

***“Análisis y modelado mediante RELAP5 del sistema de Refrigeración de Emergencia del Núcleo de la CNE”***

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES  
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumno: Ing. Ricardo Ugarte  
Director: Lic. Alejandro I. Lazarte  
Co-director: Ing. María Virginia Guala

28/09/2017



**UNSAM**  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

### **AGRADECIMIENTOS:**

En primer lugar quiero agradecer a la Autoridad Regulatoria Nuclear por permitir capacitarme y brindarme los medios necesarios para realizar el presente trabajo. Quiero agradecer también el apoyo del instituto Dan Beninson, en particular a Ana María Lerner y Adrián Daoud, por la paciencia y por estar presentes en todo momento en el transcurso del ciclo de clases. Finalmente mi más profundo agradecimiento a Virginia Guala y Alejandro Lazarte por aceptar ser mis tutores y acompañarme en el camino de la elaboración de este trabajo mediante sus sugerencias que siempre fueron acertadas.



## ABREVIATURAS

ARN	Autoridad Regulatoria Nuclear
CNE	Central Nuclear Embalse
BSI	Código básico de identificación de sistemas
DM	Manual de Diseño
ECCS	Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo
EC	Elementos Combustibles
GV	Generador de vapor
INEL	Laboratorio nacional Idaho
LOCA	Accidente con pérdida de refrigerante
LWR	Reactores de agua liviana
MSSV	Válvulas principales de seguridad de vapor
NRC	Comisión reguladora nuclear de Estados Unidos
PWR	Reactores de agua a presión
SPTC	Sistema primario de transporte de calor
TDJ	Unión dependiente del tiempo
TDV	Volumen dependiente del tiempo

<b>Agradecimientos:</b> .....	<b>2</b>
<b>Resumen</b>	
<b>Capítulo 1</b>	
Introducción.....	7
1.1. Antecedentes.....	7
1.2. Objetivo y alcance .....	8
1.3. Contenido .....	8
<b>Capítulo 2</b>	
Descripción de la CNE .....	10
2.1. La planta.....	10
2.2. Descripción del ECCS .....	12
2.3. Descripción de la etapa de inyección de alta presión.....	14
2.4. Descripción de la etapa de inyección de media presión.....	16
2.5. Descripción de la etapa de inyección de baja presión.....	18
2.6. Descripción de la ingeniería conceptual y básica del ECCS .....	19
2.7. Descripción del código de sistemas utilizado .....	22
<b>Capítulo 3</b>	
Modelado del sistema de inyección de emergencia del núcleo .....	25
3.1. Modelo aislado.....	25
3.2. Modelado de la etapa de inyección de alta presión.....	26
3.3. Modelado de la etapa de inyección de media presión.....	29
3.4. Modelado de la etapa de inyección de baja presión.....	30
3.5. Lógica de control .....	32
3.5.1. Descripción de la implementación de señal de LOCA.....	33
3.5.2. Apertura de las válvulas de inyección del ECCS al SPTC .....	35
3.5.3. Rotura de los discos de ruptura (control de válvulas).....	36
3.5.4. Control de inyección de alta presión .....	37
3.5.5. Control de inyección de media y baja presión.....	38
<b>Capítulo 4</b>	
Modificaciones para la implementación del ECCS en el modelo completo .....	40
4.1. Implementación del ECCS en el modelo completo de la CNE .....	40
4.1.1. Aislación de los circuitos del SPTC.....	41
<b>Capítulo 5</b>	
Simulaciones, resultados y análisis .....	42
5.1. Resultados de las simulaciones.....	42
5.2. Análisis del ECCS como modelo aislado .....	42
5.3. Análisis del ECCS sobre un modelo de planta completo.....	47
<b>Capítulo 6</b>	
Conclusiones.....	53
6.1. Referencias .....	54

## RESUMEN

La Central Nuclear Embalse (CNE) está siendo reacondicionada para un nuevo período de operación. Esta tarea implica la introducción de varios cambios, algunos en los sistemas relacionados con la seguridad de la planta. Parte del objetivo del reacondicionamiento es incrementar la potencia de operación y en consecuencia aumentar la transferencia de calor al sistema secundario, contar con dos o más parámetros de disparo efectivos del reactor en cada sistema de parada, y la implementación de mejoras en sistemas de procesos.

Con el fin de mejorar la confiabilidad del "Emergency Core Cooling System" (ECCS) se introducirán cambios tales como la conmutación automática de la inyección de media presión al de baja presión, el reemplazo de la señal de condicionamiento por alta temperatura por una de baja presión sostenida en el SPTC, etc. En este sentido surge la necesidad de realizar una revisión de los análisis de seguridad. La técnica utilizada para tal fin es la incorporación de los cambios de diseño en un modelo de computadora de la planta. Es decir, el modelado de la planta es una de las herramientas de base para realizar este tipo análisis.

La Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) ha realizado en RELAP5 Mod3.3 un modelo de planta completamente independiente al del diseñador o al del operador en el cual uno de los sistemas modelados fue el ECCS. Este sistema tiene la función mantener la refrigeración del núcleo inyectando agua al SPTC, luego de eventos con pérdidas de refrigerante.

Al inyectar agua en el núcleo, se podrá mantener el combustible sumergido y refrigerado, disminuyendo así el riesgo de falla de los elementos combustibles. En este trabajo se describe el proceso de modelado del ECCS, partiendo de la ingeniería básica y conceptual hasta la verificación del correcto modelado del sistema. Si bien este sistema se presenta en forma aislada, éste forma parte integrante de un modelo completo de la planta nuclear de potencia.



## **ABSTRACT**

The Embalse Nuclear Power Plant is being refurbished for a new operational period. This task involves changes in systems related to safety. Part of the purpose of the refurbishment is to increase the operating power and to have two or more effective trip parameters in each shutdown system and to implement improvements in process systems.

In order to improve the reliability of the ECCS, changes will be introduced such as the automatic passage from the medium pressure injection to the low pressure, the replacement of the signal conditioning due a high temperature by the low pressure sustained in the SPTC, etc. In this sense there is a need to carry out a review of the safety analysis. The technique used to accomplish this objective is to simulate the design changes with a computer model of the plant.

The ARN developed in RELAP5 Mod3.3 a completely independent plant model, in which one of the modeled systems is the emergency core cooling system (ECCS). Its function is to maintain the core cooling by injecting water into the primary heat transport system after loss of coolant accidents. By injecting water into the core, fuel can be submerged and refrigerated, thus reducing the risk of fuel element failure.

This work describes the ECCS modeling process, starting from a basic and conceptual engineering to verifying the correct modeling of the system. Although this system is presented isolated, this is an integral part of a complete model of the nuclear power plant.



# CAPÍTULO 1

## Introducción

El desarrollo de una herramienta para realizar una evaluación cuantitativa del comportamiento termohidráulico de una planta nuclear de potencia frente a un conjunto de escenarios determinados, incluye el modelado de los distintos sistemas tales como ser el sistema primario, el sistema secundario, el sistema moderador y el ECCS, entre otros.

En este trabajo se presenta el modelado termohidráulico y los sistemas de control del ECCS. El alcance de este modelo será suficiente para formar parte de un modelo de planta completo y realizar un análisis de accidentes, dentro de la base de diseño o de baja frecuencia de ocurrencia [1]. En particular accidentes de pérdida de refrigerante donde el ECCS es demandado.

Como punto de partida para desarrollar el modelo del ECCS, se tomó la documentación de la planta provista por el diseñador. Para realizar esta tarea se utilizó el código de sistemas RELAP5 mod3.3 patch 4 (RELAP5 de aquí en adelante), distribuido por la Comisión Regulatoria Nuclear de los Estados Unidos (NRC) y de una interfaz gráfica denominada SNAP (también distribuida por la NRC). [15], [16], [17], [18].

### 1.1. Antecedentes

Como parte de las tareas análisis y evaluación para un nuevo período de operación de la CNE, se realiza una actualización del informe final de seguridad de la instalación. El informe mencionado comprende, en uno de sus capítulos el análisis de seguridad determinístico frente a eventos iniciantes postulados. Se trata de un estudio analítico utilizado para demostrar el grado de cumplimiento de los requisitos de seguridad para una amplia gama de condiciones de funcionamiento y varios eventos iniciantes postulados [1].

Toda central nuclear debe cumplir con las funciones de seguridad, orientadas a operar en forma segura en todos los escenarios, ellas son: controlar la potencia del reactor, asegurar la refrigeración del núcleo, asegurar la contención y mitigar las consecuencias en caso de accidentes.



El análisis de seguridad implica análisis determinísticos y probabilísticos en apoyo del emplazamiento, diseño, puesta en marcha, operación o extensión de vida de una central nuclear.

Para realizar cálculos de los análisis determinísticos, la ARN emplea el uso de códigos independientes destinados a verificar el cumplimiento de los requisitos seguridad definidos según se indica en [2] y en [5]. Estos requerimientos responden a las normas de la ARN y a un marco normativo establecido en la documentación mandatoria.

Actualmente existen plantas canadienses similares a la CNE (Point Lepreau, Gentilly II y Wolseong) las cuales han terminado su primer periodo de operación y que han sido reacondicionadas o no. Por este motivo se han tomado como referencia para analizar y compararlas con el estado de la CNE [20]. Debido a que el reacondicionamiento de Gentilly II se ha cancelado, se ha tomado como referencia la central Point Lepreau [6]. Otra referencia de este tipo de reacondicionamiento es el caso de la central Wolseong ubicada en Corea del sur.

## 1.2. Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo es presentar la metodología utilizada para la confección del modelo del ECCS, partiendo de la comprensión de la ingeniería conceptual y básica hasta la obtención del modelo del sistema.

Se indicarán las distintas etapas de modelado, las hipótesis asumidas junto con las condiciones de contorno para correr el modelo y finalmente, el análisis de la evolución del modelo frente a condiciones correspondientes a un evento de pérdida de refrigerante del SPTC.

El análisis consiste en la verificación de la secuencia del accionamiento de los sistemas de seguridad, el cumplimiento de las funciones de los sistemas de seguridad y que los tiempos de disparo se producen de acuerdo a lo esperado por diseño.

## 1.3. Contenido

En las siguientes secciones se presentará una breve descripción de la CNE, indicando los principales sistemas y componentes de la planta. Seguidamente se incluirá la descripción del ECCS, la descripción de la ingeniería conceptual y básica y una descripción del modelo mostrando su capacidad de ser utilizado como herramienta para evaluar el comportamiento del mismo. Se presentará también el proceso de modelización indicando las hipótesis asumidas, las condiciones de contorno, enfocándose en el punto de vista del sistema de control y de la funcionalidad del



sistema. Se describirán los componentes de mayor importancia de éste sistema y cómo deben ser modelados siguiendo guías de usuario.

Se presentarán resultados de estudios paramétricos del modelo utilizando condiciones de contorno apropiadas y finalmente, el resultado de una aplicación directa de esta herramienta para un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA) por rotura del 40% del área de un colector de entrada del SPTC de la CNE.



## CAPÍTULO 2

### Descripción de la CNE

#### 2.1. La planta

El diseño de la planta tiene como objetivo la producción de energía eléctrica a partir del calor generado en el proceso de fisión nuclear. Este calor es utilizado para generar vapor el cual es utilizado para alimentar un turbogenerador. Este proceso tiene requisitos orientados a cumplir requerimientos de seguridad, entre ellos, figuran los objetivos principales de la protección radiológica (el uso responsable y eficiente de las radiaciones ionizantes). Estos objetivos de diseño responden al cumplimiento del marco normativo definido en la documentación mandatoria durante la etapa de licenciamiento de la CNE. Esto incluye un conjunto de normas Argentinas relacionadas al diseño [7] (entre otras) y a las guías canadienses tales como la C-6, R-8 y R-10 [21], [22].

La CNE es un reactor nuclear tipo CANDU6, presurizado y diseñado para operar con agua pesada. Los principales componentes de la planta son el núcleo, cuatro generadores de vapor, cuatro bombas, cuatro colectores de entrada, cuatro colectores de salida, cañería de interconexión y un presurizador. Los colectores y las bombas están por encima del nivel del reactor.

El núcleo está compuesto por 380 canales refrigerantes horizontales, cada uno contiene 12 manojos de elementos combustibles (EC) con una longitud activa por EC de 50 centímetros aproximadamente. Por cada canal circula refrigerante ingresando desde un colector de entrada a través una cañería denominada alimentador hacia el núcleo.

El refrigerante luego de pasar por el núcleo, circula por un alimentador de salida hacia un colector. El SPTC posee dos circuitos con cuatro colectores (dos de entrada y dos de salida), es decir, cada circuito tiene dos pasos por el reactor, el paso 1 y 2 corresponden al circuito 1 y el paso 3 y 4, al circuito 2. A cada colector de salida le llegan 95 alimentadores y a cada colector de entrada le salen 95 alimentadores. El SPTC cuenta con un presurizador que controla la presión del SPTC en ambos circuitos.

El caudal de refrigeración es suministrado por cuatro bombas principales. La Figura 1 ilustra un esquema simplificado del circuito 1 del SPTC. El caudal total del circuito primario es de aproximadamente 8600 kg/s. Este caudal debe distribuirse en los 380



canales de forma tal que a la salida de los mismos se obtenga un valor similar de entalpía entre ellos. Debido a lo anterior, los alimentadores de entrada y salida tienen distinta forma (longitud, accesorios, etc.) entre canal y canal. Por simplicidad y a los fines de abreviar la descripción solo se muestra un único circuito de refrigeración del núcleo en forma esquemática (Figura 1).

La temperatura de entrada medida en los colectores es de 266°C y la de salida es de 310°C. La presión en los colectores de entrada es de 11.3 MPa y en los colectores de salida es de 9.99 MPa. En operación normal el título en los colectores de salida está entre el 1% y el 2%.

Los cuatro generadores de vapor son idénticos de 3530 tubos verticales en forma de "U" y poseen precalentadores que transfieren calor del refrigerante para elevar la temperatura de entrada y poner en ebullición el agua de alimentación en el lado secundario del GV. La presión de operación en el lado H<sub>2</sub>O es de 4.69 MPa.

Las cuatro bombas principales son verticales, centrífugas y de un etapa, aspiración simple y descarga doble. El caudal de operación nominal es de 2228 l/seg. La temperatura nominal del fluido en la etapa de succión es de 266°C y la presión de descarga es de 11.22 MPa.

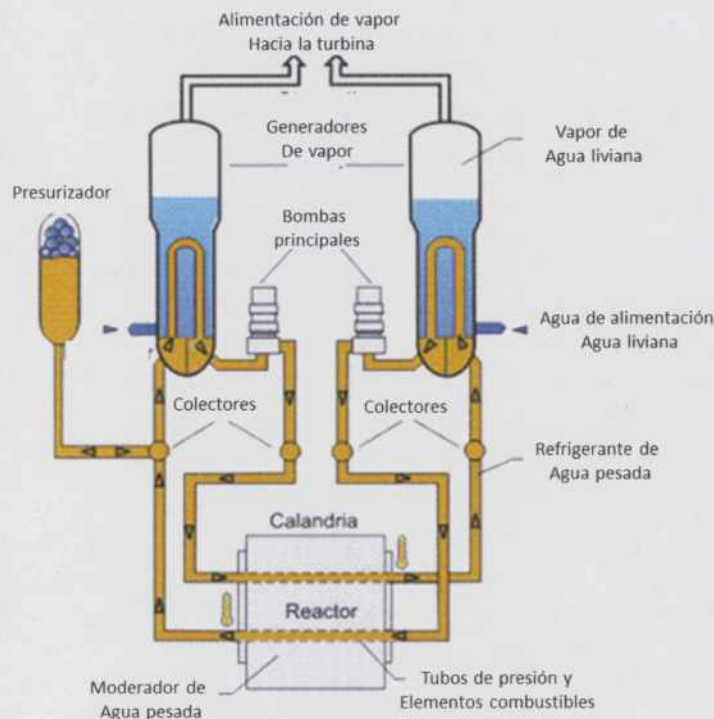


Figura 1: uno de los circuitos del SPTC de la CNE.

El calor generado en el núcleo se transfiere desde el SPTC hacia el sistema secundario a través de cuatro GVs. El vapor generado en los distintos GV, se dirige a un colector principal a través de cuatro líneas de vapor, este colector provee de vapor a la turbina. Este vapor, luego de pasar por el turbogenerador es enviado al condensador y tratado para obtener refrigerante acondicionado para ser utilizado nuevamente por el sistema de agua de alimentación. Del lado secundario ingresa al GV agua liviana subenfriada, donde se calienta hasta evaporarse utilizando el calor suministrado por el refrigerante del circuito primario a través de las paredes de los tubos en U. Para mayores detalles de los sistemas puede consultarse el capítulo 5 de [4].

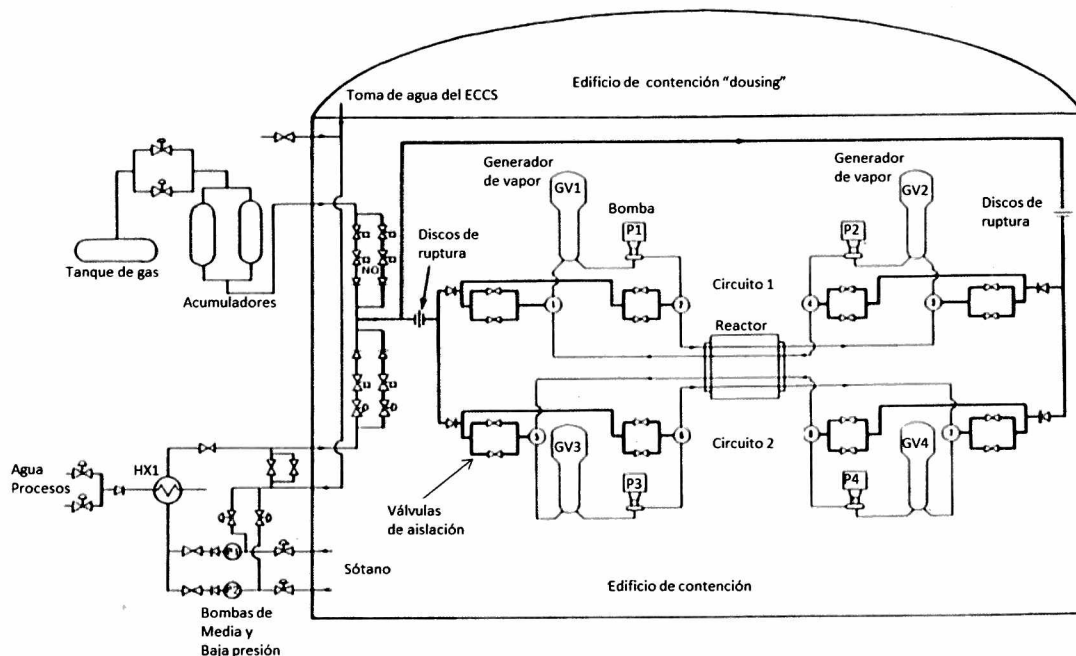
## 2.2. Descripción del ECCS

El principal objetivo del ECCS en la CNE es asegurar la refrigeración del núcleo, removiendo el calor del SPTC [11], refrigerándolo con agua liviana a baja temperatura, por ejemplo, después de la ocurrencia de un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA).

Esta refrigeración debe mantenerse en forma indefinida o lo suficientemente prolongada y debe contar con los sistemas de apoyo, es decir una fuente fría externa o sumidero de calor que permita refrigerar el SPTC en forma indeterminada.

Para realizar esta función, el sistema posee tres fases de operación luego de ser requerido por disparo de la señal de LOCA. Estas son las fases de baja, media y alta presión.

En el caso de un escenario accidental donde se produce pérdida de refrigerante, el SPTC se despresurizará, pasando de la presión nominal de operación a la presión a la cual el agua del ECCS puede ser inyectada, en un tiempo que depende del tamaño de la rotura [10]. La Figura 2 muestra un esquema simplificado del sistema ECCS.



**Figura 2: Esquema del ECCS.**

En este esquema se muestra la contención con los componentes más importantes del ECCS. Ellos son (siguiendo el circuito de inyección):

1. el tanque de gas 3432-TK2,
2. las válvulas de aislación de gas PV81 y PV82,
3. los tanques acumuladores de alta presión 3432-TK1 y 3
4. las válvulas de aislación de alta presión 3432-MV79 y 3432-MV80
5. las válvulas de retención 3432-V96 y 3432-V97
6. los discos de ruptura 3432-RD1 y 3432-RD2
7. las tuberías de inyección a los colectores
8. las válvulas de aislación entre el ECCS y el SPTC (dentro de la contención).
9. Bombas de inyección de media y baja presión 3432-P1 y 3432-P2
10. Intercambiador de calor 3432-HX1
11. Válvulas de succión de media presión 3432-PV10 3432-PV11
12. Válvula de baja presión 3432-PV1

Los tiempos asociados a la etapa de despresurización varían desde algunos segundos (LOCA grande) hasta unos cuantos minutos (LOCA pequeño).

La Figura 3 muestra un esquema de los tiempos de inyección de refrigerante a los colectores del SPTC mediante el sistema ECCS, para el caso de un LOCA del 100% (que implica la rotura del colector de entrada al núcleo con dos áreas expuestas para la pérdida).

Cuando se demanda la acción del ECCS (a través de la señal de LOCA y producida la ruptura de los discos) comienza la etapa de inyección de alta presión (4.18 MPa(a)). Aquí, el suministro de agua liviana proviene de los tanques acumuladores del ECCS. En la etapa de media presión (3.26 MPa(a)), el suministro de agua proviene del "dousing" y finalmente en la etapa de baja presión (0.3 MPa(a)), el suministro se obtiene del agua derramada en el sótano del reactor.

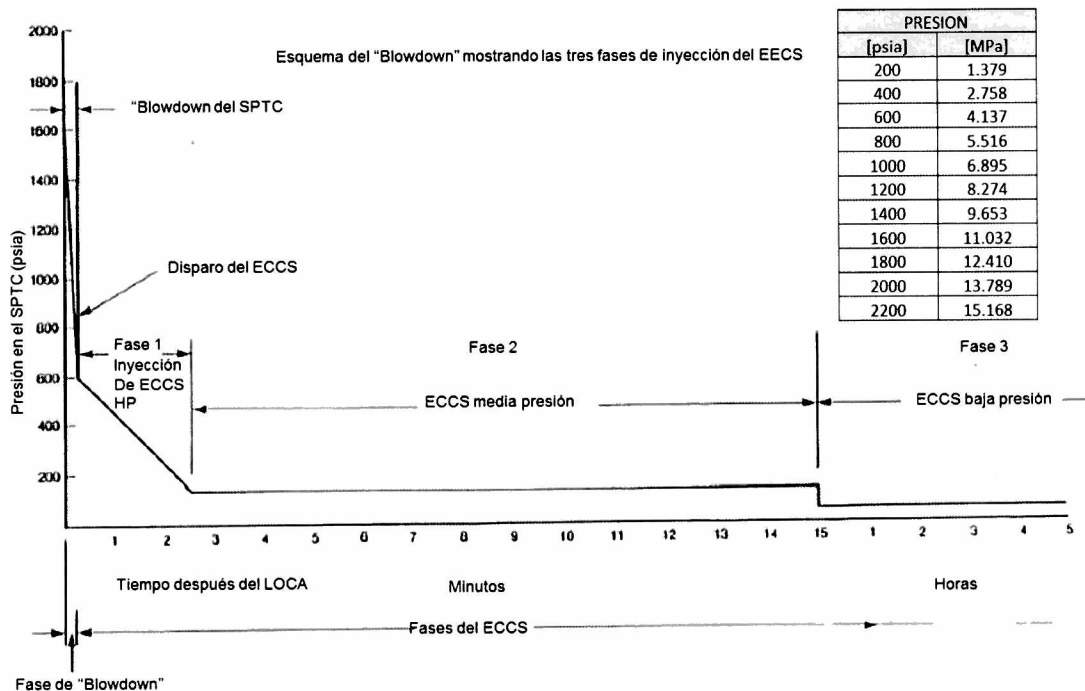


Figura 3: Esquema de fases del ECCS.

Después de 30 segundos de producirse la señal de LOCA se abren las válvulas de seguridad de los GVs para enfriarlos en forma rápida ("CRASH-COOLDOWN") [10]. Esta etapa de enfriamiento es para bajar la temperatura del SPTC en la inyección del ECCS y forma parte de una de las funciones del ECCS asociadas al proceso de inyección.

### 2.3. Descripción de la etapa de inyección de alta presión

El sistema de inyección de alta presión consiste en dos tanques acumuladores con agua a una presión de 275 kPa, conectados a un tanque de gas de 108 m<sup>3</sup> (3432-TK2). El tanque de gas esta normalmente presurizado a 4.24 MPa (a) y está aislado de los tanques acumuladores de agua del ECCS 3432-TK1 y TK3, por dos válvulas (3432-PV81 y PV82) conectadas en paralelo (ver Figura 4).

Estas válvulas son operadas neumáticamente y están cerradas durante la operación normal. Estas se abrirán cuando exista falta de suministro de aire, pérdida de energía de control de 48 VCC o cuando se dispare el inicio del ECCS presurizando los tanques de agua.

Ante una señal de LOCA se abren y se cierran simultáneamente, las válvulas de aislación de gas a alta presión 3432-PV81 y PV82 y las válvulas de venteo (PV83 y PV84) para presurizar los tanques acumuladores de alta presión 3432-TK1 Y TK3 (ver Figura 4), respectivamente.

Aguas abajo de las válvulas de aislación de gas, la presión se mantiene a 170 kPa (m) y los tanques de agua del ECCS almacenan un total de 216 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O para la inyección de alta presión. Los tanques de agua, el de gas y las válvulas de aislación de gas están ubicados en un edificio separado denominado edificio de enfriamiento de emergencia del núcleo de alta presión.

Las válvulas de inyección de agua a alta presión 3432-MV79 y MV80 se abren por señal de LOCA, están energizadas con clase II y suministran un paso redundante de flujo para el agua del ECCS de alta presión, aguas abajo de estas válvulas y previo a un accidente, la cañería se encuentra llena de agua y despresurizada.

El caudal del ECCS al SPTC se inyecta a través de dos discos de ruptura (3432-RD1 y RD2) que se rompen a una presión diferencial de 0.48 MPa, que puede ser desarrollada tanto para la inyección en la etapa de alta presión, o caso de falla, para la de media presión.

Los tanques de agua del ECCS 3432-TK1 y TK3 tienen suficiente cantidad de agua para inyectar durante aproximadamente 2.5 minutos para una rotura del 100% correspondiente a un área de 0.213 m<sup>2</sup>, dos veces el del colector más pequeño que es uno de los de entrada al reactor.

Cuando se ha acabado el agua, quedando un nivel mínimo en 3432-TK1 y TK3, las válvulas de inyección de alta presión 3432-MV79 y MV80 se cierran para evitar la inyección de no condensables al SPTC.

Aguas abajo del disco de ruptura, el flujo se divide en dos direcciones hacia los colectores del SPTC. Se cuenta con cuatro válvulas de retención (3432-PV33, PV34, PV47, PV48) que evitan que el circuito no dañado se descargue sobre el que tiene la rotura, estas válvulas abren como consecuencia de la presión diferencial entre el subsistema a alta presión y el SPTC.

La inyección a cada colector tiene un par de válvulas de aislamiento de D<sub>2</sub>O en paralelo, cada una de las cuales se energizan con 220 VCC de Clase I. Las válvulas están cerradas en operación normal y se abren cuando detectan señal de LOCA.

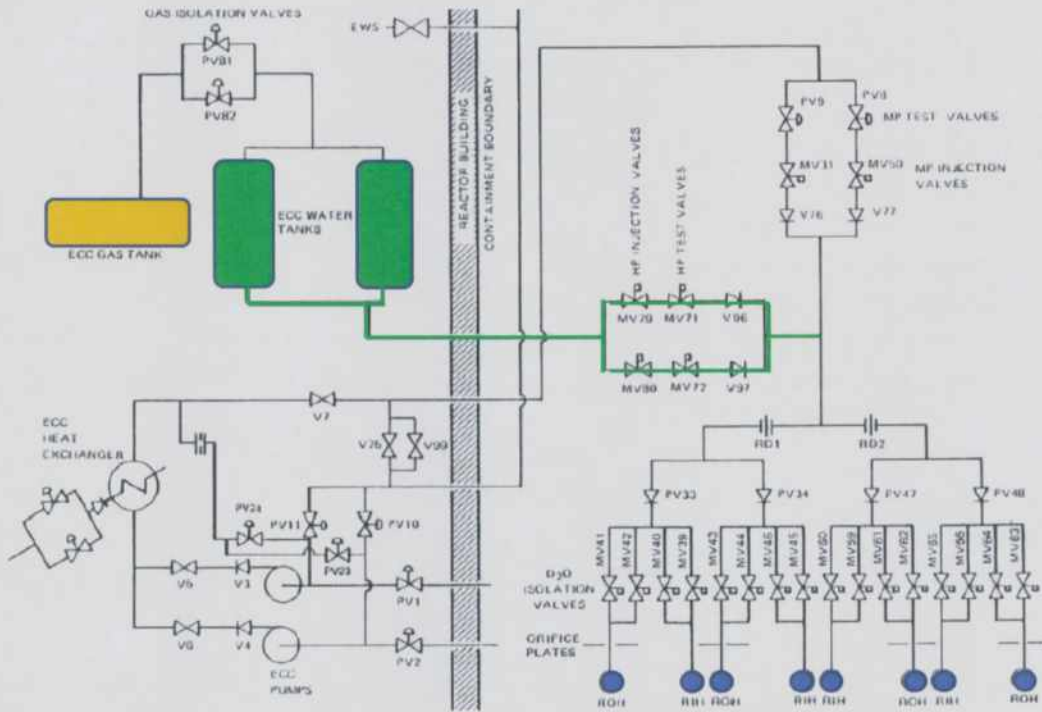


Figura 4: ECCS etapa de alta presión.

La inyección del sistema de alta presión finalizará (cerrando las válvulas MV79 y MV80) cuando se inyecte el volumen total de líquido disponible en los tanques acumuladores. Los tanques poseen medidores de nivel que realizan esa tarea [12]. La inyección no se realiza directamente sobre los colectores sino que se hace a través de una cañería de distribución del sistema de purificación.

#### 2.4. Descripción de la etapa de inyección de media presión

Ante una señal de bajo nivel en los acumuladores de alta presión, se finaliza la inyección mediante el cierre de las válvulas 3432-MV79/80. La fuerza de inyección del sistema de media presión proviene de 2 bombas del 100%, denominadas 3432-P1 y 3432-P2. Estas bombas son centrifugas y de 61 m de altura de elevación y poseen una línea de recirculación que hace de carga mientras no se abren las válvulas de inyección de media presión y sirve para ajustar la pérdida de carga sobre la bomba a través de las válvulas PV23 y PV24.

El suministro de agua de las bombas proviene principalmente del “dousing” con 500 m<sup>3</sup> de agua liviana a una temperatura de 27°C a través de las válvulas 3432-PV10 y 3432-PV11. Estas válvulas se abren con señal de LOCA. El “dousing” alberga un volumen superior al inyectado en la etapa de media presión, pero el agua restante es reservada para las duchas dentro de la contención. Otra fuente alternativa de suministro de agua liviana es el Agua de suministro de emergencia que suministra agua de emergencia a los GV en caso de pérdida de agua de alimentación.

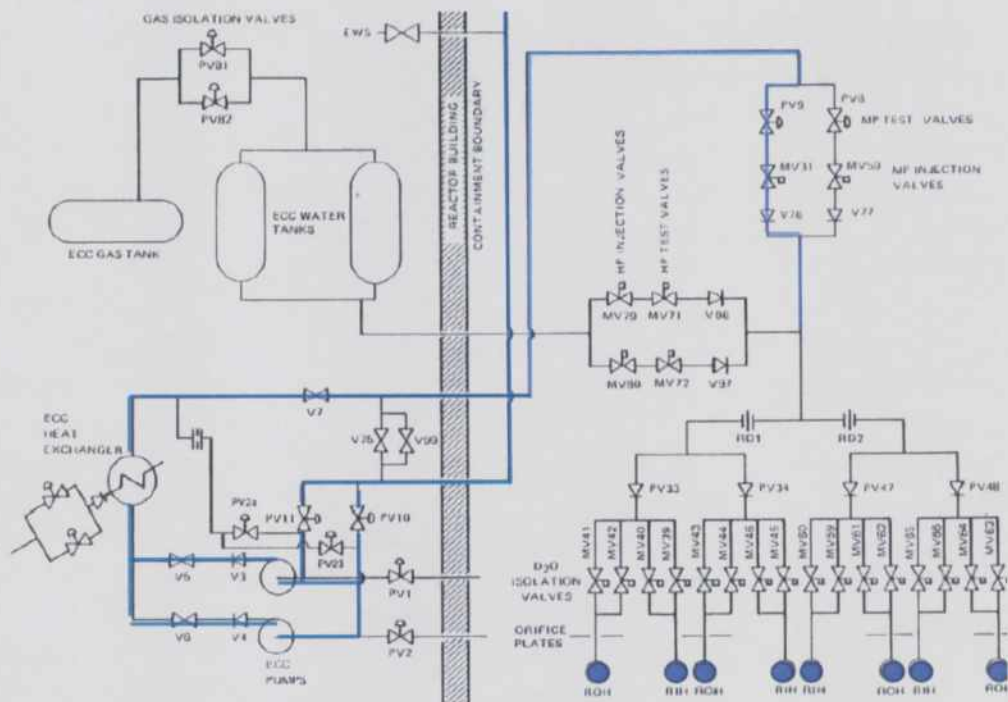
La etapa de media presión puede superponerse con la etapa de inyección de alta presión, debido a que la inyección de media presión comenzará cuando la presión aguas debajo de las válvulas de retención 3432-V76 y V77, esté por debajo del umbral de paso respecto de la presión de salida de la bomba del ECCS.

La inyección de media presión comparte las bombas de inyección y parte de la cañería con el sistema de inyección de baja presión, esto puede apreciarse en la Figura 5. Estas bombas se prenden luego de producida la señal de LOCA.

Esta cañería posee dos válvulas 3432-MV31 y MV50 llamadas válvulas de inyección de media presión, estas válvulas abrirán 90 segundos luego de producida la señal de LOCA. Corriente abajo de las válvulas de inyección de media presión hay dos válvulas de retención 3432-V76 y 3432-V77.

La inyección de media presión pasa también por un intercambiador de calor 3432-HX1 tipo placa, de titanio, con capacidad de extraer 40 MW el cual es utilizado también por el sistema de inyección de baja presión.

Cuando el nivel del “dousing” llega a un valor mínimo comienza la tercera etapa de inyección. La Figura 5 muestra un esquema simplificado de la línea de inyección de media presión.



**Figura 5: ECCS Etapa de media presión**

### 2.5. Descripción de la etapa de inyección de baja presión

Ante una señal de bajo nivel de agua en el “dousing” comienza la conmutación de la etapa de media a baja presión. Esto es, cierre de las válvulas 3432-PV10 y PV11 y apertura de las válvulas 3432-PV1 y PV2 (toma de aspiración del sótano del reactor) y las válvulas 3432-V5 y V6 (válvulas de inyección de baja presión).

Las líneas de descarga de ambas bombas se unen formando una única línea, que conduce el caudal de descarga de refrigerante a la cañería de inyección del ECCS, a través del intercambiador de calor 3432-HX1 [10]. El fluido inyectado en la etapa de media y baja presión es refrigerado por el intercambiador de calor utilizando agua del sistema de agua de servicio de baja presión a una temperatura de 23°C.

Esta cañería es compartida con la etapa de media presión, desde la posición de succión de las bombas hasta el punto de inyección del ECCS en el SPTC. El tramo de inyección de baja presión se puede observar en la Figura 6.

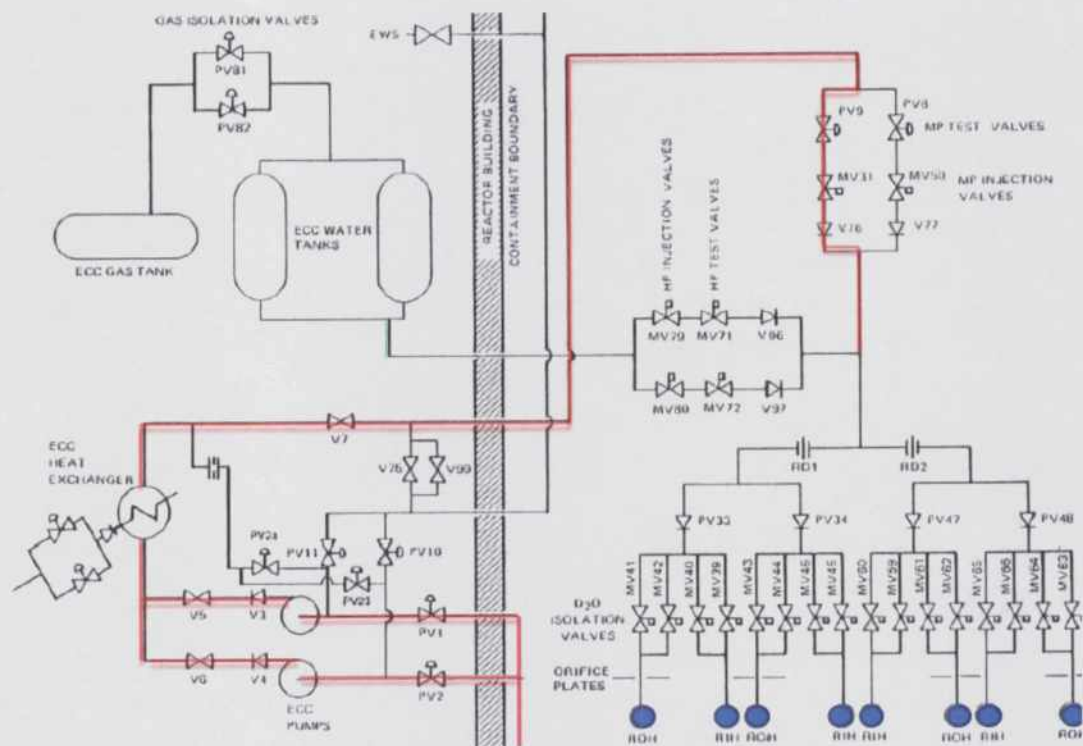


Figura 6: ECCS Etapa de baja presión

La línea de media y baja presión posee dos válvulas 3432-MV31 y 3432-MV50 llamadas válvulas de inyección de media presión que son las que habilitan la inyección de media y baja presión, a través del último tramo de las líneas de alta presión.

Todas las válvulas que componen la línea de inyección de baja presión son de accionamiento neumático salvo las 3432-MV31 y MV50, que son de accionamiento motorizado. Aguas abajo de estas válvulas se encuentran las válvulas 3432-V76 y V77 que son anti-retorno.

## 2.6. Descripción de la ingeniería conceptual y básica del ECCS

Como se mencionó en el capítulo de descripción de la planta, la CNE está diseñada para generar energía eléctrica basándose en la generación de calor nuclear, la cual es necesario controlar mediante sistemas diseñados para tal fin. De este modo es necesario contar con sumideros de calor capaces de absorber la energía calórica en exceso. De aquí surgen las funciones que deben cumplir los sistemas.

Las funciones de seguridad de una planta nuclear están relacionadas con el control la potencia del núcleo, asegurar la refrigeración del núcleo y de los EC gastados, asegurar la contención para mantener el confinamiento de los productos radiactivos y

limitar la liberación de los mismos en caso de accidentes. Esto implica controlar la exposición a la radiación de las personas y la liberación de material radioactivo durante todos los estados operacionales de la planta y la mitigación de accidentes en caso de que estos ocurran.

De este modo se busca limitar la probabilidad de los eventos que puedan conducir a la pérdida de control sobre la potencia del núcleo del reactor, minimizar la liberación de fuentes radioactivas de combustibles gastados, de residuos radioactivos y de cualquier otra fuente de radiación asociada a cualquier escenario durante el ciclo de vida de una central nuclear [4].

Se acude así al concepto de defensa en profundidad, en el que se definen las siguientes barreras físicas, para evitar la fuga de elementos radiactivos originados de los productos de fisión. Estas barreras son: la matriz combustible, la vaina de los EC, los tubos de presión del SPTC, el SPTC, el sistema de contención.

Se definen escenarios accidentales (rotura de un alimentador, rotura de un colector del SPTC, pérdida de suministro eléctrico, etc.) para los cuales la planta está diseñada para soportar, manteniendo el núcleo apagado y refrigerado. Estos escenarios se llaman condiciones de falla postuladas y contemplan dos tipos de fallas, las fallas simples y las fallas dobles estas últimas incluyen la falla de cualquier sistema o componente más la falla de un único sistema de seguridad. Cada tipo de falla está asociada a un valor de inventario de liberación de material radioactivo [26].

Para evitar una posible degradación de las primeras dos barreras (la fundición de los EC y de la vaina) en condiciones de falla, se definen funciones con requerimientos denominados criterios de aceptación, que consisten en parámetros de proceso de planta con límites bien definidos.

La eficacia de los sistemas de seguridad radica en su capacidad para reducir la deformación de la vaina del combustible luego de una condición de falla postulada con de pérdida de refrigerante. De esta manera la acción del ECCS reduce la deformación y limita la probabilidad de la falla de los EC.

El sistema secundario de transporte de calor (vapor y agua de alimentación) es el encargado extraer el calor del SPTC y el cual esta dimensionado con este objetivo. En el caso de la pérdida de sumidero de calor, es necesario contar con sistemas de apoyo que permitan extinguir el reactor y extraer el calor residual y de decaimiento producido por los productos de fisión en los EC del núcleo en el SPTC.

El ECCS entra dentro de este conjunto de sistemas denominados "sistemas especiales de seguridad" y tiene la función de refrigerar el núcleo en situaciones de

emergencia con pérdida de refrigerante del SPTC. Este sistema tendrá entonces que contar con suficiente inventario de refrigerante para reponer las pérdidas de inventario y mantener el núcleo refrigerado.

Según [3] se definen requerimientos de independencia, diversidad y separación física. Por este motivo, los tanques de alta presión de gas de inyección, los tanques acumuladores, las bombas de inyección y el intercambiador de calor se ubican afuera de la contención como se indica en la Figura 2.

Conforme a los requerimientos mencionados para el ECCS, surge que en caso de accidente de pérdida de refrigerante, el ECCS debe ser capaz de reponer el inventario perdido por la rotura del SPTC y extraer el calor generado del decaimiento radiactivo de los productos de fisión, luego del apagado del reactor. Esto define el volumen de inventario a inyectar y el caudal de inyección en función del tamaño de rotura.

De la misma manera existe independencia entre el ECCS y los sistemas de proceso. Existen dispositivos de aislación adecuados de modo que la falla de un sistema de proceso no interrumpa las funciones del ECCS. Si bien el ECCS depende de sistemas de apoyo como ser el suministro de agua de proceso para la refrigeración del sistema de baja inyección, etc. se asegura que la confiabilidad de estos sistemas sea tal que satisfacen el grado de confiabilidad general. Esto implica que los componentes sean de calidad nuclear. Otro requerimiento es que estos componentes posean calificación sísmica.

Respecto a las funciones secundarias del ECCS, las válvulas de aislación de los circuitos del SPTC evitan la transferencia de inventario desde el circuito sano al circuito roto en caso de rotura independizando así, la mitad del SPTC. Las válvulas de seguridad de los GVs denominadas con sus siglas en inglés "Main Steam Safety Valves" (MSSV), producen el enfriamiento del SPTC. Esta acción se traduce en un apoyo al accionar del ECCS.

La existencia de dos circuitos de refrigeración en el sistema, es para reducir la inserción de reactividad por vacío en caso de accidente de pérdida de refrigerante. Cada circuito posee dos bombas y dos generadores de vapor. Las diferencias de altura entre los GVs y los canales combustibles, es para aprovechar la refrigeración por circulación natural en caso de pérdida del suministro eléctrico de clase IV (este recurso no es por tiempo infinito).

## 2.7. Descripción del código de sistemas utilizado

El código RELAP5 Mod3.3 patch 4 es un código utilizado para el análisis de transitorios en reactores de agua liviana LWR (Light Water Reactor), en especial para PWR, pero con la incorporación de las tablas de agua pesada, se extendió su uso a reactores nucleares de agua pesada.

Este código fue desarrollado por la “Nuclear Regulatory Commission”, (NRC) en el “Idaho National Laboratory” (INEL) [15] y ha sido utilizado como herramienta base para el análisis de las plantas nucleares [14]. El mismo está basado en modelos de fluidos no homogéneos y de no equilibrio con la presencia de no condensables y para sistemas de simple y doble fase.

Los sistemas de ecuaciones diferenciales que representan a estos sistemas se resuelven empleando esquemas de resolución numérica del tipo semi-implícito, para minimizar el costo computacional de cálculo [15]. Este código es empleado para la resolución de sistemas termohidráulicos unidimensionales, empleando la técnica de resolución de diferencias finitas sobre volúmenes de control para la resolución de sistemas compuestos por distintos tipos de componentes.

El modelo hidrodinámico y el esquema numérico asociado están basados en el uso de una red de volúmenes de control interconectados por uniones por donde circula el fluido para determinar el comportamiento del mismo.

El programa resuelve problemas de fluido-dinámica en doble fase, basándose en la resolución de balances de masa, momento y energía, aplicadas a estos volúmenes de control. Para esto el programa utiliza correlaciones experimentales y bibliotecas de agua liviana, agua pesada y otras herramientas relacionadas a las propiedades de los materiales utilizados. El código contiene además modelos de componentes de sistemas de reactores de agua liviana. Entre ellos posee un modelo de cinética puntual, turbinas, generadores de vapor, válvulas y separadores de vapor.

Como todo modelo, la transformación de un sistema físico a un sistema de volúmenes de control, unidos por uniones, es una representación inexacta de la realidad pero siguiendo las reglas generales de desarrollo del código, es posible extender el alcance de la representación al rango necesario para realizar el estudio.

Es decir, el alcance del código o modelo del sistema, es suficiente para representar el fenómeno estudiado o de interés. Hay un conjunto de recomendaciones que suelen seguirse para modelos generales, como: reglas generales para la confeccionar la entrada de datos y modelar [17]:

- 1- La longitud de los volúmenes debe ser tal que todos deberían tener límites de "Courant" similares, es decir, la longitud de flujo dividida por velocidad alrededor de la misma. Para esto debe tenerse en cuenta las velocidades de flujo esperadas durante el transitorio. Es decir el tiempo de este cociente debe ser menor al tiempo necesario para que el fluido atravesase el volumen de control.
- 2- Los volúmenes de control deberían tener una relación de  $L/D \geq 1$ , (longitud, diámetro hidráulico).
- 3- Evitar las nodalizaciones donde una unión coincide con un fuerte gradiente de densidad de fluido (por ejemplo, una interfaz líquida) en estado de régimen permanente o durante un tiempo prolongado durante un transitorio. Este tipo de situación puede resultar en una reducción del paso de tiempo conllevando a un aumento en el costo computacional.
- 4- Evitar caminos de flujo menores que no sean importantes en el comportamiento del sistema o son insignificantes en comparación con la precisión de la representación del sistema.

Las condiciones de borde hidrodinámicas de un sistema se modelan utilizando componentes del tipo "Time Dependent Volumen" (TDV) y uniones. Una segunda forma de especificar condiciones de contorno de flujo es usando "Time Dependent Junction" (TDJ) junto con TDV.

Cada volumen de control tiene tres direcciones de coordenadas cuyo sentido es definido un número y un signo. En este tipo de volúmenes, es posible establecer flujos de fluido cruzados utilizando las coordenadas ortogonales.

Para resolver sistemas termo-hidráulicos, el código cuenta con los componentes hidráulicos ya mencionados y estructuras de calor. La funcionalidad y el comportamiento de los sistemas, se logra utilizando lógicas de control, que utilizan componentes lógicos y variables de control.

Para el caso en donde se debe tener en cuenta la transferencia de calor, se utilizan estructuras de calor, definidas de acuerdo al fenómeno a ser modelado. Las estructuras de calor consisten en volúmenes de control de un determinado material que interactúa con otra estructura hidrodinámica.

Este tipo de estructuras es utilizado frecuentemente para representar el material combustible, las vainas de los EC y las tuberías por la que se transfiere calor a otros componentes del sistema, tales como los intercambiadores de calor.

RELAP5 cuenta con una opción denominada “abrupt area change” que afecta la forma del cálculo de la pérdida de carga en la tubería por la que circula el fluido. Esta opción puede ser puesta por el usuario o el dejar que el código las calcule según sus propias correlaciones. Esto influye tanto en el cálculo de los factores de pérdida de carga como el cálculo de la velocidad del fluido.

Las funcionalidades de los sistemas de control se definen en base a la documentación disponible. Aquí se definen las lógicas con sus constantes de tiempo y retardos asociados.

Para modelar el sistema de control de un sistema de planta se dispone de componentes lógicos del tipo booleano, comparadores, y bloques de control del tipo tabla y funciones matemáticas, que aplicadas en combinación permiten emular el comportamiento de cualquier sistema de control.

El RELAP5 es un código que se ha utilizado durante más de 20 años y ha sido aplicado para evaluar los comportamientos de numerosos escenarios para distintas facilidades experimentales. Otras referencias de validación de códigos son los modelos de experimentos Integrales, como LOFT, ZION-1 PWR, Postulated Small Break Transient. Semiscale, y experimentos de efectos separados como “The Edwards4”, “Dukler Air-Water Flooding Tests”, “Marviken Test 24”, “Marviken Test 22, Bennett's”, “Heated Tube Experiments”, “Royal Institute of Technology Tube Test 261”, “ORNL Bundle Tests”, entre otros [18].

En particular la ARN ha utilizado este código para realizar estudios del mapa de circulación natural de la CNE durante una pérdida de refrigerante [23], también se ha realizado un modelo de planta completo [19] y se validó a través de datos experimentales de planta, para la aplicación de un disparo de turbina [9].

## CAPÍTULO 3

### Modelado del sistema de inyección de emergencia del núcleo

#### 3.1. Modelo aislado

En esta sección se detalla el modelado del ECCS en forma aislada y de los sistemas de control asociados, finalmente el ECCS y su sistema de control son acoplados a un modelo de planta completo y son evaluados como parte integral de éste.

Los componentes principales a modelar en el ECCS aislado son:

- Las tuberías de interconexión
- Las válvulas de paso
- Las bombas de inyección
- Los tanques de suministro de alta presión (acumuladores)
- El intercambiador de calor
- Lógica de control del sistema

Utilizando los planos isométricos del sistema y de las especificaciones técnicas de los componentes, se construye un modelo geométrico aproximado que irá acompañado de las condiciones iniciales y de contorno correspondientes.

En los casos de modelado de cañerías interesa el diámetro, la longitud, la rugosidad, las pérdidas de carga por forma o singularidades y por cambios de altura. Las presiones y temperaturas del fluido en los distintos componentes se utilizan como condición inicial y son necesarias en la entrada de datos. La discretización espacial se determina en base a la fenomenología que interesa estudiar.

En el caso del modelado de los sistemas instrumentación, en la mayoría de los casos, no se modelan las redundancias y se asume una única vía, y que ésta no falla al ser demandada. Salvo que dicha redundancia implique mediciones en ubicaciones diferentes del sistema) por ejemplo las mediciones de presión por triplicado que se llevan a cabo como una única medición sobre la cual no se asume falla y con lectura sin error. En la Tabla 1 se listan los componentes utilizados en el código RELAP5 y su nomenclatura BSI conforme a los datos de planta.

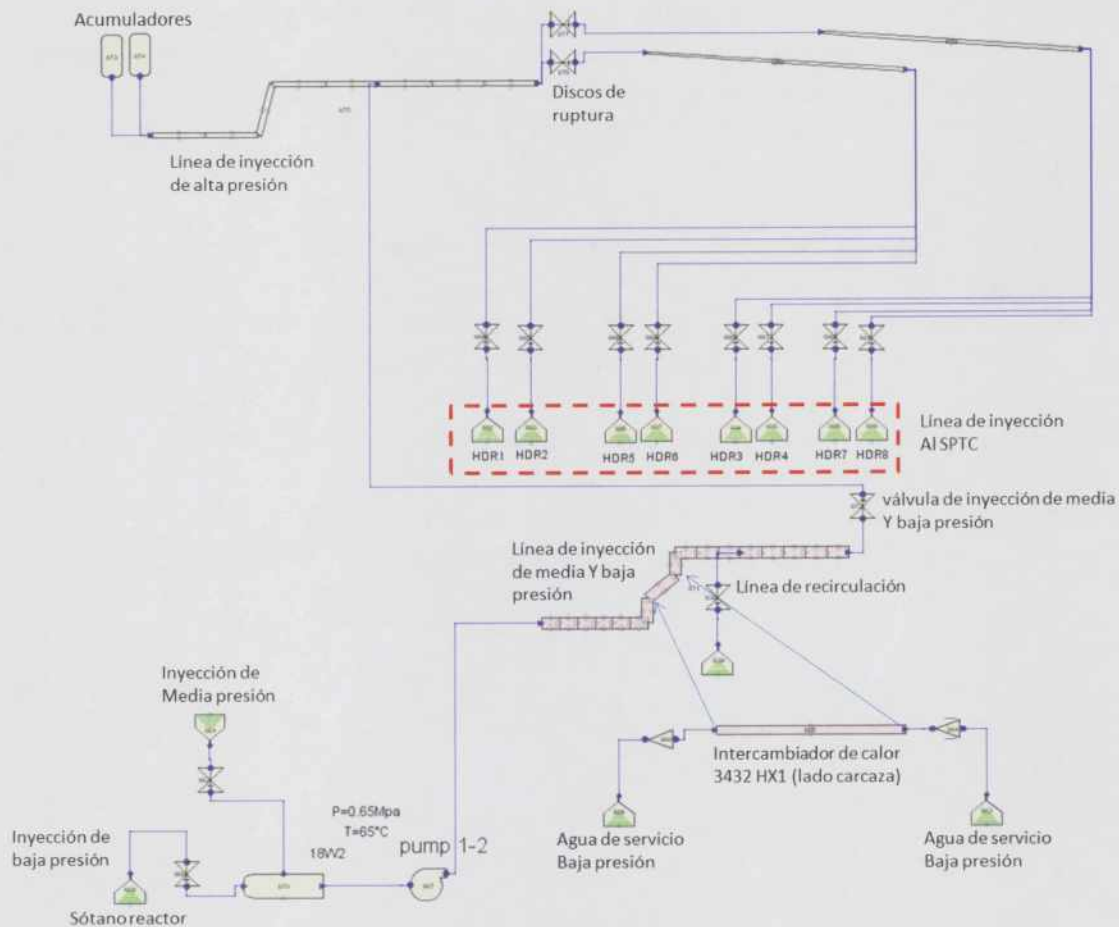


**Tabla 1: Tabla de componentes del ECCS**

N°	Código BSI	Código RELAP5	Descripción
1	3432-PV23	838	Válvula de recirculación
3	3432-PV11	862	Válvula de inyección de media
6	7132-HX1	865	Intercambiador de calor lado carcaza
8	3432-P1	867	Bomba de inyección de media y baja presión
11	-	870	Tubería de interconexión
12	-	871	Tubería de interconexión
13	3432-MV31	872	Válvula inyección de media y baja
14	3432-TK1	873	Tanque acumulador
15	3432-TK3	874	Tanque acumulador
16	-	875	Tubería de interconexión
17	3432-DR1	876	Disco de ruptura
18	3432-DR2	877	Disco de ruptura
19	-	878	Tubería de interconexión
20	-	879	Tubería de interconexión
21	34320-MV41	884	Válvulas de aislación
22	34320-MV39	885	Válvulas de aislación
23	34320-MV63	886	Válvulas de aislación
24	34320-MV65	887	Válvulas de aislación
25	34320-MV29	888	Válvulas de aislación
26	34320-MV45	889	Válvulas de aislación
27	34320-MV61	890	Válvulas de aislación
28	34320-MV59	891	Válvulas de aislación
37	34320-PV1	900	Válvula de inyección de baja
38	34320-HX1	871 (volumen 8)	Intercambiador de calor lado tubo

### 3.2. Modelado de la etapa de inyección de alta presión

La Figura 7 muestra el modelo hidráulico completo del ECCS aislado. A continuación se describe cada una de las etapas de inyección describiendo el proceso de modelado



**Figura 7: modelo del Sistema de refrigeración de emergencia del núcleo.**

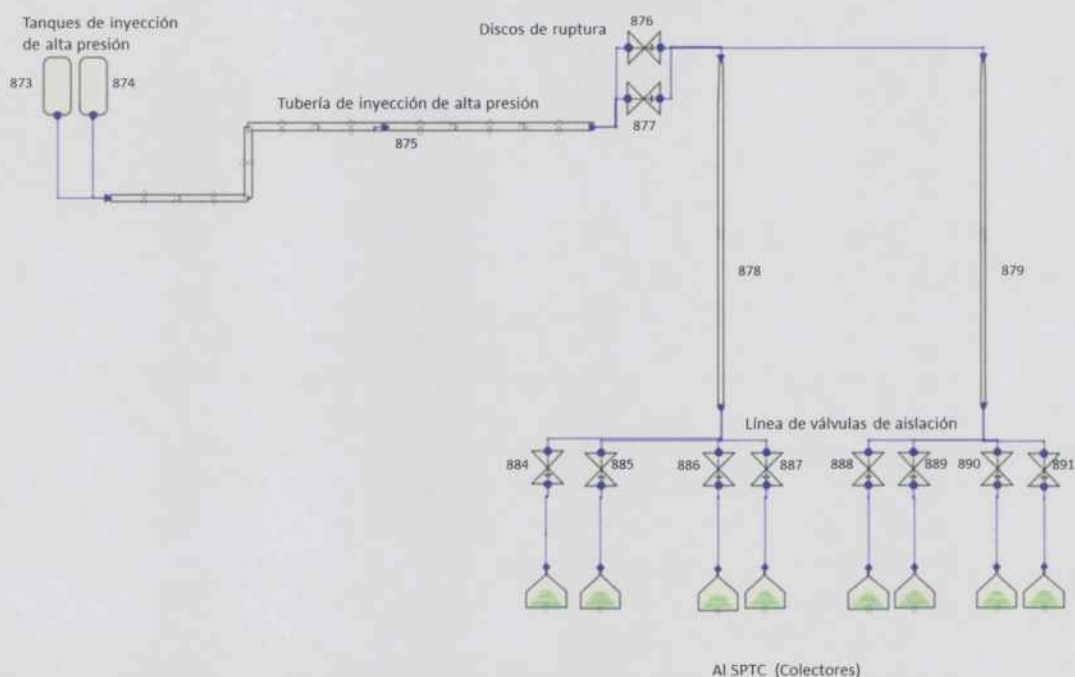
El modelo del sistema de inyección de alta presión consiste en una fuente de refrigerante con sus tramos de cañería, entre los acumuladores de alta presión y la inyección al SPTC. Para realizarlo, se tuvo en cuenta las longitudes de las cañerías, los cambios de altura y se modeló el trayecto desde los tanques de agua hasta el punto de inyección.

En el modelo las tuberías conservan las diferencias de altura entre el punto de succión y el de inyección. La rugosidad utilizada en las tuberías fue de  $45 \mu\text{m}$ . En el modelado no se incluyen los tanques acumuladores de aire. Para hacer esta simplificación, el volumen total de estos tanques fue dividido en dos y añadido al volumen de cada tanque acumulador 3432-TK1 y 3432-TK3, respectivamente, a la presión del tanque de aire. Por lo tanto ambos tanques acumuladores estarán inicialmente presurizados y cada uno de ellos modelado con un componente denominado en RELAP5 como "accumulator".

El acumulador tiene la ventaja de poseer una variable para medir el volumen de fluido dentro del componente en función del tiempo y un “trip” para producir el cierre de la inyección, haciendo las veces de las válvulas 3432-MV79 y MV80, conocidas como válvulas de inyección de alta presión y que tienen la función de aislar los tanques acumuladores del SPTC.

En el modelo, estos tanques acumuladores son el componente “accumulator” 873 para el 3432-TK1 y el “accumulator” 874 para el 3432-TK3, ver Figura 8. Como condición conservadora en cuanto a la cantidad inventario disponible para la inyección, se consideran sólo 85 m<sup>3</sup> (en lugar de 106 m<sup>3</sup>) por cada tanque.

El componente “accumulator” permite contener nitrógeno y mediante un “trip” (886 para el 3432-TK1 y 885 para el 3432-TK3) se produce el cierre del acumulador para no introducir gas no condensable a la cañería aguas abajo de los tanques del ECCS. La Figura 8 muestra la nodalización del ECCS de alta presión en RELAP5.



**Figura 8: Nodalización del ECCS de alta presión en RELAP5.**

Los discos de ruptura se modelaron como válvulas motoras 876 y 877, que tienen señales de apertura y cierre, dadas por los “trips” 877, 1877, 883 y 1884 respectivamente, con un tiempo de apertura de 100 ms.

En la planta, aparte de las válvulas de aislación del D<sub>2</sub>O 3432-MV39 a MV46 y 3432-MV59 a MV46, posee un conjunto de válvulas anti-retorno que no permiten el flujo de D<sub>2</sub>O desde el SPTC hacia el tanque acumulador, estas válvulas se modelaron con el

agregado de un coeficiente de pérdida de carga elevado para el flujo en reversa (en sentido hacia los acumuladores). El componente denominado en RELAP5 "pipe" 875 (Figura 8) es una cañería que tiene la longitud total de 164 m y consiste en todas las cañerías que componen la línea de inyección de alta presión. Las pérdidas de carga correspondientes tanto a la fricción como a las singularidades de esta cañería, fueron consideradas en este componente equivalente y obtenidos de [14].

Los diámetros de las cañerías que conforman el sistema de inyección de alta presión son de 10", 12" y 16". Se ha tomado un área equivalente de 0.1138 m<sup>2</sup>, considerando un promedio ponderado de los tres diámetros de esta cañería respecto a sus longitudes. Se asume que esta simplificación posee el alcance suficiente para realizar el análisis considerado. En la Tabla 2 se muestra la lista de algunos planos isométricos utilizados y la geometría de las cañerías del sistema.

**Tabla 2: Listado de planos isométricos del sistema de inyección de alta presión.**

Código	Diámetro (pulgadas)	Longitud (mm)	coeficiente de pérdida de carga	Altura Diferencial (mm)*
34320-16W-83	16"	4965	0.34	-1472
34320-16W-81-1	16"	35639	0.88	4058
34320-16W-81-2	16"	21175	0.27	8700
34320-W-62-1	16"	20032	0.86	7059
34320-W-62-2	16"	23703	0.57	0
34320-W-62-3	16"	7577	0.55	0
34320-W-62-4	12"	12011	0.79	7315
34320-W-5-3	12"	1094	0.41	0
34320-W-5-4	12"	20183	1.36	-2591
34320-W-5-5	12"	11029	1.88	-6426
34320-W-5-6	10"	7182	0.34	1149

\* El signo de la altura diferencial implica: positivo - cañería ascendente; Negativo - cañería descendente.

### 3.3. Modelado de la etapa de inyección de media presión

La línea de inyección de media presión desde el "dousing" hasta la succión de la bomba 3432- PV1/2, ha sido modelada con la válvula 862 (que es la válvula 3432-PV10 o 3432-PV11, ya que no se incluye la redundancia en el modelo). Esta válvula posee una pérdida de carga concentrada equivalente a la de toda la cañería desde el

“dousing” hasta la succión de la bomba. El “dousing” fue modelado como una condición de contorno con el “TDV” 861 a una presión y a una temperatura equivalente.

Cuando la presión en los colectores está por debajo de la altura de las bombas 3432-PV1/2 se inicia la inyección de media presión. Estas bombas se encuentran fuera del recinto del reactor y están alimentadas por dos líneas de aspiración separadas.

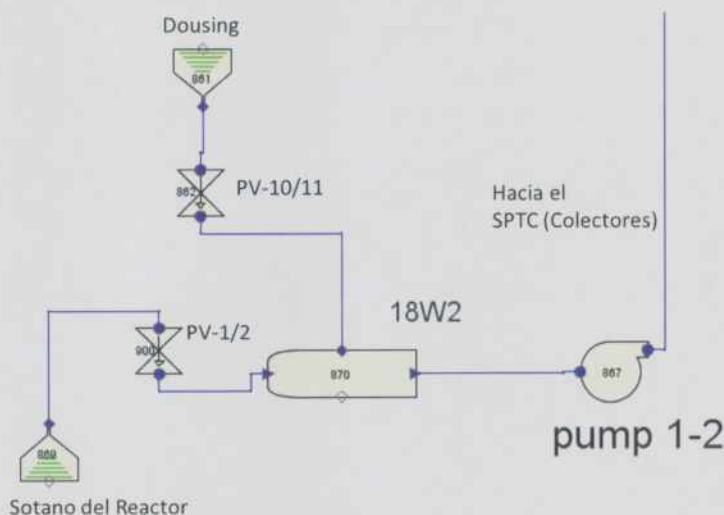


Figura 9: Inyección del sistema de media presión.

Las bombas son 2x100%, esto implica que una única bomba puede realizar la función de inyección pero por requerimientos de seguridad el sistema cuenta con una redundancia, aunque solo se ha modelado una de ellas. La bomba ha sido modelada con una del código RELAP5 del tipo “Bingham” con una altura de 61 m. La misma, en el modelo, fue denominada como Pump-1-2. La Figura 9 muestra un esquema del sistema de inyección de media y baja presión, modelado en forma aislada utilizando las condiciones establecidas en [8].

La cañería utilizada por el sistema de inyección de media presión comparte cañería con el de baja presión y es la que se encuentra aguas debajo de la bomba. Cuando el nivel del “dousing” llega a su valor de “setpoint” (o en forma equivalente, se hayan inyectado 286 m<sup>3</sup> de refrigerante de un total de 500 m<sup>3</sup>) se iniciará la conmutación hacia la etapa de inyección de baja presión.

### 3.4. Modelado de la etapa de inyección de baja presión.

En el modelo del circuito de baja presión (siguiendo el sentido del fluido), el “TDV” 869, representa la condición de contorno con las propiedades termodinámicas del fluido

recolectado en el sótano del reactor. Las válvulas 3432-PV1/2 son incluidas en el modelo como una única válvula de apertura instantánea llamada válvula 900 (ver Figura 10). Dicha válvula está conectada al “BRANCH” 870. La tubería que conecta el sótano con dichas válvulas fue modelada como una pérdida de carga incluida en las mismas.

El circuito consta de cañerías representadas por el “pipe” 871 que se acopla con la cañería de inyección de alta presión (“pipe” 875). Las pérdidas de carga en las tuberías de baja presión en el tramo entre las bombas y dicho acople, fue introducido como un parámetro concentrado en la cañería en dos ubicaciones, a la entrada y a la salida del tramo inclinado a 45°.

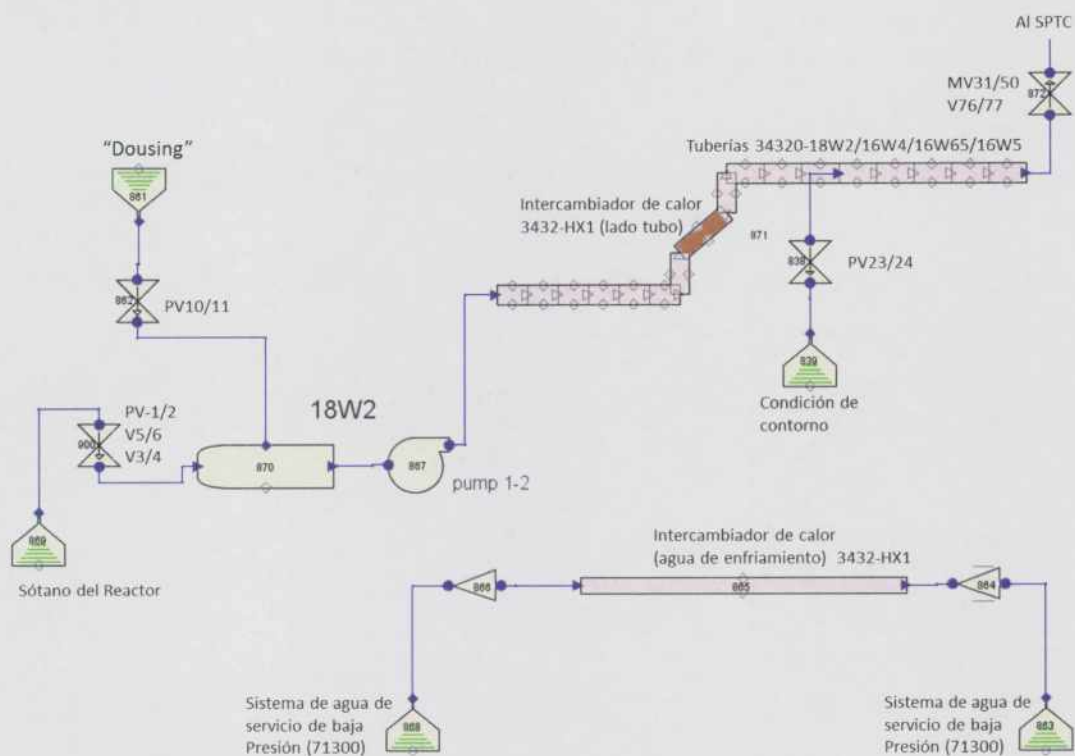


Figura 10: modelo en RELAP5 del ECCS de media y baja presión.

En el tramo inclinado a 45° del “pipe” 871 se incluyó una estructura de calor conectada al componente “pipe” 865 que representa al intercambiador de calor 3432-HX1, que es refrigerado por agua de proceso de baja presión.

Este suministro de agua de proceso fue modelado como una condición de contorno por la “TDJ” 864 que inyecta un caudal constante de aproximadamente 760 kg/s. Esta inyección se habilita a los 90 segundos luego de la señal de LOCA.

El modelo simplificado de baja presión contempla una única bomba (explicada en el modelado del sistema de media presión), las válvulas de inyección de baja presión, 3432-PV1/2, las válvulas de inyección de media y baja presión 3432-MV31 y MV50, la tubería de conexión entre la bomba 3432-PV1/2 y el SPTC y el intercambiador de calor 3432-HX1.

En la planta, las bombas 3432 P1/2 arrancan funcionando a través de un circuito de recirculación hasta ponerse en régimen, en RELAP5 la bomba arranca en forma instantánea y la recirculación se modeló como una extracción de refrigerante para tomar en cuenta el inventario extraído y que no forma parte de la inyección. Las válvulas 3432-PV23 y PV24 corresponden al circuito de recirculación del sistema de inyección de media y baja presión. La misma fue modelada por la válvula 838 del tipo "trip valve" con apertura instantánea y una pérdida de carga determinada utilizando los datos de planta.

La Tabla 3 especifica la lista de planos según código y características geométricas de cada tramo a lo largo del sistema.

**Tabla 3: Listado de planos isométricos del sistema de inyección de baja presión.**

Código	Diámetro (pulgadas)	Longitud (mm)	coeficiente resistencia	Altura Diferencial (mm)*
34320-16W-4	16	19734	2.44	4827
34320-16W/14W	16 y 14	31239	1.77	4600
34320-16W/14W-65	14 y 16	42095	2.056	3795
34320-16W-5	16	42095	1.716	15849
34320-16W-5	16	15210	1.426	1829
34320-16W-5	16	11800	0.714	-1524
3432-18W-2	18	2966	2.08	98

\* El signo de la altura diferencial implica: positivo – cañería ascendente; negativo – cañería descendente.

Finalmente las válvulas 3432-MV31 y MV50 fueron modeladas por una única válvula y la válvula de retención asociada fue incluida como una pérdida de carga en reversa elevada.

### 3.5. Lógica de control

En esta sección se describe la implementación de los sistemas de control que actúan sobre el sistema ECCS. Como se mencionó, el comportamiento del ECCS se evaluará

primero en forma aislada y luego como parte constitutiva de un modelo de planta completo. Por lo tanto, en esta sección se describirá solo la lógica de control para el modelo del sistema aislado.

El modelo de control consta de 6 bloques independientes, a saber:

- 1- descripción de la implementación de señal de LOCA
- 2- apertura de válvulas de inyección de alta presión
- 3- rotura de los discos de ruptura (control de válvulas)
- 4- control de inyección de alta presión
- 5- control de inyección de media y baja presión

### **3.5.1. Descripción de la implementación de señal de LOCA**

En la planta, la señal de LOCA es obtenida empleando la lógica indicada en [13], a partir de 6 parámetros de proceso a saber:

1. Presión en el circuito 1 del SPTC
2. Presión en el circuito 2 del SPTC
3. Presión en el Edificio del reactor
4. Nivel (moderador) en el tanque de calandria
5. Temperatura en la sala del GV \*\*\*
6. Temperatura en el edificio de la M/R \*\*\*

La Figura 11 muestra cómo se confecciona la señal de LOCA en la planta empleando estos parámetros de proceso mencionados. Aquellos que se indican con \*\*\* corresponden a aquellos que no se implementaron en el modelo. Por otro lado, la Figura 12 presenta el esquema en RELAP5 de los parámetros (implementados) en la generación de la señal.

En el modelo, la señal de baja presión se obtiene midiendo la presión en los colectores 1, 2 y 4 del circuito 1 y en los colectores 5, 6 y 8 del circuito 2. El valor implementado de "setpoint" en el modelo fue de 5.62 MPa(a).

En el modelo de planta completo se puede medir una presión en la contención que es comparada con la de referencia. Esta presión de referencia se obtiene del resultado de una corrida de estado estacionario. El modelo de contención calcula el cambio de

presión de contención en función de la cantidad de vapor y no condensables (aire) y temperatura de la misma. Si esta diferencia de presión excede 3kPa, se genera una señal de disparo por alta presión en la contención para el primer sistema de extinción. El alcance del modelo solo permite determinar la presión en la contención, por este motivo no se tomó en cuenta el parámetro de temperatura en los recintos. En el caso aislado solo se toma en cuenta la presión en el SPTC.

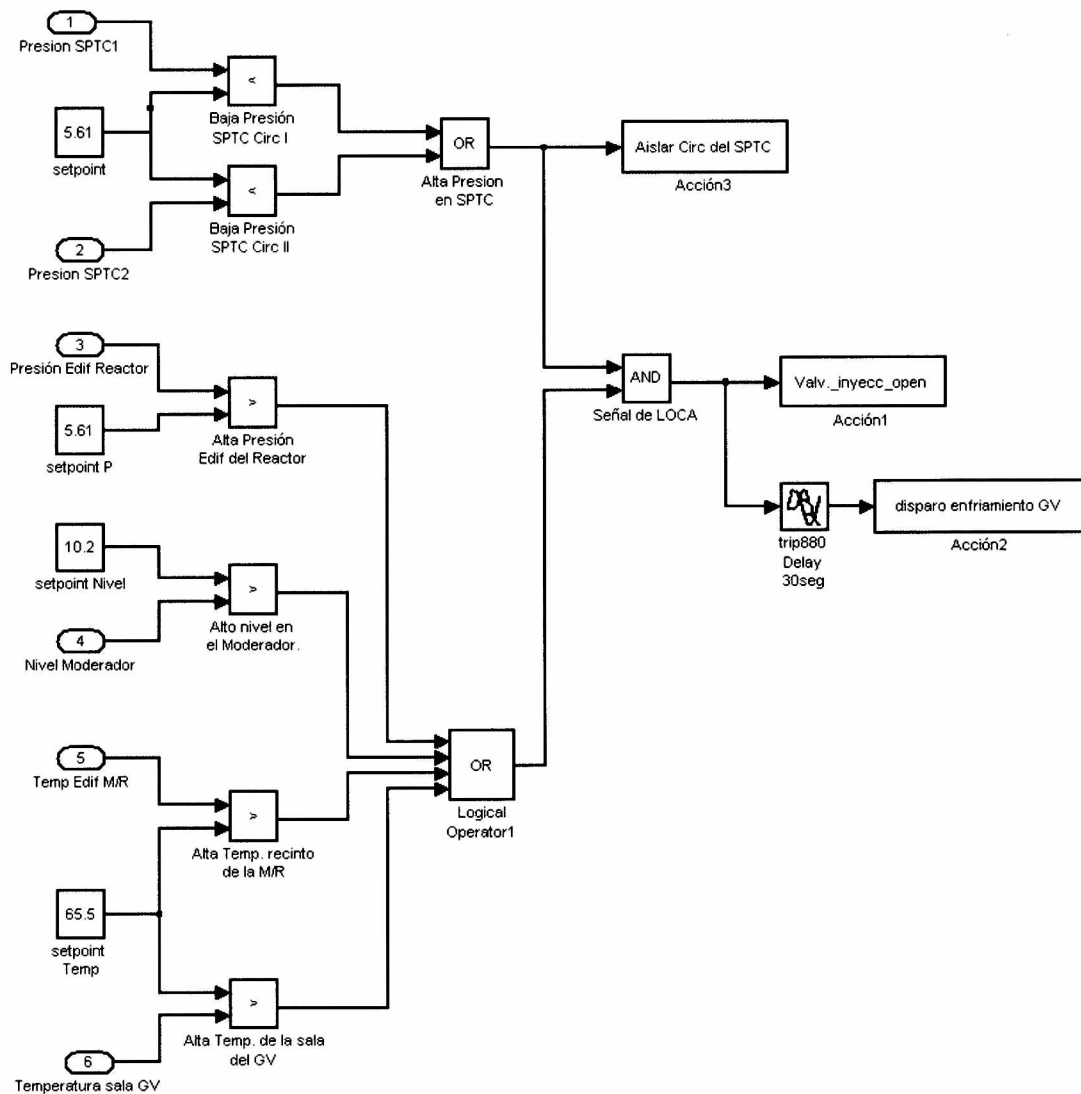


Figura 11: Lógica utilizada para la generación de la señal de LOCA en la planta.

En la planta, al igual que en el modelo, una vez producida la señal de LOCA se inicia la inyección del ECCS.

- apertura de las válvulas de aislación del gas a presión que conectan a los tanques 3432-K1 y 3432-TK3
- apertura de las válvulas de aislación del ECCS con el SPTC
- apertura de las válvulas de inyección de alta presión del ECCS
- inicio del conteo de 30 segundos para accionar la apertura de las válvulas de seguridad de los GVs (“Crash cooldown”)
- encendido de la bomba 3432-P1/2

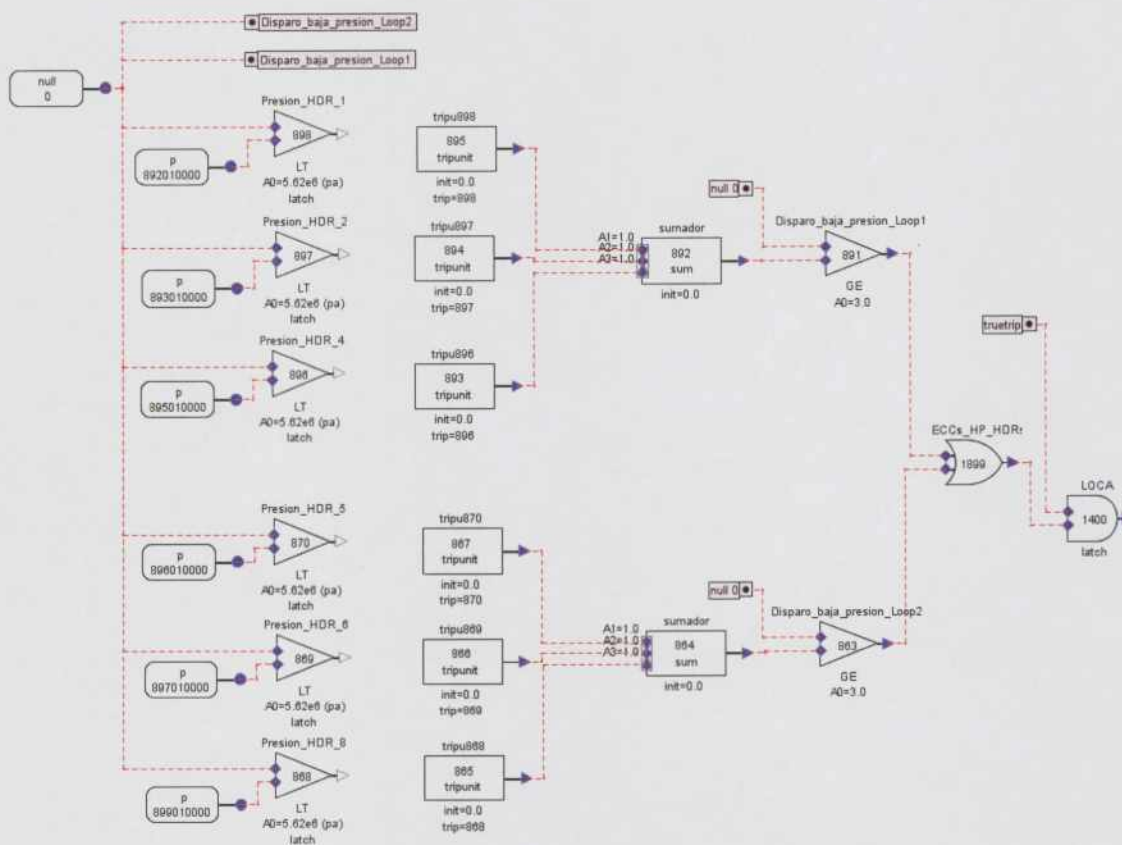


Figura 12: Disparo de LOCA implementado en el modelo del ECCS de RELAP5.

### 3.5.2. Apertura de las válvulas de inyección del ECCS al SPTC

Una vez producida la señal de LOCA, la línea de válvulas de aislación está habilitada para la inyección de refrigerante desde el ECCS al SPTC, siempre que exista una diferencia de presión positiva en la dirección de flujo de las válvulas. Esta condición de diferencia de presión representa el comportamiento de las válvulas anti-retorno PV-33, 34, 47 y 48, ubicadas aguas arriba de la línea.

En el modelo se calcula la presión promedio en los colectores de entrada y de salida de un mismo circuito del reactor y se compara este valor con la diferencia de presión entre los extremos de la válvula (Figura 13). Si la presión promedio es menor a esta diferencia la válvula se abre. En esta lógica está contemplado el comportamiento de las válvulas anti-retorno. En el modelo aislado la presión en los colectores es reemplazada por una condición de contorno implementada por los TDV del 892 al 899 (ver Figura 7).

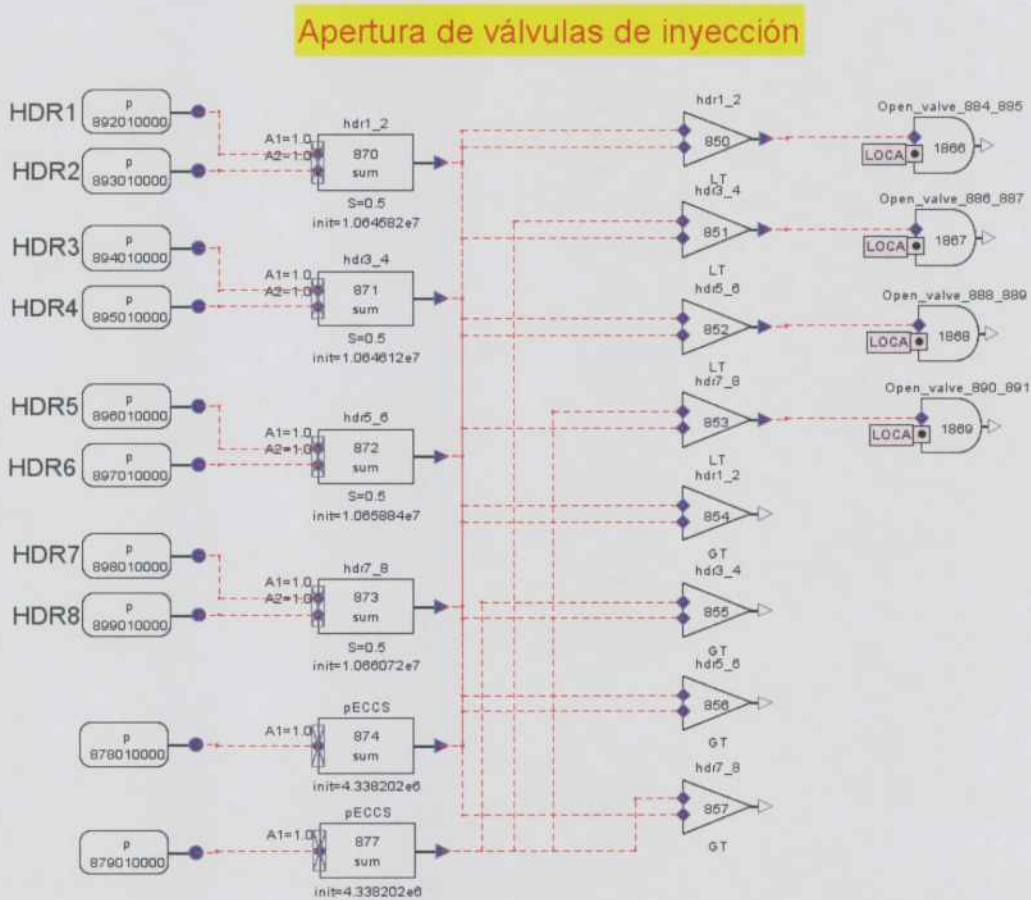


Figura 13: Disparo de LOCA implementado en el modelo del ECCS de RELAP5.

### 3.5.3. Rotura de los discos de ruptura (control de válvulas)

Una vez producida la señal de LOCA, la inyección comienza recién después de producida la rotura de los discos por diferencia de presión. Cada disco de ruptura puede de alimentar con agua del ECCS a uno de los dos circuitos del SPTC (Figura 7). Para modelarlos se utilizaron las válvulas 876 y 877 que se abrirán con cuando la

diferencia de presión a través del disco sea menor a 0.48 MPa. La válvula 876 se abrirá con la diferencia de presión existente aguas arriba del disco y aguas abajo. La válvula 877 se abrirá de la misma manera. La Figura 14 muestra la lógica utilizada para la implementación de la apertura y el cierre de dichas válvulas.

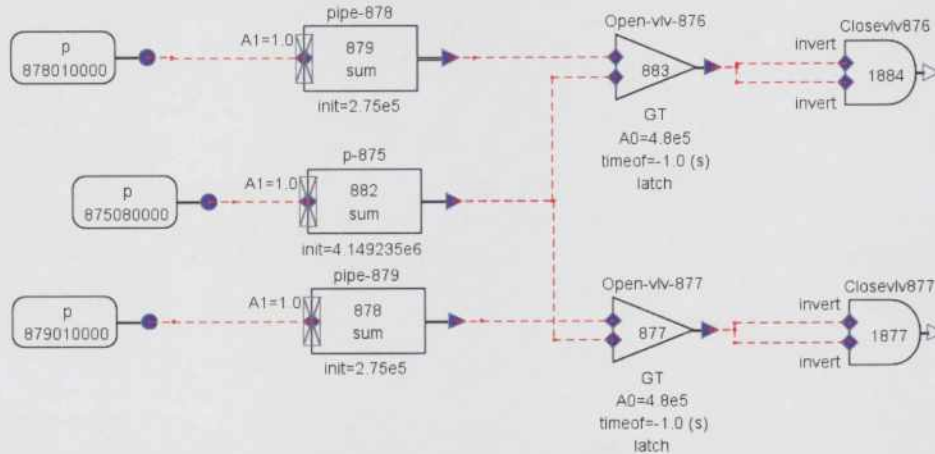


Figura 14: control de apertura de las válvulas que simulan los discos de ruptura

### 3.5.4. Control de inyección de alta presión

La inyección del sistema de alta presión tendrá lugar hasta que se produzca una señal de bajo nivel de en los acumuladores para evitar el ingreso de no condensables al SPTC. Para ello, se utilizan dos “trips” 885 y 886 que comparan el nivel de los tanques con un volumen mínimo de 21.05 m<sup>3</sup>, medidos a través de una señal variable denominada “acvliq”, como se observa en la Figura 15. Cuando estos “trips” se activan se finaliza la inyección de refrigerante de la etapa de alta presión.

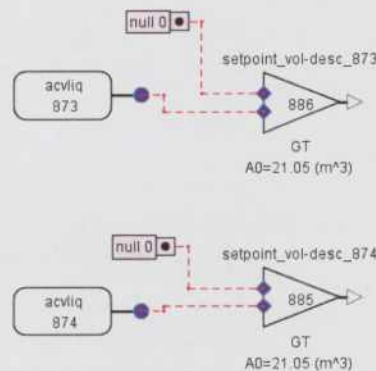


Figura 15: Lógica de cierre de válvulas de aislamiento de inyección de alta presión.

### 3.5.5. Control de inyección de media y baja presión

En la planta las bombas 3432-P1/2 arrancan luego de la apertura de la válvula de inyección del “dousing”, que se abren automáticamente con señal de LOCA. Luego de 90 seg, se produce la apertura de las válvulas de inyección de media presión 3432-MV31/50.

En el modelo, tanto el encendido de las bombas como la apertura de la válvula 3432-MV31/50, se realiza a los 90 seg luego de la señal de LOCA mediante el “trip” 1875. La lógica utilizada se muestra en la Figura 16. En ella se incluye también el control de la inyección de agua de servicio y ésta es habilitada por la variable de control 1876.

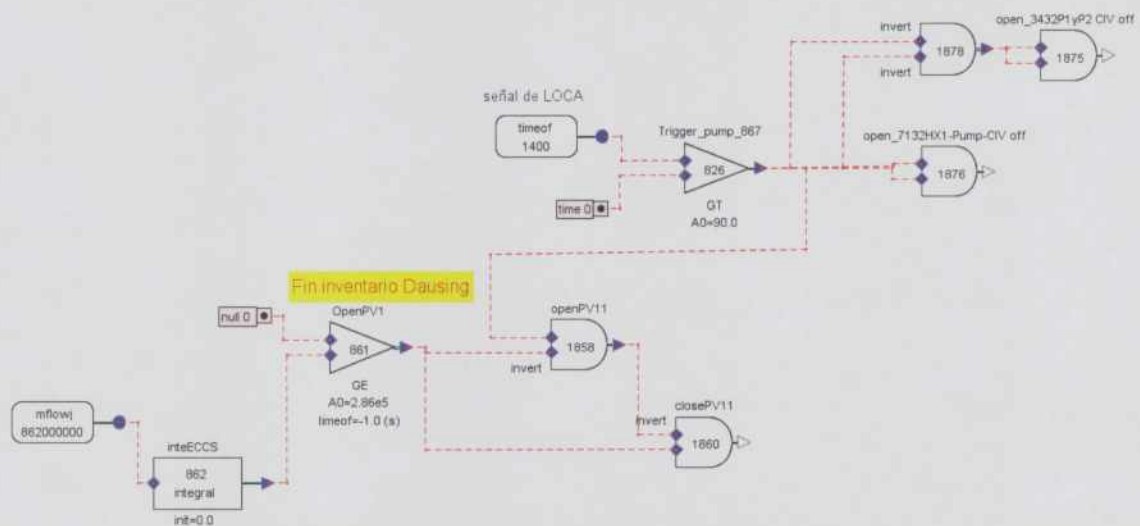
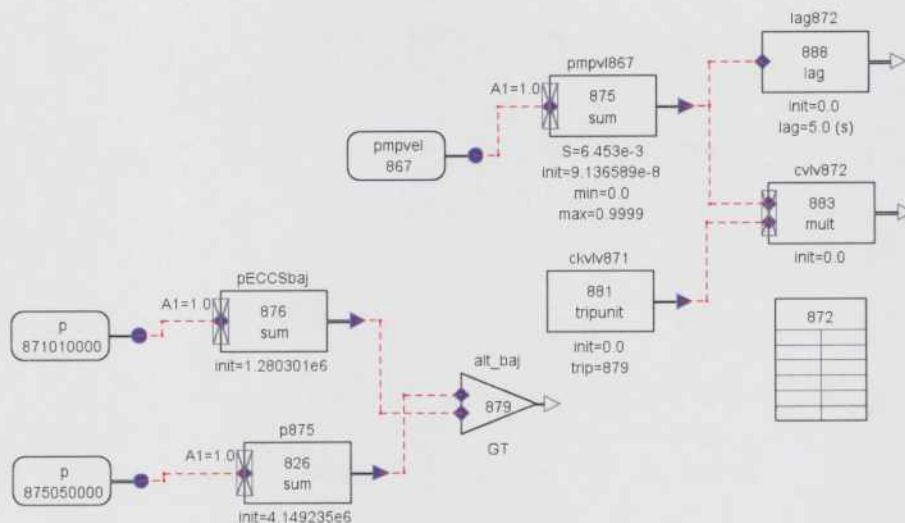


Figura 16: Control de disparo de media y baja presión.

La apertura de las válvulas se implementó como una función del tiempo que sigue el aumento en la velocidad de la bomba. Esto es para evitar el vaciado de la cañería aguas arriba de la bomba o un incremento de presión aguas debajo de la bomba dando como resultado un error en la corrida.

La tabla 872 de la Figura 17 contiene como valores de entrada la velocidad de la bomba y como salida, el área de apertura de la válvula 872 (3432-MV31-50). Esta tabla es habilitada únicamente si la diferencia de presión aguas arriba y aguas debajo de la válvula es positiva.



**Figura 17: Lógica de apertura de la válvula de inyección de media presión.**

En suma, una vez comenzada la inyección de alta presión, la presión en el SPTC irá bajando hasta alcanzar un valor en el que las bombas podrán comenzar a inyectar refrigerante desde el “dousing”.

Durante la inyección de media presión, cuando el nivel en el “dousing” alcanza un volumen de inyección de 286 m<sup>3</sup>, se cierra automáticamente la válvula 862 (3432-PV10-11) y se abre la válvula 900 (3432-PV1-2), comenzando así la etapa de inyección de baja presión.

## CAPÍTULO 4

### Modificaciones para la implementación del ECCS al modelo completo

#### 4.1. Implementación del ECCS en el modelo completo de la CNE

El ECCS inyecta H<sub>2</sub>O al SPTC mientras que este contiene D<sub>2</sub>O, lo que representa un problema en la implementación en RELAP5 del ECCS en el modelo de planta completo. Esto se debe a que el código no permite la mezcla de H<sub>2</sub>O y D<sub>2</sub>O en un mismo volumen de control.

Este inconveniente se resolvió utilizando el ECCS como un sistema con agua liviana y copiando sus presiones en la inyección de H<sub>2</sub>O y los caudales de inyección en el SPTC, para que el líquido introducido en el mismo, sea D<sub>2</sub>O. De esta manera en el modelo de planta completo, el ECCS y el SPTC estarán conectados indirectamente. La limitación que genera este tipo de conexión es que la temperatura de inyección se mantendrá constante y con un valor de 49°C.

Este acople indirecto se realizó agregando al modelo aislado del ECCS, una serie de componentes TDV, que van de 853 al 860, como se ve en la Figura 18. Estos componentes definen la condición de contorno de la presión de los colectores (como función del tiempo) y es utilizada como dato para la inyección de H<sub>2</sub>O por el ECCS.



Figura 18: Conexión hidráulica del ECCS al SPTC.

Así, mediante el acople mencionado se mantienen el ECCS y el SPTC aislados pero hidráulicamente interconectados, tomando el caudal del ECCS para inyectarlo al SPTC. Como este trabajo solo se limita a presentar el ECCS aislado, se explica la interface utilizada para utilizarlo con el modelo completo, solo por razones de

completitud. Las condiciones de contorno del sistema de alta presión, están dadas por la presión de los acumuladores y la presión en los colectores durante el transitorio.

#### 4.1.1. Aislación de los circuitos del SPTC

Una de las acciones que realiza la lógica de control del ECCS en el caso de señal de LOCA, es la de aislar los dos circuitos del SPTC, para que el circuito intacto no pierda inventario a través del circuito roto como se muestra en la Figura 19.

Para esto una lógica 2/3 del sistema mide la presión en los colectores 1, 2, 4 del circuito 1 y en los colectores 5, 6 y 8 del circuito 2. En caso, de ser este valor menor a 5.32 MPa, se accionarán las válvulas de aislamiento.

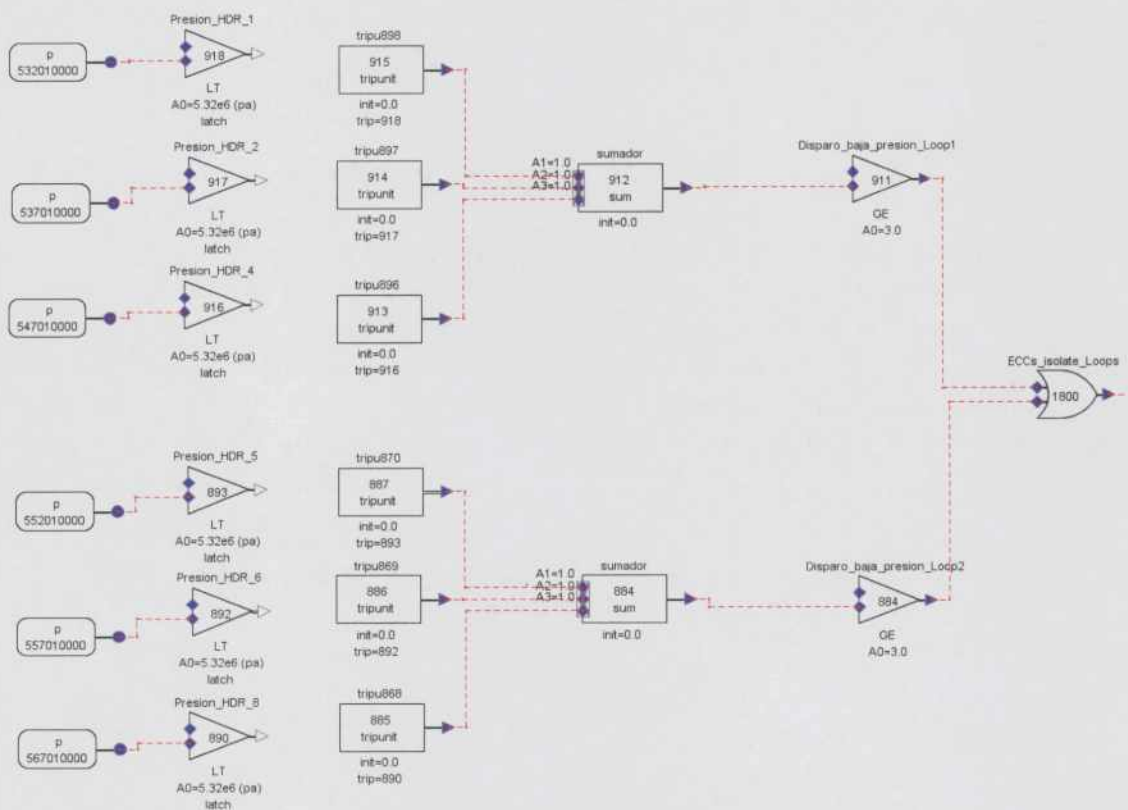


Figura 19: Aislación de circuitos del SPTC.

## CAPÍTULO 5

### Simulaciones, resultados y análisis

#### 5.1. Resultados de las simulaciones

En esta capítulo se muestran los resultados del análisis de la respuesta del ECCS. El análisis se divide en dos partes, uno con el modelo del ECCS aislado y otro con el modelo incorporado a un modelo de planta completo. En el primer caso se analiza la forma de la inyección del ECCS frente a variaciones de la presión del SPTC. Esto es para verificar la secuencia de accionamiento del sistema desde el punto de vista de la lógica del control. Luego se analiza el comportamiento de la inyección del ECCS frente a un cambio de presión producido por una rotura del 40% de un colector de entrada del SPTC

#### 5.2. Análisis del ECCS como modelo aislado

A los efectos de estudiar la respuesta del modelo a una variación de presión en el SPTC, se ensayó una rampa lineal descendente con baja tasa de variación que va desde la presión nominal del SPTC a plena potencia, hasta el valor de presión que alcanza el SPTC luego de ser apagado (ver Figura 20). La rampa superior (en color rojo) corresponde a la presión de los colectores de entrada y la inferior (color negro) corresponde a la presión de los colectores de salida.

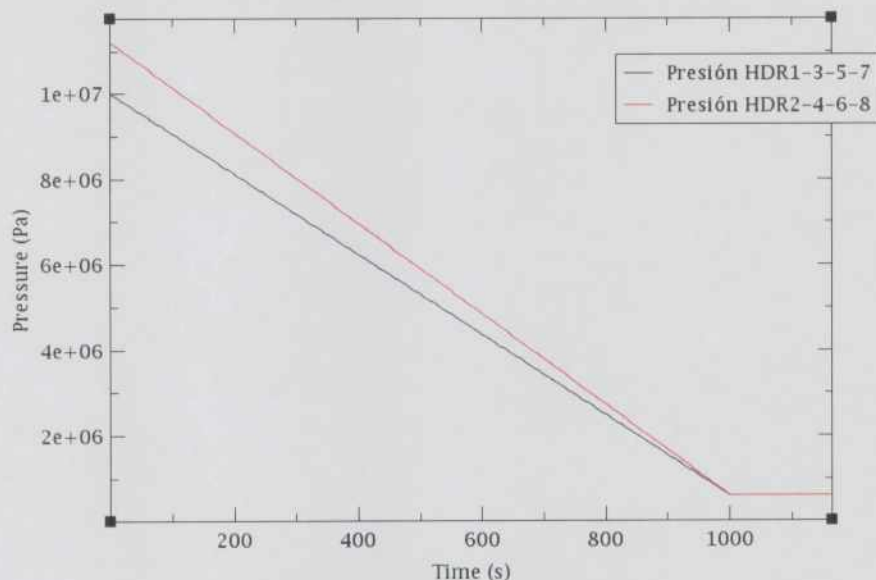


Figura 20: Curva de despresurización.

El resultado de la inyección del ECCS en sus tres etapas, en el tiempo, para la variación de presión mencionada se muestra en la Figura 21. En dicha figura se puede observar que el caudal de inyección de alta presión cambia con el tiempo. Esta variación es función de la presión en el punto de inyección y del grado de solapamiento con la etapa de media presión. En la etapa de baja presión y parte de la de media presión, esto no ocurre y se observa un caudal constante.

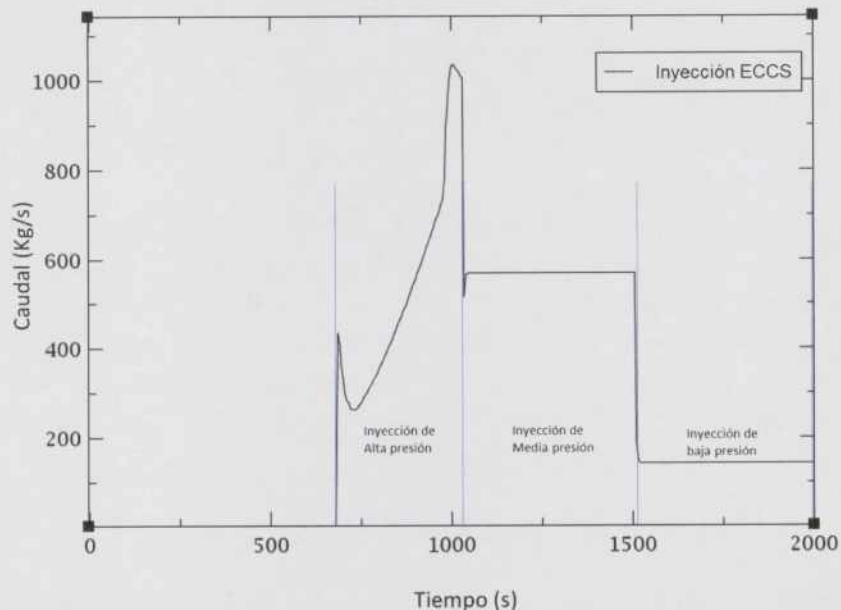


Figura 21: Respuesta del ECCS frente a la caída de presión del SPTC.

La Tabla 4 presenta el resultado de los tiempos de inyección asociados a las distintas etapas del ECCS para la variación de presión correspondiente a la Figura 20.

Tabla 4: Tiempos de inyección del ECCS (modelo aislado)

Evento	Tiempo (s)
Baja presión	530
Apertura Válvulas de inyección (colectores)	675
Apertura de discos de ruptura	680
Inicio inyección de media presión	975
Fin Inyección de alta presión	1040
Fin Inyección de media presión	1505
Inicio Inyección de baja presión	1505

Para el ensayo realizado se asumió como activación del ECCS cuando la presión del SPTC es de 5.62 MPa (a).

Conforme a este análisis y a la vista de los resultados, la evolución del modelo es la esperada desde el punto de vista del comportamiento de la lógica de control. De todos modos no pueden evaluarse aquí resultados acerca del cumplimiento de los requerimientos del sistema desde el punto de vista termohidráulico.

Estos tiempos de inyección obedecen al accionar de la lógica de control del ECCS y el caudal de inyección los cuales son función de la presión en el SPTC y de la curva de característica de la bomba de inyección de media y baja presión.

La evolución de la presión en la etapa de alta presión, será distinta dependiendo de la velocidad en la que decrece la presión del SPTC. Para evaluar este comportamiento frente a distintas tasas de despresurización, se realizó un análisis paramétrico del caudal de inyección en función de la tasa de despresurización en el SPTC. Para esto se utilizaron rectas con distintas pendientes en intervalos entre 10 seg y 250 seg, con valores de presión iniciales y finales, idénticos a los definidos en la figura 20.

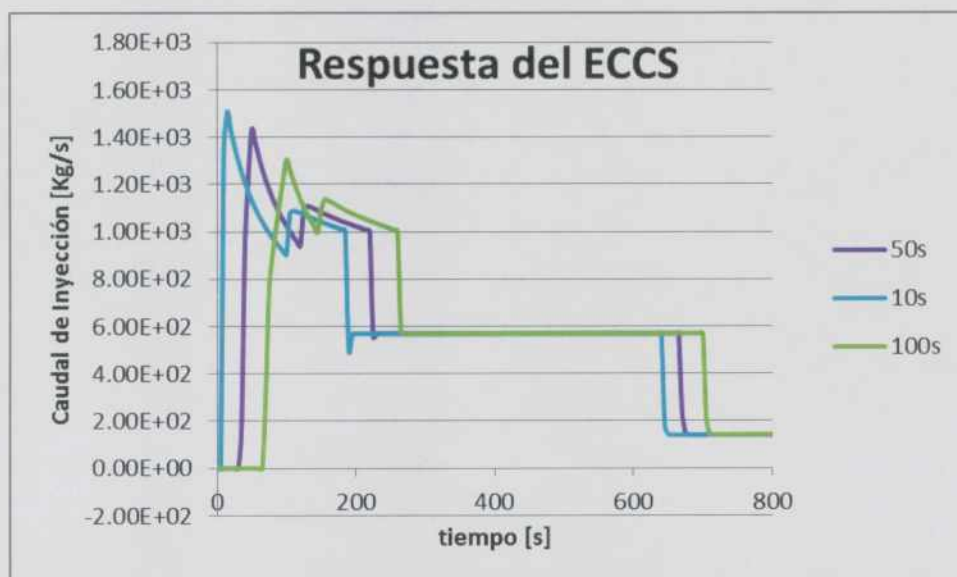


Figura 22: Respuesta del ECCS frente a distintas tasas de despresurización.

Los resultados mostrados en la Figura 22 verifican que la evolución de la inyección del ECCS (de alta presión) responde aumentando el caudal inicial del sistema de alta presión y desplazando los tiempos de inyección de media y baja presión, pero conservando el patrón observado en la Figura 21. El salto que se observa en la inyección de alta presión corresponde al solapamiento de la inyección de media presión sobre el de alta.

Esto último se justifica dado que al aumentar variación de presión se produce un aumento del caudal, haciendo que el acumulador se vacie más rápido y alcanzando la presión de inyección de media presión más tempranamente.

Para evaluar la inyección del ECCS frente a una curva de despresurización más próxima a la calculada por el código, se tomaron como curvas de referencia, las del caso de un LOCA, correspondiente a la rotura del 40% de un colector de entrada de la CNE, extraídos de los resultados obtenidos para el modelo de planta completo desarrollado por la ARN. Las curvas de despresurización utilizadas se muestran en la Figura 23 y Figura 24.

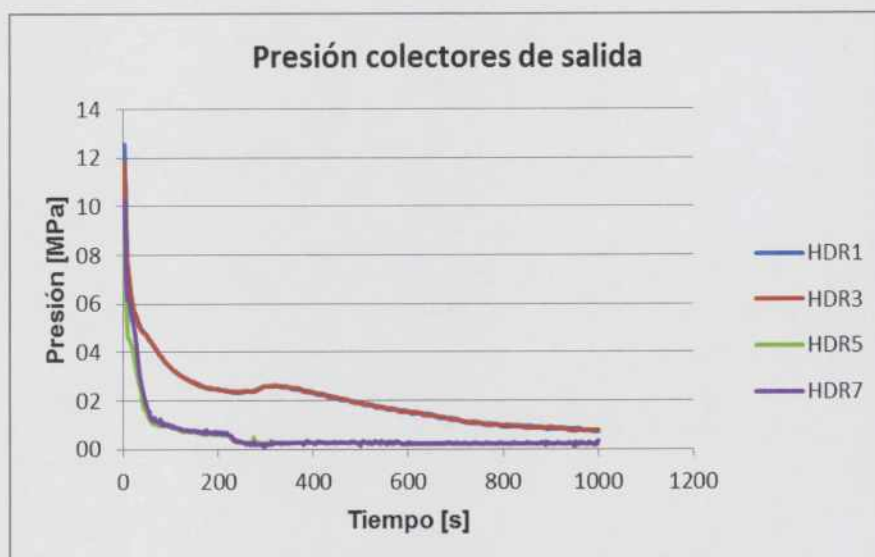


Figura 23: Presión de colectores de salida para un LOCA 40%.

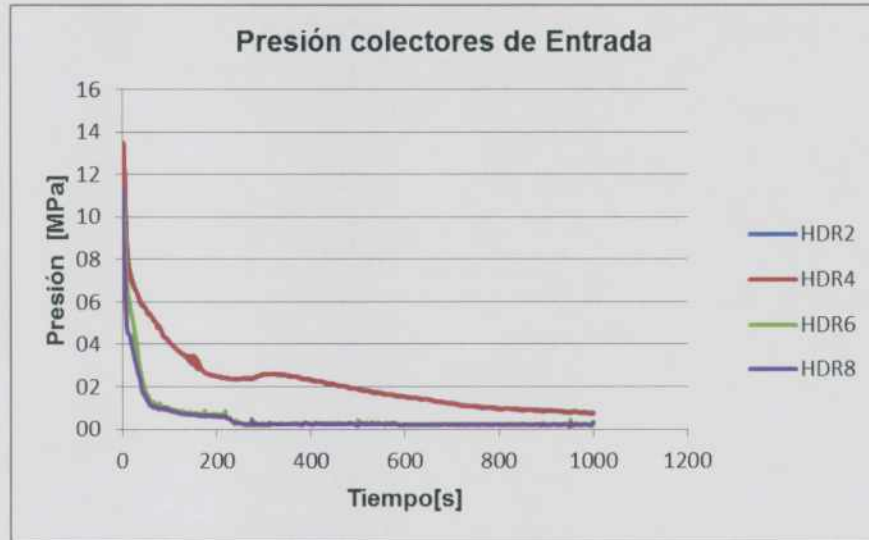


Figura 24: Presión de colectores de entrada para un LOCA 40%.

La respuesta obtenida de la inyección del ECCS, se muestra en la Figura 25. Este patrón de inyección se corresponde con el esperado para este tipo de eventos y se puede observar solapamiento del sistema de inyección de alta y media presión mencionado anteriormente.

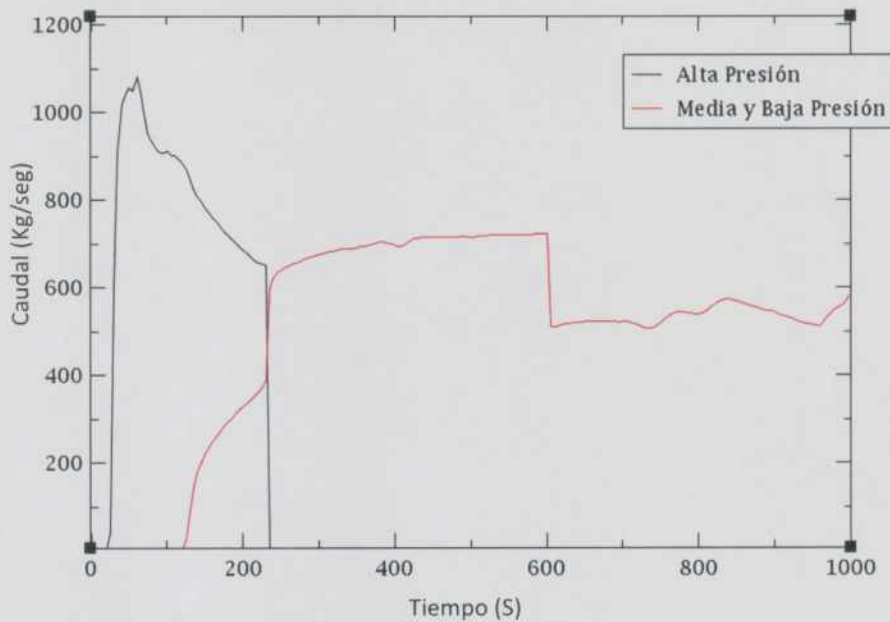


Figura 25: Caudales de inyección del ECCS para un LOCA del 40%.

La Tabla 5 muestra los tiempos de inicio de cada etapa. Estos valores están en acuerdo con los valores esperados por el diseñador [24].

**Tabla 5 : tiempos de inyección del ECCS**

Evento	Tiempo (s)
Señal de LOCA	16.5
Apertura Válvulas de inyección (colectores)	22
Apertura de discos de ruptura	22.5
Inicio inyección de media presión	106
Fin Inyección de alta presión	230.5
Fin Inyección de media presión	600
Inicio Inyección de baja presión	600

### 5.3. Análisis del ECCS sobre un modelo de planta completo

Una vez realizado el modelo del ECCS y verificado el comportamiento lógico, este fue implementado como parte complementaria de un modelo de planta completo con cinética neutrónica incluida. Ahora interesa evaluar la dispersión de los resultados obtenidos (en el modelo completo), en función de la dispersión de distintos parámetros del sistema (ECCS). Los parámetros evaluados fueron la presión de los acumuladores, la temperatura del refrigerante inyectado, las pérdidas de carga en las cañerías, la presión, la temperatura del agua del sumidero y la elección del modelo del flujo de descarga.

El parámetro tomado como referencia para evaluar la variabilidad de los resultados, fue la temperatura de vaina promedio del canal más caliente en función del tiempo. Esta además, no deberá alcanzar el valor de la temperatura de fusión de 1760°C.

La temperatura de vaina promedio corresponde al valor medido en la estructura de calor que está conectada a un canal del modelo, el cual representa varios canales concentrados. En este sentido, la temperatura de vaina de este canal representará un valor promedio y está medida a la mitad del canal.

Dado que en el modelo, el núcleo está subdividido en zonas, se tomó como canal más caliente la zona que presenta mayor temperatura. Esta es la zona 3 y corresponde al paso 4 del reactor. Para mayores detalles ver [25].

Para realizar este análisis, el evento elegido como escenario de prueba fue la rotura del 40% del colector de entrada del SPTC. Se eligió este escenario por considerarse uno de los casos envolventes dentro de este tipo de accidentes y donde se registran los mayores valores de temperatura de vaina.

La variación de parámetros se hizo dentro de un rango entre el -10% al +10%. Para hacer el estudio se varió el parámetro de interés, dejando todos los demás parámetros constantes. De los parámetros analizados mencionados anteriormente, los más relevantes frente a desviaciones, resultaron ser la presión en los acumuladores y la elección del flujo de descarga. A continuación se presentan los resultados.

### 5.3.1. Variación de presión de inyección de los acumuladores

Se realizaron corridas del modelo de planta completo, variando la presión en los acumuladores en saltos de presión del 5% (ver Tabla 6) respecto del valor de referencia, en un rango entre el -10% al +10% del valor nominal (4.18 MPa (a)).

Tabla 6 Rango de variación de presión en los acumuladores

Presión tanques (P = referencia)	(MPa(a))
P-10%	3.76
P-5%	3.97
P	4.18
P+5%	4.39
P+10%	4.60

La Figura 26 muestra la variación de la temperatura de vaina promedio en el tiempo para distintos valores de presión en los acumuladores. Para el caso correspondiente al de menor presión (3.76 MPa(a)) la permanencia de la temperatura de la vaina es más prolongada pero en ningún momento supera el límite máximo aunque el pico máximo siempre permanece igual.

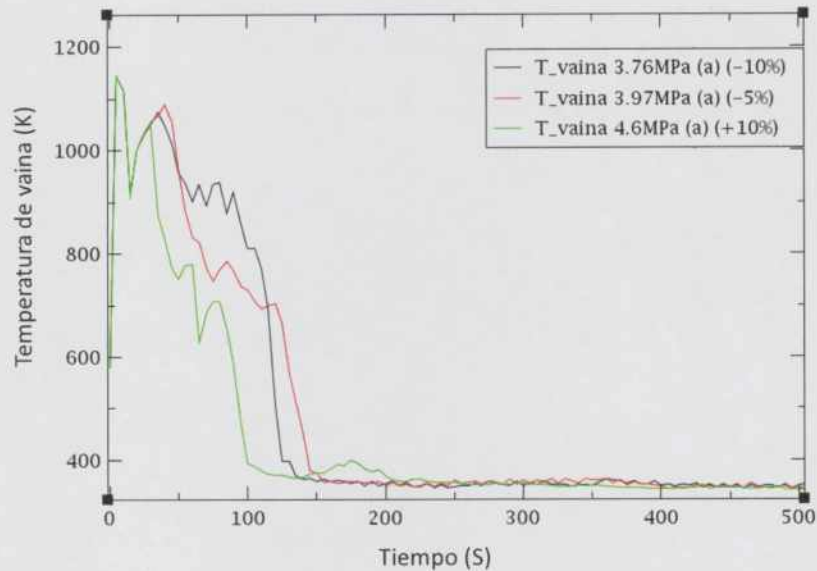


Figura 26: Evolución de la temperatura de vaina para distintas de presiones en los acumuladores.

En la Figura 27 puede observarse (como es de esperar) que la tasa de inyección de refrigerante en el SPTC es mayor para valores mayores de presión en los tanques acumuladores. Esto se ve reflejado en la temperatura de vaina, la cual indica una bajada más abrupta (Figura 26). De este modo, bajar levemente la presión de los tanques de inyección de alta presión aumenta la permanencia de altas temperaturas en la vaina.

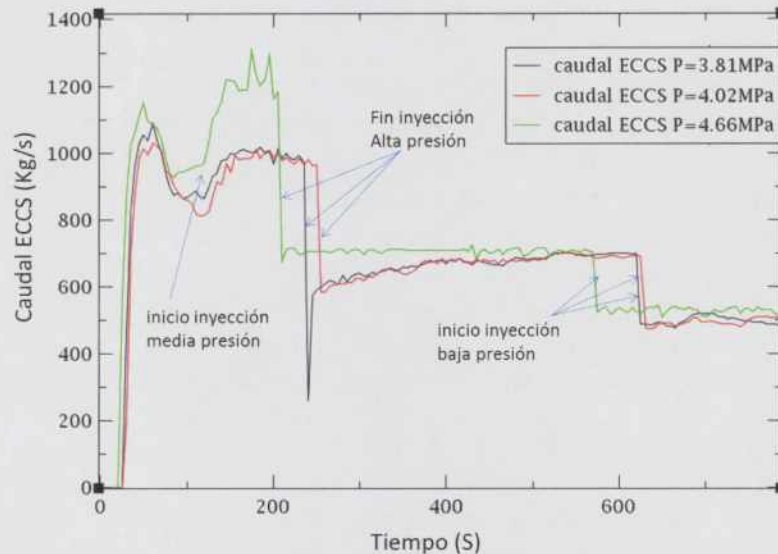


Figura 27: caudal de inyección para distintas presiones en los acumuladores.

La Figura 27 en la etapa de inyección de alta presión (120s) se muestra el incremento del caudal debido al solapamiento del caudal con la inyección de media presión.

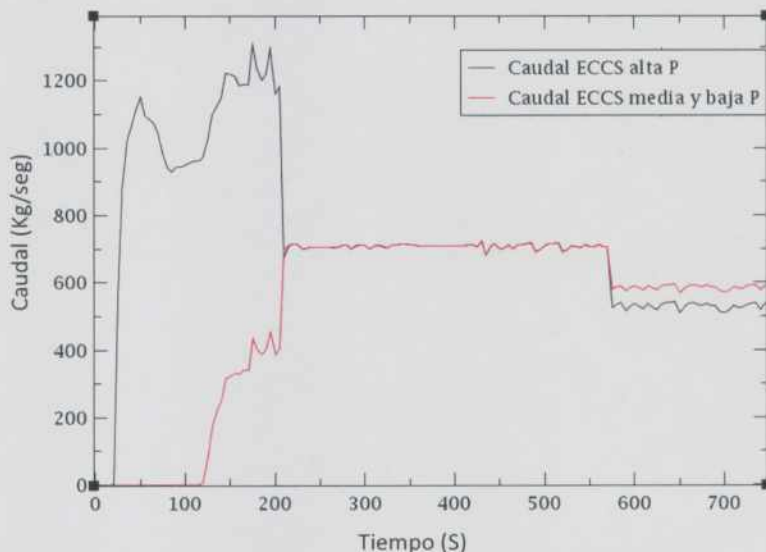


Figura 28: Caudal de inyección de alta y media presión.

### 5.3.2. Variación del modelo de flujo crítico de descarga

El código RELAP5 permite elegir el modelo de flujo crítico a ser utilizado en la simulación. Por default, RELAP5 utiliza el modelo de flujo crítico de descarga de "Henry Fauske". Este puede cambiarse por el modelo de "Ransom and Trapp" empleando el uso de la opción 50 en el código.

Este modelo de flujo crítico es utilizado en el cálculo del flujo de descarga de la válvula con la que se simula la rotura y tiene en cuenta tres parámetros de interés, la velocidad del fluido, la densidad y el área de paso. El modelo por "default" ("Henry Fauske") tiene limitaciones cuando existe la presencia de gases no condensables en el volumen de control.

Se corrió el modelo cambiando el modelo de flujo de crítico. Se utilizó primero el modelo de "Henry Fauske" y luego el modelo "Ransom and Trapp". La Figura 29 muestra el resultado de ambas corridas. Se puede observar aquí la gran diferencia en el perfil de descarga. De aquí se puede considerar que esto hará variar el perfil de despresurización y por lo tanto el perfil de inyección el ECCS.

En los primeros segundos la descarga corresponde a flujo crítico subenfriado. Según el manual de RELAP5 el modelo de "Henry Fauske" estima menores caudales al predicho por el modelo por "Ransom and Trapp" para valores de presión superiores a

8 MPa aguas arriba de la descarga, esto es consistente con el resultado observado en la Figura 29. En los primeros instantes luego de un segundo esta situación se invierte.

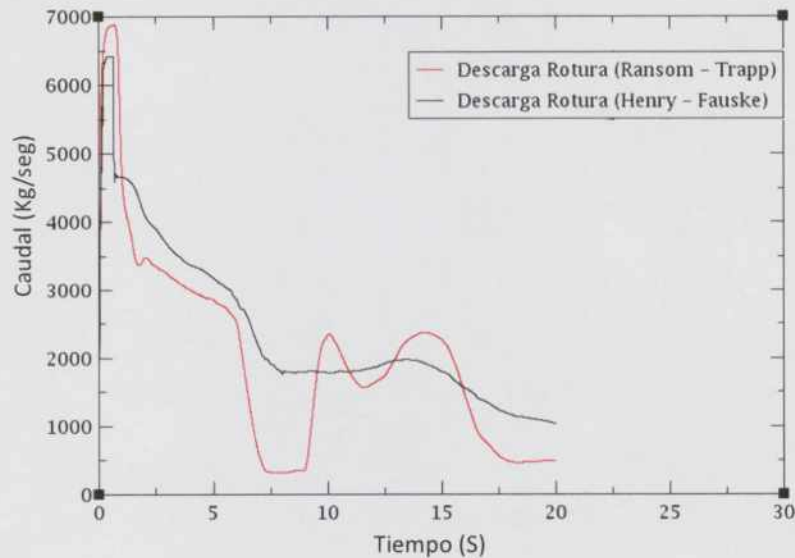


Figura 29: Descarga de refrigerante a través de la rotura

La diferencia aproximada de 1000 kg/s en los primeros segundos da crédito a la suposición de que esto afectará también a la generación en la fracción de vacío y por tanto la reactividad del núcleo. Un aumento de la reactividad en el núcleo produce un aumento de generación de energía que será almacenada en el EC.

Esta diferencia de calor almacenado, insumirá más tiempo para que el ECCS extraiga el calor generado. Sin embargo debido a la inversión en la descarga, para el caso de "Henry-Fauske" resulta ser mayor luego de un segundo.

Al ser mayor la descarga se esperará también mayor temperatura de vaina. Esto puede verse en la Figura 30. Cabe destacar que a pesar de la penalización de temperatura, esta no alcanza su valor límite.

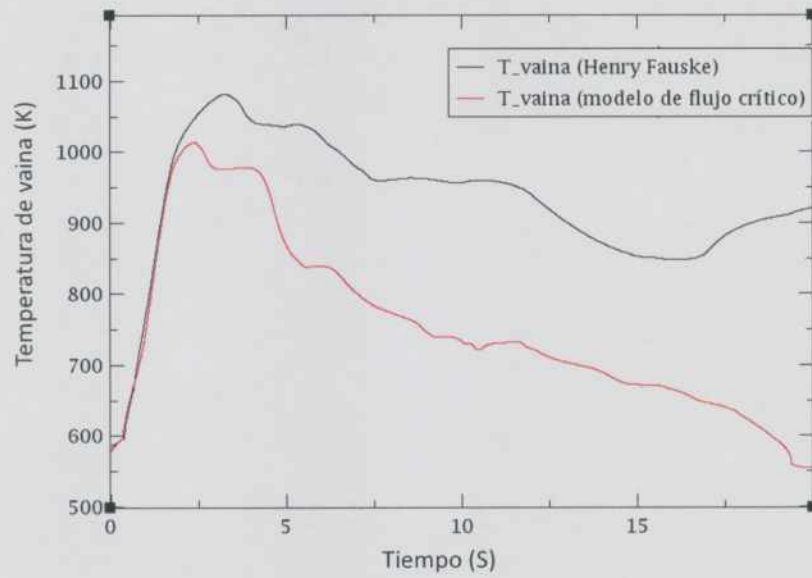


Figura 30: Temperatura de vaina.

## CAPÍTULO 6

### Conclusiones

El sistema ECCS de la CNE ha sido modelado como sistema aislado en RELAP5 de forma simplificada de acuerdo a los requisitos de funcionamiento conforme a la documentación disponible. Se realizó una explicación resumida basada en la ingeniería básica y conceptual del diseño del ECCS. Se mostraron los detalles del modelado termohidráulico y de la lógica de control incluyendo hipótesis asumidas y condiciones de contorno utilizadas.

Seguidamente se mostraron resultados de la corrida del modelo aislado mostrando un análisis frente a distintas velocidades de variación de presión en el SPTC. Las curvas de variación de presión fueron utilizadas con el fin de mostrar el comportamiento del sistema de control para distintos rangos de presión y estudiar el perfil de inyección del sistema.

Finalmente se presentó la respuesta del modelo del ECCS para condiciones de contorno correspondientes a un LOCA del 40% de un colector de entrada de la CNE y se verificó que la evolución del caudal y los tiempos de inyección del sistema son los esperados.

Finalmente se hizo un análisis de sensibilidad utilizando el modelo del ECCS como parte integral de un modelo de planta completo, para varios parámetros del sistema ECCS. De todos los parámetros estudiados los únicos que presentan incidencia en el comportamiento de la temperatura de vaina fueron la presión en los acumuladores y la elección del modelo de flujo de descarga.

Los resultados de la corrida del modelo aislado frente a distintas velocidades de variación de presión en el SPTC, muestra que el patrón de inyección se mantiene mostrando solo variaciones de inyección de caudal en el sistema de alta presión.

Conforme a los resultados obtenidos se concluye que el modelo del ECCS ha resultado una herramienta útil dentro del alcance para el cual fue modelado y sirve para la aplicación directa de análisis de planta en eventos con pérdida de refrigerante del SPTC.



## 6.1. Referencias

- [1]. V-CNE-P-01 "Manual descriptivo de la gestión del proyecto de extensión de vida de la CNE", G. Díaz, 16/08/2007
- [2]. GPEV-CNE-09100-SL-ES-004, "Plan de análisis deterministas de seguridad", M. Tempestini 19/02/2013.
- [3]. SSR-21 – "Safety of nuclear power plants". VIENNA, 2012
- [4]. IS-1993 "Informe de seguridad de la CNE", 1993.
- [5]. NS-R-1 "safety of nuclear power plants", 2000
- [6]. 18RF-01000-ASD-001 REV. 0. "Revisión de los cambios de diseño relacionados con la seguridad en CANDU6", AECL, 16/02/2009
- [7]. AR 3.2.1: "Criterios generales de seguridad para el diseño de reactores nucleares de potencia". Autoridad Regulatoria Nuclear, Rev.2, 2002
- [8]. ES/01-15 "Modelo simplificado para determinar la presión en contención en RELAP5 para estudios de extensión de vida de la CNE". Lazarte A. I, 01/10/2014
- [9]. ES-07/16 Rev-0 "Modelo de la Central Nuclear de Embalse con RELAP5. aplicación para un disparo de turbina". M. Virginia Guala, 06/01/2016
- [10]. DM-18-34320-Rev-6 "Enfriamiento de Emergencia del Núcleo" 1984
- [11]. DM-18-68500-1, "Emergency Core Cooling System part-1, General Requirements and Overview". 1984
- [12]. Training Manual 68500 "Sistema de refrigeración del Núcleo". 11/09/1998
- [13]. DM-18-63432-1 "Sistema de Enfriamiento de Emergencia del Núcleo, instrumentación y control ". 1984
- [14]. Software Pressure drop. (<http://www.pressure-drop.com>)
- [15]. RELAP5/MOD3.3 "CODE MANUAL VOLUME II. User Manual and Input Requirements", 2010
- [16]. RELAP5/MOD3.3 "CODE MANUAL VOLUME IV. Model and Correlations", 2010
- [17]. RELAP5/MOD3.3 "CODE MANUAL VOLUME II. Input requirements", 2010
- [18]. RELAP5/MOD3.3 "CODE MANUAL VOLUME III. Developmental assessment Problems", 2010
- [19]. ES-19/15 Rev-02 "Modelización termohidráulica del sistema de enfriamiento de emergencia del núcleo de la CNE en RELAP5 patch4, en el marco de extensión de vida", M. V. Guala, R. Ugarte, 11/11/2014
- [20]. GPEV-CNE-1012-SL-I-1 -13 "COMPARACION DE CAMBIOS DE DISEÑO ENTRE POINT LEPREAU Y CNE", Fornero, Tempestini, 18/03/2013
- [21]. SSR-2/1 "Safety of nuclear power plant Design". IAEA 2012 Rev.1
- [22]. C-6: "REQUIREMENTS FOR THE SAFETY ANALYSIS OF CANDU NUCLEAR POWER PLANTS".
- [23]. "ESTUDIO DEL MAPA DE CIRCULACION NATURAL DE UN CANDU6 DURANTE UNA PÉRDIDA DE REFRIGERANTE CON RELAP5" (Guala, M.V., Lazarte A.I., Ugarte R.)
- [24]. 18RF-03500-AR-027\_R1 "Large LOCA - System Thermalhydraulics" 20/06/2014

- [25]. ES-16-06 "Descripción del modelo núcleo de la CNE implementado en RELAP5 mod3.3 PATCH 4". 28/082013 (Alejandro I. Lazarte)
- [26]. R-10 "THE USE OF TWO SHUTDOWN SYSTEMS IN REACTORS". (1977)