



MX0500057

*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*

## **Incorporación del Sistema de Control de Presión al Simulador de Aula**

***Jerson Sánchez Jaramillo***

*Universidad Nacional Autónoma de México*

*Facultad de Ingeniería*

*Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares*

*DEPFI Campus Morelos*

*shaqaul@hotmail.com*

***Asesores: Carlos Chávez Mercado, Juan Carlos Ramos Pablos***

*Universidad Nacional Autónoma de México*

*Facultad de Ingeniería*

*Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares*

*DEPFI Campus Morelos*

*cchavez2@cableonline.com.mx*

### ***Resumen***

En las centrales nucleoelectricas, los sistemas de información, apoyo para la toma de decisiones y entrenamiento son cada día más complejos e importantes. El presente trabajo es una contribución en este sentido, específicamente, es parte de una herramienta de entrenamiento y análisis desarrollada por el Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares (LAIRN) de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, que consiste esencialmente de un simulador de la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde; el Simulador de Aula, comprende los sistemas físicos que componen a la central e interfaces gráficas para su operación y el análisis de resultados. El proyecto del Simulador de Aula se lleva a cabo en módulos independientes que se integran al sistema total a medida que estos son desarrollados y probados.

El objetivo central de este trabajo consiste en el desarrollo, implementación y prueba de un modelo del sistema de control de presión de acuerdo a las características de la Central Nucleoelectrica de Laguna Verde, así como el desarrollo de los mímicos y despliegues gráficos necesarios para efectuar su operación interactiva desde monitores sensibles al tacto.

El modelo del sistema de control fue desarrollado utilizando como herramienta el código nuclear de simulación RELAP/SCDAP, diseñado para el análisis de los tipos de reactores nucleares más comunes en occidente, y permite las maniobras típicas en los modos de arranque, calentamiento y operación a potencia, mostrando un comportamiento adecuado durante los transitorios operacionales más comunes.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares (LAIRN), de la Facultad de Ingeniería (FI), de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), se desarrolla el Simulador de Aula para una central nucleoelectrica con un reactor del tipo BWR. En este simulador se pretende la representación y emulación de la instrumentación, paneles de control, y componentes de la Central Nucleoelectrica Laguna Verde (CNLV), en diferentes despliegues gráficos presentados en diferentes computadoras para su manipulación, monitoreo y control a través de monitores sensibles al tacto.

El simulador de aula se utilizará como una plataforma computacional con múltiples propósitos. Con la implementación e integración de códigos nucleares altamente especializados y mejoras en su interfase gráficas, el simulador de aula apoyará el estudio de factores humanos, diseño y optimización de recargas de combustible, pruebas de inestabilidad, diseño y mejora de sistemas nucleares, etc., apoyando fuertemente a actividades de investigación y docencia.

El desarrollo del Simulador de Aula se implantó como un sistema de múltiples computadoras, las cuales son controladas por una interfase gráfica avanzada. El sistema permite la representación virtual y emulación de paneles de control e instrumentación asociada, así como la exhibición de diversos despliegues gráficos de información [1, 2].

Par lograr un comportamiento correcto del Simulador de Aula, es necesario contar con una serie de modelos que funcionen de manera conjunta, una de los modelos que tiene una gran importancia para el funcionamiento correcto del modelo del reactor es el Sistema de Control de Presión.

## 2. BREVE DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL DE PRESIÓN

El Sistema de Control Electrohidráulico (EHC), se encarga de controlar la presión del reactor, la velocidad y carga de la turbina (regulando el flujo de vapor), durante todos los modos de operación<sup>1</sup> de la Central.

Este sistema, actúa sobre las válvulas principales de paro, de control, de derivación (bypass), de paro de recalentado y de las interceptoras de control. Tiene mecanismos de protección de la turbina y cuenta con la instrumentación de supervisión para el funcionamiento del turbogenerador. Está diseñado para modular las válvulas de derivación de la turbina junto con las válvulas de control y mandar al condensador principal el exceso de vapor del requerido por la turbina y mantener la carga de la central.

Si la potencia del reactor aumenta se produce un aumento de presión en el reactor y en cabezal igualador de presión, el aumento en el cabezal requiere que las válvulas de control de la turbina abran para regular éste incremento de vapor. Una disminución en la potencia del reactor causa una disminución de presión, esto requiere que las válvulas en el cabezal igualador cierren para

---

<sup>1</sup> Existen 5 modos de operación de la planta, arranque, calentamiento, operación a potencia, paro y enfriamiento.

disminuir el flujo de vapor a la turbina. De tal manera que el Sistema EHC está diseñado para que la turbina siga al reactor.

La admisión de vapor a la turbina es controlada por reguladores de presión y el punto de referencia de ajuste de presión se establece de forma manual (aunque existe un modo automático de seguimiento de carga que modifica el punto de ajuste para lograr la carga deseada), y estos dictan la posición de las válvulas de control y de derivación para mantener la presión constante. El sistema de válvulas de derivación manda cualquier exceso de vapor de la turbina hacia el condensador principal. Estas válvulas controlan la presión del reactor y controlan la demanda de la turbina para que la presión en el cabezal igualador se mantenga constante. Son muy utilizadas por el sistema en situaciones de arranque, disminuciones súbitas de carga y operaciones de salida de máquina.

La presión en el cabezal igualador es comparada con una presión de referencia en los reguladores, de donde se genera una señal de error. Esta señal es convertida a una señal de demanda de posición, para la apertura o cierre de las válvulas y es enviada al Subsistema de Control Electrohidráulico (parte hidráulica), para posicionar las válvulas. La banda de "regulación de presión" de diseño (para operación normal), tiene un valor de 2.1 kg/cm<sup>2</sup> (30 psi) por lo tanto, la presión de referencia inferior (para operación normal), será de 66.1 kg/cm<sup>2</sup> (940 psi), y la presión a la entrada de la turbina es de 68.2 kg/cm<sup>2</sup> (970 psi).

El sistema de control de derivación controla la presión de vapor cuando la generación de vapor en el reactor excede la capacidad de las válvulas de control. La capacidad máxima de las 3 válvulas de derivación es de aproximadamente del 25%. Este sistema también controla la presión durante el calentamiento y presurización de la vasija, en situaciones de aceleración de la turbina, hasta alcanzar la velocidad de sincronización y durante el enfriamiento de la vasija del reactor [3].

## **2.1. Propuesta para el Simulador de Aula:**

Para el Simulador de Aula, se simplificó el sistema de control de presión de tal manera que sólo se contempla una línea de vapor que llega al cabezal concentrador y una sola línea que llega a la turbina de alta presión, así como una sola línea de sistema de derivación que va al condensador principal. Esto es porque en principio las 4 líneas de vapor del cabezal, y el resto de las tuberías, se comportan de una manera similar. Estas simplificaciones se hicieron considerando los equivalentes de flujo másico total, presión y temperatura promedio.

Para lograr un funcionamiento correcto del Simulador de Aula es necesario contar con varios sistemas de simulación para su incorporación al mismo, estos trabajos se desarrollan de manera conjunta en el Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, por un grupo de trabajo [4, 5].

Para el desarrollo del modelo se utilizó el código nuclear RELAP, el cual se presenta en la siguiente sección.

### 3. LA HERRAMIENTA RELAP

El código nuclear RELAP5, utilizado ampliamente para análisis de transitorios para reactores de agua ligera (LWR), fue desarrollado en el Laboratorio Nacional de Ingeniería de Idaho (INEL), Estados Unidos de Norte América, a solicitud de la Comisión Reguladora Nuclear (NRC).

Tiene aplicaciones específicas incluyendo la simulación para LWRs, Accidentes por pérdida de refrigerante, transitorios anticipados sin SCRAM (ATWS), transitorios con pérdida de agua de alimentación, pérdida de energía interna y externa, disparo de turbina, además de modelar la liberación de productos de fisión durante un accidente severo. Además, incluye procesos como la pérdida de la geometría del reactor, variación de flujo por el cambio de área, ramificación de flujo y concentración de boro. Este código cuenta con una serie de manuales en los que se puede encontrar toda la información para su utilización [6].

El código RELAP hace un procesamiento estricto de la información del archivo de entrada, cada línea es identificada por el número de tarjeta y por la información que contiene cada una de ellas. En las líneas de código puede haber variables de punto flotante, alfanuméricos o enteros, que pueden estar separados por uno o más espacios en blanco.

Las tarjetas pueden ser introducidas en cualquier orden, siempre que se cumpla con la estructura requerida por el código, en caso de que alguna tarjeta se repita a lo largo del archivo de entrada, se hace caso omiso de la primera encontrada y se toman en cuenta los datos de la segunda tarjeta.

Es recomendable que se mantenga un orden al introducir las tarjetas, esto es para facilitar las revisiones y modificaciones posteriores al código, además de ser recomendable introducir comentarios en las líneas que sirvan de apoyo a la comprensión del archivo de entrada. Toda línea que se encuentre después de un (\*) se considera como un comentario.

En el código RELAP5, las tarjetas de control están definidas por el número inicial 205, definidas en el manual [6] como 205CCCNN ó 205CCCCN (datos de entrada del sistema de control).

Estas tarjetas se usan en problemas NEW y RESTART, si el sistema de control es deseado. Éstas sólo son usadas si se definen componentes genéricos de control empleados con opciones de autoinicialización.

Dos tipos diferentes de tarjetas están disponibles para introducir datos del sistema de control, pero sólo un tipo es usado por problema. Los dígitos CCC o CCCC son el número de la variable de control (el número del componente de control), esto es, si se introduce al código una tarjeta 205100 por ejemplo, los segundos tres dígitos indican que se trata del componente de control número cien.

El formato de las tarjetas 205CCCNN permite 999 variables de control, donde CCC está en el rango de 001 a 999. El formato de las tarjetas 205CCCCN permite 9999 variables de control, donde CCCC está en el rango de 1 a 9999.

La estructura de las tarjetas de control en el código RELAP es la siguiente. Debe ser introducida una tarjeta por cada componente de control cuando se usa la opción de autoinicialización [6].

El formato general que debe seguirse al introducir las tarjetas al código, es el siguiente:

- ❖ W<sup>2</sup>1 (A) Nombre alfanumérico. Éste es un nombre descriptivo del componente. Este nombre puede ser impreso en el archivo de salida, con el número del componente. El límite es de 10 caracteres para computadoras CDC 7600, y de 8 caracteres para otro tipo de computadoras.
- ❖ W2 (A) Tipo de componente de control. Se debe de introducir uno de los siguientes nombres: SUM, MULT, DIV, DIFFERENI, DIFFREND, INTEGRAL, FUNCTION, STDFNCTN, DELAY, TRIPUNIT, TRIPDLAY, POWERI, POWERR, POWERX, PROP-INT, LAG, LEAD-LAG, COSTANT, SHAFT, PUMPCTL, STEAMCTL, O FEEDCTL, o el comando, DELETE. Si DELETE es introducido, se puede poner cualquier palabra en W1, y ceros en el resto de las palabras.
- ❖ W3 (R) Factor de escalamiento. Es un valor constante. No introduce palabras adicionales en esta tarjeta, y en las tarjetas 205CCC01 a 205CCC09, o 205CCCC1 a 205CCCC9, no se introduce. Para los componentes PUMPCTL, STEAMCTL, o FEEDCTL, es para el signo de salida.
- ❖ W4 (R) Valor inicial.
- ❖ W5 (I) Bandera de valor inicial. Un cero, significa que no tiene condición inicial, si se pone un uno, significa que calcula una condición inicial.
- ❖ W6 (I) Limitador de control. Si se ingresa un cero o se omite, no tiene límites la variable de control, las siguientes palabras se omiten también. Si se ingresa un uno, sólo tiene límite inferior o mínimo. Si se ingresa un dos, sólo tiene límite superior o máximo. Si se ingresa un tres se establecen máximo y mínimo.
- ❖ W7 (R) Valor máximo o mínimo. Esta palabra es un valor máximo o un mínimo, sólo un límite es establecido. Puede ser un valor mínimo, si ambos valores son establecidos.
- ❖ W8 (R) Valor máximo. Esta palabra es usada si ambos límites son establecidos.

El formato específico de cada tarjeta depende del tipo de componente de control.

### 3.1. Implementación del Sistema de Control de Presión en el Código RELAP:

Para facilitar la comprensión del modelo se utiliza un diagrama a bloques, en donde con las consideraciones propias de RELAP, se representan los componentes utilizados y sus lazos de unión. A continuación se explica el funcionamiento del sistema especificando los valores típicos de salida de cada bloque para el estado estacionario a condiciones nominales de operación.

La Figura 1, muestra el diagrama de control de de presión de entrada a la turbina, el cual se utiliza como referencia en la siguiente descripción.

El código de la simulación empieza en la tarjeta 200, que es un multiplicador, en donde se toma la presión del volumen 527010000 que corresponde al cabezal igualador de presión y es multiplicado por un factor para convertir la presión medida en el cabezal, de Pascales a Libra por

---

<sup>2</sup> W, se utiliza como abreviatura de Word (palabra).

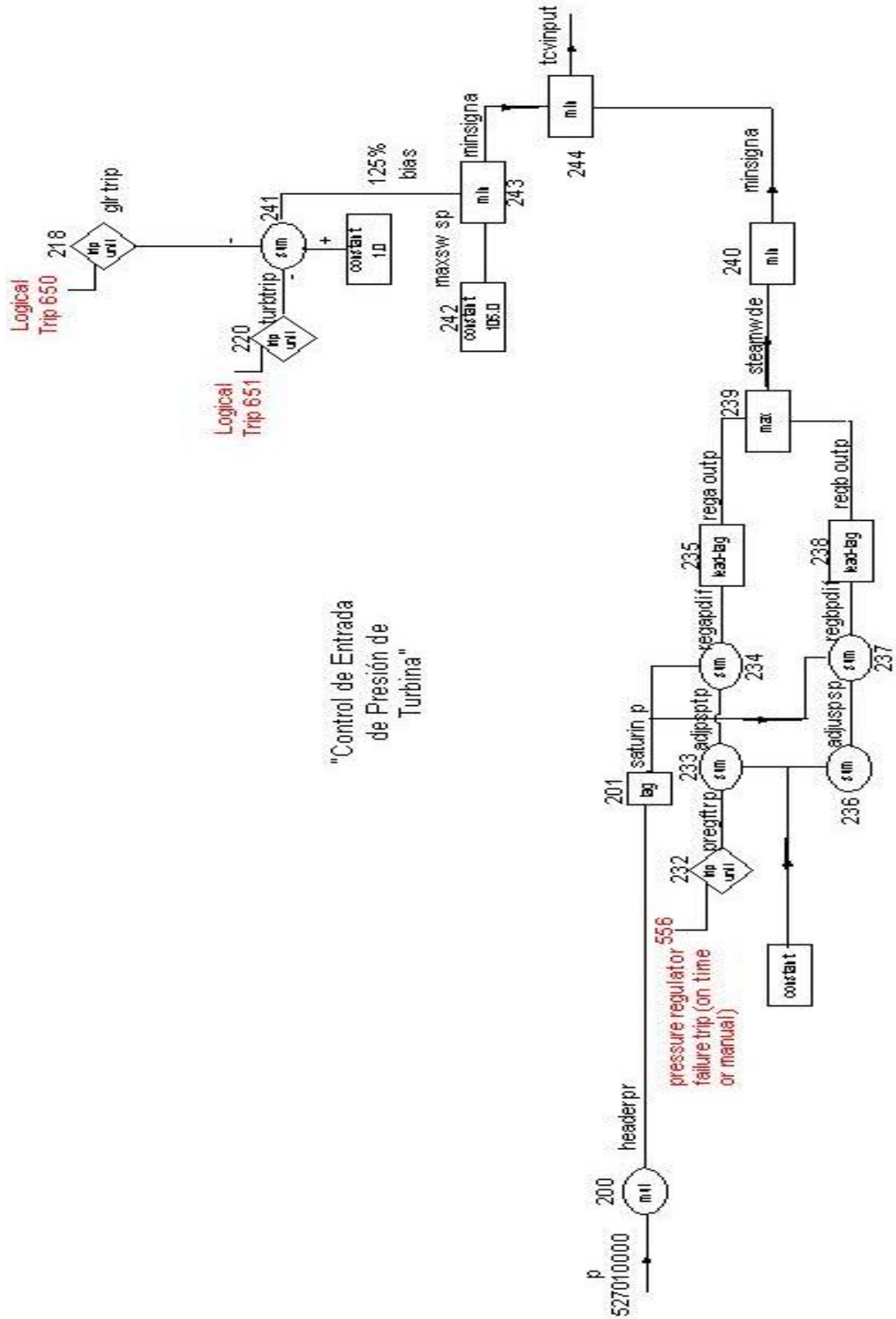


Figura 1. Diagrama de flujo para el control de presión de entrada a la turbina.

Pulgada cuadrada, la salida es de 970.65 psi. Este valor ingresa a un retardo en la tarjeta 201, que sirve para simular la dinámica del medidor de presión y sólo retrasa un poco la salida de la variable sin modificar su valor.

La tarjeta 232 es un disparo del control de presión para generar el transitorio de Falla de Control de Presión en Abierto, el valor de salida es cero para la operación normal, con lo que en el sumador 233 se provee un valor inicial para el punto de ajuste de 947.3 psi que proviene de la constante dada en la tarjeta 231. Si el disparo 556 es verdadero, la tarjeta 232 da una salida de uno, con lo que en la tarjeta 233 se restan 999 psi al valor del punto de ajuste, lo que hace que el error de salida en el siguiente bloque sea exageradamente grande y se tenga como resultado una apertura rápida de las válvulas simulando la falla del regulador de presión en abierto.

El valor de salida de la tarjeta 201, que es la presión medida en el cabezal y la tarjeta 233 ingresan a un sumador, tarjeta 234; en éste se resta el valor del punto de ajuste al de la presión medida del cabezal y se tiene una salida de 25.65 psi, esta cantidad cuando se encuentra en la tarjeta 235 (lead-lag), es multiplicada por una constante con un valor de 3.333 (% flujo total de regulación / psi), para tener como salida un 77.85 % de flujo total de regulación.

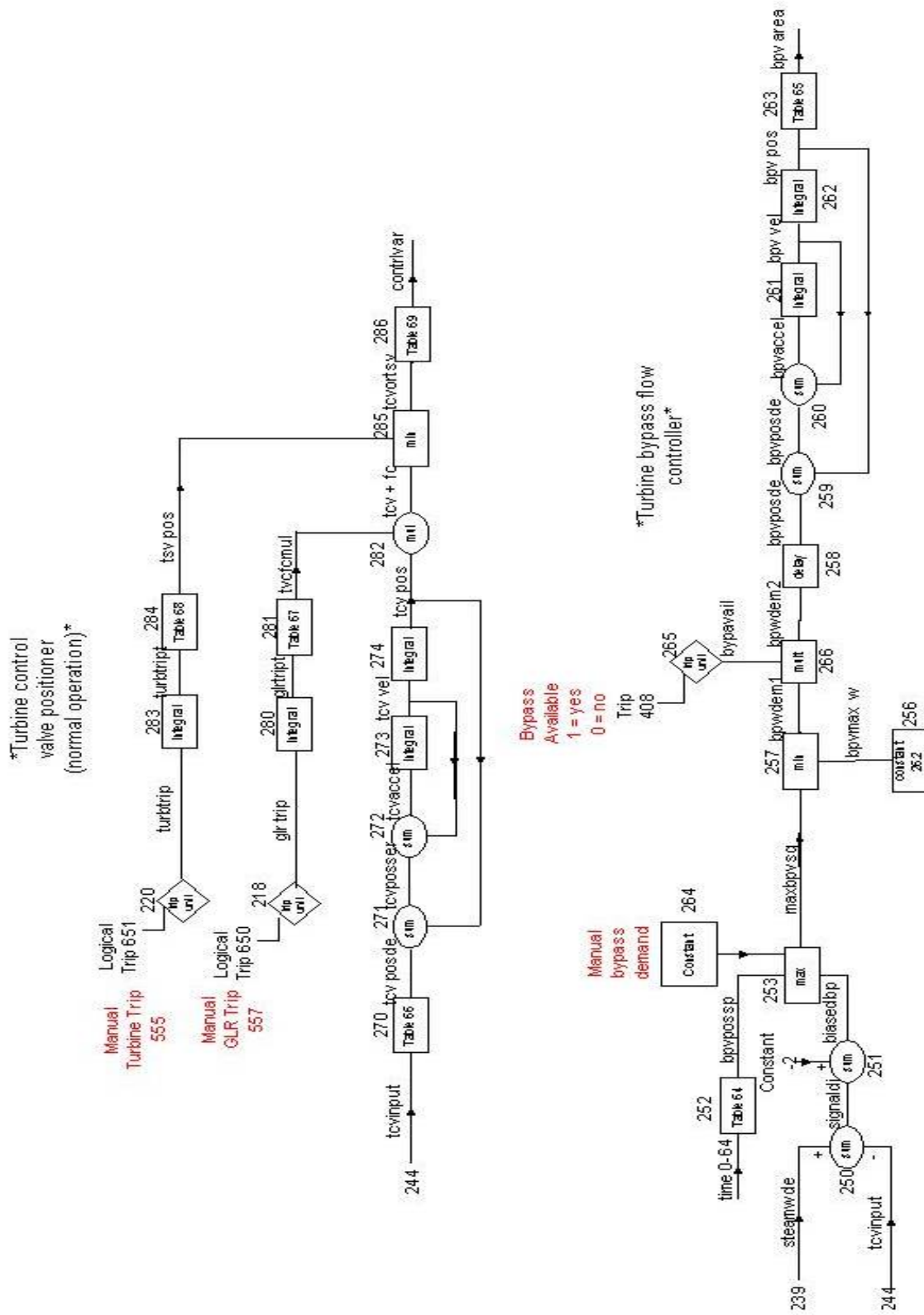
De la tarjeta 236 a la 238 es el mismo sistema descrito anteriormente, sólo que en este se incrementa en 3 unidades el valor de la tarjeta 233 para obtener resultados más pequeños a la salida de la tarjeta 238 (lead-lag). Este lazo del diagrama es de respaldo, si falla el principal que es el da las tarjetas 233 a la 235, este sistema toma el control.

En la tarjeta 239 (max), se hace una comparación entre los valores de ambas unidades reguladoras, provenientes de las tarjetas 235 y 238 para obtener el valor máximo.

El sistema de tarjetas de la 218, 220, 241 a la 243, es el de control de disparo de la turbina y el generador, si alguno de los dos es activado a través de los disparos 650 ó 651, el valor a la salida de las tarjetas 218 ó 220 es la unidad. Estos se introducen con signo cambiado al sumador 241, que tiene un factor de escala de 125, con lo que cambia su salida de 125 a cero y por consiguiente también la salida en la 243, que es un mínimo, y 244 (min), es cero. El sistema de disparo de turbina y generador deben ser independientes porque responden a tiempos distintos, el disparo del generador responde en un tiempo típico de 0.035 s, mientras que el disparo de la turbina lo hace en 0.1 s.

La constante de la tarjeta 242 es para especificar el flujo máximo admisible a la turbina (105%). Mientras no exista un disparo de turbina o de generador que anule el valor de salida de 241, es el valor de 242 (105%) el que pasa por el min de la tarjeta 243 al compararse con el valor bias de 125. Si la demanda de flujo de vapor de 240 es menor al dado por 242 (que puede ser cero si ha habido disparo de turbina o generador, o 105% si se tiene operación normal), pasa el valor del control de presión, de lo contrario, pasa el valor de 242.

La figura 2, muestra los diagramas de control de posición de la válvula de control de la turbina, y el control de flujo de derivación de la turbina, que a continuación se describen.



**Figura 2. Diagramas de control de posición de la válvula de control de la turbina, y control de flujo de derivación de la turbina.**



En el diagrama de control de posición de la válvula de la turbina para una operación normal, entra el valor de salida del diagrama anterior, (salida de la tarjeta 244), en la tarjeta 270 que hace una consulta la tabla 66, que contiene la posición de la válvula de control de la turbina contra la señal de demanda de la válvula de control de la turbina que se recibe de la tarjeta 244 y la salida es el valor al que debe llevarse la posición de la válvula de control.

En el sumador de la tarjeta 271 se resta el valor de la salida de la integral de la tarjeta 274 que es la posición real de la válvula al de la tarjeta 270, que es para obtener el error entre la posición deseada y la real de la válvula de control de la turbina. El mismo proceso ocurre en el sumador de la tarjeta 272, en donde se resta la salida del integrador 273 que es la velocidad a la que se mueve el vástago de la válvula de control a la de la tarjeta 271 para obtener la aceleración del vástago de la válvula de control de la turbina a la salida del sumador 272, a la salida del integrador 273 se tiene la velocidad de la misma válvula y a la salida del integrador 274 la posición. Cuando ocurre el disparo de la turbina, se tiene un 1 en la salida de la tarjeta 220 y este valor se ingresa al integrador 283, que sólo integra el tiempo transcurrido para darlo como entrada a la tabla 68 de la tarjeta 284, que finalmente proporciona la posición de la válvula como función del tiempo después del disparo.

Ocurre un proceso similar en el disparo del generador, si se tiene un 1 en la tarjeta 218, la tarjeta 280 integra el tiempo transcurrido y este valor es ingresado a la tabla 67, de la que se obtiene la posición deseada como función del tiempo a la salida de la tarjeta 281. Cuando hay un cero a la salida de la tarjeta 281, se multiplica este por el valor de salida de la 274, teniendo como salida en el sumador de la tarjeta 282 un cero y haciendo cero el resto de las salidas de las tarjetas.

En el control de flujo de derivación se tienen como entradas las tarjetas 244 y 239. En operación hasta a 100% de potencia tienen el mismo valor y al entrar al sumador de la tarjeta 250 una se resta de la otra, la salida es cero y el resto de las salida son cero en todo el sistema. Esto es correcto porque quiere decir que se está permitiendo el 100 % de flujo hacia la turbina sin que sea necesario el uso del sistema de derivación. El valor de la salida de la tarjeta 239 es la demanda total de flujo de vapor, y la salida de la tarjeta 244 es la cantidad de flujo permitido a la turbina. El valor de la tarjeta 244 puede ser modificado si no se quiere tener una operación de la central al 100 %. Si la salida de la tarjeta 250 es diferente de cero, se solicita la apertura de la válvula de bypass, la tabla 64 de la tarjeta 252 proporciona la posición de la válvula de derivación contra el tiempo, la tarjeta 264 es una constante que permite la demanda manual del sistema de derivación obligando a tener abierto el sistema al porcentaje de flujo deseado, si este sistema es activado se sigue un proceso similar al descrito en el control de la turbina para obtener posición, velocidad y aceleración de la válvula de derivación.

La tarjeta 265 es un disparo para habilitar o deshabilitar el sistema de derivación, si se encuentra deshabilitado no hay forma de que se abra la válvula de derivación aunque esta sea requerida. La tarjeta 256, nos da el máximo flujo permitido hacia el sistema de derivación, es un limitador que no permite un flujo mayor al de esta constante.

Para el Simulador de Aula también se desarrollan interfaces gráficas para manipulación, monitoreo y control, las cuales se describen en la siguiente sección.

## 4. INTERFACES GRÁFICAS

Para el desarrollo de las interfaces gráficas se utiliza el software especializado DataViews actualmente propiedad de General Electric. Con esta poderosa herramienta se pueden crear aplicaciones sumamente elaboradas para monitoreo y control de procesos en tiempo real. DataViews cuenta con el DV-Draw, que es un potente editor para desarrollar interfaces gráficas dinámicas con adquisición de datos [7].

Con el editor DV-Draw, se pueden crear dibujos detallados para su manipulación. Se pueden crear objetos gráficos complejos (instrumentación virtual, mímicos, pictoriales, gráficas de tendencia, etc.) en los que se puede incluir dinámica diversas, emulando las características y comportamiento reales. Es posible conectar dinámicas de varios tipos de datos, incluyendo ODBC (*Open DataBase Connectivity*) que hace posible el acceso a bases de datos y fuentes de datos. Se pueden agregar reglas para manipular las vistas para controlar y efectuar acciones sobre los elementos creados. Las interfaces gráficas para control de las vistas creadas, finalmente son programadas en lenguaje de programación C para su manipulación.

Para el sistema de control de presión se tienen 5 vistas que fueron realizadas de tal manera que fueran lo más similares a los controles reales, basados en el panel BB-13 de la CNLV. Las vistas son:

- ✓ Panel de Control BWR
- ✓ Control MSR
- ✓ Panel del Operador
- ✓ Disparo Turbina y Flujo EHC (Control Electrohidráulico)
- ✓ Conjunto de las 4 vistas anteriores

En la Figura 3 se muestra el conjunto de las vistas del panel BB-13 con las que cuenta el Simulador Aula hasta el momento.

La interfaz de control además cuenta con funciones de desplazamiento vertical, horizontal y diagonal, que permiten mover el centro de visión en cualquier dirección y obtener con esto el despliegue en pantalla de cualquier sección deseada

Al ampliar las imágenes, se ven con claridad todos los instrumentos de monitoreo y control, así como sus leyendas. Mediante esta representación de la instrumentación el usuario puede realizar diferentes acciones sobre los despliegues (mover alguna perilla, oprimir un botón, etc.), haciendo contacto con el dedo sobre el monitor sensible al tacto en el texto o en el símbolo que representa la acción deseada. Es importante mencionar que al momento, solamente se ha implementado la emulación dinámica de aquellos instrumentos que muestran el valor de alguna variable proporcionada actualmente por el modelo.

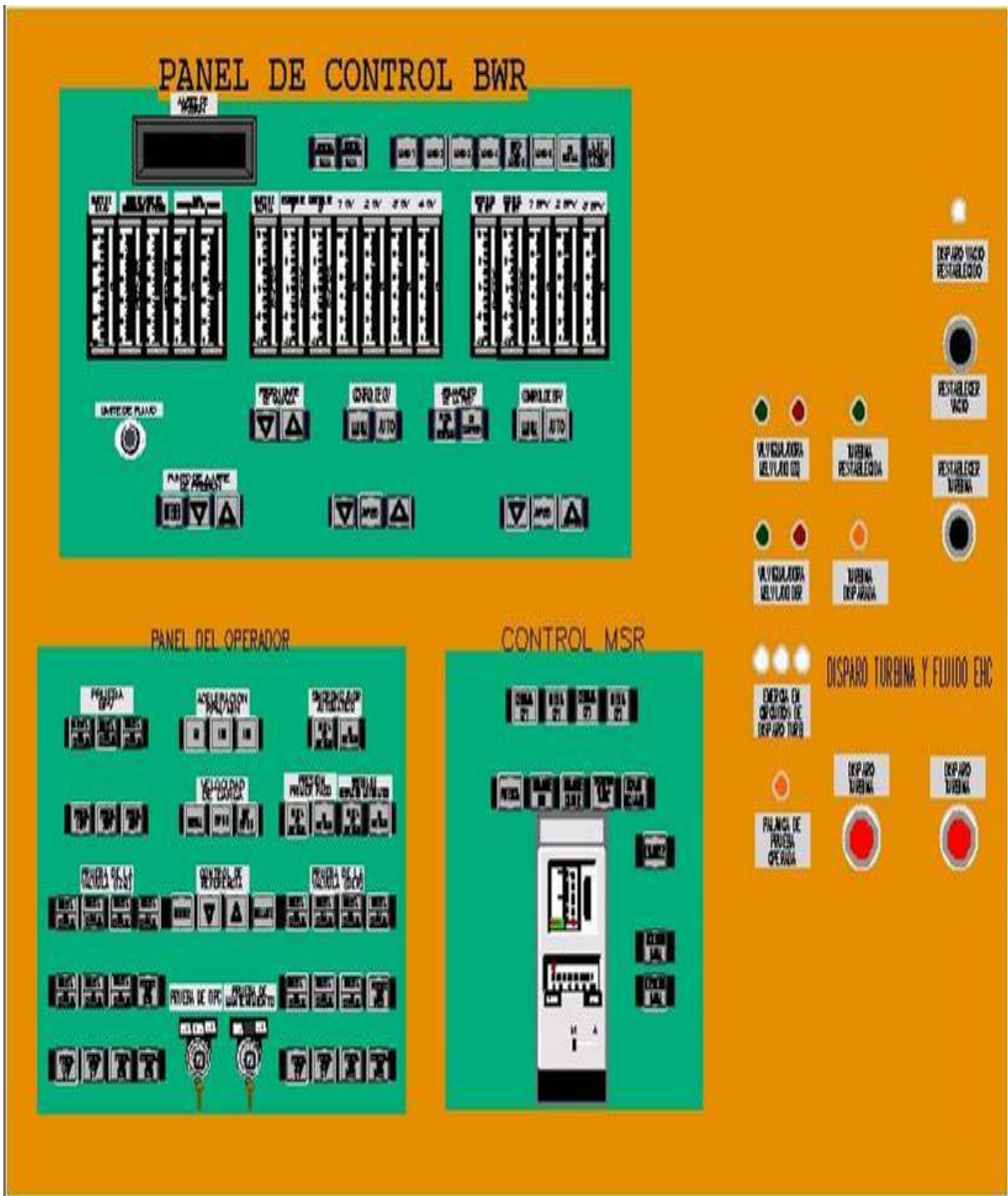


Figura 3. Parte del panel BB-13 para el simulador de aula.

En la siguiente sección se presentan las pruebas efectuadas al Sistema de Control de Presión para el Simulador de Aula.

## 5. PRUEBAS DEL SISTEMA

Las pruebas que se realizaron al modelo de control de presión del reactor, incorporado al Simulador de Aula fueron las siguientes:

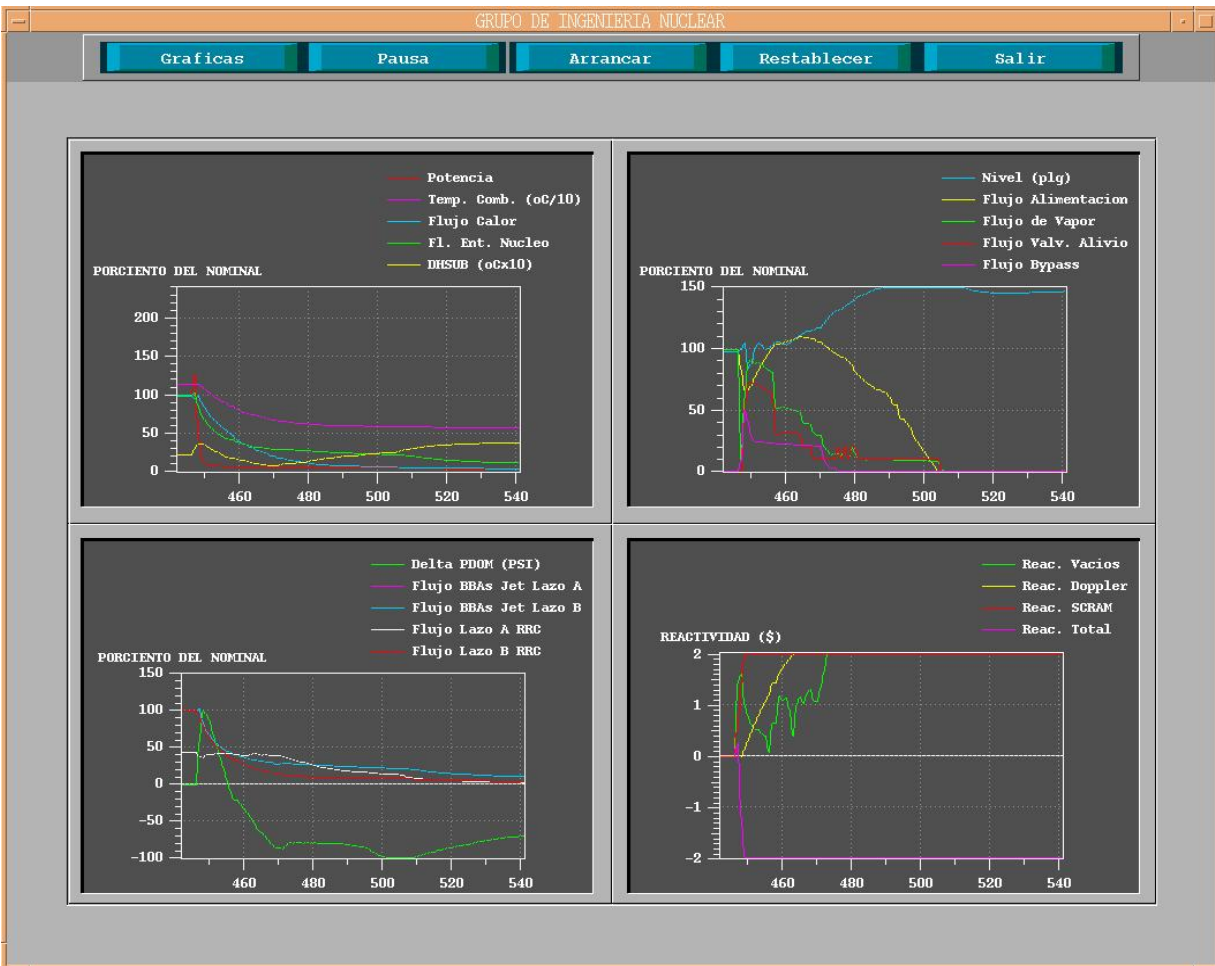
- Modificación del valor del máximo flujo másico permitido en la turbina en la tarjeta 242.
- Cambio del valor del sumador en la tarjeta 245 para afectar el punto de ajuste del regulador de presión (setpoint).
- Cambio del valor de la tarjeta 256, que es la una constante que indica la cantidad máxima de flujo de vapor permitido hacia el sistema de derivación.
- Cambio en la demanda manual del sistema de derivación con la tarjeta 264.
- Disparo de la turbina.
- Disparo del generador.
- Falla del regulador de presión en abierto.
- Habilitación o inhabilitación del sistema de derivación.

En la Figura 4 se muestra el disparo de la turbina con el sistema de derivación habilitado. En este transitorio se cierran las válvulas de paro de la turbina, se inicia el SCRAM del reactor, las válvulas del sistema de derivación abren, se disparan las bombas de recirculación.

Cuando se dispara la turbina se involucran un gran número de sistemas y fenómenos de gran importancia. El disparo de la turbina es particularmente sensible a los cambios de flujo de vapor, por eso se tiene una interacción entre el disparo de la turbina y las válvulas de control. Las válvulas de control son generalmente cerradas de manera parcial para controlar el flujo de vapor.

La secuencia de eventos que se presentan al disparar la turbina son los siguientes:

- Se inicia el cierre de las válvulas de paro de la turbina.
- Se inicia la operación del sistema de derivación.
- Al cerrarse las válvulas de paro de la turbina principal se inicia el SCRAM del reactor.
- Cuando se cierran las válvulas de paro de la turbina principal se inicia el disparo de las bombas de recirculación.
- Cierre total de las válvulas de paro.
- El sistema de derivación abre para regular la presión.
- Las válvulas de alivio actúan.
- Las válvulas de alivio cierran.
- Las válvulas de alivio entran en un ciclo Abierto-Cerrado (en el caso de no contar con el sistema de derivación).



**Figura 4. Graficas de tendencia correspondientes a la prueba de disparo de la turbina**

Por cuestiones de espacio en el presente trabajo no es posible mostrar los resultados de todas las pruebas, sin embargo los resultados de todas ellas confirman el correcto funcionamiento del modelo de control propuesto en los distintos rangos de operación.

## 6. CONCLUSIONES

Todas las pruebas de operación descritas en la sección anterior fueron ejecutadas en el modelo de control integrado al simulador de aula, mostrando los resultados esperados, por lo que es posible concluir de la evaluación y las pruebas realizadas, que el sistema de control de presión desarrollado e implementado cumple con los requerimientos necesarios para su incorporación al Simulador de Aula del Laboratorio de Análisis en Ingeniería de Reactores Nucleares.

En un trabajo futuro se pretende incorporar al Simulador de Aula los sistemas de control y otros modelos del Balance de Planta para mejorar su funcionamiento integral, como por ejemplo, simular el sistema de agua de alimentación, y los calentadores de agua de alimentación para cerrar el ciclo de operación.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), a la Facultad de Ingeniería de la UNAM, a sus asesores y a todos los involucrados en el proyecto por el apoyo técnico y financiero que hicieron posible la realización del presente trabajo.

## REFERENCIAS

1. C. Chávez Mercado, "An Advanced Graphical Human-Machine Interface for a Classroom Analysis Simulator of Nuclear Processes." *Proceedings of the IERE Workshop on Human Factors in Nuclear Power Plants*. Operation Session (2) Interface. TEPCO R & D Centers, Tokio, Japan. May. 27 -30 (1996).
2. C. Chávez-Mercado, "A Classroom Analysis Simulator for the Laguna Verde Nuclear Power Plant." *Proceedings of the ANS International Topical Meeting on Nuclear Plant Instrumentation, Control, and Human-Machine Interface Technologies*. The Pennsylvania State University, PA. May.6 – 9. **Vol. I**, pp 445-450 (1996).
3. Curso de tecnología CNLV (CD ROM). Comisión Federal de Electricidad.
4. José Humberto Salazar Cravioto, "Desarrollo de un Modelo de la Central Nucleoeléctrica Laguna Verde Basado en el Código RELAP/SCDAP y su Incorporación a un Simulador de Aula para el Análisis de Eventos Transitorios y Accidentes Postulados." Tesis de Maestría en Energía, Facultad de Ingeniería, UNAM (en Proceso).
5. Francisco Samuel Cortés Martell, "Desarrollo de Interfaces Gráficas Avanzadas Prototipo Basadas en los Códigos Nucleares RELAP/SCDAP y MELCOR." Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM (2003).
6. RELAP/MOD3 Code Manual. Code Structure, System Models, and Solution Methods. Vol. 1-7. The RELAP Development Team. Idaho National Engineering Laboratory (1994).
7. DataViews. DV-Tools Reference Manual, DV-Tools User's Guide. DataViews Corporation. Northampton, Ma. USA (1995).