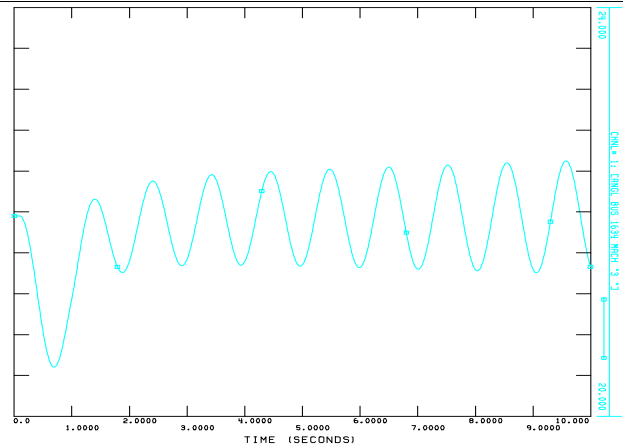


Fig. 3. Ángulo Rotórico del generador

7.1.2 Modo Inter-Unidad

En Tabla V se presenta un modo electromecánico con amortiguamiento del orden del 10% de frecuencia 1.09Hz. Este modo fue clasificado como Modo Inter-Unidad en el que participan distintos generadores de distintas centrales de la misma área eléctrica (Cuyo).

Los generadores son los de las barras N° 7680 de QULLUM, barra N° 7621 de ULLUM, barra N° 7624 de CACHEUTA, barras N° 7615 y N° 7616 de CARRIZAL y barra N° 7691 de SARMIENTO.

TABLA V. AUTOVALOR. MODO INTER-UNIDAD

N° de autovalor	Real	Imag	D(pu)	f(Hz)	Observaciones
1963	-0.693	6.806	0.101	1.089	Modo Inter-Unidad / 7680 QULLH1 / 7621 ULLUH1 / 7624 CACHVIH2 / 7624 CACHVIH3 / 7624 CACHVIH1 / 7615 CARRH1 / 7616 CARRH2 / 7691 SARCTG1 / 7691 SARCTG2

En Tabla VI se observa que las variables de estado que más participan del modo son las correspondientes a Desvío de Velocidad y Ángulo Rotórico de los modelos GENSAL y GENROU de generadores de distintas centrales, determinando un Modo Inter-Unidad. En Fig. 4 se observa como las componentes del autovectores correspondiente a las variables de estado Ángulos Rotóricos de máquinas de las centrales de un mismo área eléctrica, CACHEUTA y CARRIZAL se encuentra en oposición de fase respecto de las centrales QULLUM, ULLUM y SARMIENTO, verificando así el tipo de Modo Inter-Unidad.

TABLA VI. FACTORES DE PARTICIPACIÓN

Factor	Row Nr	Bus	Machine	Model	State
1	1563	7680	QULLH1	GENSAL	K+3
0.99919	1564	7680	QULLH1	GENSAL	K+4
0.34293	1389	7621	ULLUH1	GENSAL	K+3
0.3426	1390	7621	ULLUH1	GENSAL	K+4
0.20223	1562	7680	QULLH1	GENSAL	K+2
0.12257	1404	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+3
0.12256	1409	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+3
0.12255	1399	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+3
0.12248	1405	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+4
0.12247	1410	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+4
0.12246	1400	7624	CACHVIH1	GENSAL	K+4
0.11435	1359	7615	CARRH1	GENSAL	K+3
0.1143	1364	7616	CARRH2	GENSAL	K+3
0.11423	1360	7615	CARRH1	GENSAL	K+4
0.11418	1365	7616	CARRH2	GENSAL	K+4
0.10501	1584	7691	SARCTG1	GENROU	K+4
0.10499	1590	7691	SARCTG2	GENROU	K+4
0.10492	1585	7691	SARCTG1	GENROU	K+5
0.10491	1591	7691	SARCTG2	GENROU	K+5

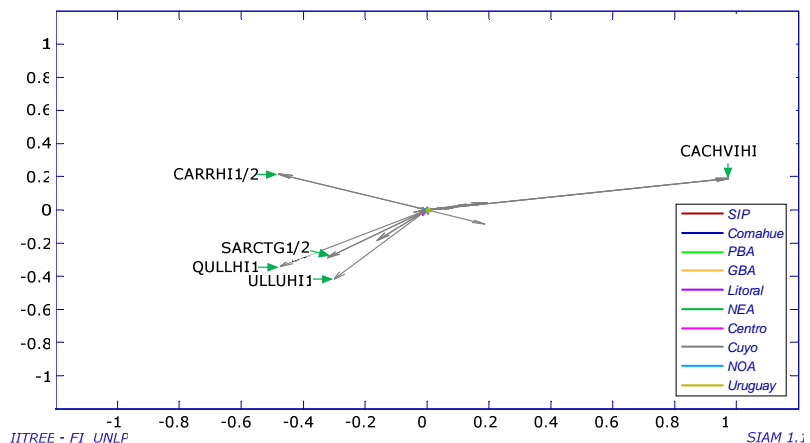


Fig. 4. Autovector. Modo Inter-Unidad

A continuación se presenta el Análisis de Prony llevado a cabo para validar los resultados del Análisis Modal. La oscilación fue excitada provocando durante 0.1 segundo una variación de -0.1pu en la reactancia longitudinal de una de las líneas del sistema que vincula a las máquinas generadoras cuyas Variables de

Estado tienen los mayores Factores de Participación en el Autovalor que se busca excitar. La Fig. 5 muestra la evolución temporal de los Ángulos Rotóricos de los generadores, todos pertenecientes al mismo área eléctrica del sistema Cuyo, de las barras N° 7680 QULLUM (línea celeste), N° 7621 ULLUM (traza verde) y N° 7691 SARMIENTO (traza violeta) están en contra fase, respecto de aquellos de las barras N° 7624 CACHEUTA (línea roja) y las barras N° 7615/7616 de CARRIZAL (líneas negras y azul coincidentes), estableciendo el Modo Inter-Unidad entre dichas máquinas.

En Tabla VII, se presenta el Análisis de Prony del Ángulo Rotórico del generador cuya variable de estado tiene el mayor factor de participación en el autovalor de la Fig. 5, barra N° 7680 de QULLUM. La componente N° 2 del análisis corresponde al modo Inter-Unidad en análisis, con frecuencia de 1.085 Hz y amortiguamiento de 0.105 p.u. calculado con los valores de las partes Real e Imaginaria.

TABLA VII. ANÁLISIS DE PRONY

MODAL COMPONENTS					
COMP.	EIGENVALUE		EIGENVECTOR		
Nº	REAL	IMAG.	MAG.	ANGLE	REMARKS
1	3.58E-05	-----	21.501	-----	-----
2	-0.72200	6.81472	0.18004	16.45	1.085 HZ.
3	-1.20644	3.78044	1.46E-02	-54.98	0.602 HZ.

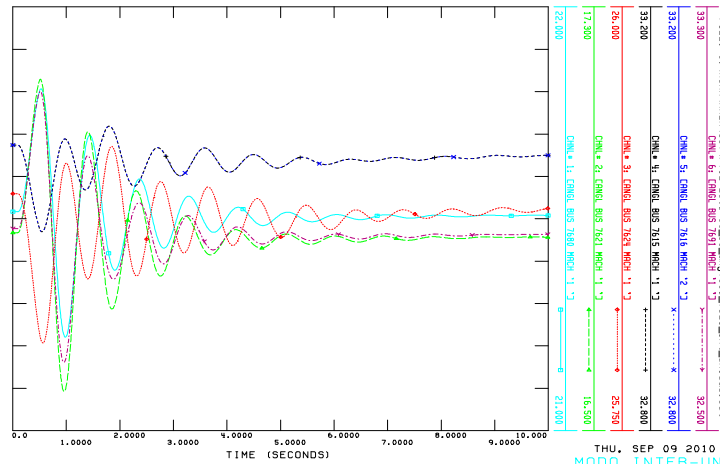


Fig. 5. Ángulos Rotóricos de los generadores

Se observa que coinciden los Autovalores determinados con Análisis de Prony y con Análisis Modal.

7.1.3 Modo Inter-Área

En Tabla VIII se observa un Autovalor con amortiguamiento del orden del 9.3% y con frecuencia de aprox. 1.08Hz. Este modo de oscilación fue clasificado como un Modo Inter-Área y corresponde a generadores que se encuentran en las áreas GBA (barras N° 3641 y N° 3642) y Uruguay (barras N° 98730 y N° 98121).

TABLA VIII. AUTOVALOR. MODO INTER-ÁREA

Nº de autovalor	Real	Imag	D(pu)	f(Hz)	Observaciones
1959	-0.626	6.732	0.093	1.076	Modo Inter-Área GBA-Uruguay

En Tabla IX se observa que las variables de estado que más participan del modo son las correspondientes al Desvío de Velocidad y al Ángulo Rotórico del modelo GENROU de los generadores que pertenecen a las áreas GBA y Uruguay, determinando un tipo de Modo Inter-Área. La Fig. 6 muestra como los autovectores correspondientes a Ángulos Rotóricos de las máquinas del área GBA (vectores amarillos) y Uruguay (vectores verdes) se encuentran la mayoría en oposición de fase entre si, determinando el Modo Inter-Área.

TABLA IX. FACTORES DE PARTICIPACIÓN

Factor	Row Nr	Machine	Bus	Model	State
1	916	GEBATG2	3642	GENROU	K+4
0.99997	910	GEBATG1	3641	GENROU	K+4
0.99924	917	GEBATG2	3642	GENROU	K+5
0.99921	911	GEBATG1	3641	GENROU	K+5
0.12711	2019	MALD1	98730	GENROU	K+4
0.12703	2020	MALD1	98730	GENROU	K+5
0.11971	1933	MONLA1	98121	GENROU	K+4
0.11962	1934	MONLA1	98121	GENROU	K+5
0.11918	1939	MONLB2	98122	GENROU	K+4
0.11909	1940	MONLB2	98122	GENROU	K+5
0.10586	915	GEBATG2	3642	GENROU	K+3
0.10586	909	GEBATG1	3641	GENROU	K+3
0.07922	832	COCCTG2	3610	GENROU	K+4
0.07915	833	COCCTG2	3610	GENROU	K+5
0.04762	922	GEBACV3	3643	GENROU	K+4
0.04758	923	GEBACV3	3643	GENROU	K+5

0.04353	820	BSASTG8	3608	GENROU	K+4
0.04350	821	BSASTG8	3608	GENROU	K+5

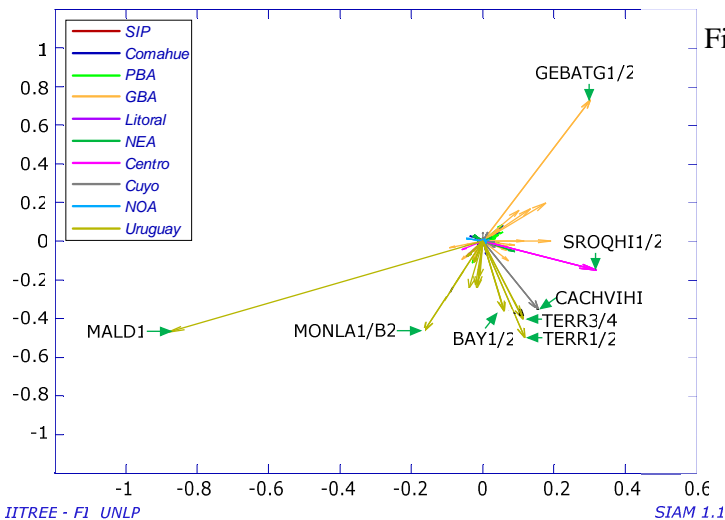


Fig. 6. Autovector. Modo Inter-Área

Se efectúa Análisis de Prony sobre los Ángulos Rotóricos de los generadores antes mencionados al aplicarse una perturbación que excita el modo en estudio. La Fig. 7 muestra la evolución temporal de los Ángulos Rotóricos de los generadores y se observa que los que pertenecen a distintas áreas eléctricas del sistema, GBA y Uruguay, de las barras N° 3641/3642 GEBA TG1/TG2 (líneas celeste y verde coincidentes - ambas en fase -), están en contra fase con aquellos de las barras N° 98121/98122 MONLA1/MONLB2 (líneas roja y negra) y N° 98730 MALD1 (línea azul), determinando un Modo Inter-Área. El modo posee una frecuencia de 1.082 Hz y un amortiguamiento de 0.093 p.u. determinado con las partes Real e Imaginaria. Nuevamente, estos resultados convalidan los obtenidos con Análisis Modal. En Tabla X se presenta el Análisis de Prony del Ángulo Rotórico del generador con mayor factor de participación en el modo de la Fig. 7, barra N° 3641. La componente N° 2 corresponde al modo Inter-Área en análisis.

TABLA X. ANÁLISIS DE PRONY

MODAL COMPONENTS					
COMP.	EIGENVALUE		EIGENVECTOR		REMARKS
Nº	REAL	IMAGINARY	MAGNITUDE	ANGLE	
1	-4.17E-05	-----	13.867	-----	TCNST:SC
2	-0.638068	6.79662	5.77E-02	-146.98	1.082 HZ.
3	-0.935484	4.44999	7.43E-03	149.72	0.708 HZ.

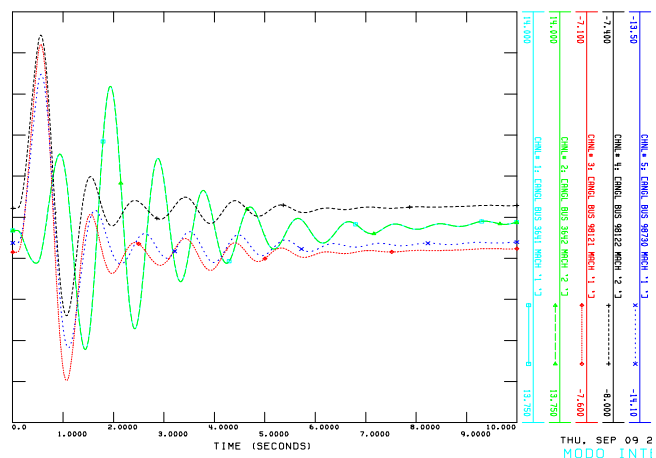


Fig. 7. Ángulos Rotóricos de los generadores

8 CONCLUSIONES

La correcta linealización de la “Base de Datos de Modelos no lineales” del SADI-SIP utilizada para estudios de estabilidad permite obtener una “Base de Datos para Análisis Modal”, a partir de la cual es posible obtener la matriz A correctamente conformada que caracteriza el comportamiento dinámico del SADI-SIP. Consecuentemente, resulta posible utilizar el Análisis Modal para caracterizar el comportamiento de pequeña señal del SADI-SIP. Para realizar el Análisis Modal, se ha desarrollado un programa en MATLAB denominado SIAM. El programa SIAM realiza el procesamiento de la matriz A y permite de manera rápida y confiable, obtener todos los Autovalores o Modos de Oscilación del sistema, los Factores de Participación y los Autovectores asociados a cada Autovalor. Los resultados obtenidos con el SIAM han sido comparados y verificados con otro programa – Lsysan - que realiza Análisis Modal y a su vez, con otra herramienta de aplicación en el dominio del tiempo como es el Análisis de Prony, arrojando resultados concordantes en todos los casos. Cabe destacar que comparado con el Análisis de Prony, el Análisis Modal permite obtener resultados en forma más rápida, más precisa, menos laboriosa y no dependiente de la experiencia del

ingeniero que realiza el análisis. Como contraparte, el Análisis Modal requiere el manejo de grandes volúmenes de información que debe ser procesada para determinar aquella parte de la información que permite caracterizar el comportamiento dinámico del sistema bajo estudio.

9 REFERENCIAS

- [1] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., 1994.
- [2] Graham Rogers, *Power System Oscillations*, The Kluwer International Series in Engineering and Computer Science, 2000.
- [3] J.L.Rueda y D.G.Colomé, “Métodos para el Análisis de Estabilidad de Pequeña Señal en Sistemas Eléctricos de Potencia”, *Décimo Segundo Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ, XII ERIAC*, Foz de Iguazú, Brasil, Mayo de 2007.
- [4] Program Operation Manual: Volumen I, PSS/E 30.
- [5] IEEE Std. 421.2-1990, “Dynamic Performance of Excitation Control System”, 1990.
- [6] IEEE Power Engineering Society System Oscillations Working Group, “Inter-Area Oscillations In Power Systems”, 95 TP-101, 1995.
- [7] Modal Analysis Plotting, PSS PLT Program Manual PSS/E 30.