



MX0500059

*Congreso Internacional Conjunto Cancún 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR/International Joint Meeting Cancun 2004 LAS/ANS-SNM-SMSR  
XV Congreso Anual de la SNM y XXII Reunión Anual de la SMSR/XV SNM Annual Meeting and XXII SMSR Annual Meeting  
Cancún, Q.R., México, 11-14 de Julio, 2004/Cancún, Q.R., Mexico, July 11-14, 2004*

## **Implementación Digital, Simulación y Pruebas en MATLAB de los Modelos de la Línea de Vapor, las Turbinas y el Regulador de Presión de una Central Nucleoeléctrica tipo BWR.**

***Andrés López Ramírez.***

*Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares.  
DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos  
Universidad Nacional Autónoma de México.  
[andyskamx@yahoo.com.mx](mailto:andyskamx@yahoo.com.mx)*

***Asesor: Dr. Jaime B. Morales Sandoval***

*Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares  
DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos  
Universidad Nacional Autónoma de México  
[jms0620@yahoo.com](mailto:jms0620@yahoo.com)*

### ***Resumen***

En esta fase del proyecto se realizaron pruebas exhaustivas a los modelos de la línea de vapor, turbinas y regulador de presión de una central nucleoelectrica tipo BWR para verificar que sus tendencias y comportamientos son lo mas reales posible. Para ello, fue necesario analizar también las funciones de transferencia de los distintos componentes a lo largo de la Línea de Vapor hasta el Generador de Potencia. Dichos modelos definen solo los polos dominantes del sistema, lo que no es limitación para reproducir una amplia gama de transitorios anticipados de operación de una central. Así mismo, se integró y probó el modelo de forma integrada con los modelos de agua de alimentación del SUN-RAH, simulando el reactor nuclear a partir de entradas predefinidas de los valores esperados de la vasija. Además se acopló con la interfaz gráfica desarrollada con las librerías Direct X, implementando un panel de monitoreo específico para este sistema.

### **1. INTRODUCCIÓN**

El desarrollo de simuladores de entrenamiento y de analizadores requiere indudablemente de modelos válidos de las plantas para aplicarlos a un considerable número de eventos transitorios y de accidente, por lo que estos modelos deben ser verificados de manera detallada, y validados a partir del comportamiento de los sistemas reales de una central. Al no contar con datos de nucleoelectrica específica fue necesario aplicar pruebas mas profundas a los componentes del sistema de manera individual, garantizando con ello, un mejor desempeño del mismo, una vez anexado a los demás módulos del SUN-RAH.

El diseño de nuevas centrales avanzadas o la optimización operativa de las actuales, puede utilizar observadores y controladores óptimos de esos sistemas complejos con la finalidad de

ampliar los márgenes de operación o reducir la incertidumbre en los cálculos de parámetros críticos. Para ello, es necesario contar con las funciones de transferencia que describen el comportamiento de los sistemas para realizar las verificaciones pertinentes de la simulación. Éstas funciones de transferencia se obtuvieron a partir de los modelos matemáticos de orden reducido expuestos en el congreso anterior y pueden ser consultados en [1].

El entrenamiento del funcionamiento de las nuevas centrales requerirá de simuladores que deberán contemplar el uso de monitores de las diferentes variables a controlar. En preparación a ello se implementó un monitor de estas variables que permite la fácil interacción entre el usuario del simulador y la simulación como tal. Cabe recordar que la implementación de éste panel, se realizó por medio de la manipulación de las librerías DirectX, que es la tecnología empleada por los videojuegos en la actualidad, con lo que se logra una interfaz amigable e intuitiva de usar.

## 2. DESARROLLO

### 2.1. Implementación Digital de los Modelos en Matlab.

En este apartado se pretende definir cada uno de los sistemas en módulos, que puedan ser construidos con una herramienta gráfica, como *Simulink*. Cada módulo está constituido por bloques menos complejos, llegando a tener varios niveles de profundidad en la modularidad de cada sistema. *Simulink* nos permite realizar pruebas que aseguran el buen funcionamiento de cada módulo y que de requerirse permite depurar los módulos que tengan algún tipo de error.

### 2.2. Modelo en Simulink de la Línea de Vapor Primer Nivel.

El modelo implementado se realizó generalmente en tres niveles fácilmente identificables. Por ejemplo, en el primer nivel del modelo en Simulink de la línea de vapor se muestra en un bloque con las variables de entrada y salida que interaccionan con otros bloques del SUN-RAH. Por brevedad, solo se listan las variables de salida del bloque, en la Tabla I. Para este modulo la única variable de interacción con el reactor es una entrada: la Presión en la vasija del reactor nuclear.

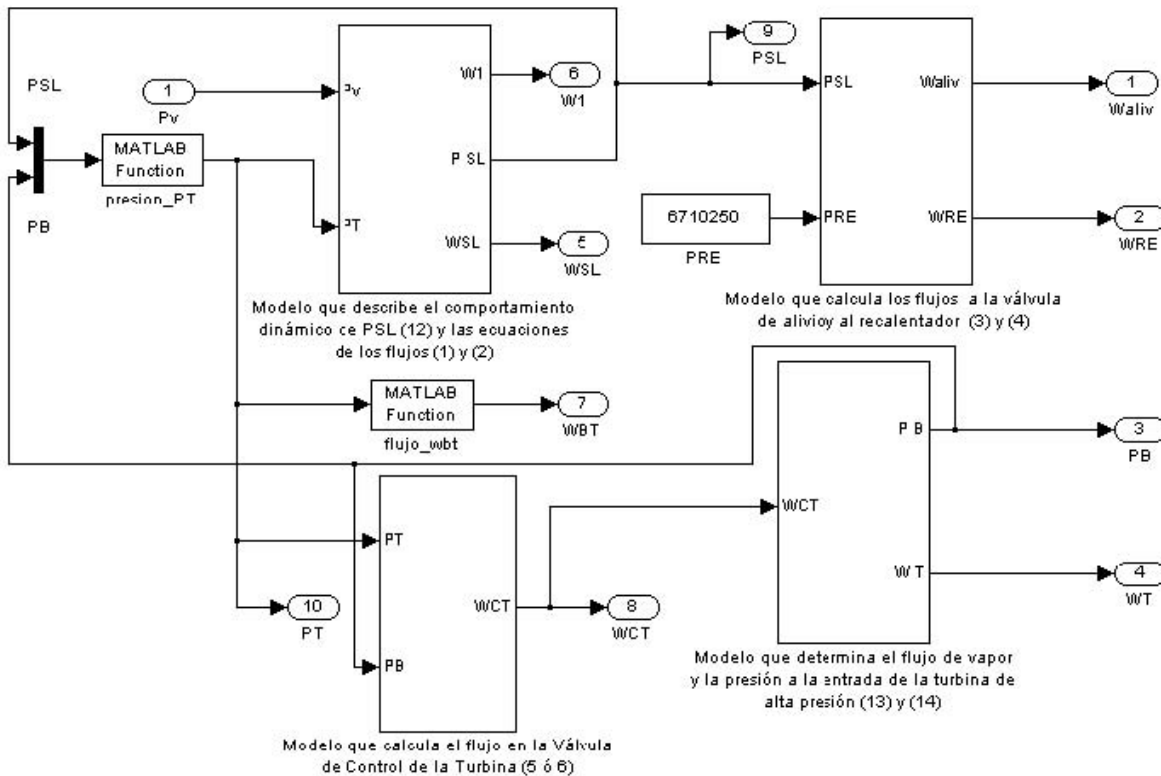
Para el segundo nivel, se establecen las relaciones entre las variables dinámicas del sistema incluyendo integradores en algunos casos y que para la línea de vapor está constituido por los siguientes modelos gráficos (mostrados en la Figura 1):

- Modelo que describe el comportamiento dinámico de la presión  $P_{SL}$  y las ecuaciones de los flujos  $W_1$  y  $W_{SL}$ .
- Modelo que calcula los flujos a la válvula de alivio y al Recalentador.
- Modelo que calcula el flujo en la Válvula de Control de la Turbina.
- Modelo que determina el flujo de vapor y la presión a la entrada de la turbina de alta presión.

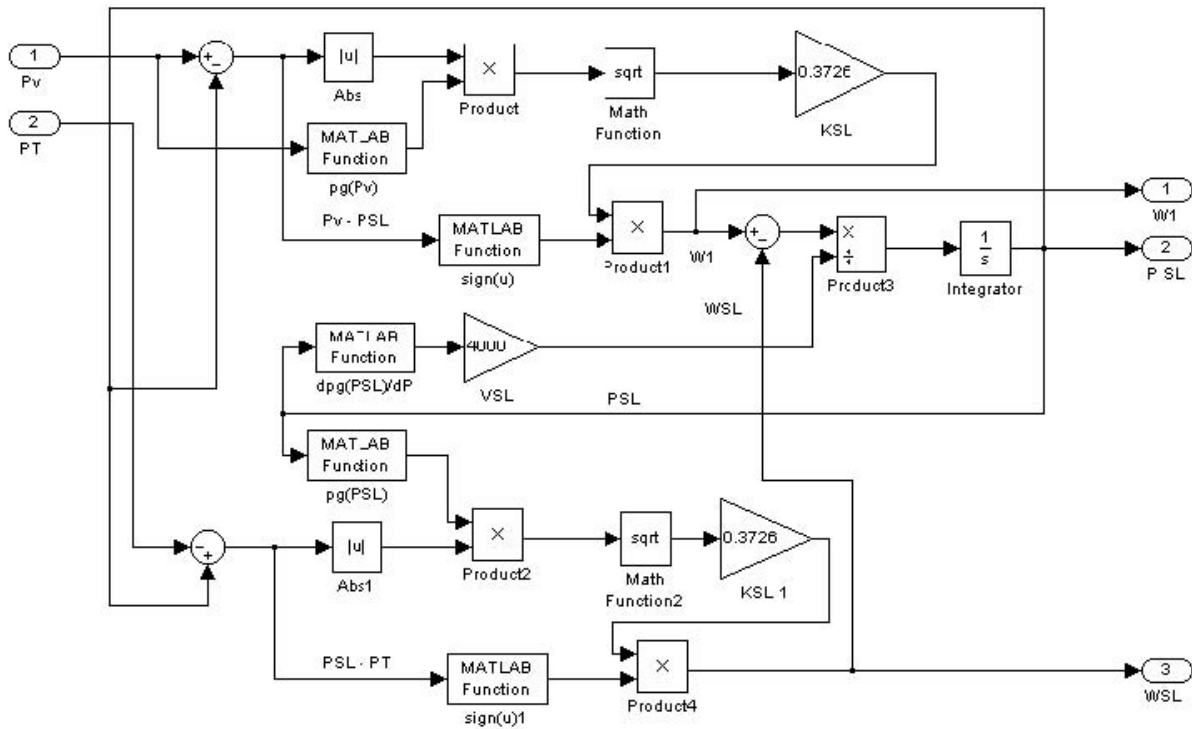
**Tabla I: Salidas del modelo de la línea de vapor.**

Símbolo	Definición	Símbolo	Definición
$W_{aliv}$	Flujo de vapor extraído para accesorios de la planta.	$W_1$	Flujo de vapor que sale de la vasija del reactor.
$W_{RE}$	Flujo de vapor al recalentador extraído de la línea de vapor.	$W_{BT}$	Flujo de vapor a través de la válvula de derivación (bypass).
$P_B$	Presión a la entrada de la turbina de alta presión.	$W_{CT}$	Flujo de vapor a través de la válvula de la turbina.
$W_T$	Flujo de vapor a través de la turbina.	$P_{SL}$	Presión en la línea de vapor, a la mitad del recorrido a la turbina de alta presión.
$W_{SL}$	Flujo de vapor a través de la línea de vapor.	$P_T$	Presión al final de la línea de vapor.

En el nivel más bajo se pueden observar los bloques definidos en *Simulink*, ya que él se comienza a programar los niveles superiores más complejos. Para la línea de vapor el modelo de la presión  $P_{SL}$  se muestra en la Figura 2.



**Figura 1. Segundo nivel del modelo en Simulink de la línea de vapor.**



**Figura 2. Modelo que describe el comportamiento dinámico de la presión PSL y las ecuaciones de los flujos  $W_1$  y  $W_{SL}$ .**

### 3. SIMULACIÓN Y PRUEBAS

En este apartado se reportan las pruebas hechas a los modelos digitales que representan a los sistemas: línea de vapor, turbinas y regulador de presión de una central nucleoelectrica tipo BWR. En particular para el controlador de presión las pruebas permitieron ajustar la dinámica de las válvulas de control de “bypass” y de “control” para finalmente quedar como se muestra en la Figura 3, donde se ven los componentes no lineales que las representan.

Las pruebas que se realizan, buscan la estabilidad del sistema y que los valores de las salidas respectivas caigan dentro de un rango permitido. Las señales de salida deben aproximarse a valores previamente fijados, es decir, a valores típicos. Las pruebas también permitieron encontrar que la programación anterior era ineficiente en la búsqueda de la presión congruente con todas las presiones a lo largo de la línea de vapor, como se planteó en el artículo anterior. La Figura 4 presenta esta nueva solución que básicamente es el método de la tangente para la búsqueda de la solución congruente.

La simulación es genérica, es decir, no trata de representar a un tipo particular de central nucleoelectrica, pero es claro, que se necesitan tomar valores típicos de centrales nucleoelectricas como referencia para poder comprobar el buen funcionamiento de los modelos.

### 3.1. Prueba del Modelo en Simulink de la Línea de Vapor.

Esta prueba se llevó a cabo con señales de entrada obtenidas de los valores típicos (ver Tabla II).

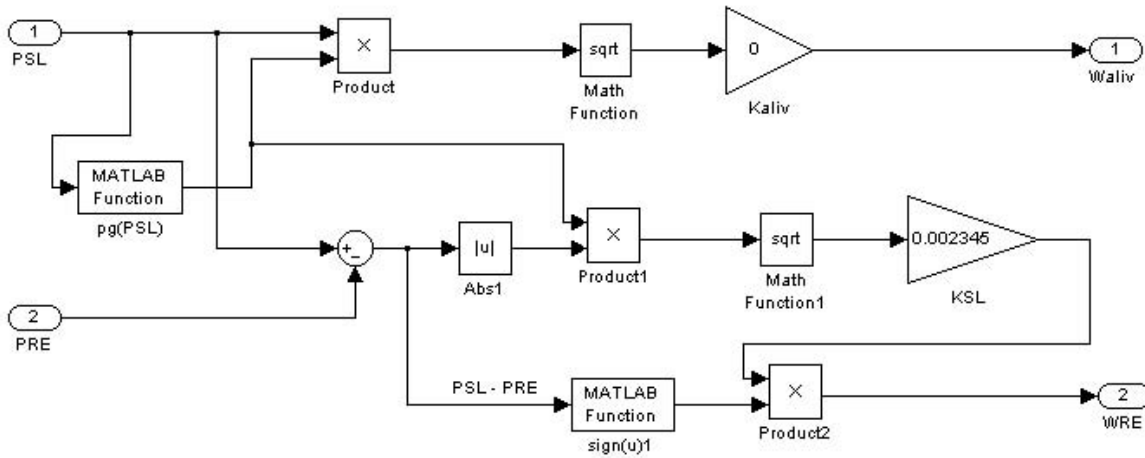


Figura 3. Modelo que calcula los flujos a la válvula de alivio y al recalentador.

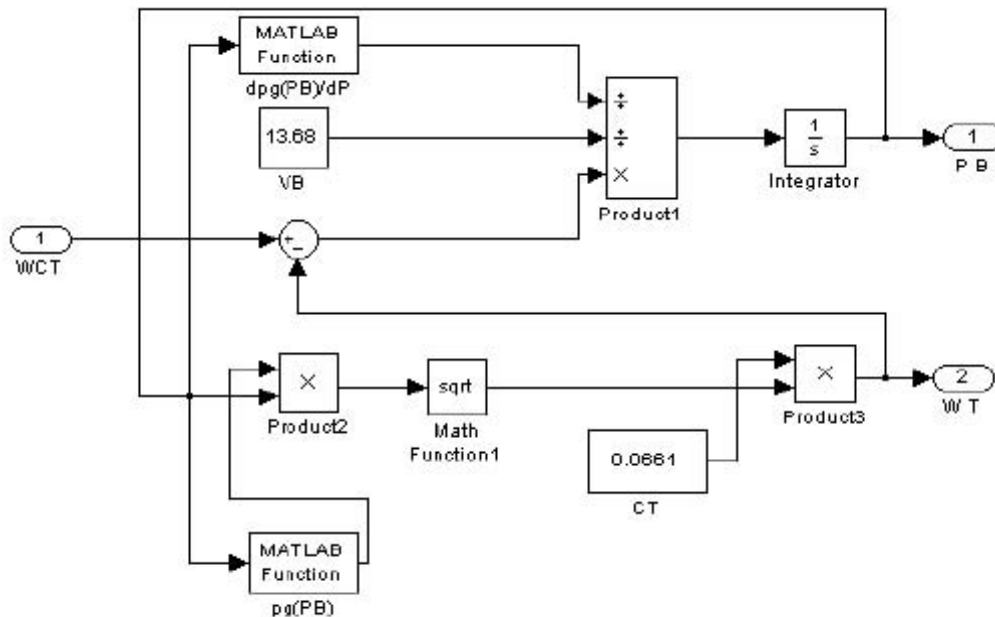


Figura 4. Modelo que determina el flujo de vapor y la presión a la entrada de la turbina de alta presión.

En la Tabla III se muestran los valores de las salidas obtenidas en la simulación y en el Registro de valores típicos. Se puede observar que los valores de la simulación se aproximan a los valores típicos. El método de integración de estos modelos es el “ode15s” que específicamente integra

sistemas de ecuaciones diferenciales rígidas (stiff/NDF) y pasos de integración de 0.001 segundos.

**Tabla II. Valores de las entradas de la línea de vapor.**

Entrada	Valor
P <sub>V</sub>	7,032,900 P*
P <sub>RE</sub>	6,710,250 P

**Tabla III. Valores de las salidas de la línea de vapor.**

Salida	Valor en la Simulación	Valor Típico
W <sub>liv</sub>	0 G**	0 G
W <sub>RE</sub>	24.54 G	26.08 G
P <sub>B</sub>	6,426,500 P*	6,550,250 P
W <sub>T</sub>	966 G	
W <sub>SL</sub>	966 G	
W <sub>I</sub>	966 G	1100 G
W <sub>BT</sub>	0.964 G	
W <sub>CT</sub>	966 G	
P <sub>SL</sub>	6,849,900 P	6,770,890 P
P <sub>T</sub>	6,661,000 P	

\*P Presión Pa , \*\*G Flujo Kg/s

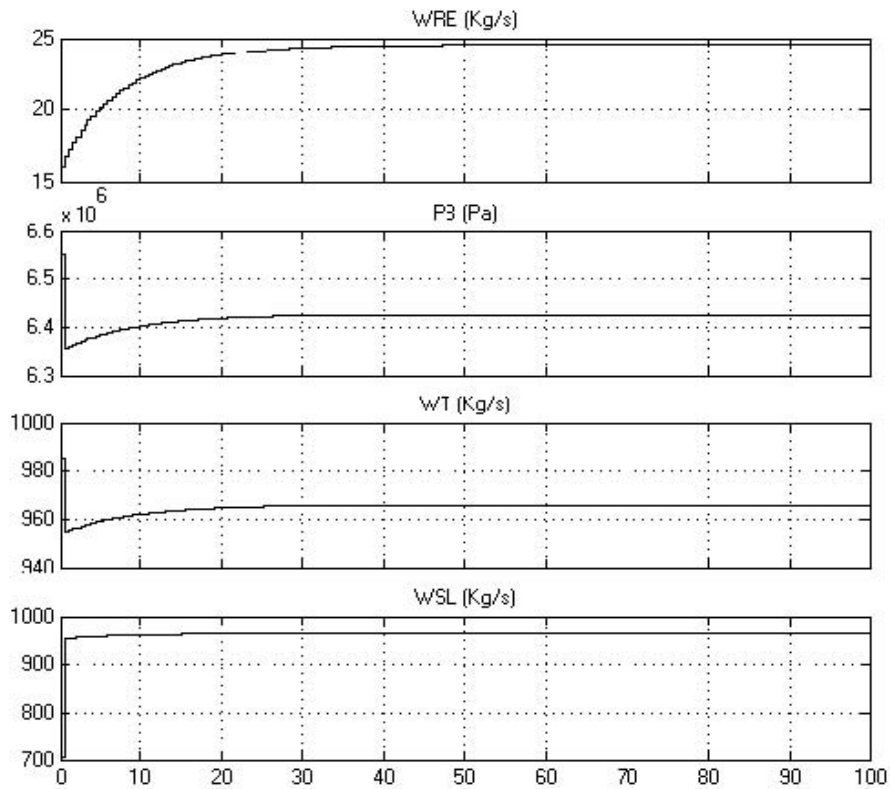
La Figura 5 presenta la dinámica de la Línea de Vapor modelada, donde se puede ver el comportamiento que sigue cada variable en el tiempo.

El sistema de línea de vapor puede representarse por un sistema en el cual la entrada principal es la presión que provoca el reactor y la salida es la presión al final de la línea de vapor que va hacia la turbina de alta presión.

La función de transferencia que describe lo anterior, está dada por:

$$F(s) = \frac{1.465}{s^2 + 15.84s + 1.601} \quad (1)$$

Un análisis del comportamiento lineal de este sistema muestra los resultados de la Figura 6. Este tipo de análisis se realizó para cada una de las componentes de la línea de vapor hasta el turbogenerador, pero por brevedad solo se presentan los resultados de este sistema. Nótese que el diagrama de polos y ceros, nos indica que este modelo, a pesar de ser un modelo de orden reducido, no es un modelo de orden mínimo.



**Figura 5. Dinámica de la línea de vapor a una perturbación en la demanda.**

### 3.2. Prueba del Modelo en Simulink de la Turbina de Alta Presión.

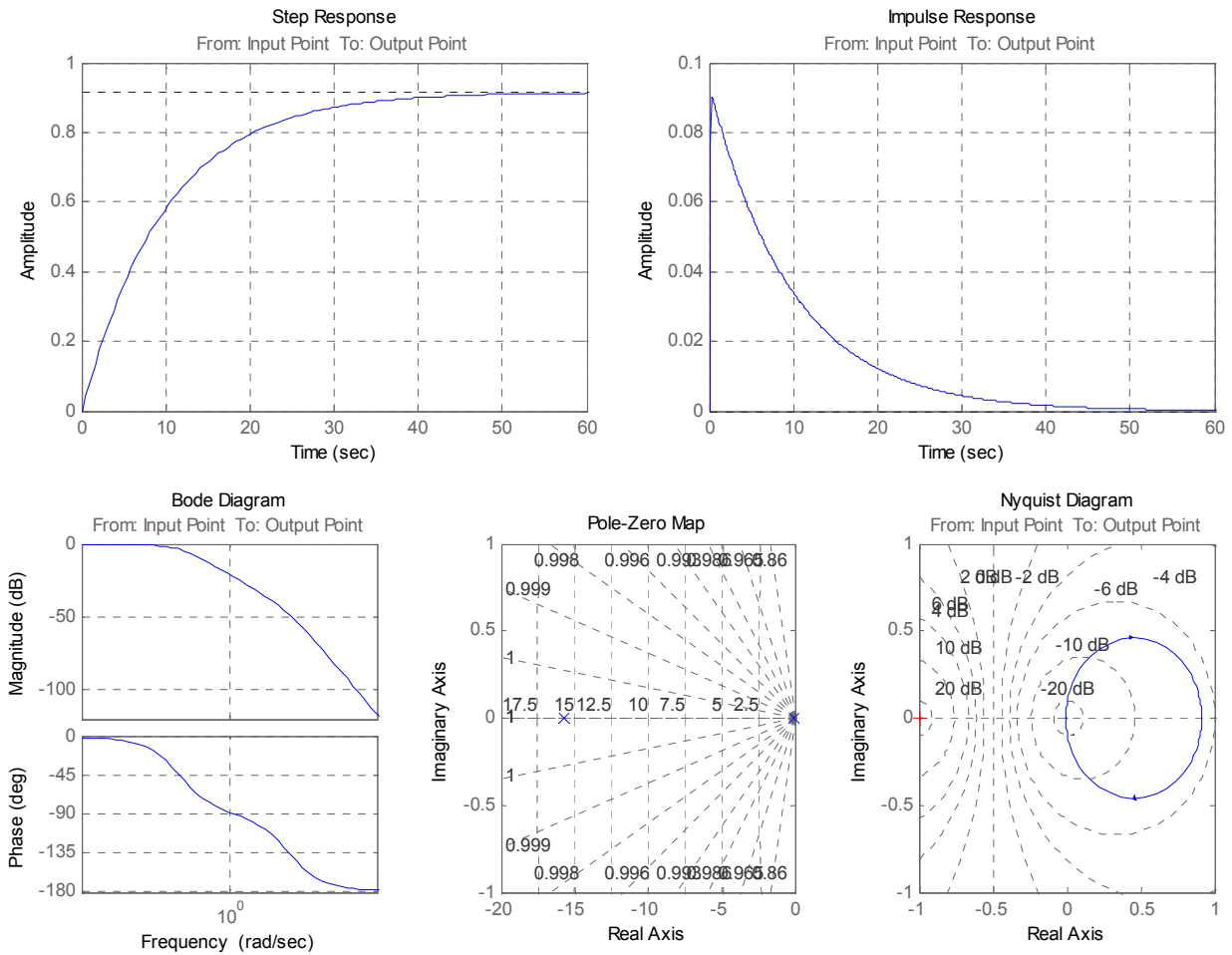
Para esta prueba fundamentalmente se utilizaron los valores de referencia presentados en la Tabla IV que claramente corresponden a una central típica, no necesariamente nucleoelectrica.

**Tabla IV. Valores de las entradas de la turbina de alta presión.**

Entrada	Valor
hcX	2,770,600 H
P <sub>R</sub>	1,308,671 P
P <sub>B</sub>	6,550,250 P
W <sub>2</sub>	1021 G

### 3.3. Prueba del Modelo en Simulink del Regulador de Presión.

A continuación se presentan las pruebas que se han diseñado para el Regulador de Presión y las Válvulas de Control de la Turbina y de Derivación.



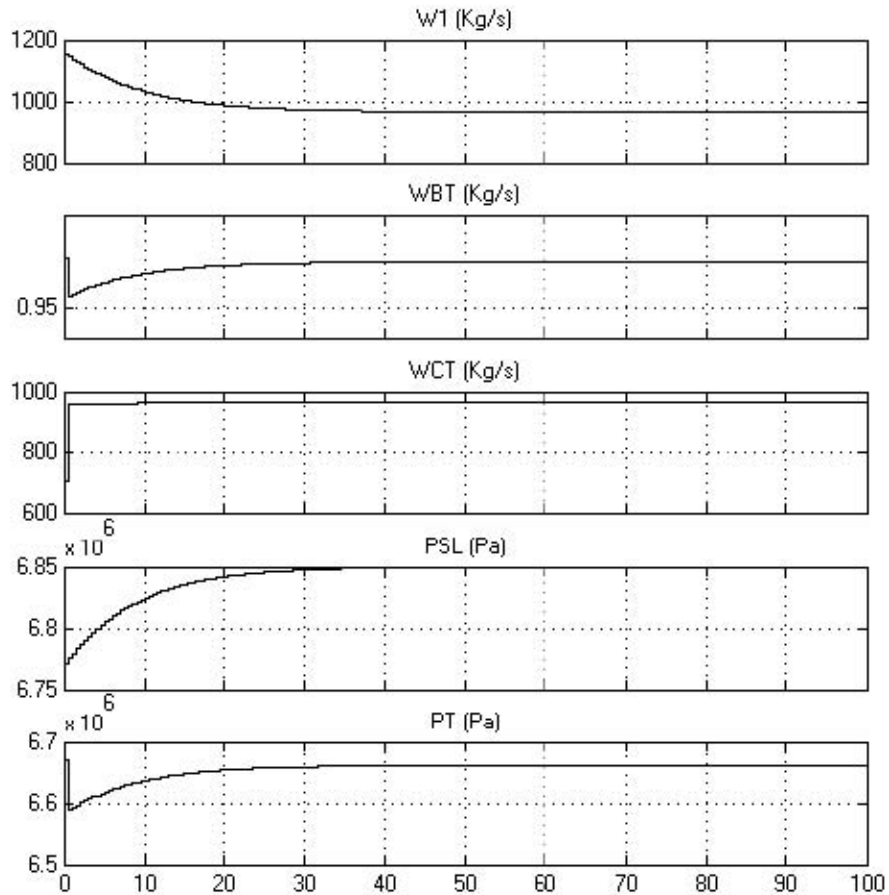
**Figura 6. Análisis lineal del modelo de la línea de vapor.**

**Tabla V. Valores de las salidas de la turbina de alta presión.**

Salida	Valor en la Simulación	Valor Típico
$W''_2$	863 G	859.57 G
$W_{REC}$	37.1 G	37.62 G
$h_2$	2,541,500 H	2,543,300 H
$W_{BHP}$	120.1 G	121.74 G

1. Se mantiene constante el flujo de vapor a través de la turbina e igual al flujo de referencia, es decir,  $W_T = W_{TREF}$ . Se hará  $P_{TS} < 1, = 1, > 1$  (Ver Figuras 3, y 4, respectivamente), con la finalidad de analizar que pasa con las válvulas cuando la presión medida por el detector varía respecto a la presión nominal de la vasija del reactor. Figuras 7 y 8.
2. Se mantiene constante  $P_{TS}$ , es decir,  $P_{TS} = 1$ . Se hará  $W_T < W_{TREF}, = W_{TREF}, > W_{TREF}$  (Ver Figuras 9 y 10, respectivamente), con la finalidad de analizar que pasa con las válvulas al variar el flujo de vapor a través de la turbina. Figura 11, 12, 13





**Figura 7. Gráficas de las salidas de la línea de vapor.**

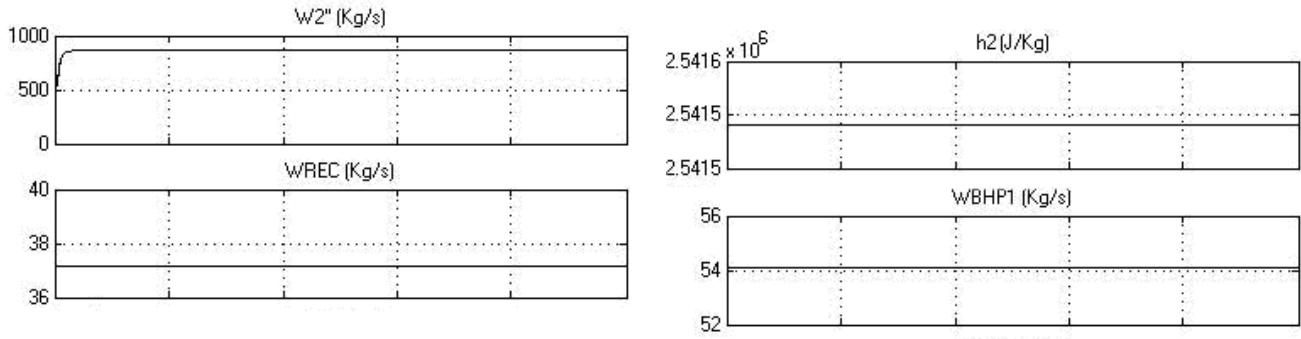
Finalmente, el sistema de línea de vapor y turbogenerador, se puede caracterizar en un modelo que integra los modelos respectivos de los componentes que lo conforman. Para ello, se realizó una configuración específica de caracterización y prueba al sistema integrado, tomando como entrada la presión en la línea de vapor que entrega el módulo del reactor en el SUN-RAH y como salida la potencia que provee el generador. De lo anterior, la función de transferencia linealizada se muestra en la ecuación 2.

$$H(s) = \frac{37.12s^5 + 196s^4 + 224s^3 + 86.99s^2 + 8.465s + 0.2144}{s^7 + 20.26s^6 + 76.22s^5 + 80.27s^4 + 30.84s^3 + 4.503s^2 + 0.2585s + 0.004374} \quad (2)$$

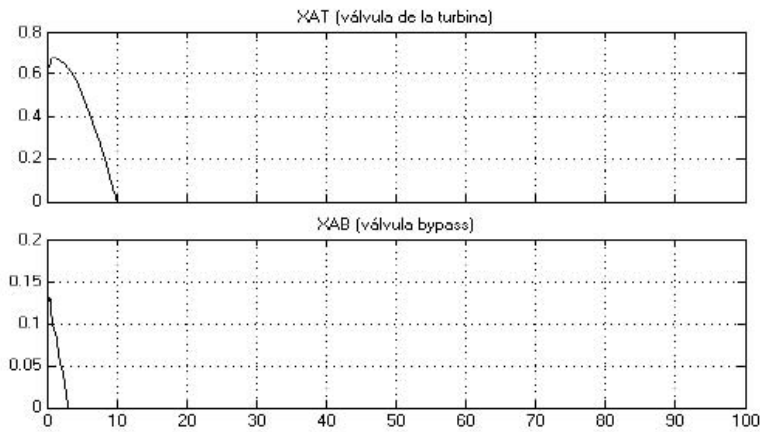
Las respuestas características se muestran en la Figura 14:

## 5. CONCLUSIONES

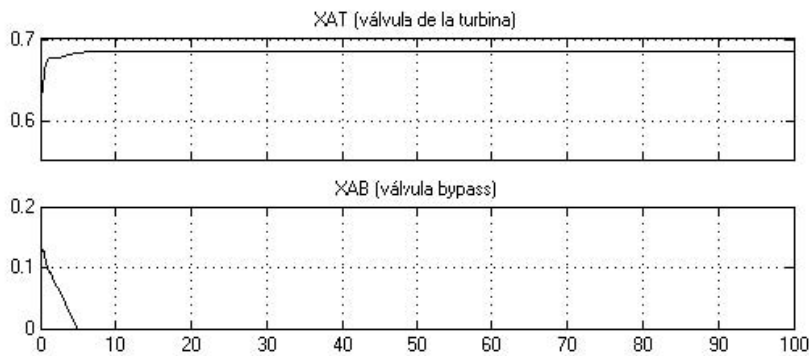
Este trabajo planteó un banco de pruebas para comprobar el comportamiento de un simulador para representar la dinámica de la línea de vapor, turbinas y regulador de presión, con la finalidad de integrarlos al Simulador Universitario de Nucleoeléctricas con Reactor de Agua Hirviente (SUN-RAH), utilizando modelos de orden reducido e implementados en Matlab.



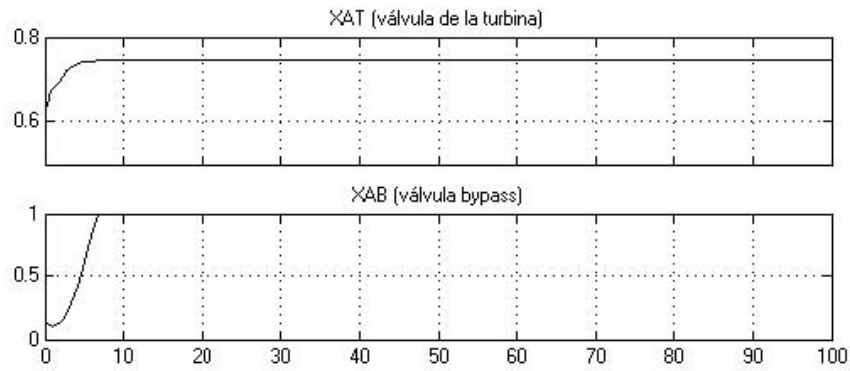
**Figura 8. Gráficas de las salidas de la turbina de alta presión.**



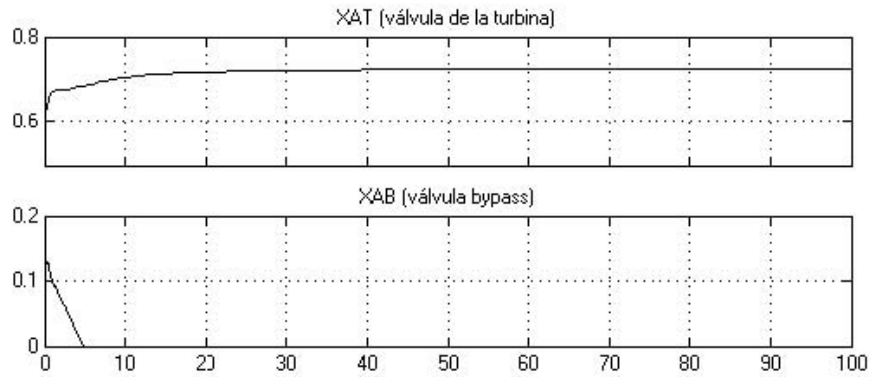
**Figura 9. Respuestas en las válvulas de control con  $P_{ts} < 1$ .**



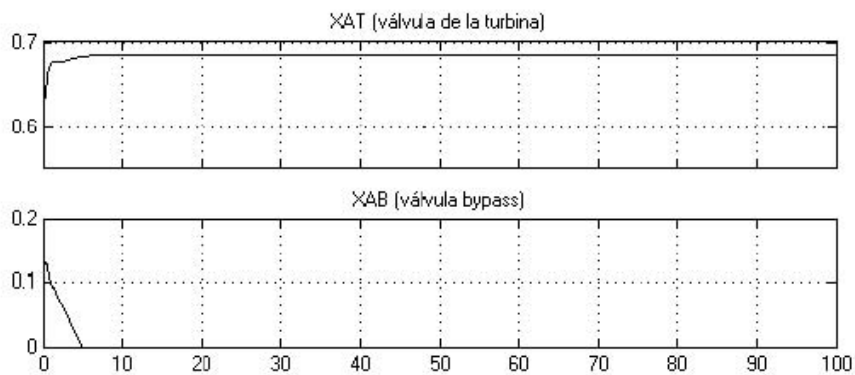
**Figura 10. Respuestas en las válvulas de control con  $P_{ts} = 1$ .**



**Figura 11. Respuestas en las válvulas de control con  $PTS > 1$ .**



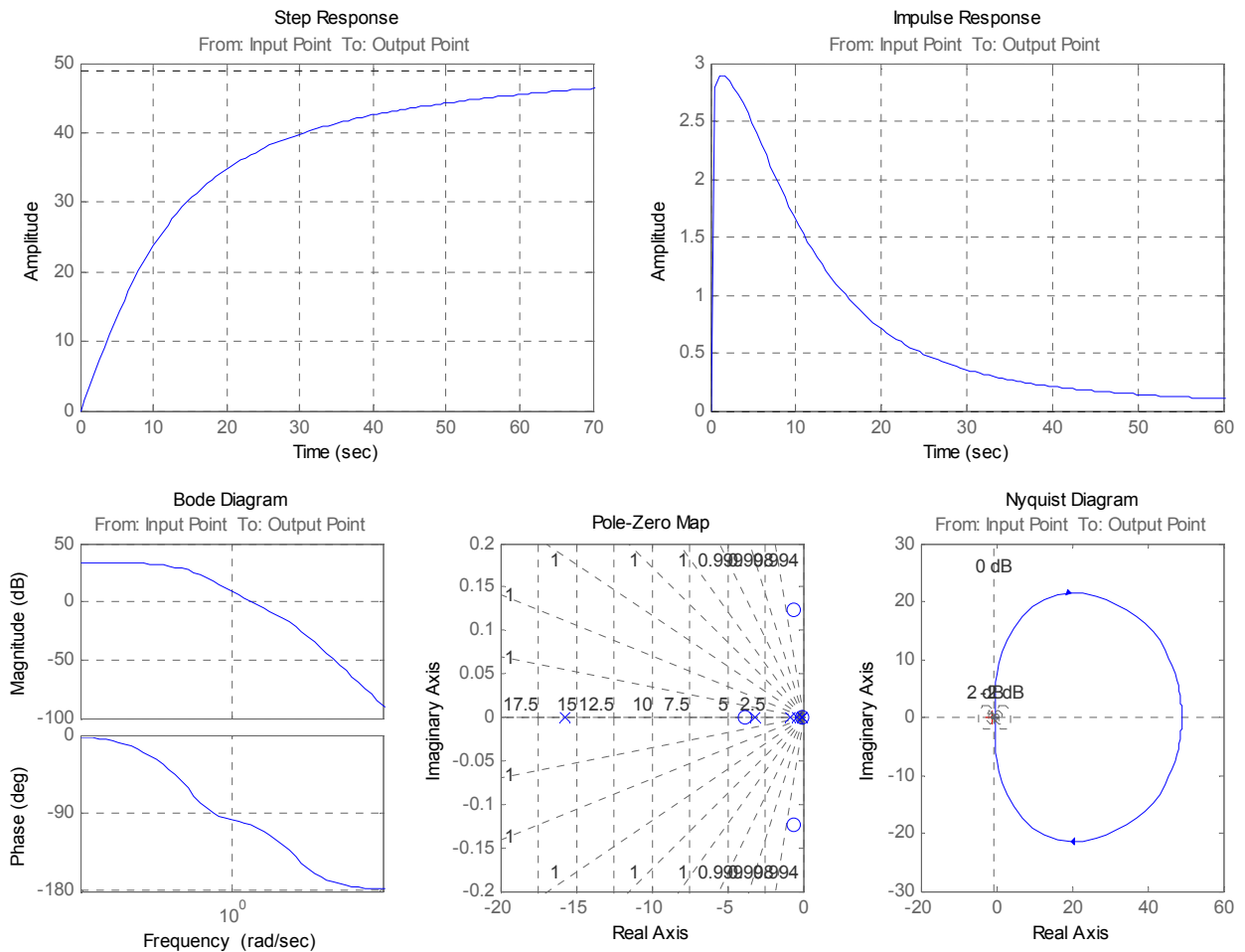
**Figura 12. Respuestas en las válvulas de control con  $W_T < W_{TREF}$ .**



**Figura 13. Respuestas en las válvulas de control con  $W_T = W_{TREF}$ .**

Se comprobó que éste modelo es de orden reducido, no de orden mínimo, y pretende mantener identificables los términos y coeficientes que aparecen en cada ecuación diferencial o algebraica con el fenómeno físico que representan. Las gráficas presentadas muestran que hay posibilidad de cancelación de polos y ceros para ciertas condiciones pero eso no necesariamente ocurre para otras y de cualquier manera no es recomendable si se desea mantener directamente identificados los parámetros con los fenómenos físicos. Podemos decir que es de orden reducido porque solo contiene unas decenas de ecuaciones diferenciales para todos los componentes importantes de la línea de vapor y del turbo generador, y que comparado con modelos de mejor estimación, solo se tienen los polos representativos. El proceso de modelado y simulación en Matlab ha requerido una verificación meticulosa de los datos ya que algunos modelos resultan muy sensibles y errores o desviaciones en alguna condición inicial o parámetro ocasiona la inestabilidad del sistema simulado.

Los módulos que representan los sistemas del simulador fueron probados varias veces con diferentes condiciones iniciales, las cuales no siempre producían valores congruentes o dentro del



**Figura 14. Análisis del modelo completo linearizado.**

rango permitido, así que se tuvieron que corregirse dichos valores y ajustar otros para obtener salidas muy cercanas a los valores típicos.

Cabe señalar que dicha tarea no fue fácil ya que no se ha tenido acceso a la información necesaria para identificar el simulador con planta específica alguna y validar dichos modelos. Sin embargo, la validación de los modelos aquí planteados se consideró desde un principio como un proyecto aparte y se podría hacer para un tipo particular de central nucleoelectrica tipo BWR.

## **REFERENCIAS**

1. López Ramírez Andrés, “Modelado y Simulación de la Línea de Vapor, las Turbinas de Alta y de Baja Presión y el Regulador de Presión para el Simulador Universitario de Nucleoelectricas SUN-RAH”, *Memorias del XIV Congreso Anual de la SNM*, Guadalajara Jalisco México, 10-13 Septiembre de 2003.