



MODELO PARA ESTUDIOS DE ESTABILIDAD DE CALDERAS DE RECUPERACIÓN DE CALOR (HRSG) Y TURBINA DE VAPOR

V. F. Corasaniti*

J. L. Agüero*

R. Bianchi Lastra*

*** IITREE-LAT FI-UNLP (Instituto de Investigaciones Tecnológicas para Redes y
Equipos Eléctricos-Laboratorio de Alta Tensión)
Facultad de Ingeniería - Universidad Nacional de La Plata**

1. RESUMEN

En este trabajo se presenta la determinación y validación de los parámetros de un modelo digital para estudios de estabilidad que representa dos Calderas de Recuperación de Calor (HRSG, del inglés Heat Recovery Steam Generator), conjuntamente con la Turbina de Vapor a la cual suministran vapor.

Los 2 HRSG producen vapor a partir de los gases de escape de 2 turbinas de gas.

El modelo de simulación se implementa en el programa PSS/E (Power System Simulator), programa usado para estudios de estabilidad de Sistemas Eléctricos.

Primeramente, se construyó el modelo digital utilizando el programa MATLAB/Simulink y se validó mediante la reproducción de ensayos de campo realizados sobre las unidades el Ciclo Combinado prescriptos en el Procedimiento Técnico N° 4 de CAMMESA.

Luego, se implementó este modelo en el programa PSS/E utilizando código FORTRAN, y se validó mediante la reproducción de los mismos ensayos previamente hechos con el programa Simulink.

Además, se verificó el modelo en ambos programas, mediante la reproducción de otros ensayos hechos sobre los modelos de simulación, ya que no se poseían tales registros provenientes de un ensayo de campo.

Se detalla en este trabajo el modelo desarrollado, denominado “SMRVTV”, y su correspondiente ajuste para representar adecuadamente en el programa PSS/E a las dos Calderas de Recuperación de Calor (HRSG), y la Turbina de Vapor y su control asociado.

Este modelo integra la Base de Datos de modelos administrada por CAMMESA, la cual es utilizada para realizar estudios de estabilidad en el SADI.

2. PALABRAS-CLAVE

Ciclo combinado, Control, Estudios de estabilidad, Modelos, Programa PSS/E, Programa Simulink, Turbina de Vapor.

3. INTRODUCCIÓN

Este trabajo presenta la implementación del modelo para el programa PSS/E de “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado” correspondiente a la Turbina de Vapor de 292 MW bruto y 284 MW neto,

que conjuntamente con 2 Turbinas de Gas, conforman un ciclo combinado de 849 MW bruto y 824 MW neto en condiciones de referencia: Carga Base 100 %; Temperatura: 15 °C; Humedad: 60 %; Temperatura de agua de circulación: 22,2 °C; Combustible: gas [1,2].

Primeramente, se realizó este modelo en el programa Simulink de MATLAB y se verificó mediante la reproducción de ensayos de campo realizados sobre las unidades el Ciclo Combinado prescriptos en el Procedimiento Técnico N° 4 de CAMMESA.

Luego, se implementó este modelo en el programa PSS/E [3,4], utilizando código FORTRAN.

El programa PSS/E es usado para estudios de comportamientos de Sistemas Eléctricos, orientado a estudios de: Flujos de Carga, Estabilidad Transitoria y Dinámica y Transitorios Electromecánicos. El programa trabaja con componentes de secuencia directa.

Se verificó el modelo con el programa PSS/E, mediante la reproducción de los mismos ensayos previamente hechos con el programa Simulink. Además, se verificó el modelo en ambos programas, mediante la reproducción de otros ensayos hechos sobre los modelos de simulación, ya que no se poseían tales registros provenientes de un ensayo de campo.

Este modelo será ingresado en la Base de Datos de modelos administrada por CAMMESA que es utilizada para realizar estudios de estabilidad.

4. DESCRIPCIÓN GENERAL

4.1 Generador

El generador de la turbina de vapor está conectado a la red de 500 kV a través de un transformador elevador de dos arrollamientos de 350 MVA y tensiones 20/510 ± 5x1 % kV. El generador tiene las siguientes características principales: $U_n=20$ kV, $S_n=312$ MVA, $\cos\phi=0.85$, $S_n=265.2$ MW, $f_n=50$ Hz.

4.2 Turbina de Vapor

Las características principales de la turbina son: $P_n=285.7$ MW, $P_m=329.8$ MW, Velocidad=3000 rpm, Presión del vapor exhausto=0.058 bar. La turbina posee 2 carcasas con 3 presiones de recalentado con condensación: 1 Carcasa de HP-IP y 1 Carcasa de LP de doble flujo y escape lateral.

Cada sección aporta: HP = 28,6 %, IP = 33,2 % y LP = 38,2 % de la potencia nominal.

A su vez, el 38,2 % de aporte de la sección de LP, está compuesto por un 10,1 % del vapor de LP de las Calderas y un 89,9 % del vapor de escape de la sección de IP.

Las condiciones de vapor a potencia nominal son:

Alta presión: Presión: 122,2 bar, Temp: 565 °C (Antes de válvula admisión). **Media presión:** Presión: 29.8 bar, Temp: 565 °C. **Baja presión:** Presión: 4,2 bar, Temp: 278 °C (Antes de válvula admisión).

4.2.1 Válvulas de control de Vapor de HP/IP/LP

La turbina de vapor tiene 2 válvulas reguladoras de HP, 2 de IP y 1 de LP (válvula mariposa) controladas en forma individual por medio de servomotores hidráulicos. Excepto en los arranques y paradas, estas válvulas están abiertas al 100 % dado que la TV funciona en el modo presión deslizante. Si las presiones disminuye por debajo de un valor mínimo prefijado para cada sección, entonces la turbina de vapor pasa a control de presión reduciendo la apertura de dichas válvulas.

4.2.2 Control velocidad-potencia

El Sistema de Control de la Turbina es marca Siemens y tipo SPPA-T3000.

4.3 HRSG

La instalación tiene 2 calderas de recuperación de calor (HRSG), una asociada a cada GT, que utilizando el poder calórico de los gases de escape proveniente de cada GT genera tres niveles de presión de vapor (HP/IP/LP) operando en circulación natural con paso horizontal.

5. ENSAYOS REALIZADOS EN LA CENTRAL

Fueron realizados los ensayos del Procedimiento Técnico N° 4 [5] sobre el sistema de control de la excitación de la Turbina de Vapor. El objeto de los ensayos es verificar el correcto desempeño de los diferentes componentes del Sistema de Control de la Excitación: AVR, OELs, UELs y PSS.

- Ensayo del Sistema de Excitación: Con la unidad a velocidad nominal, excitada y con interruptor abierto, en la referencia de tensión se aplicaron pulsos. Con la unidad despachada, se hicieron actuar los limitadores (PT4– ANEXO C, Ítem 3.2, 3.3 y 3.4 [5]).
- Ensayo del Estabilizador (PSS): Con la unidad despachada y con potencias reactivas capacitivas e inductivas, con y sin el PSS en servicio, aplicando en la referencia de tensión escalones, (PT4 – ANEXO F, Ítem 3.3, 3.4 y 3.6 [5]).
- Ensayo del HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado: con el ciclo combinado despachado se produjo la variación próxima a una rampa de la potencia eléctrica de despacho de la TG1.

Se registraron las siguientes variables tomadas desde el sistema de control de excitación: Referencia de tensión terminal, Tensión terminal, Salida del regulador de tensión, Corriente de excitación, Tensión de excitación, Salida del PSS, Potencia activa, Potencia reactiva, Salida del limitador OEL o UEL ensayado. En lo que respecta a los ensayos utilizados para la implementación del modelo de “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado”, en Figuras 5 y 6 se muestran la variación de las potencias eléctricas de despacho de las TGs y la TV y la potencia mecánica de la TV, cuando se produjo la reducción de la potencia de la turbina de gas con una variación próxima a una rampa. Además, estos ensayos serán utilizados para verificar los correspondientes modelos suministrados por los respectivos fabricantes.

6. IMPLEMENTACIÓN Y VERIFICACIÓN DEL MODELO

A partir de los datos enviados por el fabricante, diagramas en bloques, planillas con parámetros, etc. se realiza la implementación inicial del modelo en el programa Simulink de MATLAB. La versatilidad de este programa, permite el fácil y rápido armado de un modelo, a través de diagrama en bloques con distintas funciones de transferencia, funciones, constantes, etc. También, una vez armado el modelo completo, se puede ir reduciendo hasta lograr un modelo menos complejo y chequeando que el mismo se comporte igual al modelo completo.

Además, este programa permite luego verificar el modelo con los registros de ensayos realizados en campo. Determinadas variables registradas o medidas en planta por el usuario, son ingresadas en las entradas de los modelos implementados en Simulink y se verifican los resultados de las variables de salida de dicho modelo con las mismas variables registradas o medidas en planta. Además, una vez verificado el modelo con los registros de los ensayos en planta, se pueden simular otros ensayos o pruebas en el modelo Simulink, los cuales no fueron realizados en planta.

Luego, una vez implementado y verificado el modelo en el programa Simulink, se procede a la implementación del mismo en el programa PSS/E y se verifica el mismo, directamente con los resultados de las simulaciones del modelo en el programa Simulink.

7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO PARA PROGRAMA PSS/E

Los modelos de “Usuario” del programa PSS/E [3] [4] se escriben en lenguaje FORTRAN o FLECS.

7.1 Estructura de Datos

Los tipos de datos que intervienen en los cálculos de simulación dinámica se pueden separar en cuatro categorías [3]:

- Constantes son parámetros que no varían durante la simulación.
- Las variables de estado son cantidades cuyos valores instantáneos son determinados por ecuaciones diferenciales.

- Las variables algebraicas son cantidades cuyos valores en cualquier instante se pueden determinar si todas las variables de estado y las constantes son conocidas.
- Las variables de entrada son cantidades cuyos valores en cualquier instante se especifican por fuera de la lógica de la simulación dinámica.

La estructura de datos de la simulación dinámica del PSS/E contiene un grupo de matrices relacionadas con las barras, máquinas y cargas en las que residen las cantidades que se necesitan frecuentemente como entrada y salida en el establecimiento y la visualización de los resultados de las simulaciones dinámicas. Estos incluyen matrices como VOLT, BSFREQ, MBASE, PELEC, EFD, y TPLOAD. Además, hay cuatro grandes matrices de almacenamiento para fines generales: CON Contiene constantes, STATE contiene variables de estado, VAR contiene variables algebraicas y ICON Contiene cantidades enteras que pueden ser constantes o variables algebraicas.

La Tabla I muestra algunas de las matrices principales usadas en la simulación dinámica de PSS/E.

TABLA I. MATRICES DE SIMULACIÓN DINÁMICA

	Matriz	Contiene	Indexado por
Constants	CON	Constantes generales (reales)	CON numero
	ICON	Constantes generales (enteros)	ICON numero
	MBASE	Potencia base de la máquina (MVA)	Indice de máquina
	ZSORCE	Impedancia de la máquina (compleja)	Indice de máquina
State Variables	STATE	Matriz general de las variables de estado	STATE numero
Algebraic Variables	VAR	Matriz de variables algebraicas generales	VAR numero
	VOLT	Tensión de barra en pu (compleja)	Secuencia numeros de barra
Input Variables	VREF	Tensión de consigna del regulador de tensión(pu)	Indice de máquina
Internal Arrays	DSTATE	Derivadas temporales de variables de estado generales	STATE numero

7.2 Requerimientos

En el nivel más básico de escritura del modelo, el indicador MODE es el más crítico de estas variables [4]. La Tabla II presenta el significado de algunos de los MODOS.

TABLA II. ESCRITURA DEL MODELO. MODOS

MODO 1	Inicialización de las variables de estado y variables algebraicas.
MODO 2	Cálculo de las derivadas temporales de las variables de estado.
MODO 3	Cálculo de las señales de salida y de las variables internas.
MODO 4	Cálculo de NINTEG, indica la cantidad de variables de ESTADO utilizadas.
MODO 5	Ejecución de actividad DOCU: presentación de informes y datos de modelo.
MODO 6	Ejecución de actividad DYDA: escritura del correspondiente registro de datos.

7.3 Reglas de Secuencia de Llamadas

Las declaraciones de subrutina relacionados con los modelos de planta [4] son de la forma:

SUBROUTINA modelname (MC, ISLOT)

donde:

MC: índice de la máquina que tiene asociado el modelo referenciado (modelname).

ISLOT: ubicación de la tabla de referencia para este llamado del modelo (modelname).

La tabla de referencia para cada modelo contiene:

STR TIN (1, ISLOT): Índice de la primera de "NC" CONs usadas por el modelo.

STR TIN (2, ISLOT) Índice de la primera "NS" STATEs usadas por el modelo.

STR TIN (3, ISLOT) Índice de la primera de las "NV" VARs usadas por el modelo.

STR TIN (4, ISLOT) Índice de la primera de las "NI" ICONs usadas por el modelo.

Para otros tipos de modelos que no sean de plantas (GEN, PSS, RAT, RAV, etc.) existen otros formatos de subrutinas. En este caso, los modelos para de “HRSG, TV y controles asociados” son de tipo 8 que corresponden a subrutinas de modelos CONEC.

7.4 Estructura Básica

Los pasos para escribir un modelo de usuario en PSS/E [4] son:

1. Determinar el diagrama de bloques y/o las ecuaciones diferenciales y algebraicas.
2. Identificar las variables de estado asociadas y sus derivadas respecto al tiempo.
3. Identificar las cantidades necesarias como entradas del modelo.
4. Asignar ubicaciones en las matrices CON, STATE, VAR y/o ICON según se requiera.
5. Escribir la subrutina en lenguajes FORTRAN o FLECS.

7.5 Ejemplos de Bloques Básicos

En Figura 1 se presenta el diagrama en bloques de un Integrador y su función de transferencia está determinada por la ecuación (1). Se observan la entrada (In) y la salida (Out) y se identifica la variable de estado STATE(K) y su derivada DSTATE(K).



Figura 1. Integrador

En Figura 2 se presenta el diagrama en bloques de un Primer orden cuya función de transferencia está determinada por la ecuación (2). Se observan la entrada (In) y la salida (Out) y se identifica la variable de estado STATE(K) y su derivada DSTATE(K).

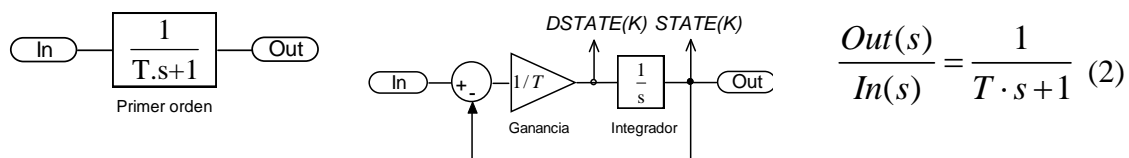


Figura 2. Primer orden.

En Tabla III se presenta la implementación de los MODOS 1, 2 y 3 de los anteriores bloques.

TABLA III. MODOS. INTEGRADOR Y PRIMER ORDEN

	INTEGRADOR	PRIMER ORDEN
MODO 1 (valor inicial)	$STATE(K) = Out$ $DSTATE(K) = 0.0$ (si no, error de inicialización) \Rightarrow $In = 0.0$ (si no, error de inicialización)	
MODO 2 (cómputo derivada)	$DSTATE(K) = In / T$	$DSTATE(K) = (In - STATE(K)) / T$
MODO 3 (cómputo salida)	$Out = STATE(K)$	

8. MODELO SMRVTV IMPLEMENTADO

8.1 Diagrama en Bloques y Planilla

En Figura 3a se presenta el diagrama general del modelo, mostrando las entradas y salidas del mismo. En Figura 3b se muestra el modelado de los bloques de Caldera de Recuperación de Calor (HRSG). En Figura 3c se muestra el modelado del bloque de la Turbina de Vapor (TV). Se observan las variables de estado (STATES (K)) y las variables internas definidas por el usuario (VARs(L)).

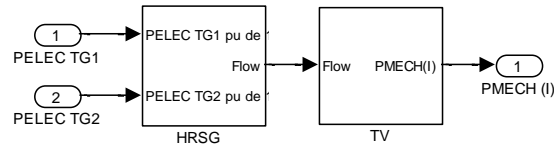


Figura 3a Diagrama en bloques general

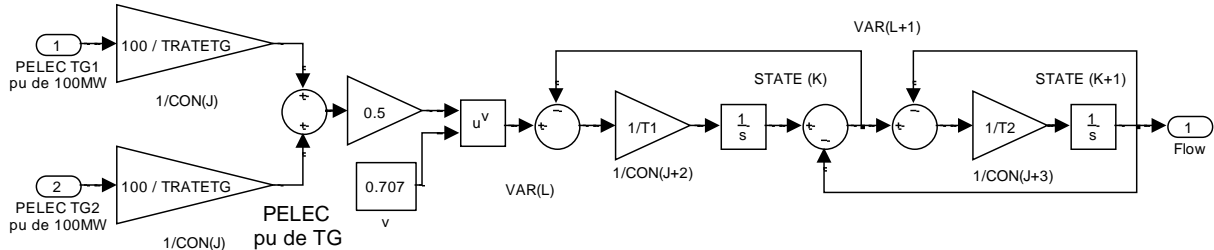


Figura 3b Diagrama en bloques HSRG

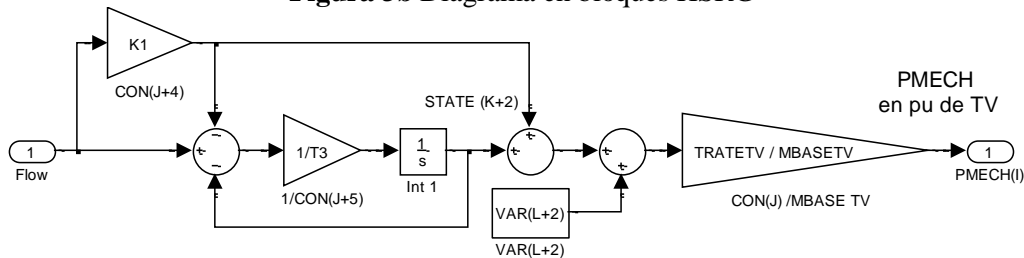


Figura 3c Diagrama en bloques TV

En Figura 4 se presenta la planilla del modelo, donde se indican los datos que utiliza el modelo para su funcionamiento. En todas las simulaciones se consideró que MBASE TV es igual a TRATE TV.

ICON	#	VALOR	DESCRIPCION
I			IBUS1. Unidad TG1
I+1			ID1. Unidad TG1
I+2			IBUS2. Unidad TG2
I+3			ID2. Unidad TG2
I+4			IBUS3. Unidad TV
I+5			ID3. Unidad TV

STATE	#	VALOR	DESCRIPCION
K			Bloque HRSG
K+1			Bloque HRSG
K+2			Bloque Turbina

CON	#	VALOR	DESCRIPCION
J		278	TRATE TG (MW)
J+1		274	TRATE TV (MW)
J+2		30	T ₁ (s) > 0. Constante de Tiempo.
J+3		30	T ₂ (s) > 0. Constante de Tiempo.
J+4		0.324582	K1. Ganancia.
J+5		10	T ₃ (s) > 0. Constante de Tiempo.

VAR	#	VALOR	DESCRIPCION
L			Entrada Bloque HRSG
L+1			Bloque HRSG
L+2			Ajuste error de inicialización de PMECH(I) de TV. Bloque Turbina

Nota: Este modelo no necesita ser "cableado".

Figura 4. Planilla del modelo SMRVTV.

Una vez escrito el modelo, la actividad DYRE del programa PSS/E [6] reconoce los modelos de usuario y los incorpora a la base de datos para su compilación y utilización. Para ello, los modelos se especifican con un formato especial, en el archivo de datos dinámicos a compilar. Los registros de datos de algunos de los tipos de modelos escritos por el usuario debe estar en el siguiente formato:

BUSID 'USRMDL' IM 'model name' IC IT NI NC NS NV data list /

donde: BUSID: Identificador de barra (Nº de barra).

IM: Identificador de la máquina (Nº de máquina).

model name: nombre del modelo

IC: Código del tipo de modelo de usuario (por ej. 1 modelo de generador, 3 de estabilizador, etc.). En este caso es un modelo a incorporar a través de la CONEC o sea tipo 8.



**Décimo Quinto Encuentro Regional
Ibero-americano del CIGRÉ
Foz de Iguazú-PR, Brasil
19 al 23 de mayo de 2013**



IT: para modelos de usuarios llamados por las rutinas CONEC y/o CONET (0 no inyecta corriente, 1 inyecta corriente, 2 modelo de medición)

NI: Número de ICONs utilizadas por el modelo.

NC: Número de CONs utilizadas por el modelo.

NS: Número de STATEs utilizada por el modelo.

NV: Número de VARs utilizada por el modelo.

data list/: especifica las “NI” ICONs, seguidas por las “NC” CONs.

El formato para el modelo SMRVTV es el siguiente: **0, ‘USRMDL’, 0, ‘SMRVTV’, 8, 0, 6, 6, 3, 3, Lista ICON’s, Lista CON’s /**

En este caso, BUSID e IM son “0” porque el modelo no corresponde a un número de máquina en una barra en particular, sino que está relacionado con las dos Turbinas de Gas del Ciclo Combinado y dicho cableado se realiza en el programa FORTRAN del modelo.

9. VERIFICACION DEL MODELO IMPLEMENTADO

En el Programa PSS/E la Máquina Síncrona se representa con el modelo de librería denominado GENROU. Además, para las turbinas de gas, TG1 y TG2, se utilizó el modelo de RAV de librería del programa PSS/E, denominado GAST. Los parámetros utilizados en los modelos han sido extraídos de la información suministrada por el fabricante y verificada mediante ensayos.

9.1 Simulaciones realizadas con el programa Simulink

Para verificar que el modelo realizado de “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado” tiene un desempeño similar al modelo dado por el fabricante, se reproducen algunos ensayos en carga realizados. Los ensayos se reproducen con el programa Simulink de MATLAB.

Estas simulaciones se realizaron con el modelo propuesto – con sus respectivos parámetros de ajuste – “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado” de la turbina de vapor, denominado SMRVTV.

A tal fin se simularon y se compararon los resultados obtenidos con el modelo realizado en el programa Simulink con la medición registrada en el ensayo.

A continuación se describen las simulaciones realizadas.

- **Ensayo 1:** variación de la potencia eléctrica de despacho de la TG1 del ciclo combinado. Ambas turbinas de gas, TG1 y TG2, se encontraban despachadas en aproximadamente 249MW. Luego, se produjo la reducción de la potencia de la turbina de gas TG1 a 100MW en un periodo de 800seg., con una variación próxima a una rampa.
- **Ensayo 2:** se simuló la misma variación de la potencia eléctrica de despacho de la TG1 del Ensayo 1, aunque con una variación más rápida, tipo escalón. Ambas turbinas de gas, TG1 y TG2, se encontraban despachadas en aproximadamente 249MW.

La Figura 5 muestra los registros de las potencias eléctricas (PE) en [MW] del Ensayo 1. Este ensayo consistió en variar la PE de la TG1 de 249MW a 100MW, permaneciendo la PE de la TG2 en 249MW. Además, se muestra la evolución temporal de la PE de la TV. En Figura 6 se presenta el registro de la potencia mecánica (PM) en [pu] de la TV correspondiente al Ensayo 1 y su comparación con la evolución temporal de la PM obtenida de la simulación con el modelo SMRVTV. Se observa una muy buena reproducción por simulación del ensayo utilizando el modelo SMRVTV.

9.2 Simulaciones realizadas con el programa PSS/E

Con el programa PSS/E se hicieron las mismas simulaciones realizadas con el programa Simulink para verificar el correcto funcionamiento del modelo SMRVTV propuesto para el programa PSS/E.

A tal fin se simularon y se compararon los resultados obtenidos con el programa PSS/E y con el programa Simulink. En Figura 7 y 8 se presentan respectivamente los resultados de los ensayos 1 y 2, mostrando en forma superpuesta las evoluciones temporales de la potencia mecánica (PM) en [pu] de la TV obtenidas de las simulaciones en los programas PSS/E y Simulink.

Para ambos casos, Ensayo 1 y Ensayo 2, se observan resultados muy similares por simulación del ensayo utilizando el modelo realizado en el programa PSS/E respecto del modelo en Simulink.

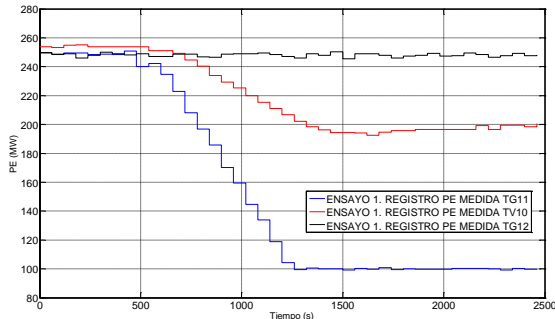


Figura 5. Ensayo 1. Registro de campo de PE de TG1, TG2 y la TV.

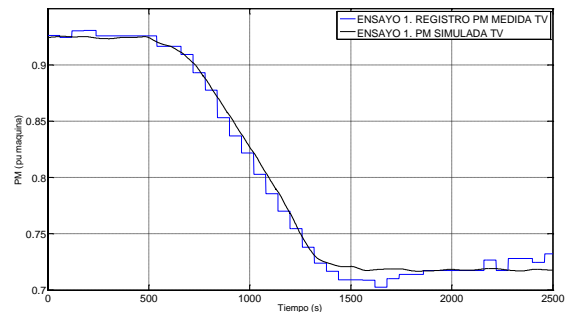


Figura 6. Ensayo 1. Simulación en Simulink de PM de TV con modelo SMRVTV.

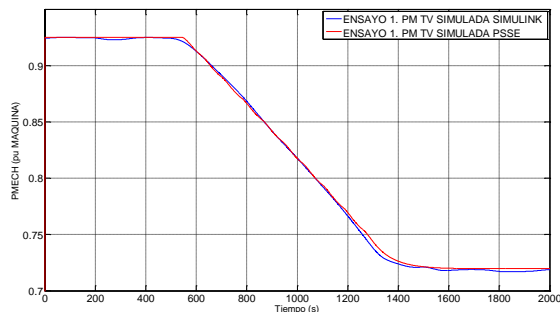


Figura 7. Ensayo 1. Simulación en PSSE de la PM de la TV con modelo SMRVTV.

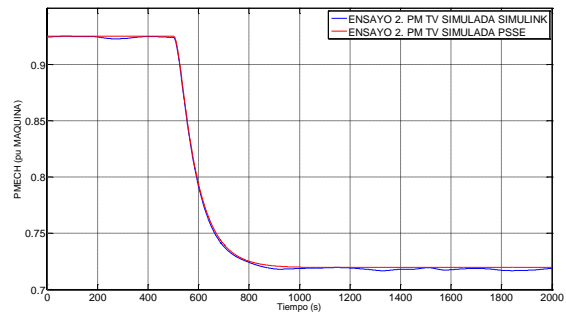


Figura 8. Ensayo 2. Simulación en PSSE de la PM de la TV con modelo SMRVTV.

10. CONCLUSIÓN

En el programa PSS/E se implementó el modelo de “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado”, denominado SMRVTV, que representa la generación de la potencia mecánica de una Turbina de Vapor de un Ciclo Combinado.

Se verificó su funcionamiento con registros de ensayos realizados en la central y simulaciones en los programas Simulink y PSS/E. En todos los casos se observa una muy buena reproducción por simulación de los ensayos utilizando el modelo SMRVTV. El modelo SMRVTV para el programa PSS/E es una adecuada representación de “HRSG, y Turbina de Vapor y control asociado”.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Rebord, A. Capalbo, F. Libonati y Otto Sollberger, “Regulación de frecuencia en Turbinas de Vapor en Ciclo Combinado”, Undécimo Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ, XI ERIAC, Hernandarias, Paraguay, Mayo de 2005.
- [2] R. M. Teixeira, J. F. Lima Filho, M. C. de Souza Castro y N. H. Moura N. Brito, “Ensaio em Campo de Validação de Modelos de Reguladores de Máquinas Térmicas com Ciclo Combinado”, Undécimo Encuentro Regional Ibero-americano del CIGRÉ, XI ERIAC, Hernandarias, Paraguay, Mayo de 2005.
- [3] Program Operation Manual: Volumen I, Chapter 7 “Dynamic Simulation-Setup and Procedures”. PSS/E 30. Power Technologies, Inc.
- [4] Program Operation Manual: Volumen I, Chapter 9 “Model Writing”. PSS/E 30. Power Technologies, Inc.
- [5] PROCEDIMIENTO TECNICO N° 4 Ingreso de Nuevos Grandes Usuarios Mayores, Distribuidores, Generadores, Autogeneradores y Cogeneradores al MEM. CAMMESA.
- [6] Program Operation Manual: Volumen I, Chapter 5 “Dynamic Simulation-Activity Descriptions”. PSS/E 30. Power Technologies, Inc.