

Comité de Estudio C4 - Desempeño Técnico del Sistema

DETERMINACIÓN DE LOS MODOS DE OSCILACIÓN ELECTROMECAÑICOS EN LA INTERCONEXIÓN SADI-SING A PARTIR DE REGISTROS DE ENSAYOS

J.L. AGÜERO*
IITREE-FI-UNLP
Argentina

F. ISSOURIBEHERE
IITREE-FI-UNLP
Argentina

J.C. BARBERO
IITREE-FI-UNLP
Argentina

R.M. MOLINA
CAMMESA
Argentina

Resumen – Como consecuencia de las puestas en servicio en Argentina del corredor NOA-NEA de 500 kV y de la obra de ampliación de la capacidad de transformación 500/345 kV en la E.T. Cobos, se han realizado gestiones para reactivar el uso de una línea de transmisión de 345 kV y 410 km de longitud que se encuentra fuera de servicio desde el año 2009.

Esta línea vincula la subestación Cobos en la provincia de Salta en el noroeste de Argentina con la subestación Los Andes en el norte de Chile.

Estudios eléctricos previos realizados con una Base de datos preliminar de modelos de generadores y sus controles del sistema de transmisión del SING realizados por el Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE) y por la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico SA (CAMMESA) arrojaron como resultado un bajo amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en la potencia eléctrica intercambiada entre el SING y el SADI por esta línea de interconexión.

A solicitud de Termoandes SA (empresa argentina del grupo AES Gener) el IITREE de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) instaló un equipo registrador digital de formas de ondas a los efectos de registrar las oscilaciones electromecánicas en la potencia transmitida por la línea de 345 kV que vincula ambos sistemas eléctricos.

El presente trabajo muestra las mediciones obtenidas durante las pruebas de interconexión realizadas el domingo 11 de Mayo del 2014.

Estas pruebas consistieron en la transmisión de 100 MW desde Argentina hacia Chile (exportación) y 150 MW desde Chile hacia Argentina (importación). La duración de las pruebas fue de aproximadamente tres horas.

Para ambos sentidos de la transmisión se conectó y desconectó un reactor de barra de 120 Mvar en la barra 500 kV de la ET Cobos con el objeto de provocar las oscilaciones electromecánicas.

Las mediciones tuvieron por objeto registrar la eventual presencia de oscilaciones de potencia eléctrica para poder luego determinar la frecuencia y el amortiguamiento de las mismas.

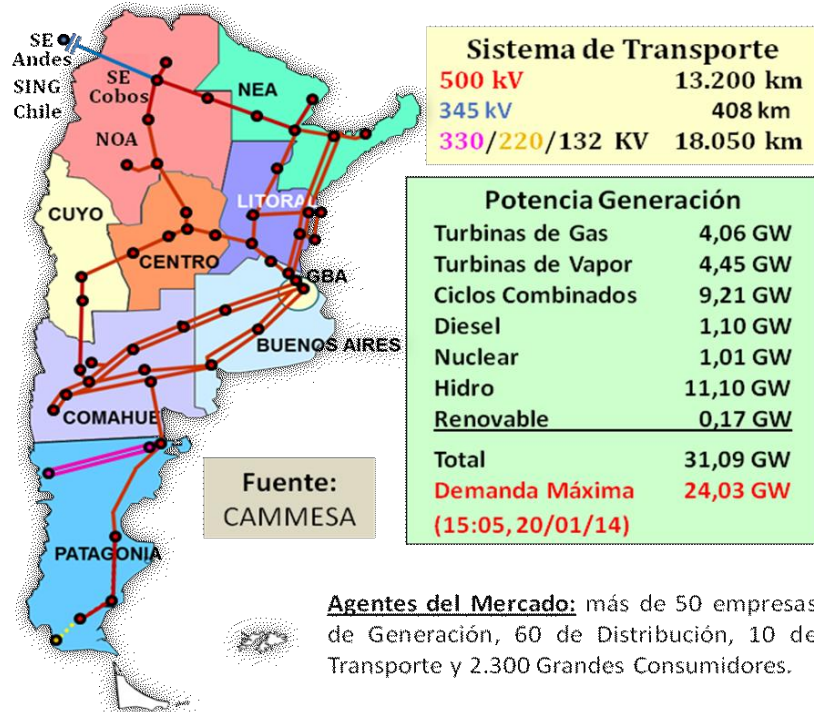
Para el análisis de las oscilaciones registradas se utilizó una herramienta desarrollada por el IITREE basada en el método de Prony, especialmente diseñada para que tenga la capacidad de identificar las componentes válidas (Autovalores) de la forma de onda analizada para cada ventana de tiempo.

En este trabajo se presentan los resultados y conclusiones obtenidos a partir del procesamiento de las mediciones realizadas en ocasión de la Interconexión SADI-SING.

Palabras clave - Registro de ensayos - Oscilaciones electromecánicas - Método de Prony

1 INTRODUCCIÓN

La empresa AES Gener, propietaria de la central Termoandes SA, ubicada en Cobos, provincia de Salta, Argentina, recibió las autorizaciones de los gobiernos de Argentina y de Chile para realizar pruebas de funcionamiento interconectado entre el Sistema Argentino de Interconexión (SADI-Argentina) mostrado **Figura 1**, y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING-Chile) mostrado **Figura 2**.



Agentes del Mercado: más de 50 empresas de Generación, 60 de Distribución, 10 de Transporte y 2.300 Grandes Consumidores.

Figura 1. Sistema Argentino de Interconexión (SADI), con línea 345 kV entre SE Cobos (SADI-Argentina) y SE Andes (SING-Chile).

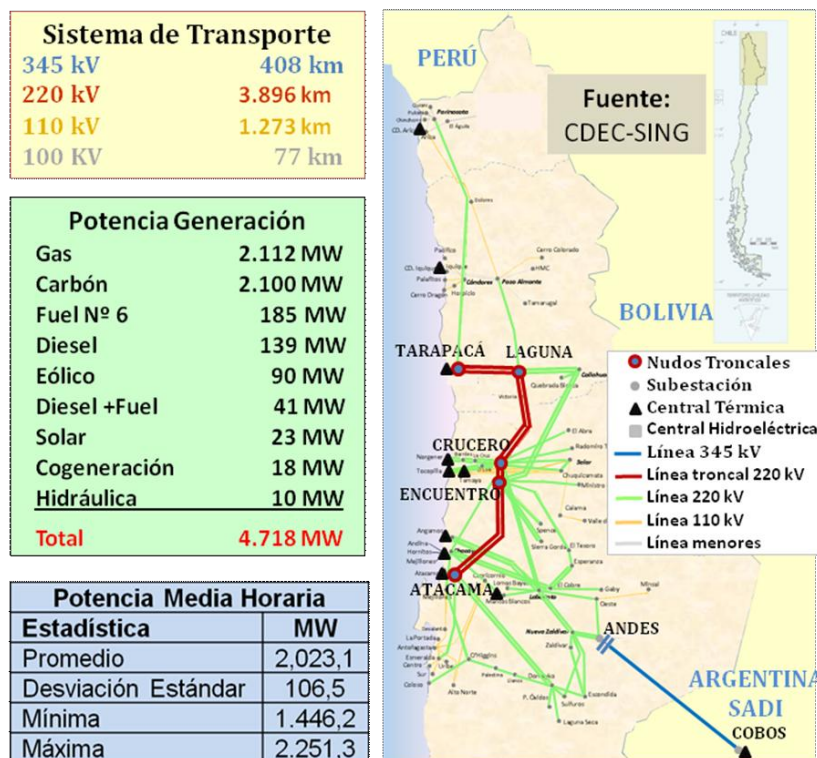


Figura 2. Sistema Interconectado Norte Grande (SING), con línea 345 kV entre SE Cobos (SADI-Argentina) y SE Andes (SING-Chile).

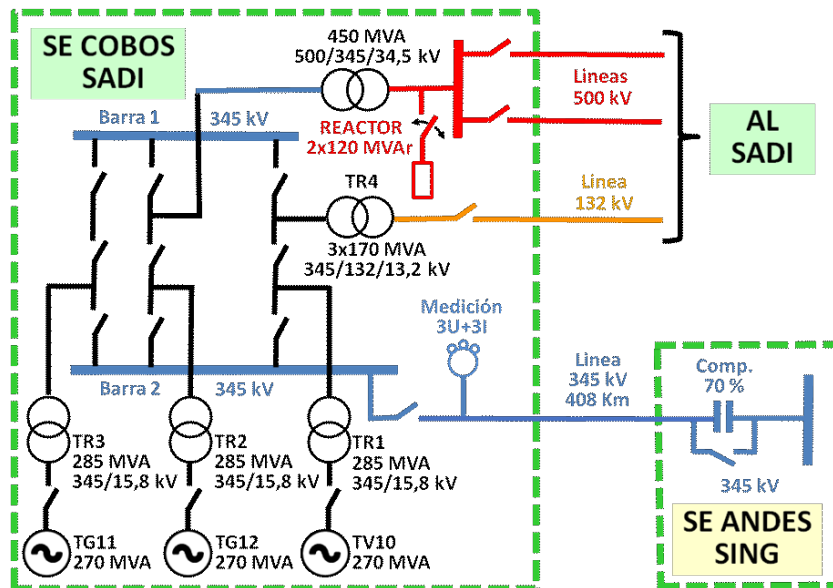


Figura 3. Esquema SE Cobos. Ciclo Combinado Termoandes (TG11, TG12 y TV10). Líneas 500 kV y 132 kV al SADI-Argentina (esquema simplificado), y línea 345 kV de 408 Km a SE Andes (SING-Chile).

El SING (Chile) y el SADI (Argentina) están vinculados por una línea de 345 kV y 408 km, y posee compensación capacitiva serie del 70% ubicada en SE Andes (SING), ver **Figuras 1, 2 y 3**. Esta línea tiene tramos de alta montaña.

La compensación capacitiva serie fue desconectada para evitar eventuales problemas de Resonancia Subsincrónica en las unidades generadoras de vapor del SING. Estas unidades poseen varias masas rotantes (excitatriz, generador, etapas de baja-media-alta presión en turbina, etc.) acopladas mecánicamente mediante ejes, y pueden presentar frecuencias subsincrónicas de resonancia mecánica (fm) con muy bajo amortiguamiento mecánico (debido al bajo roce en soportes de ejes).

Estas frecuencias mecánicas de oscilación pueden ser excitadas por oscilaciones complementarias en el sistema eléctrico ($f_m = 50 - f_e$) dando lugar a pérdida de vida útil por fatiga en los ejes, o rotura inmediata si es lo suficientemente grande el torque mecánico aplicado entre las distintas partes del eje.

Con el objeto de provocar las oscilaciones electromecánicas se conectó/desconectó un reactor de barra de 120 Mvar, ubicado en barras de 500 kV de la SE Cobos (SADI), ver **Figura 3**.

2 SISTEMA DE MEDICIÓN

Las mediciones se efectuaron en la SE Cobos, donde está la central Termoandes de la empresa AES Gener, ubicada en Cobos, provincia de Salta, Argentina, ver **Figura 3**.

La central Termoandes consiste en un Ciclo Combinado compuesto por 2 Turbinas de Gas (TG11 y TG12) que operan en ciclo cerrado con una Turbina de Vapor (TV10).

Cada una de las 3 unidades generadoras es de 270 MVA, 15.8 kV, y está conectada a un transformador de 15,8/345 kV, 285 MW.

La medición se realizó sobre la salida de la línea de 345 kV, 408 Km, que vincula las SSEE Cobos (SADI) y Andes (SING), ver "Medición 3U+3I" en **Figura 3**.

Se midieron los secundarios de transformadores de tensión, relación 345/0.115 kV, y los secundarios de los transformadores de corriente, relación 1200/1 A.

En **Figura 4** se muestran fotos de la instalación del equipamiento de medición y registro.

Los secundarios de los transformadores de corriente de la SE Cobos fueron ingresados a los primarios de transformadores de corriente de propiedad del IITREE, con relación 1/10, cuyos secundarios fueron ingresados a un Transductor de Potencia convencional, propiedad del IITREE.

Asimismo, se utilizaron pinzas de corriente de 400 mV/A. Estas pinzas abrazaron a 20 vueltas de los secundarios de los Transformadores de corriente de la instalación, obteniendo un factor de amplificación de

20/1. Las tensiones de salida de estas pinzas de corriente fueron ingresadas a un Adaptador de Señales diseñado y construido por el IITREE.

Los secundarios de los transformadores de tensión fueron ingresados al Adaptador de Señales del IITREE y al Transductor de Potencia convencional.

Asimismo, una de las tensiones medidas fue ingresada un Transductor de Frecuencia diseñado y construido por el IITREE.

Finalmente, las 6 salidas del Adaptador de Señales del IITREE (3 corrientes y 3 tensiones), conjuntamente con las salidas del Transductor de Potencia convencional y del Transductor de Frecuencia fueron ingresadas a un equipo registrador oscilográfico marca HIOKI modelo 8855, propiedad del IITREE.

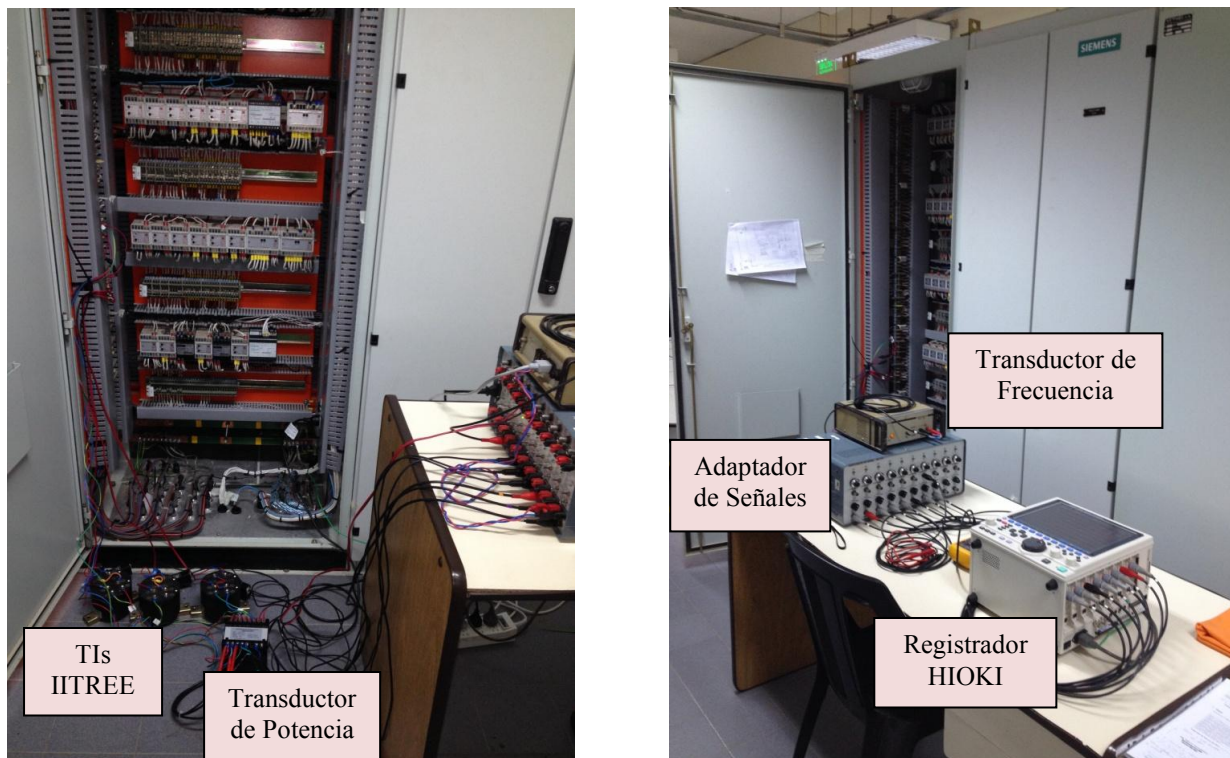


Figura 4. Instalación del sistema de medición y registrado. SE Cobos 345 kV.

3 MEDICIONES REALIZADAS

Para los ensayos se realizó la siguiente secuencia de operaciones:

- 09:19 Hs. Energización en vacío LAT 345 kV (U barra aprox. 332 kV).
- 10:00 Hs. Paralelo SADI-SING.
- 10:40 Hs. Exportación a Chile - Aprox. 100 MW.
- 11:00 Hs. Conexión Reactor N° 2 en SE Cobos 500kV.
- 11:12 Hs. Desconexión Reactor N° 2 en SE Cobos 500kV.
- 12:50 Hs. Importación desde Chile.- Aprox. 150 MW
- 13:22 Hs. Conexión Reactor N° 2 en SE Cobos 500kV.
- 13:35 Hs. Desconexión Reactor N° 2 en SE Cobos 500kV.
- 13:52 Hs. Fin de las pruebas. Apertura LAT 345 kV.

En el período de tiempo mencionado, el IITREE realizó los registros que se detallan en **Tabla I**.

Los registros de las 3 tensiones y las 3 corrientes fueron procesados en Matlab para obtener la Frecuencia y la Potencia Activa. Estas magnitudes calculadas fueron contrastadas con la Potencia Activa y la Frecuencia obtenidas por los transductores del IITREE, no observándose desvíos significativos entre ambos sistemas de medición.

TABLA I: REGISTROS EFECTUADOS EN LA INTERCONEXIÓN SADI-SING. 11 DE MAYO DE 2014.

Hora	Archivo (*.mat)	Observación
9:39	TERMO003_IITREE	Línea energizada lado Argentino y en vacío. Reactivo línea aprox. 90 Mvar.
10:04	TERMO004_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 30 MW
10:22	TERMO005_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 60 MW
10:27	TERMO006_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 75 MW
10:32	TERMO007_IITREE	Potencia estabilizada, exportación a Chile de aprox. 100 MW
10:37	TERMO008_IITREE	Potencia estabilizada, exportación a Chile de aprox. 100 MW
10:46	TERMO009_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
10:52	TERMO010_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
10:54	TERMO011_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
11:02	TERMO012_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW. Conexión reactor 120 Mvar
11:05	TERMO013_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
11:15	TERMO014_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW. Desconexión reactor 120 Mvar
11:25	TERMO015_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
11:37	TERMO016_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
11:43	TERMO017_IITREE	Exportación a Chile de aprox. 100 MW
12:08	TERMO018_IITREE	Intercambio de potencia con Chile cercano a cero
12:38	TERMO019_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 50 MW
12:44	TERMO020_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 75 MW
13:02	TERMO021_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW
13:06	TERMO022_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW
13:15	TERMO023_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW
13:17	TERMO024_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW
13:23	TERMO025_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW. Conexión reactor 120 Mvar
13:29	TERMO026_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW
13:32	TERMO027_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW. Desconexión reactor 120 Mvar
13:37	TERMO028_IITREE	Importación desde Chile de aprox. 150 MW desde Chile pero bajando potencia

En los registros donde se conecta y desconecta el reactor de 120 Mvar no se alcanza a distinguir el momento cuando este reactor es operado, ya que las oscilaciones son continuamente excitadas.

A modo de ejemplo, en **Figuras 5a** y **5b** se muestra un ensayo correspondiente a la exportación a Chile de 100 MW y en **Figuras 6a** y **6b** se muestra un ensayo correspondiente a la importación desde Chile de 150 MW.

Cualquiera sea el sentido de la potencia intercambiada entre Argentina y Chile, se observa claramente una oscilación del orden de 0.3 Hz que está presente continuamente, y que es excitada recurrentemente. Cabe aclarar que el amortiguamiento es positivo porque las oscilaciones no aumentan su amplitud y el sistema permanece estable.

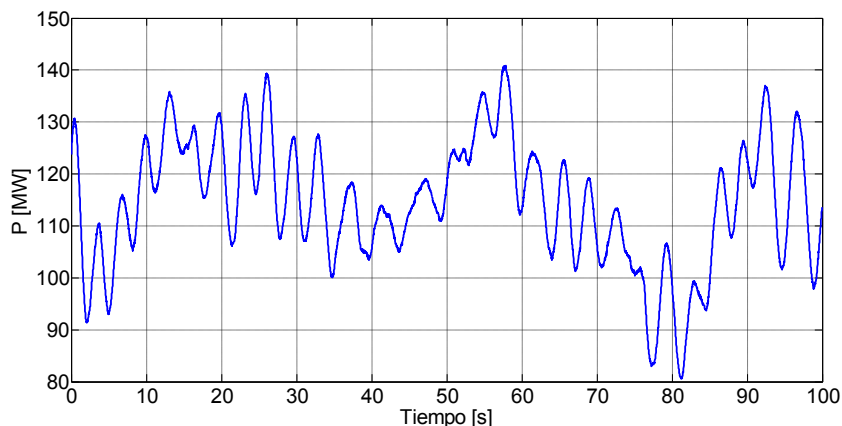


Figura 5a. Registro TERMO011. Exportación a Chile de aprox. 100 MW. Potencia Activa.

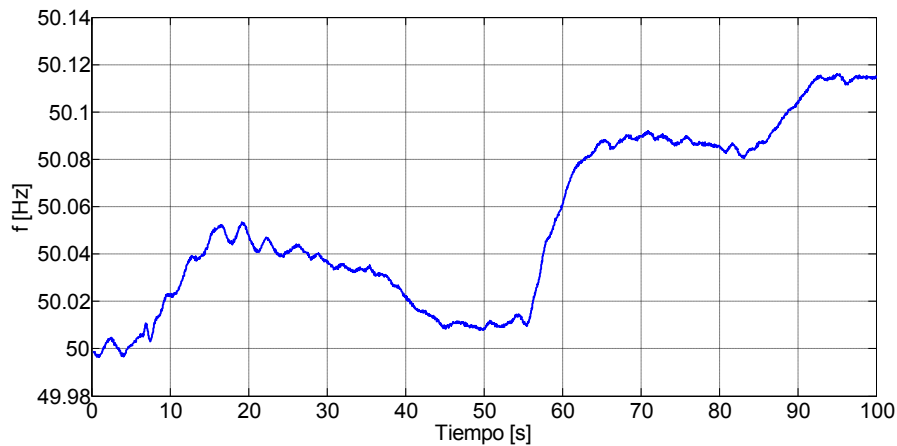


Figura 5b. Registro TERMO011. Exportación a Chile de aprox. 100 MW. Frecuencia.

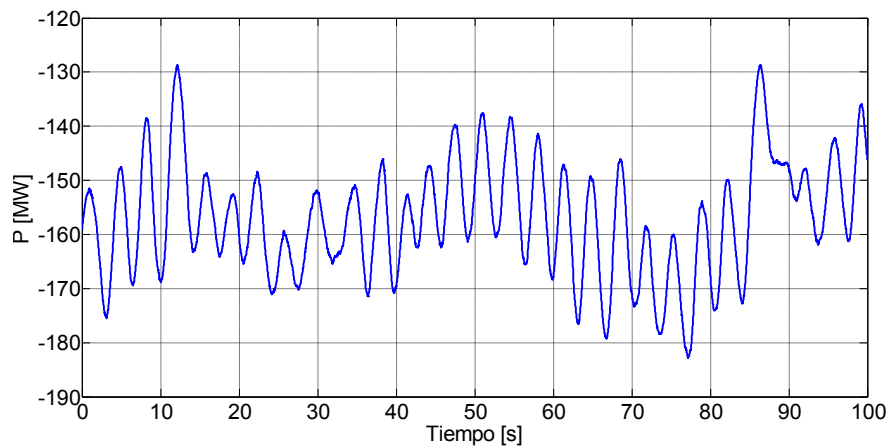


Figura 6a. Registro TERMO023. Importación desde Chile de aprox. 150 MW. Potencia Activa.

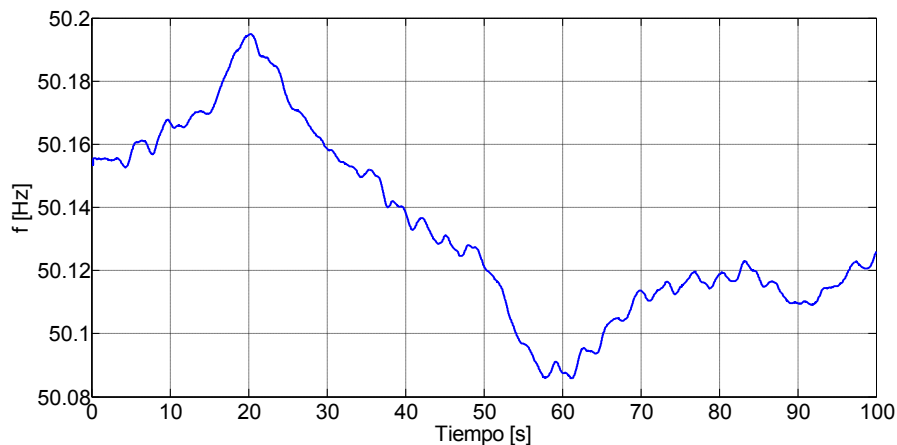


Figura 6b. Registro TERMO023. Importación desde Chile de aprox. 150 MW. Frecuencia.

4 PROCESAMIENTO DE LAS MEDICIONES

Para el análisis de las oscilaciones electromecánicas registradas se utilizó una herramienta desarrollada por el IITREE basada en el método de Prony [1], especialmente diseñada para que tenga la capacidad de identificar las componentes válidas (Autovalores) de la forma de onda analizada para cada ventana de tiempo. Esta herramienta ha sido contrastada exhaustivamente con más de 800 registros de eventos obtenidos con el sistema de monitoreo de oscilaciones subsíncronas instalado en la ET Bahía Blanca [2-3].

El análisis de Prony permite modelar señales muestreadas como una combinación de sinusoides amortiguadas, minimizando el error cuadrático medio entre la señal real y la señal estimada,

determinando todos los parámetros de cada componente presente en las variables registradas, esto es: amplitud, frecuencia y amortiguamiento. La herramienta mencionada permite hacer un análisis de Prony sobre una ventana de tiempo deslizante.

Para el análisis de los intercambios de potencia entre Chile y Argentina se incorporaron algunos parámetros de ajuste al anterior análisis de Prony para estimar mejor la frecuencia y el amortiguamiento del modo de oscilación dominante.

Para eliminar las variaciones lentas de la potencia eléctrica, presumiblemente debidas a la acción de los Reguladores de Velocidad – Potencia o a las acciones de los operadores durante las pruebas, se realizó un proceso de filtrado, como se presenta en la **Figura 7** para el registro TERMO026_IITREE y en la **Figura 8** para el registro TERMO019_IITREE. El registro de potencia activa (curva negra) se pasó por un filtro de promedio móvil, con un ancho de ventana de 10 s, para eliminar todas las componentes por debajo de 0,1 Hz (curva roja). Posteriormente, al registro original de potencia activa se le descontó la salida del filtro de promedio móvil, obteniendo un nuevo registro de potencia (curva azul) apto para realizar el procesamiento con el análisis de Prony.

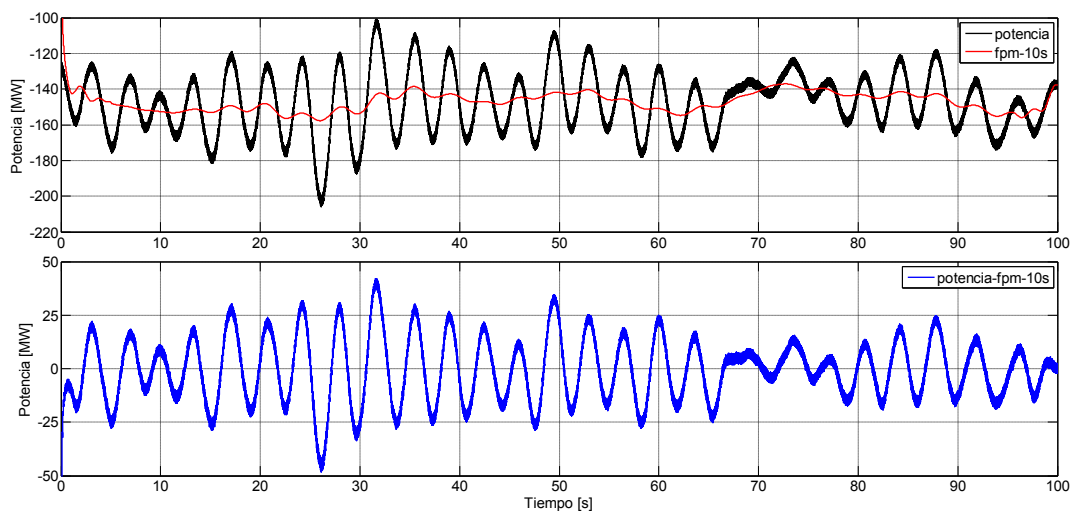


Figura 7. Filtrado del registro de Potencia Activa TERMO026_IITREE.

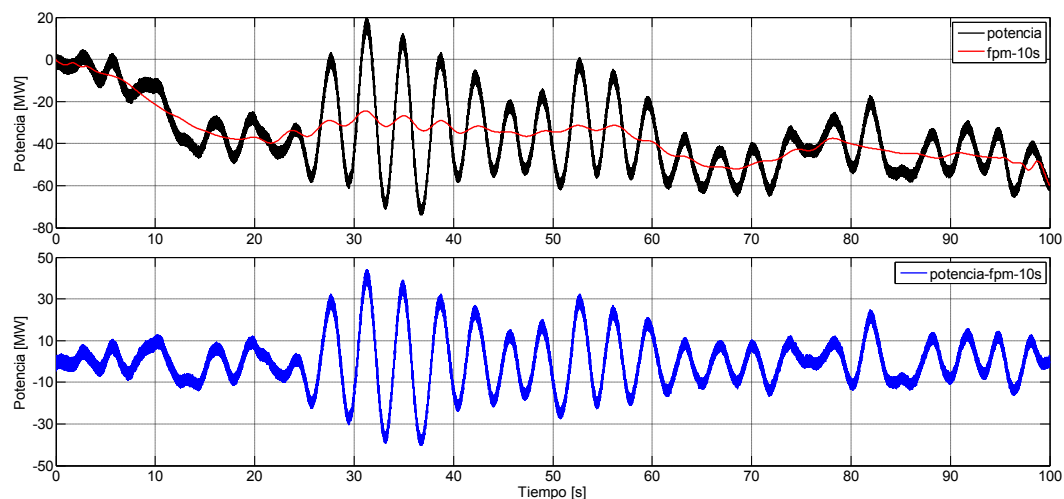


Figura 8. Filtrado del registro de Potencia Activa TERMO019_IITREE.

Para el análisis de Prony, con el cual se pretenden detectar modos de oscilación de una frecuencia cercana a los 0,3 Hz, se utilizó un ancho de ventana de análisis de 300 ciclos de la frecuencia fundamental (50 Hz), es decir un ancho de ventana de 6 segundos. Para analizar el comportamiento de la potencia eléctrica registrada se efectuó un análisis de Prony deslizante cada 20 ms.

A modo de ejemplo, en la **Figura 9** y en la **Figura 10** se presentan los resultados del procesamiento de los registros TERMO026_IITREE y TERMO019_IITREE respectivamente.

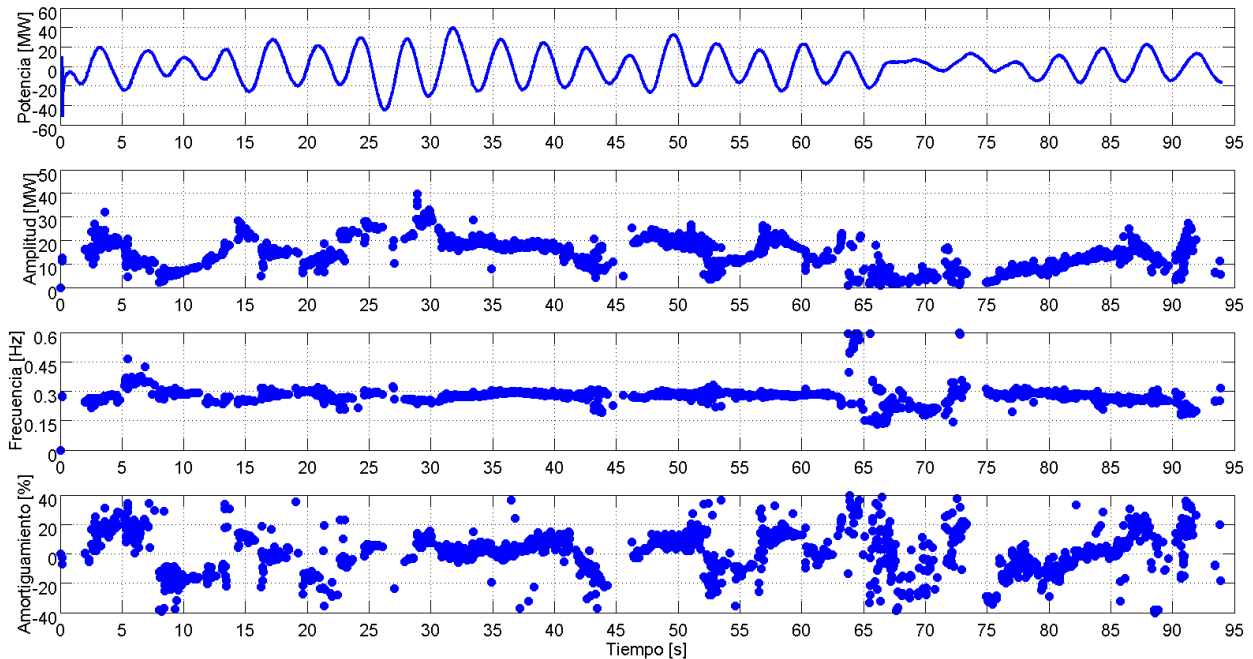


Figura 9. Análisis de Prony del registro TERMO026_IITREE.

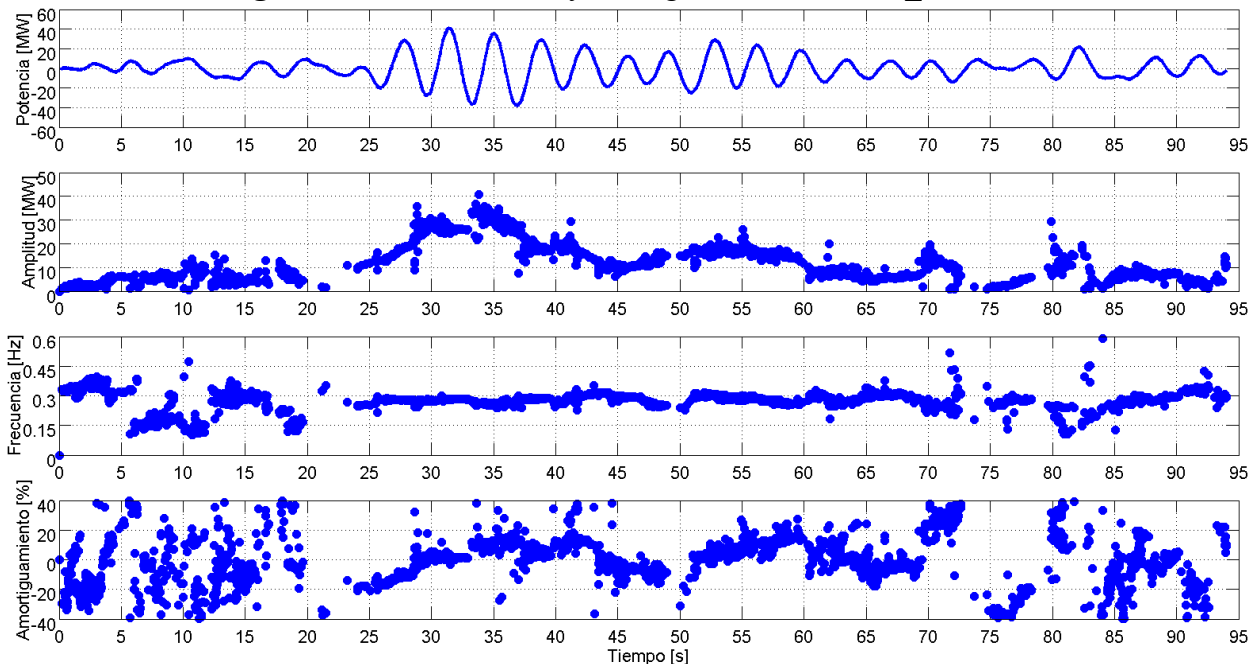


Figura 10. Análisis de Prony del registro TERMO019_IITREE.

Del análisis de Prony deslizante de los registros TERMO26_IITREE y TERMO19_IITREE se observa que:

- La frecuencia de la oscilación se mantiene muy cercana al valor de 0,3 Hz.
- El amortiguamiento de la oscilación es muy variable con un valor promedio del 3 % que fluctúa en ± 40 %. Sin embargo existe una buena correlación entre el amortiguamiento que podría observarse a simple vista en la traza temporal de la potencia y el valor estimado por la herramienta utilizada.

Posteriormente, se modifica el criterio de selección de tramos de registro para la aplicación del análisis de Prony. Dado que la frecuencia de oscilación dominante es de alrededor de 0,3 Hz, se presentan los resultados del análisis de Prony para las siguientes condiciones:

- Componentes de frecuencia entre 0,25 y 0,35 Hz.
- Amortiguamiento entre 0 y 10 %.
- Valor absoluto de la diferencia de los valores máximos y mínimos de la componente de 0,3 Hz de la potencia activa mayor que un determinado valor, ajustado para cada registro.

En la **Figura 11** y la **Figura 12** se presentan los resultados del análisis utilizando los nuevos criterios establecidos, para los registros TERMO026_IITREE y TERMO019_IITREE.

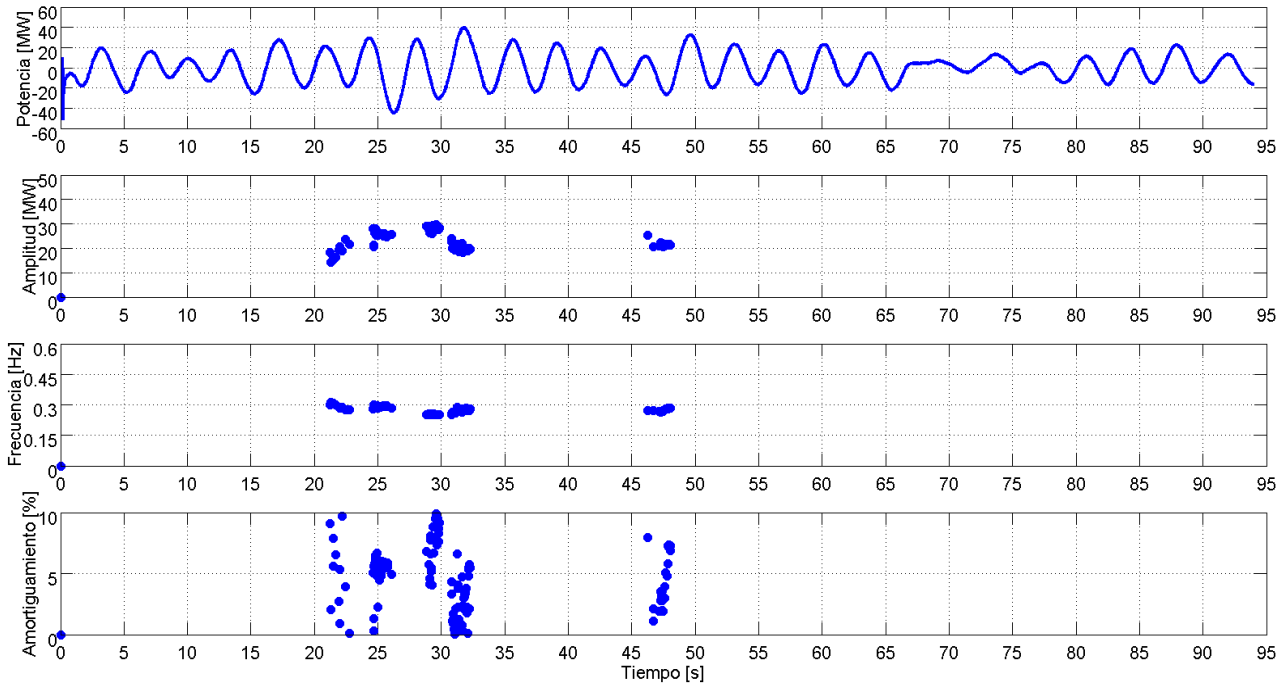


Figura 11. Análisis de Prony del registro TERMO026_IITREE con nuevos criterios.

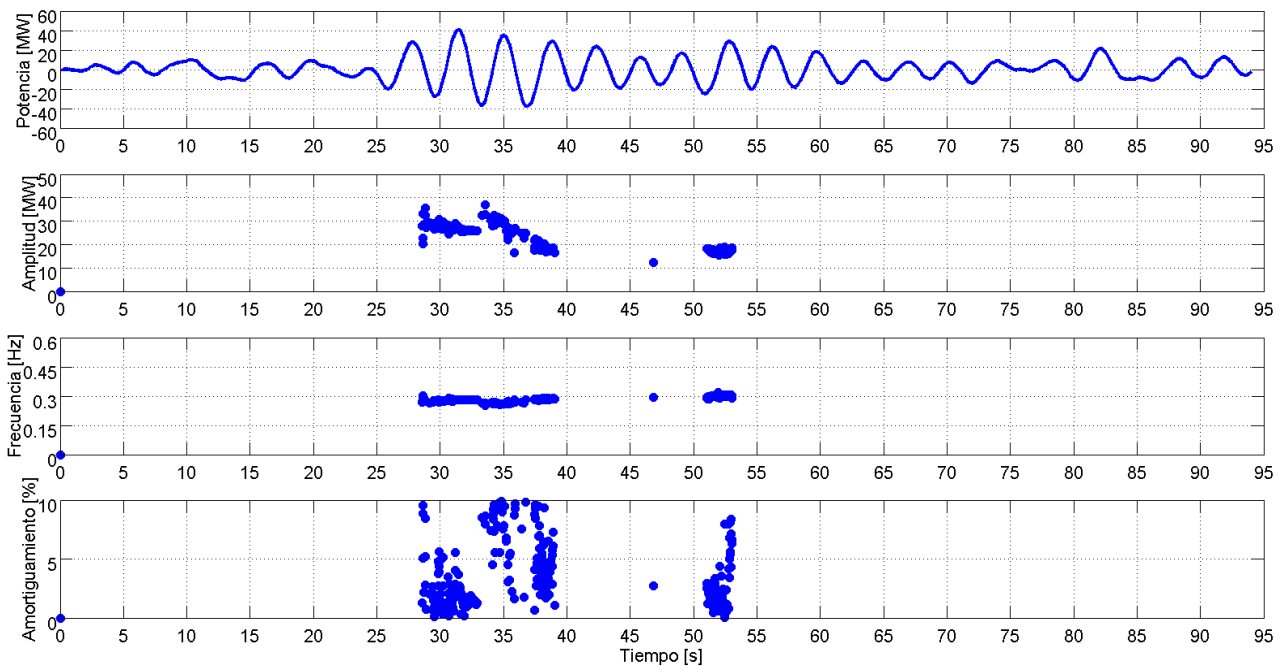


Figura 12. Análisis de Prony del registro TERMO019_IITREE con nuevos criterios.

En **Figura 11** y **Figura 12** se observa que:

- La frecuencia de la oscilación es próxima a 0,3 Hz.
- El amortiguamiento es en promedio del orden de 2 a 4 %.

5 CONCLUSIONES

La herramienta de análisis desarrollada, basada en el método de Prony deslizante, ha demostrado ser extremadamente útil para cuantificar las oscilaciones electromecánicas que se presentan en los sistemas de transmisión, y que se observan principalmente en la potencia eléctrica. Esta herramienta también fue utilizada exitosamente para ponderar oscilaciones subsíncronas [3].

Del procesamiento exhaustivo de los registros de ensayo es posible concluir que, si bien la oscilación dominante es excitada continuamente, en determinados tramos de los registros es posible estimar un valor de 0,3 Hz para la frecuencia de oscilación y valores del amortiguamiento del orden de 2 a 4 %.

6 CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] “Time-Varying Waveforms Distortions in Power Systems”. Paulo F. Ribeiro. John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-71402-7.
- [2] “SSR Studies in Argentina for the Bahía Blanca Generating Plant”. International Power System Transients Conference, Seattle, USA, 23 al 27 de junio de 1997. Autores: J. A. Nizovoy, J. L. Alonso, A. C. Alvarez, L. M. Bouyssede.
- [3] “Análisis de Oscilaciones Subsíncronas derivadas de fallas en Sistemas de 500 kV. Experiencias de aplicación del Método de Prony”. P. E. Issouribehere, J. C. Barbero, F. Issouribehere,- J. Rodríguez. XIV ERIAC, Ciudad del Este, Paraguay - 22 al 26 de mayo de 2011.