

MODELADO DE SISTEMAS TERMOHIDRAULICOS PARA USO EN SIMULADORES DE ENTRENAMIENTO Y DESARROLLO DE REACTORES NUCLEARES.

Castelao Caruana M., Molina G., Pierini J.

Centro Atómico Bariloche, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Resumen: En el presente trabajo se describe el modelado del sistema de Purificación y Control de Volumen y del sistema de Refrigeración en Parada y Calentamiento en Arranque a ser usado en el simulador del Reactor CAREM25. A su vez se describen las herramientas utilizadas para el desarrollo de estos modelos.

THERMOHYDRAULIC MODELING SYSTEMS FOR USE IN TRAINING SIMULATORS AND DEVELOPMENT OF NUCLEAR REACTOR

Abstract: The present work describes the modeling of the Purification and Volume Control System and the Cooling Shutdown and Heating Startup System to be use in the CAREM25 reactor simulator. Also, this work describes the tools used for the development of these models.

Introducción: Los simuladores de entrenamiento de operadores constan de tres partes principales: la interfaz humano-sistema (HSI) que emula el sistema SCADA de la planta, los modelos matemáticos que emulan la dinámica de la planta y por último la consola del instructor, desde donde se comanda la simulación, se introducen fallas y/o se implementan acciones de campo. El operador supervisa directamente los principales sistemas de la planta (núcleo del reactor, sistemas de refrigeración, sistemas de protección del reactor, etcétera). Debido a esto, para cada uno de estos sistemas, se modela las variables que se conectan con el sistema SCADA de la planta, como así también las asociadas a acciones de campo. El alcance de estos modelos permiten que el operador realice las mismas acciones que en la planta real para operar el reactor; tanto para situaciones normales como de emergencias previstas en la base de diseño. Estos modelos deben poseer la capacidad de simular la dinámica de la planta de manera que el operador pueda decidir las acciones a realizar ante la ocurrencia de un evento en tiempo real.

Motivación: En el Grupo de Control de Procesos del Centro Atómico Bariloche se está desarrollando el simulador del reactor CAREM25. Este Simulador se utilizará como herramienta de soporte para el entrenamiento de los operadores, para el análisis y diseño de las regulaciones principales del reactor y para la verificación preliminar de las maniobras operativas del reactor. Debido a esto es necesario modelar los principales sistemas termohidráulicos que componen al reactor.

Desarrollo y descripción

En la actualidad el simulador del Reactor CAREM25 cuenta con los siguientes modelos:

- Sistema Primario (0100)
- Sistema de Purificación y Control de Volumen (1400)
- Sistema de Refrigeración en Parada y Calentamiento en Arranque (1900)
- Sistema Secundario (4005)
- Sistema de Control (6000)

Los modelos del sistema primario y secundario fueron desarrollados en RELAP mientras que los demás sistemas se desarrollaron en el entorno Matlab/Simulink (Figura 1).

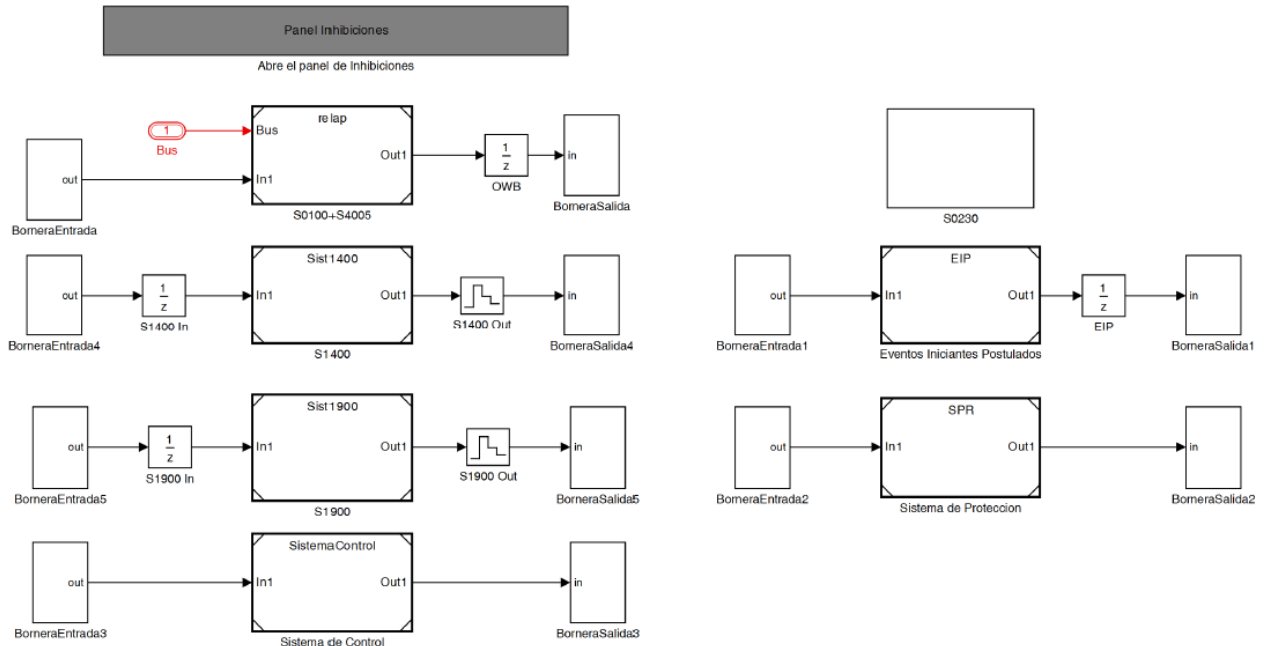


Figura 1: Diagrama de bloques del Simulador CAREM25 donde se aprecian los distintos sistemas que están modelados.

La comunicación entre RELAP y MatLab/Simulink® se realiza en línea a paso de tiempo fijo a través de una herramienta desarrollada en el grupo de trabajo denominada “Relap Service”.

Desde el punto de vista de RELAP, las señales de salida pueden incluir todas las magnitudes correspondientes a volúmenes como así también juntas de RELAP [2]. Las señales de entrada son consideradas por el código RELAP como “*cntrlvar*” de manera que, a través de Simulink, se pueden accionar válvulas, definir presiones o temperaturas en los componentes tipo “*tmdpvol*”, caudales máscicos en las juntas tipo “*tmdpjun*”, etcétera.

Los modelos del *Sistema de Purificación y Control de Volumen* (Sistema 1400) y el *Sistema de Refrigeración en Parada y Calentamiento en Arranque* (Sistema 1900) se realizaron a partir de bibliotecas desarrolladas en el Grupo de Control de Procesos del Centro Atómico Bariloche. Estas bibliotecas comprenden sensores, actuadores y componentes termohidráulicos. Para complementar su funcionalidad, estos componentes poseen además una apariencia similar a los diagramas utilizados para describir componentes e instrumentación (P&ID). Las señales vinculadas a los sensores y actuadores están vinculadas a una base de datos de manera de centralizar todas las señales presentes en el simulador facilitando a su vez la integración con los distintos modelos.

Biblioteca “Sensores”

La biblioteca de Sensores fue desarrollada para modelar los distintos instrumentos de medición presentes en la planta. Estos componentes representan las señales de salida de los modelos termohidráulicos que se conectaran con los Sistemas de Control, Protección y Consola de Instructor. El modelo de sensores incluye señal de alimentación (proveniente del sistema eléctrico o neumático), señal de falla y valor de la medición en caso de falla (ambas señales provenientes de Consola de Instructor). Existen dos tipos de componentes, los analógicos y los digitales (Figura 2).



Figura 2: Biblioteca de Sensores. a) Sensor analógicos, b) Sensor digital

Los parámetros que definen al componente sensor son:

- Output value when disconnected: Señal de salida al desconectar fuente de alimentación.
- Time constant: Constante de Tiempo del sensor.
- Outputs limits: Rango del Instrumento.
- Noise: Valor de Offset y varianza del ruido

- Enable noise: Des habilitación del ruido (utilizado en el debug del modelo).
- Input conversion: Conversión de unidades.

Los sensores digitales están modelados de manera lógica siendo los parámetros que definen el componente:

- Output value when disconnected: Señal de salida al desconectar fuente de alimentación.
- Threshold: Valor limite donde el switch cambia de valor lógico
- Dead zone: modelado de histéresis en switch.
- Input conversion: Conversión de unidades.

Biblioteca “Actuadores”

La biblioteca de Actuadores fue desarrollada para modelar los distintos tipos de válvulas que se encuentran en el reactor CAREM25. Estos componentes representan las señales de entrada al modelo termohidráulico que se conectarán con el Sistema de Control y la Consola de Instructor. Al igual que el modelo de sensores, los modelos de válvulas incluyen señal de alimentación (proveniente del sistema eléctrico o neumático), señal de falla y posición del vástago en caso de falla (ambas señales provenientes de Consola de Instructor). La biblioteca cuenta con cuatro tipos de válvulas (Figura 3), válvula de control y válvula ON/OFF donde cada una de ellas puede ser neumática o motorizada.

Las válvulas motorizadas poseen como señales de entrada; comando para abrir y comando para cerrar, mientras que las neumáticas poseen una sola señal de entrada: comando de apertura/cierre. Las señales de salida son: indicación de válvula abierta, indicación de válvula cerrada y posición de vástago.

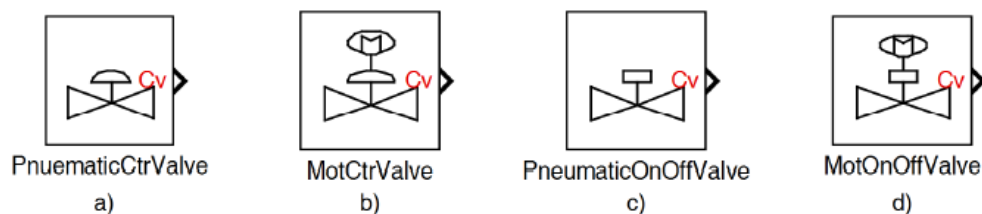


Figura 3: Biblioteca de actuadores. a) Válvula de Control Neumática, b) Válvula de Control Motorizada, c) Válvula de ON/OFF Neumática, d) Válvula ON/OFF Motorizada.

Los parámetros que definen el modelado de los actuadores son:

- Aperture vector: Curva de apertura de la válvula
- Cv vector: Curva de Cv de la válvula en función de la apertura
- Opening/Closing rate [Ap/s]: Velocidad de apertura/cierre de la válvula.
- Initial condition: Condición inicial de apertura.

- Source fail type: Posición de falla de la válvula.

En la Figura 4 se muestran las máscaras de los componentes tipo Sensor y tipo Actuador donde se observan descripción, nombre de las señales de entrada y salida del componente y los parámetros que definen al componente.

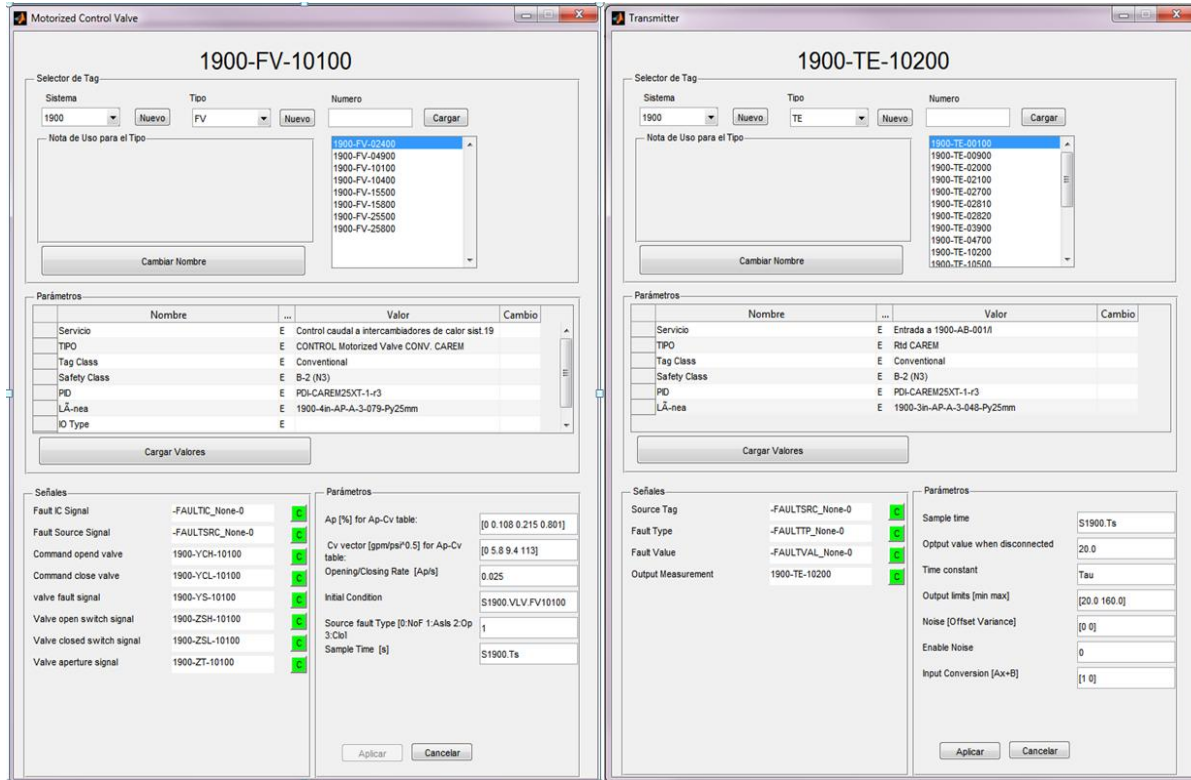


Figura 4: Interfaz para la configuración de actuadores y sensores

Biblioteca “ModBas”

La biblioteca “ModBas” fue desarrollada para modelar los distintos sistemas termohidráulicos que están presentes en el simulador. Esta biblioteca posee 4 componentes básicos (Caño, Intercambiador de Calor, Tanque y Header) los cuales al interconectarse permiten simular sistemas complejos [3]. La misma resuelve de forma dinámica las ecuaciones de masa, momento y energía de componentes con la hipótesis de flujo de una sola fase.

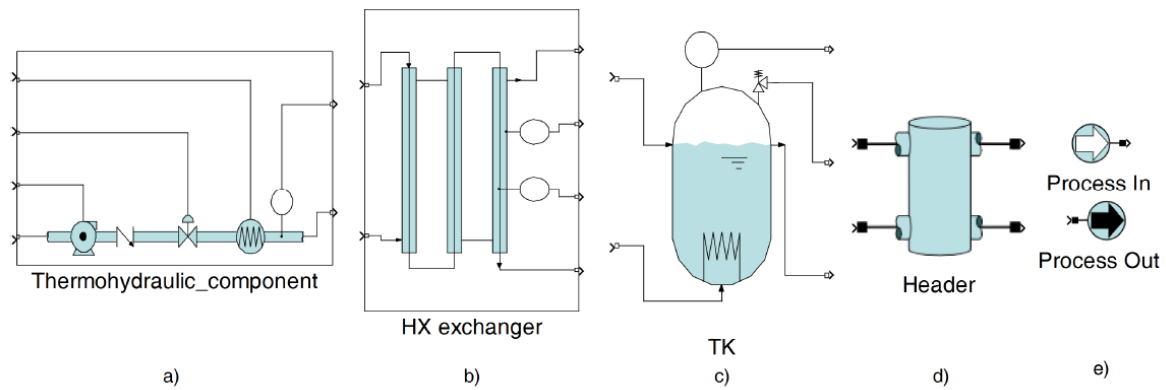


Figura 5: Componentes de la biblioteca termohidráulica "ModBas" a) Componente tipo Pipe que incluye modelo de bomba, válvula y calentador, b) Componente tipo Intercambiador de Calor (co-corriente, contracorriente o tipo U), c) Componente tipo Tanque (tipo presurizado o tipo pileta), d) componente Header, e) componente Procces In/out (condiciones de contorno).

Modelo del Sistema de Purificación y Control de Volumen (1400)

El Sistema de Purificación y Control de Volumen del Primario cumple la función de controlar la presión o el nivel del recipiente de presión durante la secuencia de arranque y parada del reactor y controlar el nivel del RPR cuando opera en su modo normal de operación. Además, el sistema 1400 cumple con funciones de seguridad ante eventos iniciantes postulados

Otra función específica de este sistema es la de acondicionar el agua del primario para mantener las especificaciones físicas, químicas y radiológicas dentro de los valores especificados para la química del agua del mismo.

El sistema 1400 se modeló de manera de poder cumplir la función de regulación de nivel y presión del reactor durante la secuencia de arranque y parada y controlar el nivel del RPR cuando opera en su modo normal de operación. El modelo también cumple con las funciones de seguridad de manera de poder simular eventos iniciantes postulados.

Este modelo no incluye el acondicionamiento fisicoquímico, como así tampoco el acondicionamiento radiológico del agua.

El modelo del Sistema 1400 interactúa con el Sistema Primario (modelado en RELAP) y el Sistema de Control (modelado en Simulink). Cada conexión Relap-Simulink se realiza a partir de dos señales (HydConn) de entrada y de salida (Figura 6).

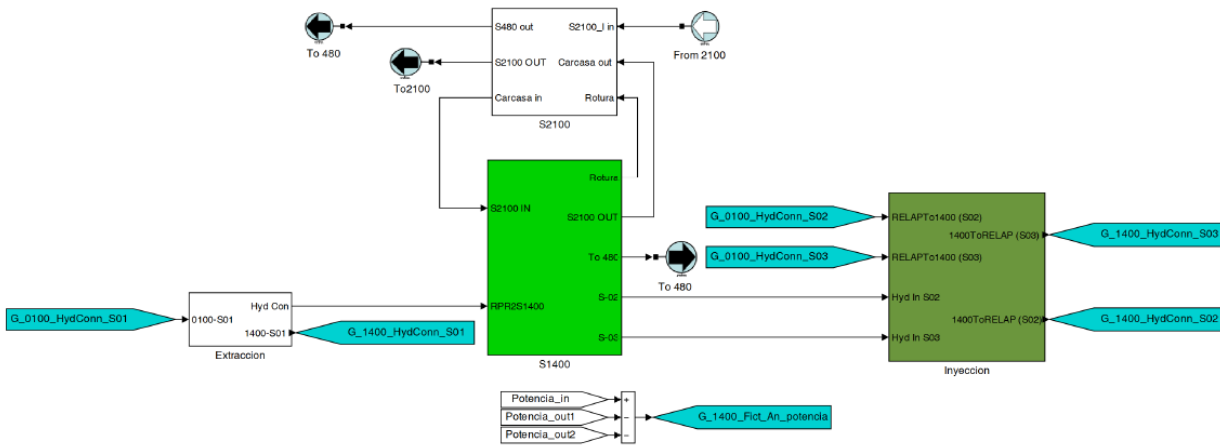


Figura 6: Conexión entre RELAP y la biblioteca “ModBas”.

El modelo del sistema 1400 (Figura 7) consta de los siguientes componentes:

- El economizador 1400-BI001 con la línea de Bypass correspondiente se modeló con los componentes “HX” y “Pipe_CV” respectivamente. Los enfriadores 1400-BI002 y 1400-BI003 fueron modelados con un único componente tipo “HX” contracorriente.
- El sistema 2100, responsable del agua del enfriamiento del intercambiador BI-002 y BI003, se modeló como condiciones de borde de presión a la entrada y la salida de la carcasa con sus respectivas válvulas de regulación de caudal.
- El cuadro de válvulas de control fue modelado con un modelo ad-hoc de válvula de control. La pérdida de carga de dicho modelo se realiza a partir de un único CV equivalente proveniente de las válvulas de regulación de caudal, la pérdida de carga del orificio de restricción y la válvula de control que realiza el bypass del orificio de restricción.
- El TCV se lo modeló con el componente tipo “Tanque” con una presión interna constante de 3bar. La inyección de agua al TCV a través del sistema 0480 y 7910 todavía no está contemplada, como así tampoco la descarga de agua hacia el sistema 2210.
- No se modeló ningún componente vinculado al acondicionamiento del agua del primario (Torre desgasificadora, tren de purificación, filtros de agua, etc.). Como así tampoco se modeló el ingreso de reactivos químicos al sistema 1400 a través de los sistemas 1510 (inyección de hidróxido de litio e hidracina), 1530 (inyección de hidrogeno gaseoso puro) y 1600 (suministro de Boro).
- Las bombas de carga (bombas de desplazamiento positivo) 1400-AB001 I/II son modeladas a partir de condiciones de caudal fijo que se habilitan o deshabilitan dependiendo del estado de la bombas.
- Se modelaron ambas líneas de retorno al RPR, la línea principal que ingresa al seno de la masa líquida y la secundaria que ingresa al serpentín

ubicado en el domo del recipiente con sus respectivas válvulas manuales remotas a partir del componente "Pipe_CV".

- Se prevé la posibilidad de rotura de un tubo del intercambiador de calor, produciendo la descarga de agua del primario hacia el sistema de refrigeración (sistema 2100).

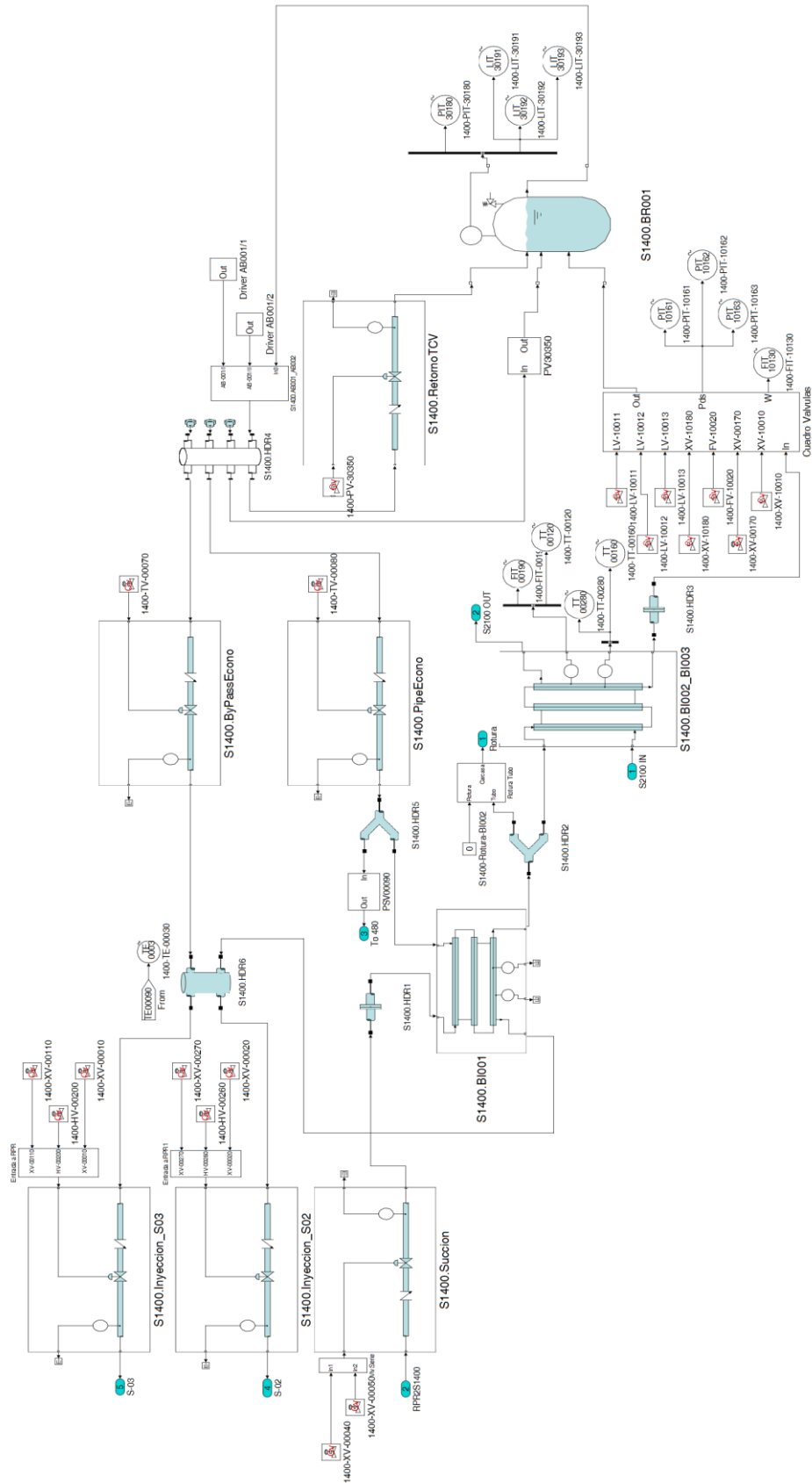


Figura 7: Modelo del Sistema 1400 donde se puede observar los distintos componentes de la biblioteca “ModBas”, los modelos de sensores y los modelos de actuadores utilizados.

Modelo del Sistema de Refrigeración en Parada y Calentamiento en Arranque (1900)

El Sistema de Refrigeración en Parada (Sistema 1900) tiene como función principal refrigerar el circuito primario, eliminando el calor de decaimiento y el calor de la masa de agua y los internos del RPR, desde el estado correspondiente de Parada Caliente hasta Parada Fría, inclusive con el RPR abierto y en la operación de recambio de combustibles. Otra función específica de este sistema es la de calentar el agua contenida en el RPR y sus internos durante la secuencia de puesta en marcha desde Parada Fría a Parada Caliente.

El modelo del Sistema 1900 se modeló de manera de cumplir con las funciones principales antes descritas.

El modelo del Sistema 1900 interactúa con el Sistema Primario (modelado en RELAP) y con el Sistema de Control. Las conexiones del sistema 1900 con el Sistema de Inyección desde Pileta de Supresión de Presión (1300), el sistema de Refrigeración de Componentes (2100) y el Sistema de Vapor Auxiliar (7400) son modeladas como condiciones de contorno.

En el modelo del Sistema 1900 (Figura 8) fue necesario representar las pérdidas de energía de la cañería (con su respectiva despresurización) debido a que el sistema se encuentra deshabilitado cuando el reactor está en estado operativo. Debido a esto todos los componentes del modelo poseen estructura de calor, la cual permite simular esta pérdida de energía al ambiente. El modelo de 1900 consta de los siguientes componentes:

- La bomba de alimentación AB-001/I junto con las válvulas de bloqueo se representó a través del componente tipo “Pipe” con bomba (S1900.AB001_I).
- La línea de bypass se modeló con el componente tipo “Pipe” con su válvula de control FV-15800.
- El componente BI001/I (que posee la función de refrigerar el agua del primario en la maniobra de parada del reactor) se modeló con un intercambiador de calor contracorriente, el mismo incluye medición de caudal FE-15500. La carcasa del intercambiador es parte del modelo del Sistema de Refrigeración de Componentes Asegurados (Figura 9) la cual incluye las válvulas de regulación de caudal. El modelo también incluye la posibilidad de rotura de tubo de intercambiador con su respectiva válvula de seguridad (PSV04800) que descarga al Sistema de Colección de Corrientes Líquidas y Gaseosas Radiactivas fuera de Contención (Sistema 2310).
- El intercambiador BI003/I (que posee la función de calentar el agua del primario en la maniobra de arranque del reactor) fue modelado con el componente tipo “Pipe” con calentador. Para representar la dinámica producida del lado carcasa se modela los componentes asociados al sistema de Vapor Auxiliar (Figura 10). Debido a que este intercambiador posee vapor saturado en su carcasa (conectado al Sistema de Vapor

Auxiliar), el componente fue modelado con una temperatura de pared constante. La temperatura de pared se calcula a partir de la presión en carcasa dada por la apertura de las válvulas TV04701 y TV04702. Se incluye en el modelo Tanque recolector de condensado (BR001), el intercambiador de calor que enfría el condensado (BI004), la bomba de descarga (AB002) con las válvulas asociadas al sistema.

- Las penetraciones al RPR se modelan a partir de los componentes tipo “Pipe” (AP042, AP044, AP045).

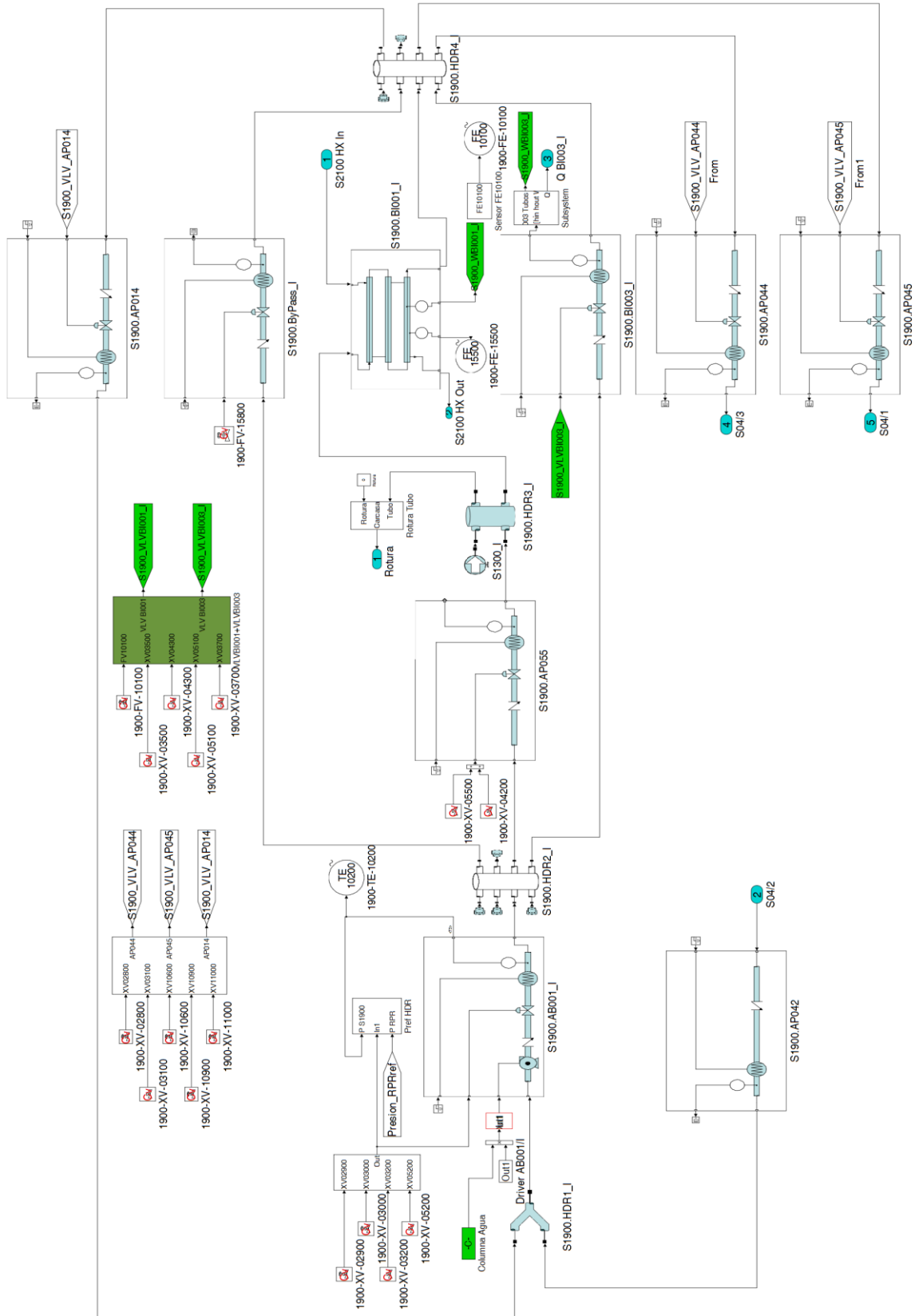


Figura 8: Esquema del modelo del Sistema 1900

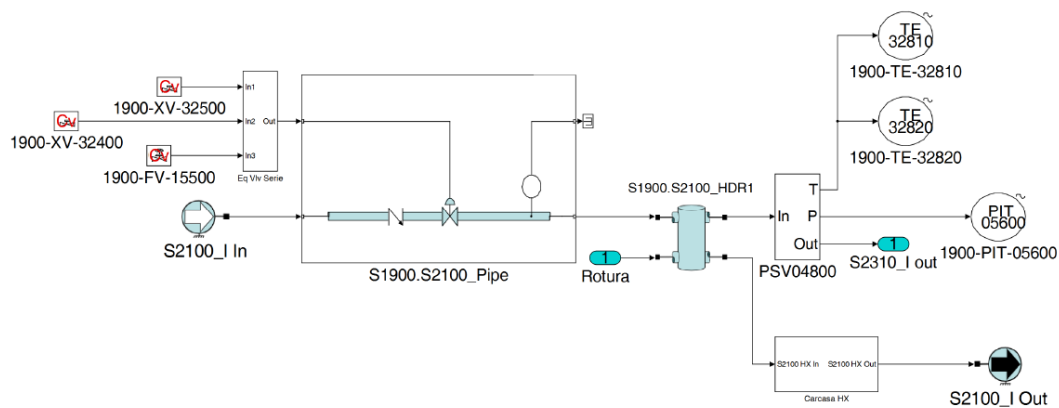


Figura 9: Esquema del modelo de carcasa del intercambiador BI002, vinculado al sistema 2100.

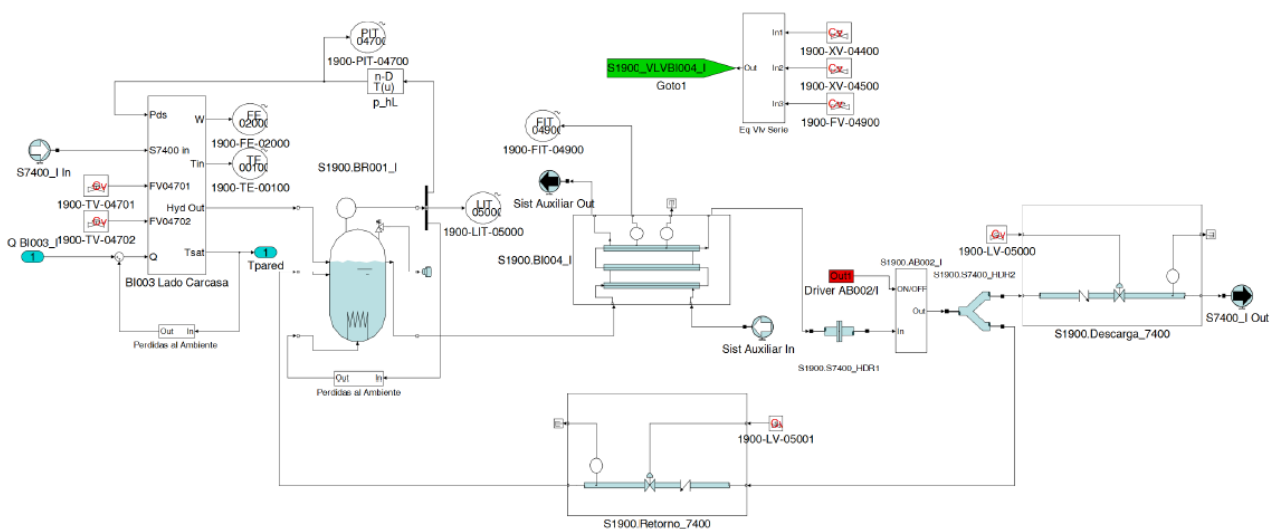


Figura 10: Esquema del modelo de carcasa del intercambiador BI003, vinculado al sistema 7400.

Bibliografía

- [1] Etchepareborda A., F. C. (2009). Simulador de Entrenamiento para el Replacement Research Reactor (RRR). *XXXVI Reunion Anual de la Asociacion Argentina de Tecnologia Nuclear*.
- [2] RELAP5/MOD3.3 Code Manual Volume II: Appendix A. Input Requirements
- [3] Castelao Caruana M., D. B. (2013). Biblioteca de Componentes Termohidraulicos para Simuladores de Entrenamiento. *XL Reunion Anual de la Asociacion Argentina de Tecnologia Nuclear*.