
Modelado y Simulación del Sistema de Agua de Alimentación, Controlador Asociado e Interfaz con el Usuario para el Simulador Universitario de Nucleoeléctricas SUN-RAH

Alitet Sánchez Bello*

Laboratorio de Análisis de Ingeniería de Reactores Nucleares.

DEPFI, Campus Morelos, en IMTA Jiutepec Morelos

Facultad de Ingeniería.

Universidad Nacional Autónoma de México.

**Estudiante de Licenciatura*

e-mail: alitet@eresmas.com

Resumen

El proceso de simulación de los sistemas componentes del agua de alimentación de una planta nucleoelectrica es presentado, empleando varios modelos de orden reducido que representan los diversos elementos que componen los sistemas como: los calentadores de agua de alimentación, el condensador, la bomba de agua de alimentación, etc. La integración de los mismos en una estructura simulable, y el desarrollo de una plataforma que dé la apariencia de ejecutarse en tiempo continuo, es el objetivo del Simulador de Agua de Alimentación, así como del simulador SUN-RAH, del que forma parte. El simulador emplea modelos de orden reducido que responden al comportamiento observado de una planta nuclear de tipo BWR. Así mismo, se presenta un modelo de un controlador de flujo de agua de alimentación, que será el encargado de regular la demanda del sistema de acuerdo a las características y restricciones críticas de seguridad y controlabilidad, asignadas de acuerdo a los parámetros deseados de funcionamiento de este sistema dentro de la planta nucleoelectrica. La integración de estos modelos, la adecuación de las variables y parámetros, se presentan de una manera que la integración con los demás modelos de los sistemas restantes de la planta (Reactor, Línea de Vapor, Turbina, etc.), sea directa y coherente con los principios de ciclos termodinámicos relativos a este tipo de plantas de generación. El diseño de las interfases gráficas y el ambiente donde funciona el simulador son parte de los desarrollos de este trabajo. Los alcances y objetivos del simulador complementan la descripción del simulador.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los sistemas, que componen las plantas nucleoelectricas, o cualquier otra planta termoeléctrica, es el sistema de Agua de Alimentación. Algunos enfoques concentrados en la generación de energía, tienden a aislar este sistema en un segundo plano por su aparente sencillez y poca relevancia en los procesos de generación. Sin embargo, otros enfoques como el termodinámico, o el de control, nos hacen notar que los sistemas de

Agua de Alimentación tienen un peso importante en la capacidad térmica de la planta y que su correcto entendimiento, funcionamiento y control, generan una mayor eficiencia general, así como también proveen una mayor seguridad, al poder controlar las cantidades de flujo en niveles óptimos. Los modelos de los componentes del sistema de agua de alimentación, son los adecuados para observar un comportamiento de los dispositivos reales en una planta del tipo BWR, estos modelos aunque son de orden reducido, definen los polos dominantes [1] de los sistemas haciendo que respondan de manera adecuada y son los suficientemente precisos como para representar la evolución temporal de las principales variables observadas en plantas reales. Los modelos son integrados para su simulación en una estructura, que incorpora los parámetros necesarios para que los modelos operen, y que a su vez, proveerá el acceso a los parámetros seleccionados por el usuario del simulador.

Otro aspecto que se incorpora en el simulador de Agua de Alimentación, es el de una fachada hecha específicamente para él, conformada por un programa escrito en Visual C++ para el entorno Windows, desarrollada empleando las facilidades de las librerías DirectX, así como las propias facilidades del entorno gráfico propio de Windows.

2. OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es crear un simulador del sistema de agua de alimentación en una nucleoelectrónica, que sea fácilmente integrable a expansiones posteriores y los otros modelos del simulador completo de una nucleoelectrónica y que conocemos como proyecto SUN-RAH. Este simulador tiene por objetivo servir como apoyo a las diversas carreras de licenciatura u otros niveles escolares, a comprender los principios básicos de funcionamiento de una planta nucleoelectrónica, así como también de servir de apoyo en el entrenamiento de individuos que requieran un conocimiento más profundo de los procedimientos de operación de los diversos sistemas que conforman una planta nuclear.

2.1. Especificaciones Generales.

El simulador de agua de alimentación, 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 de una nucleoelectrónica tipo BWR genérica sin referencia específica a central alguna.

- Inicialización con estados estacionarios previamente verificados en forma cualitativa.
- Control y Monitoreo de simulaciones con gráficos predeterminados: diagramas simplificados de proceso, paneles simplificados, gráficas de tendencias, textos explicativos, fotografías típicas de sistemas y componentes.
- Registro bajo demanda de eventos (videos) y estados del simulador (fotos)
- Configurable a centrales específica 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 de Agua de Alimentación (A.A) y controladores
- Desarrollo e Implementación de Modelos y Módulos usando Matlab
- Desarrollo de Interfaz Gráfica para el simulador del sistema de A.A.
- Modelado de los Sistemas de Control y de Protección
- Integración de Modelos de todos los sistemas de A.A.
- 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 mejor estimación para modelar en línea componentes específicos del sistema de agua de alimentación, pero si para generar referencias de tendencias o modelos simplificados. El simulador originalmente no plantea la simulación de accidentes o el cabal cumplimiento del ANSI 3.5, lo cual si sería posible para transitorios específicos y un proyecto adicional de identificación de los modelos con una central determinada. El simulador no incluye mímicos replica de central alguna en particular, solo contará con gráficos de tipo genérico o disponibles en Internet.

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 del sistema de agua de alimentación y de 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 PHP u otros lenguajes que permitan la instalación del ejecutable en un sitio desde donde puedan accederse aún bajo demanda múltiple o grande (decenas de usuarios simultáneos).

3. MÓDULOS PRINCIPALES

A continuación se hace una breve descripción de los modelos y módulos que integran este simulador.

3.1 Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario del simulador se desarrolla, para entornos Windows, en el lenguaje de programación Visual C++ 6.0 Edición Profesional. Para hacer uso de las funciones gráficas de Windows, se emplean las librerías y componentes denominados por Microsoft, como DirectX, en su versión 8.1. Estas extensiones de Windows, requieren la carga de los intérpretes de las librerías (Plug-in, DLL's, etc.), y que el programador use las librerías en forma de código fuente. Ambas implementaciones (programador y cliente) son proporcionadas por Microsoft de manera gratuita, junto con una extensa documentación.

El simulador programado emplea las extensiones del entorno Windows, para crear una capa de acceso directo a las funciones gráficas, así como de entrada del sistema conocidas como componentes DirectX, estas extensiones se ejecutaran en modo de acceso directo, por lo que la mayoría de las primitivas geométricas que se emplean en las representaciones gráficas tipo Windows usuales, no están disponibles de manera explícita e inmediata. Este modo de programación de interfaces gráficas, permite tener un control total de lo que se representará en pantalla, sin las restricciones propias de los entornos gráficos clásicos de aplicaciones Windows, un ejemplo de esto puede verse en la Figura 1.

Todos los elementos que se perciben en las diversas pantallas que el simulador presenta, fueron colocados por el programador, los elementos dinámicos de las pantallas también fueron calculados de acuerdo a respuestas planificadas y emergentes para lograr una representación clara y agradable a la vista. Varios de los elementos que se muestran en la Interfaz, son independientes del elemento al que representan, por lo que se pueden reutilizar en diferentes dispositivos o situaciones. De esta manera las gráficas, medidores, despliegues, etc., son reutilizables y configurables a voluntad.

El programa de interfaz, también contiene, programas y subrutinas, que se encargan de pedir a un intérprete de Matlab, que se ejecute una simulación en un cierto tiempo, y que se transfieran los datos que se hayan calculado en la simulación a los dominios del programa, así como también de alterar los valores de entrada o parámetros de los modelos a simular a petición del programa de interfaz, respondiendo a acciones del usuario o a actualizaciones resultado de cálculos internos.

La interfaz, mostrada en la figura es la correspondiente a la fachada de simulación del sistema de agua de alimentación, se muestran los calentadores y el condensador, así como el reactor, ya que interactúan con el sistema. La lógica interna de la interfaz define el tiempo de simulación y de representación, con lo que se puede acelerar o retrasar, los tiempos reales de los procesos, para tener una mejor visión de los que sucede en cada modelo y elemento simulado, sin esperas o prisas inconvenientes.

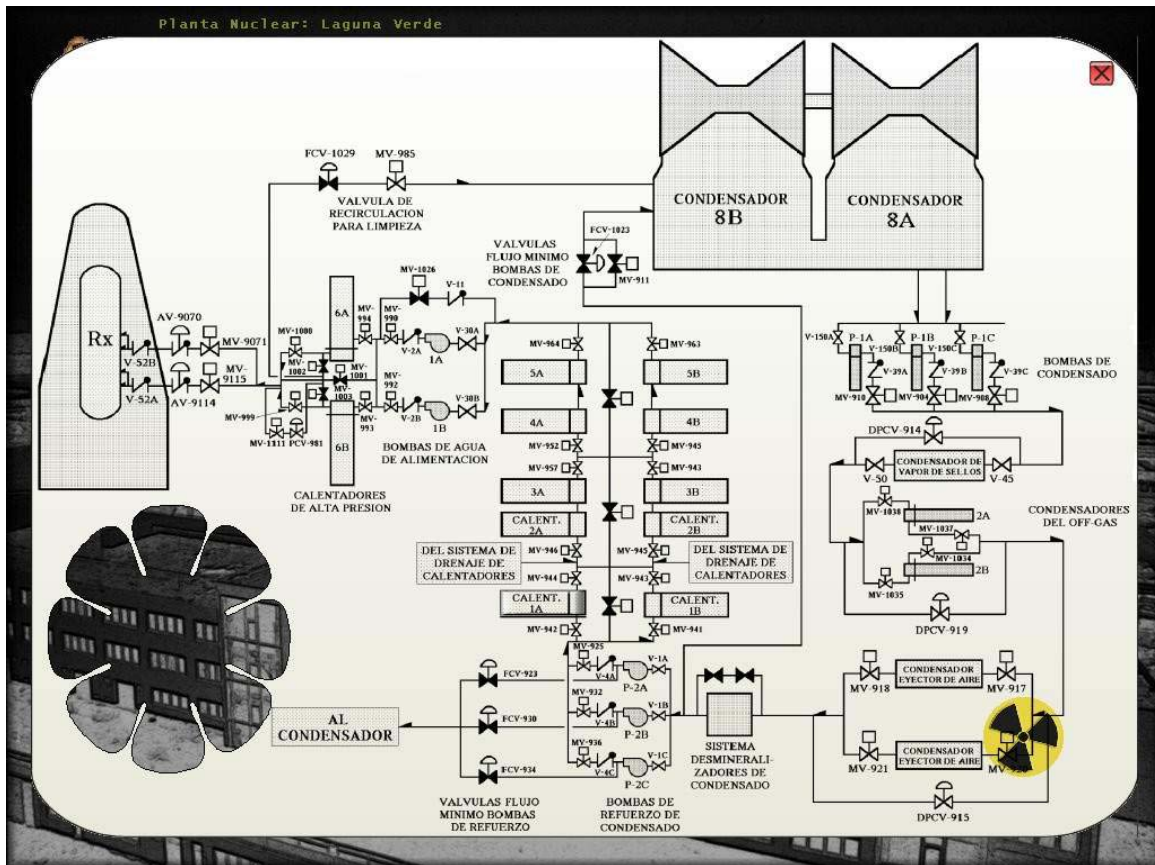


Figura 1. Pantalla de la interfase correspondiente al módulo de Agua de Alimentación en el simulador SUN-RAH, empleando elementos DirectX.

3.2 Tablas de propiedades termodinámicas de agua y vapor.

En diversas ocasiones se requirió la consulta de ciertas propiedades termodinámicas del agua y el vapor en los estados propios de la operación de sistema de agua de alimentación, por lo que para el uso de este tipo de propiedades en el entorno Matlab, se prepararon las funciones: `presisat.dll`, `tempsat.dll`, `vaptp.dll` y `vaphp.dll`, estas tablas fueron adaptaciones de las funciones proporcionadas por la pagina de la empresa: Win-Sim, basados en un documento de la The American Society of Mechanical Engineers, (ASME) de 1967, acerca de estas propiedades. [2], las funciones fueron adaptadas a los vectores de entrada de que se requerirían en la implementación en Matlab de los modelos, y fueron adaptadas al sistema internacional de unidades (SIU.)

3.3. Condensador y sistema de agua de alimentación.

Seis calentadores de los trenes del sistema de agua de alimentación son simulados en una configuración de cascada. El flujo de agua de alimentación w_{fw} es el mismo para todos ellos, proviene del condensador y es el que entra al reactor, por lo que su paso por los calentadores solo le provoca ciertos retrasos, propios de su estancia en el

interior de los calentadores. Sin embargo, a este flujo no se le adiciona ni se le sustrae ningún otro flujo.

Del balance de calor en los calentadores Obtenemos:

$$\frac{dh_{fwn}}{dt} = \frac{Q_{Hn}}{T_{Hn} w_{fw}} + \frac{h_{n-1} - h_{fwn}}{T_{Hn}} \quad (1)$$

En donde h_{fwn} es la entalpía del flujo que sale del calentador. La constante de tiempo, que representa el tiempo en el que el flujo pasa por el interior del calentador (lado tubos), en su camino hacia el reactor es T_{Hn} . h_{n-1} es la entalpía del calentador anterior o inclusive dado el caso, la del condensador, es tarea del calentador elevar esta entalpía.

Q_{Hn} es el calor transferido por los flujos en el calentador número uno, y esta dado por:

$$Q_{Hn} = H_{HFWn} (W_{HPn} + W_{BLPx}) \quad (2)$$

En donde H_{HFWn} es el coeficiente de transferencia de calor en el calentador, lo cual nos indica la cantidad de calor que el calentador generará de acuerdo a los flujos W_{HPn} y W_{BLPx} . El flujo que proviene de la extracción de una de las turbinas y otros flujos es W_{HPn} , y después de ser utilizado por un calentador posterior se le transfiere al calentador, a fin de que emplee el calor que aun posee. W_{BLPx} es un flujo extraído de alguna turbina del sistema, ya sea de baja o alta presión, y que es la principal fuente de calor para elevar la temperatura del flujo de agua de alimentación.

Del balance de masa obtenemos que:

$$\frac{dW_{HPn-1}}{dt} = \frac{W_{BLPx} + W_{HPn} - W_{HPn-1}}{T_{HnP}} \quad (3)$$

Donde W_{HPn-1} es el flujo que ha pasado por el calentador, proveniente de las turbinas, y del flujo de regreso de un calentador posterior y que ahora que ha sido despojado de cierto calor, de acuerdo con el coeficiente de transferencia de calor, mencionado anteriormente, es dirigido hacia un calentador anterior o el condensador, dependiendo si se a alcanzado el principio del tren de calentadores, T_{HnP} es una constante de tiempo de la estancia de estos flujos concurrentes y proveedores de calor, en la periferia del conducto donde fluye el agua de alimentación (Lado Carcaza), estos flujos no se mezclan con el flujo principal de agua de alimentación, la única transferencia es la del calor desprendido por la estancia de estos flujos en el calentador, durante el tiempo referido, y su salida posterior. La Figura 2 representa el tren de calentadores de baja presión, con las retroalimentaciones y extracciones mencionadas.

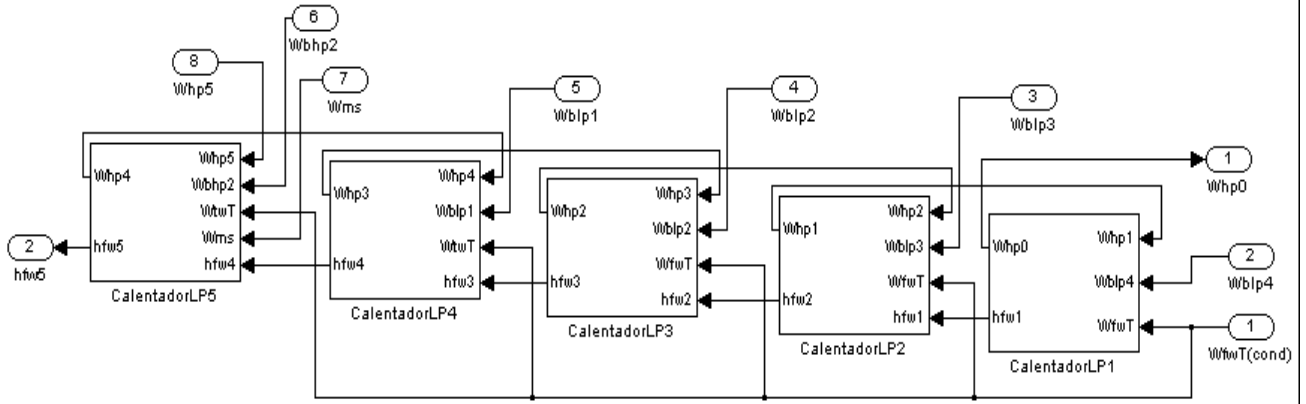


Figura 2. Representación en Simulink del sistema de calentadores de baja presión

La implementación en Matlab requirió la clasificación y organización de los modelos, así como el obtener las funciones de transferencia necesarias para ingresar los modelos al sistema Simulink, de manera directa, un ejemplo de la estructura empleada se observa en la Tabla 1.

Tabla I. Ecuaciones principales en el sistema de agua de alimentación y sus respectivas funciones de transferencia.

Nombre del Modelo.	Ecuación del Modelo.	Función de Transferencia.
Ecuación de entalpía en el calentador:	$\frac{dh_{fw1}}{dt} = \frac{Q_{H1}}{T_{H1}w_{fw}} + \frac{h_0 - h_{fw1}}{T_{H1}}$	$H(s) = \frac{1}{T_{H1}s + 1}$ donde: $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} ; Y(s) = h_{fw}(s)$ $X(s) = \frac{Q_{H1}(s)}{w_{fw}(s)} + h_0$
Calor transferido en el calentador	$Q_{H1} = HHFW1(W_{HP1} + W_{BLP4})$	
Balace de masa del Flujo lado carcaza, calentador	$\frac{dW_{HP0}}{dt} = \frac{W_{BLP4} + W_{HP1} - W_{HP0}}{T_{H1P}}$	$H(s) = \frac{1}{T_{H1P}s + 1}$ donde: $H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} ; Y(s) = W_{HP0}(s)$ $X(s) = W_{BLP4}(s) + W_{HP1}(s)$

Parámetros Relacionados.	Modelo Simulink.
$T_{H1} = 150$ Tiempo en el calentador, lado tubos. (Parámetro obtenido del documento 1)	
$HHFW1 = 263.042545$	
$T_{H1P} = 70$ Tiempo en el calentador. Lado carcasa. (Parámetro obtenido del documento 1)	

Los parámetros que se emplearon para la simulación inicial de los modelos, se obtuvieron de diversas fuentes, entre las cuales se encuentran los documentos de *Desarrollo de un Modelo de Simulación de Plantas Nucleoeléctricas Tipo BWR* [3] y el documento de Lahey y Moody [4]. Los parámetros que se aplicaban a las diversas variables que se necesitaban para los modelos, fueron colocados de acuerdo a las características de simulación de prueba de cada modelo, a fin de encontrar cierta independencia en los modelos, para así conseguir una mejor depuración y control de los mismos. Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores de diversos flujos y entalpías entre otras variables que se obtuvieron en las plantas de este tipo de reactor, de acuerdo a la bibliografía mencionada. La verificación de estos parámetros brinda la aproximación necesaria de acuerdo con un balance termodinámico de una planta y nos ayuda a certificar los modelos y los valores asignados.

3.4. Controladores del sistema de agua de alimentación.

Para regular el flujo de agua de alimentación que el sistema manejará en condiciones de estado estable, se desarrollo un controlador basado en las especificaciones del documento referente al desarrollo de modelos de simulación en plantas nucleares tipo BWR, y conforme a las estructuras y lineamientos generales que debe tener este tipo de controladores. Las características que este controlador demuestra responden a las

necesidades de estabilidad y convergencia, en los tiempos adecuados a los diferentes tipos de demandas, que las situaciones regulares y de emergencia de la planta pudieran demandar.

El controlador considera en su organización, los flujos que se presentan en diversas partes de la planta como el reactor y las turbinas, este tipo de variables, aunadas a las que el propio sistema de agua de alimentación pudiera proporcionar, conforman las diferentes etapas de control.

El controlador emplea controladores tipo PI, para la adecuación y estabilización de de las señales que recibe, así mismo emplea diversas implementaciones de segundo orden, para controlar los tiempos de estabilidad y amortiguamiento, adecuados para los tiempos propios de los sistemas particulares que pretende alterar el controlador.

Estas consideraciones son muy importantes, ya que si no se hiciera de esta manera, los cambios súbitos en los dispositivos mecánicos o térmicos que componen los sistemas de agua de alimentación e incluso otros sistemas, podrían verse afectados notoriamente, llegando incluso a la inutilización de los equipos.

El controlador de agua de alimentación, compara el flujo que viene del agua de alimentación actual, con el que esta circulando por la línea de vapor, esta diferencia o error es ponderada y estabilizada con un controlador PI.

El nivel de agua dentro del reactor también es otra variable que entra en el controlador, esta es nivelada y con otro controlador PI es adecuadamente proporcionada con el fin de que represente una variación similar a la que presenta el control PI que se obtuvo de la comparación de los flujos, como se mencionó en el párrafo anterior.

La unión de estas dos señales es estabilizada nuevamente por un controlador PI, que adapta la señal para que responda a los niveles que se necesitan para simular la dinámica de las válvulas de agua de alimentación.

La respuesta determinada por la dinámica de las válvulas a la señal generada por los errores, tanto de flujos como e nivel, es la que determina la diferencia que se agregara o sustraerá al nivel que el usuario del controlador desea para el agua de alimentación, de manera que los niveles, tanto de flujos, como de nivel, se estabilicen en los valores adecuados, de acuerdo con las necesidades del usuario.

Los parámetros asignados a los diversos sistemas no corresponden a ninguna planta específica, por lo que responden de manera general, a los diversos transitorios simulados. El posterior refinamiento y asignación de nuevos parámetros puede hacerse de manera sencilla, si se pretende adaptar su funcionamiento a los comportamientos del controlador de alguna planta específica. Una vez más los modelos fueron referenciados al documento de la IIE, y sus respectivas salidas comparadas con las respuestas de los controladores encontrados en diversos documentos como el trabajo de J. Lewins [5], los valores encontrados no representan una planta en específico, sino un conjunto de tendencias generales que deben tener este tipo de controladores. La adecuación de estos controladores a la emulación de respuestas reales de alguna planta es un proceso que puede realizarse posteriormente si se obtienen los tiempos y parámetros requeridos y si así se requiere.

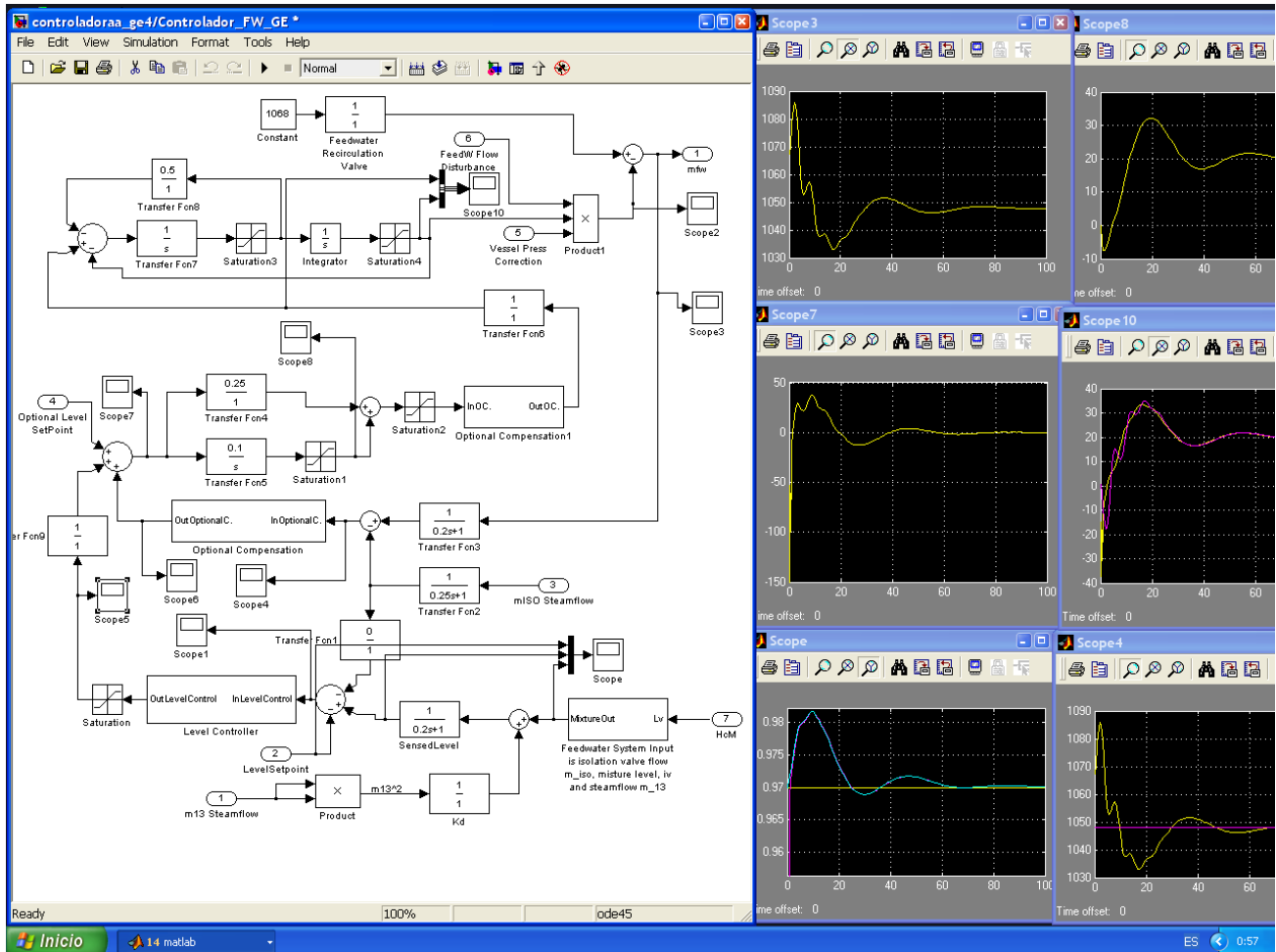


Figura 3. Esquema en Simulink del controlador de agua de alimentación con graficas de sus respuestas.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo describe el desarrollo de un simulador que representa la dinámica del sistema de agua de alimentación perteneciente a una planta nucleoelectrica con reactor nuclear de agua hirviendo, utilizando modelos de orden reducido e implementados en Matlab con una interfaz de usuario para Windows. El aprendizaje logrado durante el desarrollo de modelos de orden reducido, ha sido muy motivador para desmitificar la operación de componentes de la planta, amén de la utilidad de esta herramienta como medio para conocer los sistemas y respuesta de la planta de manera integrada. 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, como usualmente se analizan los modelos en manuales o textos como el manual de Ramona [6] lo que no es limitación para reproducir una amplia gama de transitorios anticipados de operación de una central. Las partes implementadas en Matlab fundamentalmente son el sistema nuclear

de suministro de vapor (NSSS), el balance de planta (BOP), los controladores principales de la planta y las interfaces gráficas implementadas. También se describen las metas pendientes así como los futuros desarrollos y aplicaciones de SUN-RAH.

REFERENCIAS

1. Sistemas de Control en Tiempo Discreto, K. Ogata, Prentice-Hall, 2da Edición.
2. Tablas de propiedades termodinámicas (fuentes en lenguaje C): “Steam Table Calculation Programs (freeware) “, <http://www.winsim.com/steam/steam.html>.(2003)
3. *Desarrollo de un Modelo de Simulación de Plantas Nucleoeléctricas 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
4. Richard T. Lahey, F.J. Moody, The Thermal-Hydraulics of a Boiling Water Nuclear Reactor
5. J. Lewins Nuclear Reactor Kinetics and Control, Pergamon Press.ISBN 0-08-021681-1
6. ScandPower, Ramona-3 User's Manual , rev 11, June 1995.