

# CENTRAL NUCLEAR EMBALSE. MODELOS VALIDADOS POR ENSAYO DE: REGULADOR AUTOMÁTICO DE TENSION, LIMITADORES DE SOBRE Y SUB EXCITACIÓN Y ESTABILIZADOR DE POTENCIA

J. L. Agüero\*

C. Tubello\*\*

F. Issouribehere\*

\*Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y Equipos Eléctricos (IITREE), Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Argentina  
\*\*Nucleoeléctrica Argentina S.A. (NA-SA). Central Nuclear Embalse. Embalse Río Tercero, Córdoba, Argentina

El presente artículo técnico fue seleccionado por Cigré Argentina y aprobado por el Comité Técnico del XV ERIAC, Décimo Quinto Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré. Este Seminario internacional fue organizado por Cigré Brasil, en Foz do Iguaçu, entre los días 19 y 23 de mayo de 2013.

## 1. Resumen

La Central Nuclear Embalse, ubicada en la ciudad de Embalse Río Tercero, provincia de Córdoba, cuenta con una turbina de vapor 640 MW de potencia y constituye la unidad de generación individual más importante de la República Argentina.

Recientemente, la Central Nuclear Embalse puso en marcha una serie de mejoras y reemplazo de equipamiento a los efectos de extender su vida útil.

Como primera etapa de dicha obra se reemplazó el transformador de excitación, el sistema de control de excitación (AVR) y el sistema de control de velocidad-potencia de la turbina (Governor o DEHC: *Digital Electro-Hydraulic Controller*).

Para verificar el desempeño de los nuevos sistemas de control, el IITREE de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata realizó los ensayos correspondientes al Proce-

dimiento Técnico N° 4 (PT 4) de CAMMESA durante los días 9 a 12 de diciembre de 2011.

El objeto de los ensayos es verificar el correcto desempeño de la turbina y su sistema de control velocidad – potencia (Governor o DEHC) y de los diferentes controles del sistema de excitación: regulador automático de tensión (AVR: *Automatic Voltage Regulator*), Limitador de sub-excitación (UEL; *Under Excitation Limiter*), limitador de sobreexcitación (OEL: *Over Excitation Limiter*) y estabilizador de potencia (PSS: *Power System Stabilizer*).

Adicionalmente, estos ensayos son utilizados para verificar los correspondientes modelos suministrados por los fabricantes. Esta verificación se realiza sobre modelos implementados en el programa Simulink de Matlab.

Sobre la base de estos modelos Simulink, que han sido verificados contra ensayo, se realizan los modelos para el programa PSS/E del regulador automático de tensión (AVR) y del estabilizador de potencia (PSS). Estos modelos se requieren para la base de datos de modelos administrada por CAMMESA, que es utilizada para realizar estudios de estabilidad.

En este trabajo se presentan los modelos de los diversos sistemas de control y su validación contra ensayo realizada en el programa Simulink de Matlab y en el programa PSS/E.

Los modelos propuestos reproducen adecuadamente el comportamiento dinámico de las principales variables registradas durante los ensayos respectivos y han sido incorporados a la base de datos de CAMMESA.

## 2. Palabras clave

Regulador automático de tensión, estabilizador de potencia, limitadores de sobre y sub excitación.

## 3. Introducción

Este trabajo presenta los ensayos realizados sobre la unidad generadora de Central Nuclear Embalse para verificar los parámetros de desempeño del nuevo sistema de excitación y sus controles asociados: regulador automático de tensión (AVR), limitador de sub-excitación (UEL), limitador de sobre-excitación (OEL) y estabilizador de potencia (PSS).

En el Procedimiento Técnico N° 4 de CAMMESA [1] están establecidos los siguientes parámetros de desempeño a cumplir asociados al sistema de excitación.

a) Desempeño de la regulación de tensión en vacío:

Los valores exigidos corresponden a la operación en regulación automática y en régimen lineal. Respuesta a pequeños cambios tipo escalón en la referencia de tensión:

- Sobrepaso inferior al 15%
- Tiempo de crecimiento (10 al 90%) menor a 300 ms.
- Tiempo establecimiento (banda  $\pm 5\%$ ) menor a 1,5 s

b) Desempeño de la regulación de tensión en carga:

- Error estático de la tensión menor a 5% desde vacío a plena carga (factor de potencia nominal).

- Reducción de ganancia en la banda 1,5 a 5 rad/s.
  - Capacidad de compensación por corriente reactiva (tensión controlada ubicada entre bornes de generador y salida transformador *step-up*)
  - Máxima tensión de excitación superior a dos veces la tensión de excitación a plena carga y factor de potencia nominal.
  - Gradiente de tensión de excitación, debe permitir llegar al techo de excitación en menos de 10 ms para depresión de 50% de la tensión terminal.
- c) Estabilizador de potencia:
- Tipo: potencia acelerante.
  - Aporte positivo al amortiguamiento de las oscilaciones electromecánicas en la banda de 0,1 a 2,5 Hz.
  - Constante de tiempo de transductores menor a 40 ms.

Los ensayos de campo permiten verificar los modelos, ya sean estos modelos suministrados por el fabricante o determinados a partir del relevamiento de la información disponible.

Este proceso de verificación o validación de modelos se realiza reproduciendo los ensayos de campo sobre los modelos a verificar.

Normalmente se utiliza el programa Simulink de Matlab u otro de similares prestaciones para reproducir los ensayos sobre los modelos propuestos.

Cabe destacar que para este proceso de validación de modelos no solamente es necesario modelar el sistema de excitación sino que también es preciso modelar la máquina síncrona para los ensayos en vacío, y agregar un modelo simplificado del sistema eléctrico para los ensayos en carga.

Finalmente, para el programa PSS/E se selecciona un modelo de librería o se desarrolla un modelo de usuario.

Dado que en el programa PSS/E no resulta factible ingresar señales de registros de ensayos que actúen como entradas, el proceso de validación del modelo para el programa PSS/E consiste en realizar pruebas que se ejecutan con el programa PSS/E y con el programa Simulink, y se verifica que sean similares los resultados obtenidos con ambos programas.

De esta manera se confirma que el modelo para el programa PSS/E tiene igual comportamiento que el modelo para el programa Simulink que ha sido homologado reproduciendo los ensayos de campo.

#### 4. Descripción de la planta

La potencia mecánica de la turbina de vapor de la Central Nuclear Embalse es de 620 MW nominal, siendo operada hasta 518 MW para extender la vida útil de los tubos del reactor.

La turbina de vapor tiene una etapa de alta presión cuya salida está conectada a dos recalentadores que alimentan en paralelo a tres etapas de baja presión.

La turbina dispone de un mecanismo de *fast valving* o *fast acting* que deriva al condensador (*by-pass*) el vapor total (alta y baja presión).

Este mecanismo se activa por un desequilibrio entre la potencia mecánica (térmica) generada y la potencia eléctrica despachada. Si este desequilibrio dura más de dos segundos, se genera una reducción (*run-back*) de la consigna de potencia. El mecanismo de *fast valving* o *fast acting* también se activa ante rechazo de carga.

El generador es marca ASGEN y tipo THAR-4-763530-1500-22000, y tiene las siguientes características principales:

- Tensión nominal: 22 kV
- Potencia aparente nominal: 763,53 MVA
- Factor de potencia nominal: 0,85

- Potencia nominal: 648 MW
- Frecuencia nominal: 50 Hz

El transformador de *step-up* es de 22 / 500 kV y tiene selector de tensión (no tiene conmutador bajo carga). El nuevo sistema de excitación es marca ABB y tipo UNITROL 6000, es del tipo estático y tiene un puente rectificador controlado con capacidad de inversión de polaridad y está alimentado desde servicios auxiliares (no desde bornes de máquina).

#### 5. Modelo del generador

La tabla I muestra los parámetros utilizados para representar la máquina sincrónica con rotor de polos lisos [2,3].

El modelo de masas rotantes del generador representa la relación existente entre el torque acelerante y la velocidad angular del rotor según la siguiente relación:

$$\omega_r(t) = \frac{1}{2H} \int T_a(t) dt = \frac{1}{2H} \int [T_{mech}(t) - T_{elec}(t)] dt$$

Expresada la anterior expresión en por unidad puede cambiarse la velocidad angular del rotor por la frecuencia eléctrica.

Abriendo el interruptor de máquina se produce un cambio, tipo escalón, en el torque eléctrico desde su valor inicial a cero. El regulador de velocidad no responde de manera instantánea y, por lo tanto, en los primeros instantes el torque mecánico se mantiene constante. Por eso, la velocidad angular del rotor crecerá inicialmente en forma de rampa hasta que comience a actuar el regulador de velocidad.

La figura 1 muestra la frecuencia eléctrica medida y la misma frecuencia eléctrica simulada para distintos valores de la constante de inercia (H) en los primeros instantes posteriores al rechazo de carga.

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
$S_{NOMINAL}$	763.53	MVA	Potencia Aparente Nominal
$UT_{NOMINAL}$	22	kV	Tensión Terminal Nominal
IFD Base entrehierro	1163	A	Corriente Campo recta entrehierro, a FSNL y UT nominal
IFD Base en vacío	1313	A	Corriente de campo en vacío
IFD Base a potencia nominal	3878	A	Corriente de campo a potencia nominal
EFD Base a potencia nominal	453	V	Tensión de Campo para IFD Base a potencia nominal
$X_d$	1.835	pu	Reactancia sincrónica no saturada eje directo vacío
$X'_d$	0.32	pu	Reactancia transitoria no saturada eje directo vacío
$X''_d$	0.197	pu	Reactancia sub-transitoria no saturada eje directo vacío
$X_q$	1.696	pu	Reactancia sincrónica no saturada eje cuadratura vacío
$X'_q$	0.528	pu	Reactancia transitoria no saturada eje en cuadratura vacío
$X''_q$	0.197	pu	React. sub-transitoria no saturada eje cuadratura vacío
$X_{ls}$	0.17	pu	Reactancia dispersión
$T'd_0$	10.04	seg	Constante de tiempo transitoria eje directo vacío
$T''d_0$	0.04	seg	Constante de tiempo sub-transitoria eje directo vacío
$T'q_0$	0.44	seg	Constante de tiempo transitoria eje en cuadratura vacío
$T''q_0$	0.072	seg	Constante de tiempo sub-transitoria eje cuadratura vacío
$S(1.0)$	0.1523	---	Coefficiente saturación a Tensión Terminal 1.0 pu
$S(1.2)$	0.4864	---	Coefficiente saturación a Tensión Terminal 1.2 pu

Tabla I. Parámetros del modelo máquina sincrónica rotor liso

De los resultados de las simulaciones se observa que el valor que mejor ajusta es  $H = 3.893$  s. El tiempo de lanzamiento resulta  $T_a = 2H = 7.786$  s, valor declarado por el fabricante.

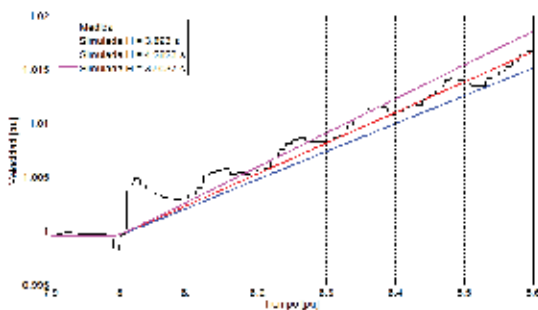


Figura 1. Verificación de la constante de inercia del generador

La figura 2 muestra el modelo de la máquina sincrónica con los registros tomados durante los ensayos de la tensión de campo (EFD), la corriente de campo (IFD) y la tensión terminal (UT).

La Figura 3 muestra la tensión terminal medida (negro) y simulada (rojo) con el modelo de figura 2), ingresando al modelo con la tensión de Campo (EFD) medida.

En estos ensayos se aplicaron cambios de -5% y +5% en la referencia de tensión terminal.

Los resultados de estas simulaciones a circuito abierto muestran que el modelo de máquina sincrónica es correcto, y que está correctamente parametrizado.

## 6. Modelo del nuevo sistema de excitación

La figura 4 muestra el esquema del sistema de control de excitación (AVR) UNITROL 6000 provisto por el fabricante (ABB). La figura 5 muestra modelo ESST1A [4] del programa PSS/E usado para representar el AVR UNITROL 6000.

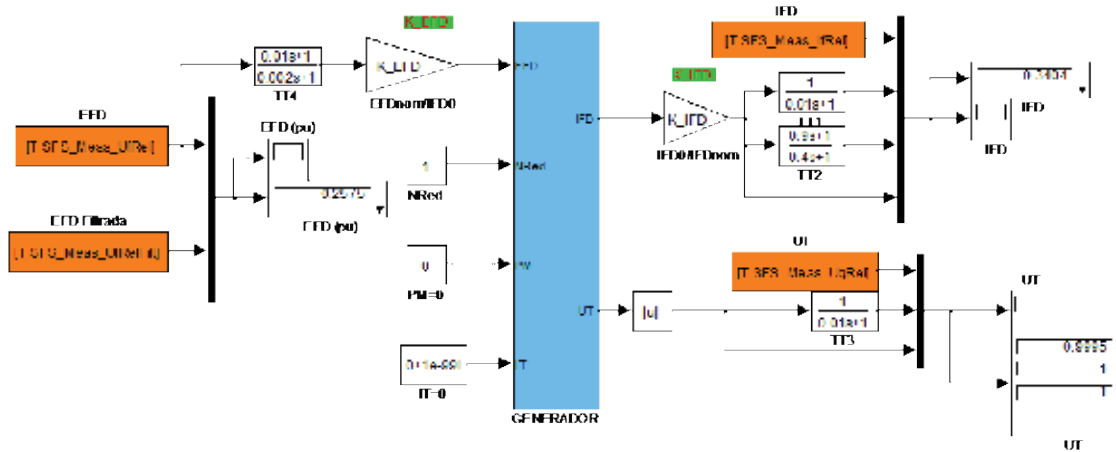


Figura 2. Modelos generador. Mediciones de EFD, IFD y UT

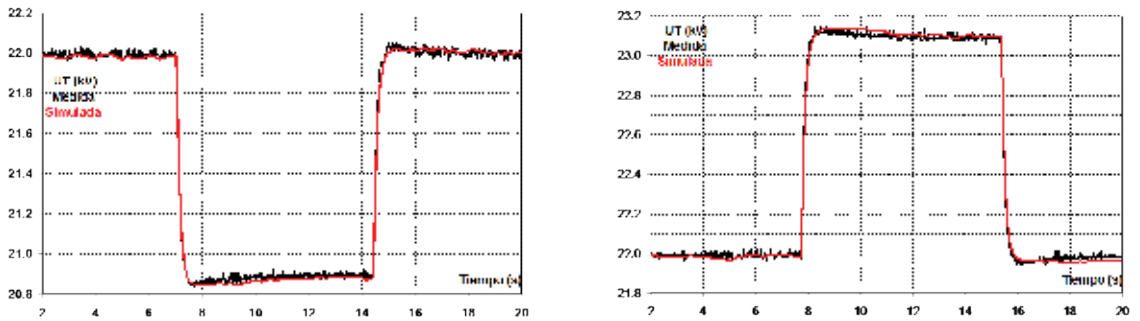


Figura 3. Modelo generador. Tensión terminal (UT) medida (negro) y simulada (rojo). Ensayos pulso -5% (izquierda) y +5% (derecha) en referencia tensión terminal

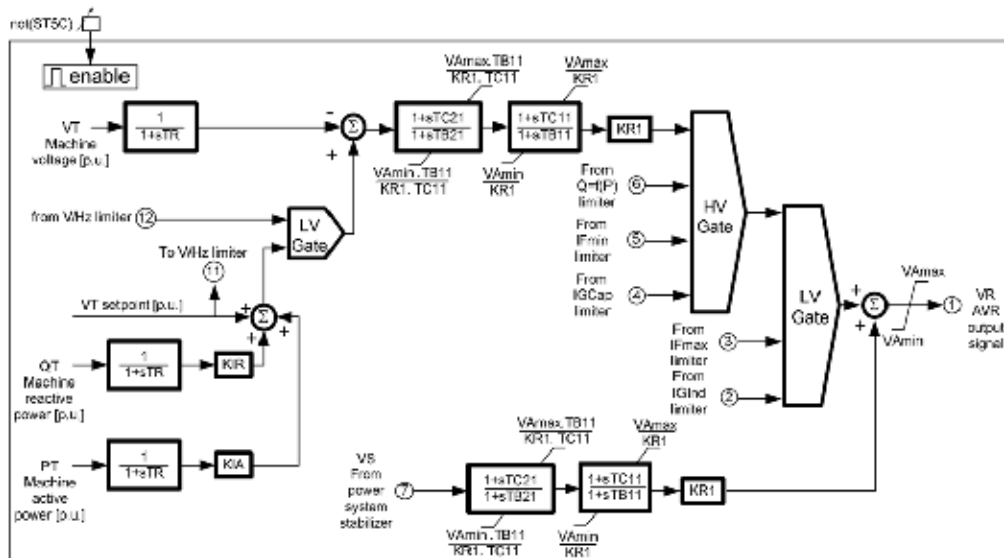


Figura 4. Modelo de fabricante (ABB) de sistema de control de excitación UNITROL 6000

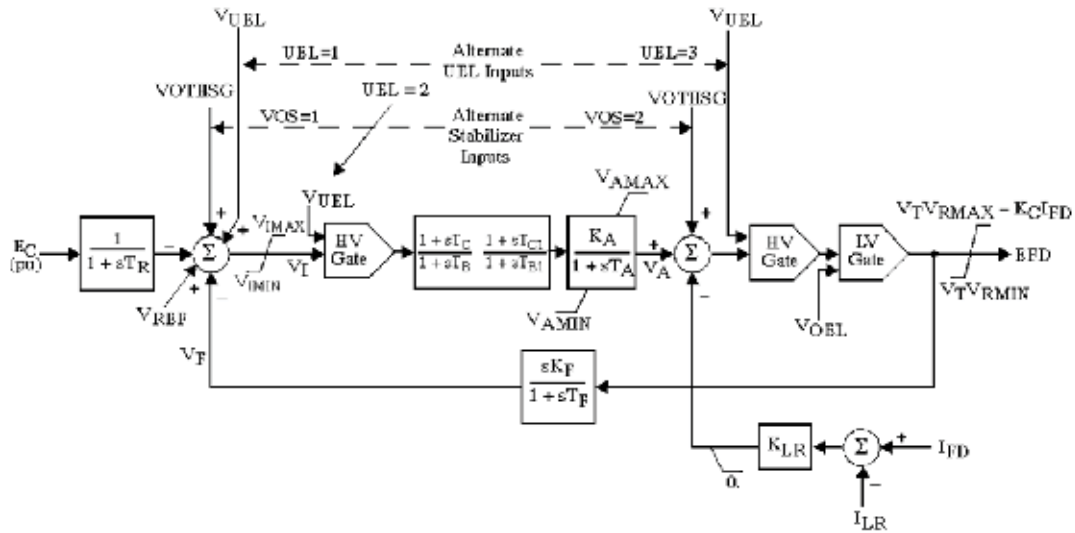


Figura 5. Modelo ESST1A, modelo PSS/E del AVR

La tabla II muestra los parámetros utilizados para el modelo ESST1A.

La figura 6 muestra el registro de campo (negro) y las simulaciones con los modelos UNITROL (rojo) y ESST1A (violeta) de tensión de

campo (EFD) y de tensión terminal (UT) en un ensayo donde se aplicó un pulso de +5 % en la referencia de tensión con la tensión terminal previa en 22 kV (1 pu) y la unidad desconectada de la red (vacío).

Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción
1	UEL	1	T <sub>C1</sub> (seg)	-6.00	V <sub>RMIN</sub>
1	VOS	1	T <sub>B1</sub> (seg)	0	K <sub>C</sub>
0.02	T <sub>R</sub>	200	K <sub>A</sub>	0	K <sub>F</sub>
1	V <sub>IMAX</sub>	0.002	T <sub>A</sub> (seg)	1	T <sub>F&gt;0</sub> (seg)
-1	V <sub>IMIN</sub>	6.83	V <sub>AMAX</sub>	seg	V <sub>IMIN</sub>
1.5	T <sub>C</sub> (seg)	-6.00	V <sub>AMIN</sub>	500	K <sub>LR</sub>
7.5	T <sub>B</sub> (seg)	6.83	V <sub>RMAX</sub>	5.16	I <sub>LR</sub>

TABLA II. Parámetros del modelo ESST1A (sistema control excitación)

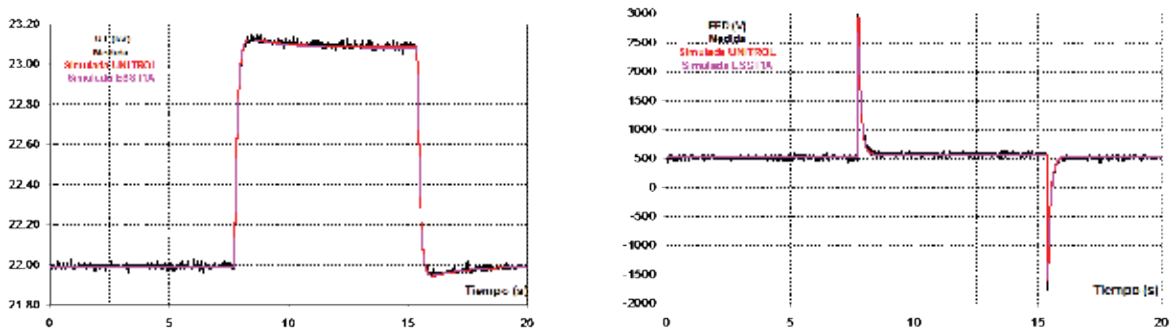


Figura 6. Modelos UNITROL y ESST1A. Ensayo 5% en vacío. EFD y UT

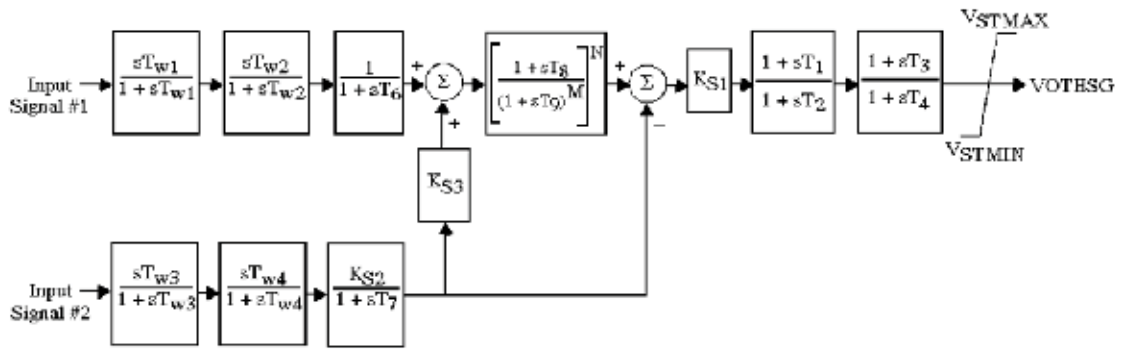


Figura 7. Modelo PSS2A de PSS

Valor	Descripción	Valor	Descripción	Valor	Descripción
2	$T_{W1} > 0$ (seg)	2	$T_7$ (seg)	5	M
2	$T_{W2}$ (seg)	0.5	$T_8$ (seg)	1	N
2	$T_{W3} > 0$ (seg)	0.11	$T_9$ (seg)	0.01	$T_R$ (seg)
0	$T_{W4}$ (seg)	1	$T_{10}$ (seg)	0.4	$PT_{min}$ (pu/pu)
0.02	$T_1$ (seg)	1	$T_{11}$ (seg)	1.1	$VT_{max}$ (pu)
0.04	$T_2$ (seg)	6	$K_{S1}$ (pu/pu)	0.85	$VT_{min}$ (pu)
0.28	$T_3$ (seg)	0.256	$K_{S2}$ (pu/pu)	0.05	$VS_{max}$ (pu)
0.12	$T_4$ (seg)	1	$K_{S3}$ (pu/pu)	-0.05	$VS_{min}$ (pu)

Tabla III. Parámetros del modelo PSS2A (PSS)

La figura 7 muestra el modelo PSS2A del *Power System Stabilizer* (PSS) que mejor representa al modelo del fabricante.

Este modelo es el PSS2A [4] del programa PSS/E cuya salida se determina con la potencia acelerante inferida a partir de la velocidad (*input signal #1*) y de la potencia eléctrica (*input signal #2*). La tabla III muestra los parámetros utilizados para el modelo PSS2A.

Con la Tensión Terminal alrededor de 22 kV (1 pu) se realizaron varios ensayos aplicando pulsos de 2% durante 20 segundos en la referencia de tensión con el PSS conectado y desconectado, y para distintas condiciones de despacho de potencia activa y reactiva (inductiva y capacitiva). Las figuras 8 y 9 corresponden respectivamente a ensayos hechos con y sin el PSS en servicio, y con la unidad despachada aprox. con 518 MW y 170 MVar. Las simulaciones fueron realizadas con el programa Simulink, conectando

la planta generadora (AVR, PSS, generador, etc.) con un sistema constituido por una carga local y una línea que conecta a otro generador con una inercia equivalente a la que tenía el sistema durante los ensayos [5].

También se verificaron parámetros de desempeño y modelos de: Limitador V/Hz, Limitador de máxima excitación instantáneo y temporizado (*Over Excitation Limiter* – OEL), y limitador de mínima excitación (*Under Excitation Limiter* – UEL)

## 6. Conclusión

Se presentaron los modelos de máquina síncrona, de sistema de excitación (AVR) y de estabilizador de potencia (PSS) de la Central Nuclear Embalse, donde fueron reemplazados el Sistema de Excitación y su control, y el transformador de excitación. Estos modelos fueron verificados mediante la reproducción de ensayos realizados con la unidad en vacío y en carga.

También fueron verificados el desempeño y

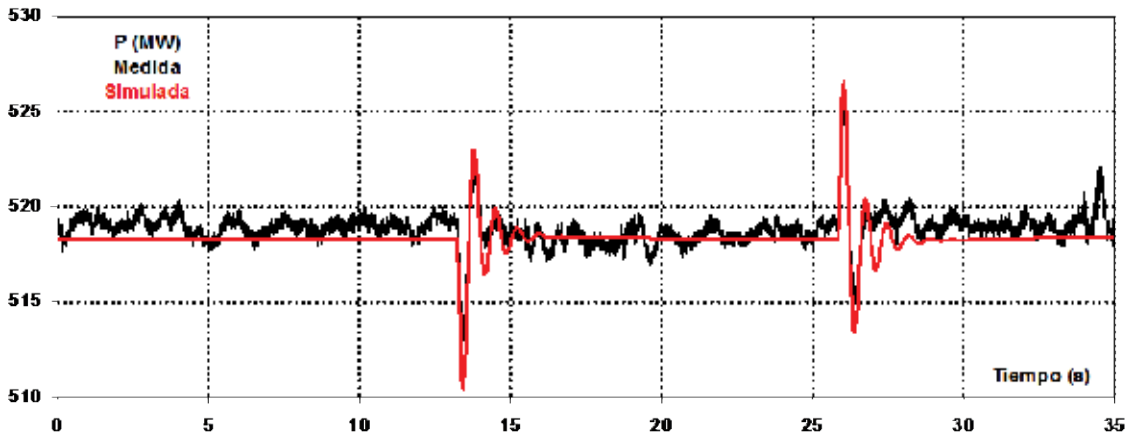


Figura 8. Modelo PSS2A. Ensayo 2% con P=518MW y Q=170MVar. PSS en servicio.

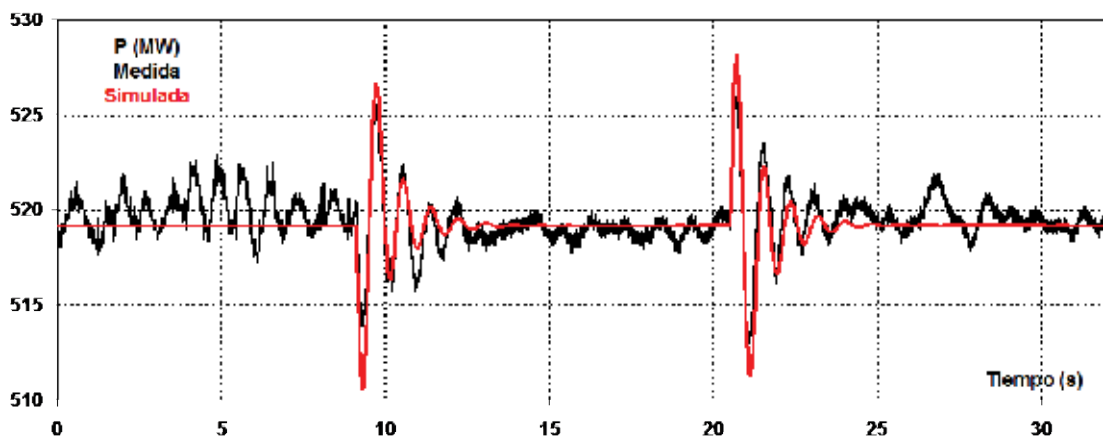


Figura 9. Modelo PSS2A. Ensayo 2% con P=518MW y Q=170MVar. PSS fuera de servicio.

los modelos de limitador V/Hz, limitador de mínima excitación (UEL) y limitadores de máxima excitación (OEL).

Los nuevos modelos de máquina sincrónica, de AVR y de PSS fueron ingresados a la base de datos de modelos administrada por CAMMESA y utilizada para la realización de estudios de estabilidad en Argentina.

## 7. Bibliografía

[1] Procedimiento Técnico N° 4 de CAMMESA [4] "Ingreso de nuevos grandes usuarios mayores, distribuidores, generadores, autogeneradores y cogeneradores al MEM".

[2] IEEE Guide for Synchronous Generator Mo-

deling Practices in Stability Analyses. IEEE Power Engineering Society. IEEE Std. 1110-1991, USA, 1991.

[3] P. Kundur, Power System Control and Stability. First Edition. USA, EPRI-Power System Engineering Series McGraw-Hill Inc., 1994.

[4] IEEE Power Engineering Society, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Std. 421.5-2005, USA, 2006.

[5] J. C. R. Ferraz, N. Martins and G. N. Taranto, "A synthetic system for the robustness assessment of power system stabilizers", Power Systems Conference and Exposition, 2004 IEEE PES.