
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 Nucleoeléctricas SUN-RAH

Andrés López Ramírez*

*Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares.
DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos
Universidad Nacional Autónoma de México.*

**Estudiante de Licenciatura*

e-mail: andyskamx@yahoo.com.mx

Resumen

En el siguiente artículo se presenta el desarrollo de un simulador que permite representar la dinámica de los siguientes sistemas: Línea de Vapor, Tobera, Separador de Vapor, Recalentador, Turbina de Alta Presión, Turbina de Baja Presión, Generador de Potencia y el Regulador de Presión de una central nucleoelectrica. Partimos del supuesto que dicha planta será modelada a partir de un reactor nuclear tipo BWR (Reactor de Agua Hirviente), utilizando modelos de orden reducido, que representan las variables dinámicas más importantes de los procesos físicos que ocurren a lo largo de la Línea de Vapor hasta el Generador. Para poder realizar la simulación en tiempo real se utiliza el software de modelado matemático Matlab, así como la herramienta específica de simulación Simulink. Cabe señalar que la plataforma sobre la que se ejecuta el simulador es el sistema operativo Windows, para permitir el uso intuitivo que solo este sistema operativo ofrece. Lo anterior obedece a que el objetivo del simulador es ayudar al usuario a comprender algunos de los fenómenos dinámicos que se presentan en los sistemas de una planta nuclear, y proporcionar una herramienta de análisis y medición de variables para predecir el comportamiento deseable de las mismas. También se presenta el modelo de un Controlador de Presión para la Línea de Vapor, la Turbina de Alta Presión y la Turbina de Baja Presión, que será el encargado de regular la demanda del sistema de acuerdo a las características y restricciones críticas de seguridad y control, asignadas de acuerdo a los parámetros deseados de funcionamiento de este sistema dentro de la planta nucleoelectrica. Este simulador está completamente bien definido y forma parte del Simulador Universitario de Nucleoeléctricas con Reactor de Agua Hirviente (SUN-RAH), un proyecto integral y de mayor alcance.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de simuladores de entrenamiento y de analizadores requiere indudablemente de modelos válidos de las plantas para un considerable número de eventos transitorios y de accidente. Esos modelos deben instalarse en varias computadoras para realizar sus cálculos más rápido en tiempo real y además funcionar coordinadamente entre sí.

El diseño de nuevas centrales avanzadas o la optimización operativa de las actuales, puede utilizar observadores y controladores óptimos, adaptivos o robustos de esos sistemas complejos con la finalidad de ampliar los márgenes de operación o reducir la incertidumbre en los cálculos de parámetros críticos. Tal es el caso de los monitores de estabilidad de las nucleoelectricas tipo BWR, como Laguna Verde, que pueden entrar a regiones de inestabilidad no deseada y contando con esos monitores la operación puede beneficiarse considerablemente.

El entrenamiento del funcionamiento de las nuevas centrales requerirá de simuladores que deberán construirse y donde nuestros ingenieros pueden aportar importantes desarrollos. Por ello un simulador de bajos requerimientos de software y hardware pueden brindar una excelente oportunidad de entrenamiento a modeladores, operadores, analistas y diseñadores. Actualmente la preparación de este tipo de personal requiere de postgrados, cursos y muchos años de trabajo. Con el desarrollo del simulador de aula y modelos de tarea específica, este proceso de entrenamiento altamente especializado puede mejorarse y ofrecerse desde la FI.

2. OBJETIVO

El proyecto tiene por objeto desarrollar un simulador con modelos de orden reducido para plantas nucleoelectricas. En particular se desea simular los modelos que representan la Línea de Vapor, las Turbinas y el Regulador de Presión, estos modelos formaran parte del Simulador Universitario de Nucleoelectricas con Reactor de Agua Hirviente (SUN-RAH).

Otro objetivo es establecer una plataforma de conocimientos para el desarrollo de modelos numéricos de los sistemas principales de una central nucleoelectrica de potencia, los cuales pueden utilizarse para diseños de controles óptimos. Con tales modelos se podrán realizar sesiones de análisis y entrenamiento dirigido y utilizar en otras aplicaciones como simuladores de aula o analizadores de eventos.

2.1. Especificaciones Generales

El simulador del Sistema de Presión esta sujeto a las siguientes especificaciones de diseño:

- Basado en Modelos de Orden Reducido. Desarrollo de módulos en una estructura conforme a los lineamientos de la ingeniería de software, que puedan ser ejecutados en sistemas computacionales de fácil acceso, como parte del simulador SUN-RAH.
- Accesible por Internet.
- Para permitir el entrenamiento o introducción a cursos de alta demanda.
- Instalación y mantenimiento con software libre. El desarrollo puede realizarse con apoyo de programas propietarios bajo licencia en la UNAM, pero las versiones liberadas solo usarán software libre.
- Modelado, en parte, de una nucleoelectrica tipo BWR genérica sin referencia específica a central alguna.

- Inicialización con estados estacionarios previamente verificados en forma cualitativa.
- Control y Rastreo de simulaciones con gráficos predeterminados: diagramas simplificados de proceso, paneles simplificados, gráficas de tendencias.
- Configurable a centrales específicas tipo BWR.
- Código fuente único y no liberable para control de versiones.

2.2. Metas

Las metas específicas de este proyecto son:

- Modelado matemático de los sistemas: Línea de Vapor (LV), Tobera (To), Separador de Vapor (SV), Recalentador (Re), Turbinas (TAP y TBP), Generador de Potencia (GP) y controladores asociados.
- Desarrollo e Implementación de Modelos y Módulos usando Matlab.
- Desarrollo de Interfaz Gráfica para el simulador.
- Modelado de los Sistemas de Control y de Protección.
- Integración de Modelos de todos los sistemas.
- Pruebas Dinámicas a Modelos Acoplados.
- Modelado de Sistemas de Emergencia.
- Actualización de Módulos y Componentes.

2.3. Alcance

En este simulador no se planea utilizar códigos de estimación para modelar en línea componentes específicos de los sistemas de interés, pero si para generar referencias de tendencias o modelos simplificados. El simulador originalmente no plantea la simulación de accidentes o el cabal cumplimiento de las Normas Internacionales, lo cual sería posible para transitorios específicos y un proyecto adicional de identificación de los modelos con una central determinada. El simulador no incluye replicas de alguna central en particular, solo contará con gráficos de tipo genérico.

2.4. Metodología

La metodología de desarrollo de este proyecto se basa en utilizar las leyes fundamentales de la ciencia y la ingeniería disponibles en libros de texto, reportes no propietarios y conocimientos disponibles en revistas y sitios de Internet de libre acceso para fundamentar y plantear los modelos matemáticos de los sistemas y componentes de interés (Línea de Vapor, Tobera, Separador de Vapor, Recalentador, Turbinas, Generador de Potencia y Regulador de Presión) pertenecientes a la planta. Estos modelos se formulan en herramientas de desarrollo como Matlab para ahí probar su comportamiento dinámico y posibles limitaciones o conflictos. Una vez probados en ese ambiente se portarán a otros lenguajes que permitan la instalación del ejecutable en un sitio y tener la posibilidad de que varios usuarios corran la aplicación simultáneamente.

3. MÓDULOS PRINCIPALES

A continuación se presenta una breve descripción de los modelos y módulos que integran el simulador.

3.1 Líneas de Vapor y Turbinas

Las líneas de vapor está representadas por varios nodos de presión de los cuales la presión en la línea de vapor a la mitad del recorrido a la turbina y la presión a la salida de la válvula de control son variables de estado:

$$\frac{dP_{SL}}{dt} = \frac{(W_1 - W_{SL})}{\frac{d\rho_g(P_{SL})}{dP} V_{SL}} \quad (1)$$

donde V_{SL} es el Volumen Total de la línea de vapor de la vasija del reactor a la turbina. En forma similar se obtiene el flujo de vapor hacia la turbina:

$$\frac{dP_B}{dt} = \frac{(W_{CT} - W_T)}{\frac{d\rho_g(P_B)}{dP} V_{SL}} \quad (2)$$

donde W_{SL} es el flujo que sale del reactor, W_T es el flujo de vapor a través de la turbina, y los flujos por las válvulas de control y de desvío de la turbina están dados por:

$$W_{SL} = K_{SL} \sqrt{\rho_g(P_{SL}) |P_{SL} - P_T|} \quad (3)$$

$$W_T = C_T \sqrt{P_B \rho_g(P_B)} \quad (4)$$

$$W_{CT} = \frac{C_{TV} a_a}{12} \sqrt{P_T g \frac{P_{ri} a_7 (1 - P_{ri} a_6)}{a_6} \rho_g(P_T)} \quad (5)$$

$$W_{BT} = 0.06357 a_B \sqrt{P_T \rho_g(P_T)} \quad (6)$$

Los flujos de las válvulas de alivio y hacia el recalentador están dados por:

$$W_{aliv} = K_{aliv} \sqrt{\rho_g(P_{SL}) |P_{SL}|} \quad (7)$$

$$W_{RE} = K_{SL} \sqrt{\rho_g(P_{SL}) |P_{SL} - P_{RE}|} \quad (8)$$

Las dinámicas de cada válvula están modeladas por sistemas lineales pero la relación entre áreas de flujo se determinan con procedimientos particulares.

La turbina es modelada con una tobera, un recalentador, una turbina de alta presión y una de presión intermedia y baja. Para la tobera la entalpía de salida se obtiene de

$$\frac{dh_{cx}}{dt} = \frac{W_T h_B - W_2 h_{cx}}{\rho'_c V_c} - \frac{h_{cx}}{\rho'_c} \frac{d\rho'_c}{dt} \quad (9)$$

siendo la densidad del vapor también una variable de estado:

$$\frac{d\rho'_c}{dt} = \frac{W_T - W_2}{V_c} \quad (10)$$

$$\frac{dW_2''}{dt} = \frac{(w_2 - W_{BHP} - W_{REC}) - W_2''}{T_{W_2}} \quad (11)$$

La entalpía del vapor saliendo del recalentador se obtiene de

$$\frac{dh_R}{dt} = \frac{Q_R + W_2' h_g - W_3 h_R}{\rho_R V_R} - \frac{(W_2' - W_3) h_R}{\rho_R V_R} \quad (12)$$

$$\frac{d\rho_R}{dt} = \frac{W_2' - W_3}{V_R} \quad (13)$$

$$\frac{dW_{PR1}}{dt} = \frac{W_{RE} + W_{REC} - W_{PR1}}{T_{R1}} \quad (14)$$

$$\frac{dQ_R}{dt} = \frac{W_{RE} + W_{REC} - W_{PR1}}{2T_{R2}} (T_S - T_R) H_{QR} - \frac{Q_R}{T_{R2}} \quad (15)$$

La turbina de baja presión

$$\frac{dW_3'}{dt} = \frac{(W_{3N} - W_{BLP}) - W_3'}{T_{W_3}} \quad (16)$$

El par producido es calculado por

$$T_{HP} = \frac{W_2''' (h_{cx} - h_2)}{J\Omega} \eta_{HP} \quad (17)$$

con

$$W_2''' = FRAC_{HP} (W_2 + W_2'') \quad (18)$$

mientras

$$h_2' = 2326275 * (1067 + 53.6 * 10^{-6} (P_R - 1.37 * 10^6) - 23.1 * 10^{-12} (P_R - 1.37 * 10^6)^2 - 14.5 * 10^{-6} (P_B - 6.89 * 10^6)) \quad (19)$$

La eficiencia real de la turbina de alta presión esta dada por $\eta_{HP} = \eta_{CFHP} \eta_{HP}^*$ siendo η_{CFHP} un factor de corrección que toma en cuenta las pérdidas rotacionales y de holgura dado por de acuerdo a

$$\eta_{CFHP} = \frac{W_2' / W_2^* - W_L}{(W_2' / W_2^*)(1 - W_L)} \quad (20)$$

De igual forma en la turbina de media y baja presión la torca está dada por:

$$T_{LP} = \frac{W_3''(h_R - h_4)}{J\Omega} \eta_{LP} \quad (21)$$

donde W_3'' y η_{LP} están relacionados por

$$W_3'' = FRAC_{LP}(W_3 + W_3') \quad (22)$$

siendo $FRAC_{LP}$ un factor similar a $FRAC_{HP}$ pero para las turbinas de media y de baja presión. $\eta_{LP} = \eta_{CFLP} \eta_{LP}^*$ y el factor de corrección de la eficiencia es:

$$\eta_{CFLP} = \frac{W_3' / W_3^* - W_L}{(W_3' / W_3^*)(1 - W_L)} \quad (23)$$

La potencia total en Watts es

$$POWER = (T_{HP} + T_{LP}) * \Omega \quad (24)$$

3.2 Regulador de Presión

El Regulador de Presión esta diseñado para responder a cambios en la potencia eléctrica (demanda) y a la presión en la vasija del reactor (**Pv**). Los cambios en la demanda de electricidad son reconocidos como variaciones de la diferencia entre la referencia del flujo de vapor **WTREF** y el flujo **WT**. Las señales de salida del controlador regulan las aberturas de la válvula de control de la turbina y la válvula de derivación (bypass) al condensador de la turbina. El regulador de presión también acondiciona una señal **XXP4** (Véase Fig. 1) para el controlador del flujo de recirculación. Esta derivación está diseñada para mejorar la respuesta de la planta durante cambios en la demanda de electricidad.

Las variaciones de la diferencia entre **WT** y **WTREF** pasan por un filtro de baja frecuencia y por una primera compuerta de valor mínimo (low value gate). Donde la señal es enviada al ajustador de punto de referencia y a una segunda compuerta de valor mínimo. Aquí la señal es comparada con la señal que proviene del controlador de presión y la señal menor es integrada en **CKP9/S** para así controlar la posición de la

válvula de la turbina. La salida de la primera compuerta es la señal que es acondicionada por el ajustador de punto de referencia (controlador del tipo PI) y que es utilizada por el controlador de recirculación.

El regulador de presión cuenta con un sistema componente llamado controlador de presión, el cual recibe las desviaciones del valor nominal de la presión de la vasija del reactor (**PTS** es la razón de la presión medida a la presión nominal de la vasija del reactor). También recibe como corrección, la señal del ajustador de punto de referencia del flujo de recirculación. El controlador de presión está caracterizado como una función de transferencia con un cero y dos polos. Sin embargo, un sistema más sencillo es un controlador con un solo polo, a menos que sea deseable introducir un compensador de adelanto (Phase Lead). En este último caso, la mejor representación para el cero y los dos polos es por medio de dos retrasos sencillos en paralelo.

Nótese que de tenerse un incremento suficientemente grande en la presión de la vasija del reactor, las válvulas de control de la turbina y de derivación al condensador pueden ser abiertas de acuerdo a la señal **YYP7** (normalmente la válvula de derivación se mantiene cerrada por un valor negativo de **YYP7**).

Las ganancias de retroalimentación **AKP8** y **AKP9** tiene como objetivo suprimir oscilaciones del sistema. La sensibilidad del regulador de presión puede ajustarse cambiando los factores **CKP2**, **AKP4**, **CKP4** y **CKP4**. Aunque debe notarse que las ganancias de redes en paralelo debe mantener sus valores, a menos que se desee cambiar las características de respuesta a señales de diferente frecuencia.

El controlador de flujo de recirculación puede operar en modo automático o manual. Si la potencia del reactor nuclear se controla manualmente, por medio del flujo de recirculación, entonces es deseable desconectar el ajustador de punto de referencia del regulador de presión. Esto se logra introduciendo un 10 % de offset de potencia y haciendo **CKR1** = 0 (en la Fig. 1).

En la Fig. 1 también se muestra un circuito diseñada para cerrar la válvula de control de la turbina en caso de una falla en la turbina. Una disminución rápida de **WT** es detectada como una gran señal positiva, la cual es diferenciada y enviada con un cambio de signo (más la señal **BKP2**), hacia la primera compuerta de valor mínimo. Este fuerza a **YYP9**, a través de la segunda compuerta, logrando así cerrar la válvula de la turbina.

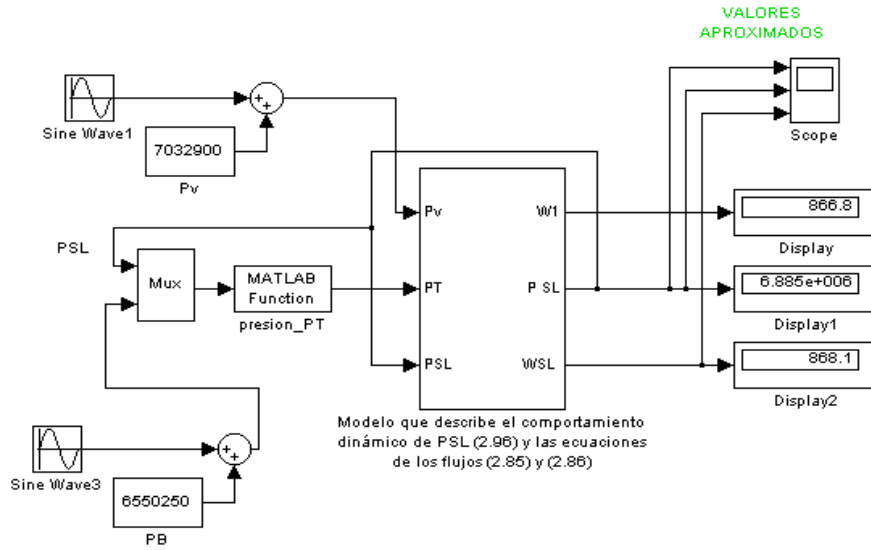


Figura 2. Simulación del comportamiento dinámico de la presión PSL y las ecuaciones de los flujos W1 y WSL.

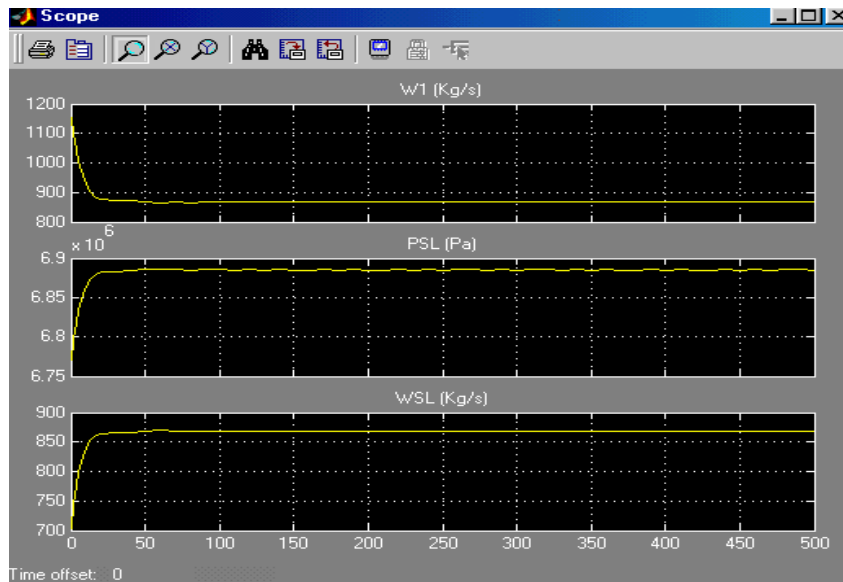


Figura 3. Gráficas correspondientes al flujo a la salida de la vasija del reactor W1; el flujo WSL y la presión PSL a la mitad de la Línea de Vapor.

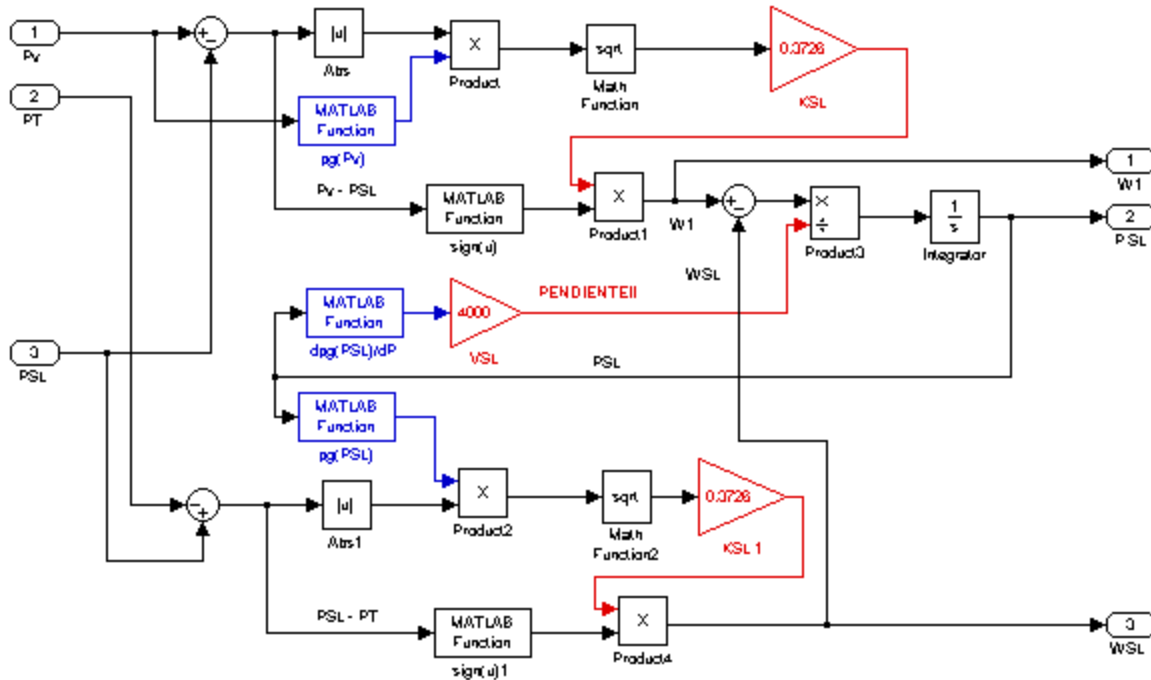


Figura 4. Modelo que describe el comportamiento dinámico de la presión PSL y las ecuaciones de los flujos W1 y WSL.

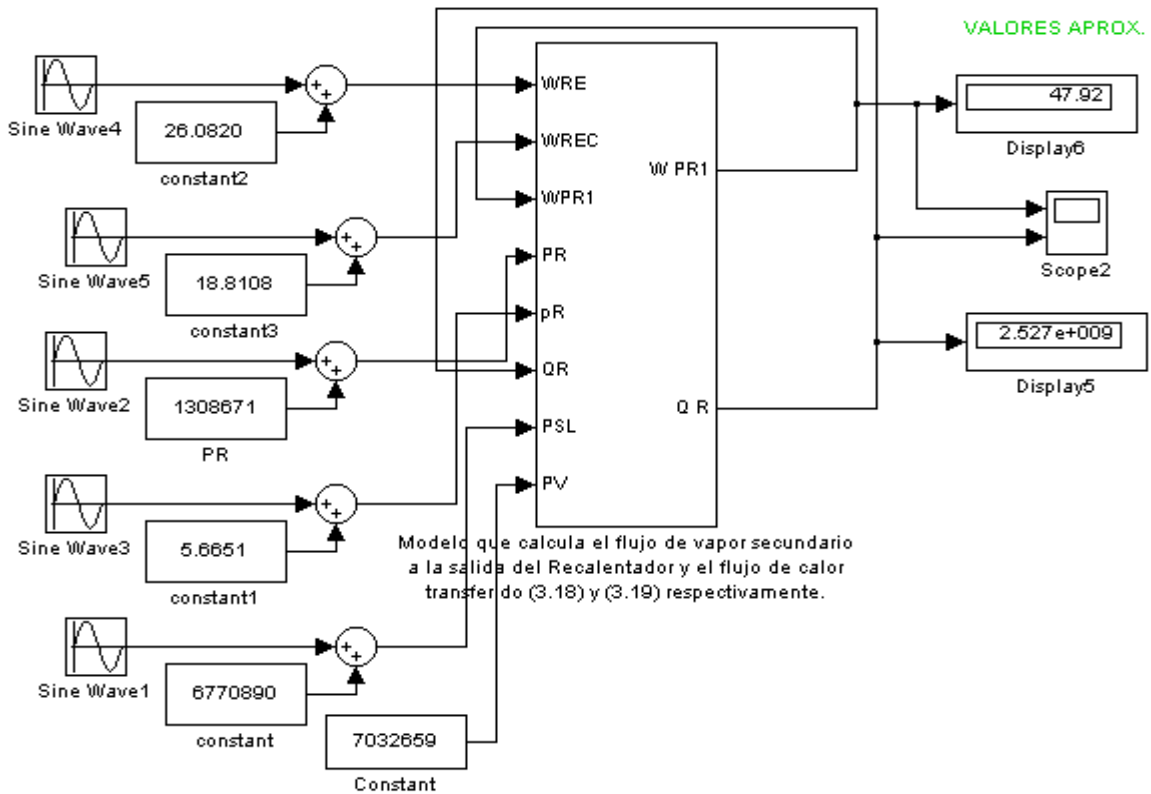


Figura 5. Simulación del flujo de vapor secundario a la salida del Recalentador y el flujo de calor transferido.

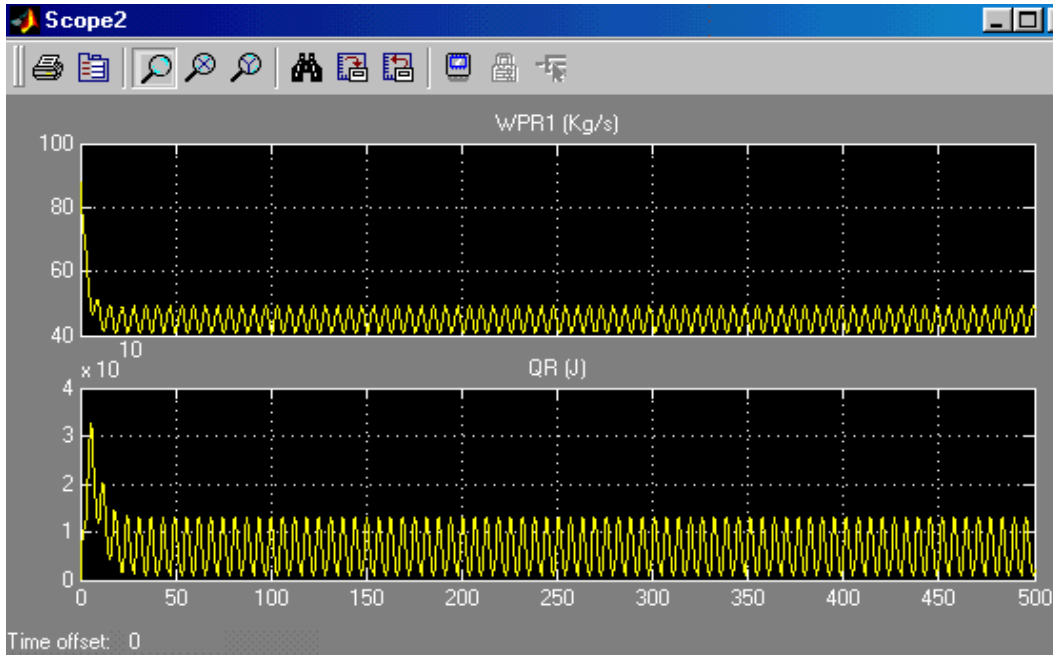


Figura 6. Gráficas correspondientes al flujo de vapor secundario a la salida del Recalentador (WPR1) y el flujo de calor transferido al Recalentador (QR).

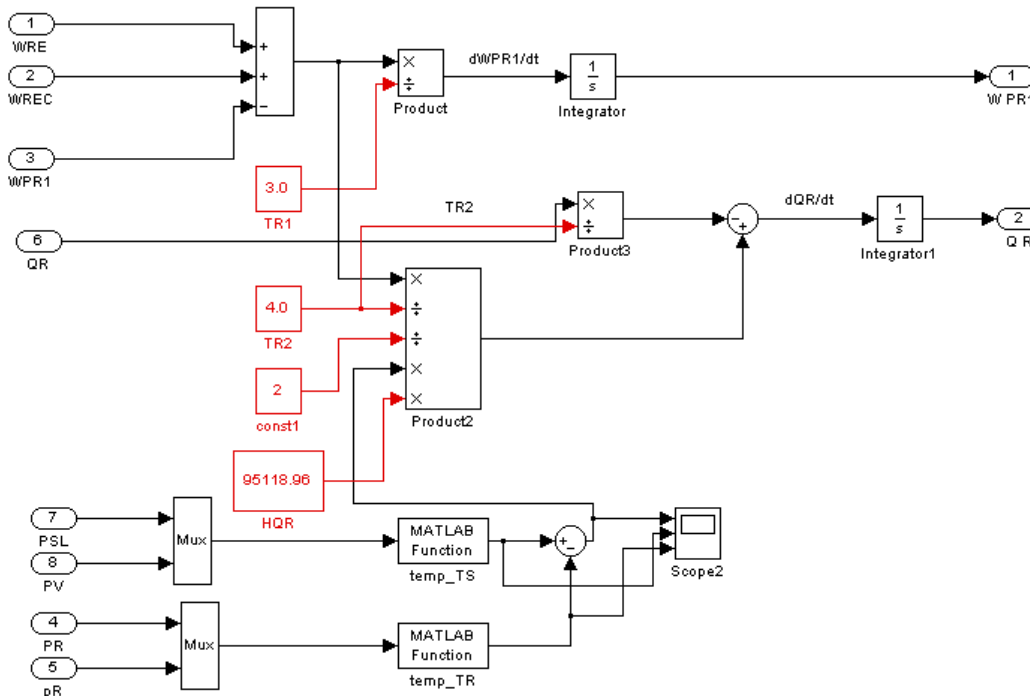


Figura 7. Modelo del flujo de vapor secundario a la salida del Recalentador y el flujo de calor transferido.

4. CONCLUSIONES

Con el proyecto se pretende desarrollar una herramienta de análisis y de entrenamiento dirigido, es decir, un software integral que puede ser utilizado por instituciones dedicadas a la enseñanza o bien por institutos de investigación que se encuentren relacionados con el tema de la energía nuclear.

Este trabajo describe el desarrollo de un simulador que representa la dinámica de los sistemas: Línea de Vapor, Tobera, Turbinas, Separador de Vapor, Recalentador, Regulador de Presión y Generador de Potencia, pertenecientes a una planta nucleoelectrica con reactor nuclear de agua hirviente, utilizando modelos de orden reducido e implementados en Matlab con una interfaz de usuario para Windows.

El desarrollo modular de este sistema permite depurar los modelos y los módulos de manera que en la integración a los demás sistemas del SUN-RAH, no se tenga la incertidumbre acerca de la funcionalidad del sistema. Los modelos de todos los componentes definen solo polos dominantes, lo que no es limitación para reproducir una amplia gama de transitorios anticipados de operación de una central.

REFERENCIAS

1. Sistemas de Control en Tiempo Discreto, K. Ogata, Prentice-Hall, 2da Edición
2. *Desarrollo de un Modelo de Simulación de Plantas Nucleoelectricas Tipo BWR.*, M. Schwarzblat, A. Villalobos, J. Morales, J. Arellano, G. Martínez, J. M. Pérez, F. Mugica, IIE /DEN, IIE /FE-N14/1546/13/F, Jun/83
3. Richard T. Lahey, F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor
4. "Simulación en Tiempo Real de la Termohidráulica de un Reactor de Agua Hirviente" Tesis de Maestría, Juan Carlos Ramos Pablos (M. En C.), ESFM /IPN, Dic/1991,
5. J. Lewins Nuclear Reactor Kinetics and Control, Pergamon Press. ISBN 0-08-021681-1