

EVALUACIÓN DE LA CIRCULACION NATURAL EN EL CAREM25 DURANTE UN STATION BLACK OUT CON LA INYECCIÓN DEL SEGUNDO SISTEMA DE EXTINCIÓN

ASSESSMENT OF NATURAL CIRCULATION IN THE CAREM 25 DURING A STATION BLACK OUT WITH THE INJECTION OF THE SECOND SHUTDOWN SYSTEM

José D. Jiménez^a, Jorgelina L. Contreras^b, Alejandro I. Lazarte^a.

^aAutoridad Regulatoria Nuclear. Av. del Libertador 8250, Ciudad Autónoma de Buenos Aires
(BNP1429C), Argentina, jjimenez@arn.gob.ar, alazarte@arn.gob.ar

^bAv. Cmte. Luis Piedrabuena 4950, S.C. de Bariloche (R8403CPV) S.C. de Bariloche
Río Negro – Argentina, jlupianocontreras@invap.com.ar

Palabras clave: Station black out, Carem25, segundo sistema de extinción.

Resumen. Este trabajo presenta los resultados de la simulación del evento Station Black Out en el reactor CAREM25 con falla del primer sistema de extinción del reactor, obtenidos con un modelo termo hidráulico desarrollado para RELAP5 Mod. 3.3 patch 4 con cinética puntual, desarrollado por la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) conjuntamente con INVAP S.E. La extinción del reactor se realiza con la actuación de las dos redundancias del segundo sistema de extinción por inyección de una solución borada que se mantiene almacenada en sus correspondientes tanques. El evento se evalúa considerando: Caso I) el volumen nominal de líquido en los presurizadores, Caso II) un incremento de 1.0 m³ de líquido, respecto del volumen nominal en cada presurizador. La inyección de la solución de boro se da por acción de la gravedad e ingresa al recipiente de presión. Se verifica que el nivel colapsado no inunde las boquillas que habilitan la refrigeración por parte del sistema de seguridad de extracción de calor residual. Se analizan los modelos utilizados para representar el nivel como son: el “nivel colapsado” y el “nivel de mezcla” calculado mediante el código RELAP5.

Keywords: Station black out, Carem25, second shutdown system.

Abstract. This work presents the results of the simulation of the Station Black Out event in the CAREM25 reactor with failure of the first shutdown system, by means of a thermal hydraulic model developed in RELAP5 Mod. 3.3 patch 4 with point kinetics, by the Nuclear Regulatory Authority (ARN) together with INVAP SE. The reactor is shut down by the actuation of the two redundancies of the second shutdown system, which uses a Boron solution stored in tanks. The event is evaluated considering I) the nominal volume of liquid in the pressurizers, II) an increase of 1.0 m³ in reference to the nominal volume in each pressurizer. The boron solution is injected by gravity at two points in the primary system. It is verified that the level doesn't reach the upper regions of the vessel where the nozzles of the residual heat extraction safety system are placed. The models used to represent the level are analyzed, such as: the “collapsed level”, and the “mixing level” calculated using the RELAP5 code.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del licenciamiento del CAREM-25 (CNEA, 2015) la Autoridad Regulatoria Nuclear (ARN) efectúa evaluaciones independientes del comportamiento del reactor ante eventos iniciantes. Bajo este contexto, la ARN decidió junto a la colaboración de INVAP, desarrollar un modelo termohidráulico de la planta totalmente independiente, con alcance suficiente para realizar análisis de eventos postulados de falla única (frecuencia de ocurrencia entre 10^{-2} y 10^{-4} por reactor por año). Para el desarrollo del modelo 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 (US-NRC) y de una interfaz gráfica denominada SNAP (también distribuida por la US-NRC). Para desarrollar el modelo en RELAP5, se tomó como punto de partida la documentación de planta provista por CNEA (INVAP, 2018).

En este trabajo, se utiliza el modelo de RELAP5 (USNRC, 2010) del CAREM25, para analizar la evolución durante un Station Black Out (SBO) con falla (atascamiento de las barras) del primer sistema de extinción (PSE) y accionamiento del segundo sistema de extinción (SSE). Este evento se clasifica como un Evento Postulado de Falla Múltiple (EPFM). El principal objetivo es estudiar la evolución en el nivel dentro del Recipiente de Presión (RPR) que conforma el sistema primario del reactor CAREM25, tras la inyección de la solución borada por las dos redundancias del SSE. Se evalúan 2 posibles casos:

Caso I: Extinción del reactor por dos redundancias del SSE, considerando el volumen nominal de agua en cada presurizador.

Caso II: Extinción del reactor con el SSE considerando 1 m^3 adicional de agua respecto del volumen nominal en cada presurizador.

Ante un EPFM, y la pérdida del sistema secundario como un SBO, la refrigeración se realiza por el sistema de seguridad de extracción de calor residual (SSECR), que se habilita por parámetros del sistema primario. Las tomas de dicho sistema se encuentran en el domo del RPR: el vapor ingresa al SSECR y se condensa en tubos condensadores ubicados en las piletas del SSECR. El líquido se reinyecta al sistema primario en el que se espera que la convección natural se mantenga.

La motivación de este análisis se basa en la necesidad de evaluar la posible degradación en la función de refrigeración del SSECR, cuando se habilitan las dos redundancias del SSE y el nivel de líquido podría acercarse a las boquillas de la toma.

2 MODELO DEL CAREM 25

El reactor con los distintos sistemas que lo componen y las lógicas de control de los sistemas de protección y de los sistemas de seguridad se modelan utilizando los componentes, modelos y tarjetas que ofrece RELAP5.

La nodalización adoptada para el sistema primario incluye sus componentes principales (plenum de entrada, núcleo, chimenea, generadores de vapor (GGVV) y downcomer) y se ilustra en la, Figura 1. El estado estacionario se ajusta a las condiciones de operación nominal a 12,25 MPa y se introduce una corriente “feed and bleed” para mantener el nivel.

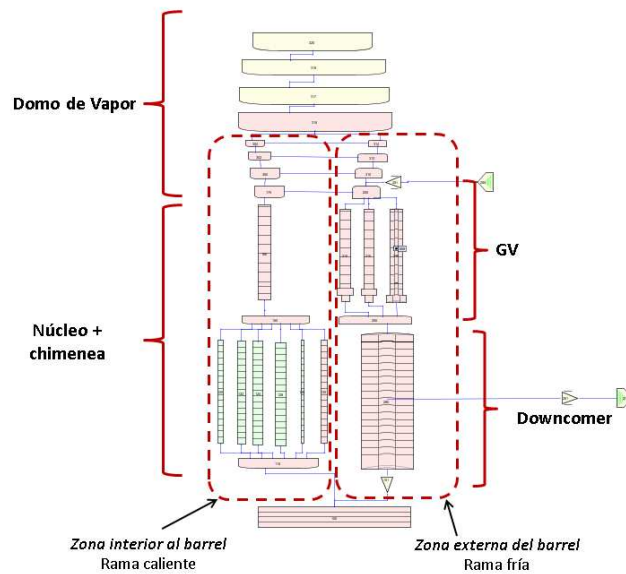


Figura 1: Nodalización del sistema primario

Tal como se muestra en la Figura 1, el núcleo se modela mediante seis canales paralelos: cinco “canales combustibles” con potencia asociada y un canal de by-pass. En el modelo, cada “canal combustible” agrupa un determinado número de elementos combustibles (EECC). El agrupamiento se realiza considerando la potencia generada en cada EC en el estado estacionario. Asimismo, se define uno de estos “canales combustibles” como “canal combustible caliente”.

El domo del reactor es representado por volúmenes con conexiones verticales y horizontales. Estas últimas representan las conexiones entre la rama caliente y fría. En el último volumen del domo del reactor se encuentran las uniones a los sistemas SSE y SSECR. Para los transitorios, la potencia generada se modela por cinética puntual considerando la realimentación por temperatura de combustible y por temperatura y densidad del fluido refrigerante/moderar.

En referencia al SSECR, el modelo cuenta con las dos redundancias que dispone la planta y con señales de disparo que permiten habilitar cualquiera de ellas. La nodalización adoptada se muestra en la Figura 2. Se asocian estructuras de calor tanto a los tubos condensadores como a las piletas del SSECR con el fin de modelar la remoción de calor por parte de este sistema de seguridad.

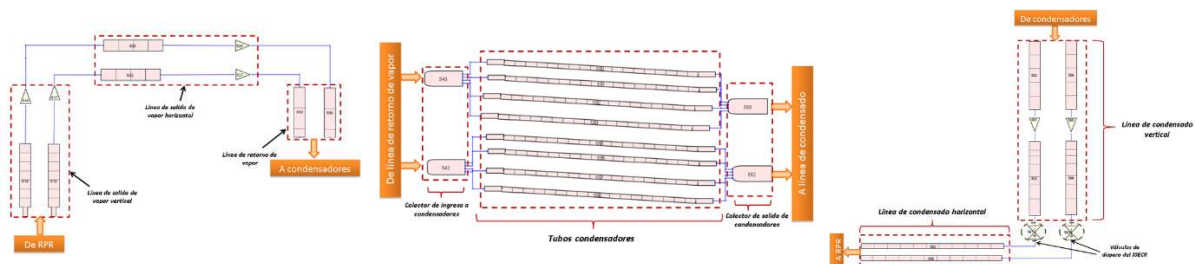


Figura 2: Nodalización del SSECR

La nodalización adoptada para las dos redundancias del SSE se muestra en la Figura 3. Se incluyen los presurizadores y los tanques de almacenamiento de boro, ambos modelados mediante el componente hidrodinámico “PIPE”, las líneas de equalización que conectan los presurizadores con el domo del RPR y las líneas de inyección que permiten el ingreso de solución borada al RPR: una línea inyecta a la entrada de los GGV del lado primario y otra a la entrada del núcleo.

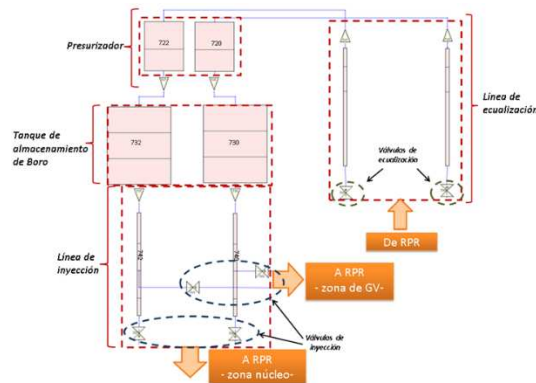


Figura 3: Nodalización del SSE

El modelo del sistema de protección contiene la lógica de disparo de los sistemas de parada N°1 (barras de seguridad) y N°2 (inyección de boro). La lógica de control incluye los retardos de instrumentación y de accionamiento existentes, de acuerdo con la documentación disponible en planta a la fecha. Asimismo, en algunos casos se han considerado valores mayores como una condición conservadora o se han realizados estimaciones en aquellos valores aún no definidos.

2.1 METODOLOGÍA DE ANÁLISIS

En primera instancia, se simula un estado estacionario en el que se verifica que las variables de procesos coincidan con las esperadas en la operación normal.

Alcanzado el estado estacionario, se realiza un “restart-neutrónico” en el que la potencia en el núcleo se ajusta según el modelo de cinética puntal. En la Tabla 1 se comparan los principales parámetros obtenidos en el estado estacionario neutrónico con los parámetros nominales de la planta para el 100% de plena Potencia.

Tabla 1: Comparación de resultados del estado estacionario neutrónico con valores nominales de planta

Descripción	Valor de la de referencia	RELAP5	Unidades.	Diferencia porcentual %
Presión del domo	12,25	12,1	[MPa]	-1
Temperatura en el domo	599,2	598,8	[K]	0
Entrada al Downcomer	557,2	557,6	[K]	0
Temp. De entrada, al núcleo	557,15	557,6	[K]	0
Temp. De salida del núcleo	599,15	599	[K]	0
Temp. Salida GV	555,15	557	[K]	0

Caudal total	420	423,16	[kg/s]	1
Caudal del núcleo	410	413,4	[kg/s]	1
Nivel	1,33	1,3	[m]	-2
Temp. de agua de alimentación	473,2	469,8	[K]	-1
Caudal de agua de alimentación	48,7	50,1	[kg/s]	3

El estado estacionario alcanzado se utiliza como punto de partida para la simulación del evento. Los transitorios planteados son:

Caso I: SBO con falla del PSE, actuación de las 2 redundancias del SSE.

Caso II: Idem al caso I pero con 1 m³ más de líquido en cada presurizador.

Como condición de borde se impone la actuación del SSE tras detectarse la falla del PSE y la actuación del SSECR que cumple con la función de remoción del calor residual, tras la pérdida del sistema secundario, como consecuencia de la pérdida de energía eléctrica.

2.2 METODOLOGIA PARA LA EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

La evaluación de los resultados se plantea en dos partes:

- i) Análisis del comportamiento del reactor durante el evento: consiste en estudiar la evolución de los parámetros relevantes a medida que avanza el transitorio
- ii) Análisis del nivel en el sistema primario: se evalúa la evolución en el “nivel colapsado” y en el “nivel de mezcla” a lo largo del transitorio, para los casos I y II con el fin de determinar si se ven afectadas las boquillas para la toma del SSECR. Se distingue entre el “nivel colapsado”, que sólo refiere al inventario de líquido, y el “nivel de mezcla” que considera las burbujas que pueden existir dentro de la fase líquida.

El nivel del líquido dentro del reactor se evalúa mediante tres alternativas de cálculo.

Nivel colapsado (N_C): se calcula como la suma, para todos los volúmenes de control que conforman el sistema primario, del producto entre la fracción de líquido (α) y la longitud (altura) del volumen de control:

$$N_C = \sum_{j=1}^N (1 - \alpha_j) L_j \quad (1)$$

Nivel de Mezcla: utiliza una variable embebida en el código RELAP. Esto requiere que se active la opción de usuario “Mixture Level tracking” para el cómputo del “nivel de mezcla” en los volúmenes que conforman el modelo. Para este caso, el código verifica la presencia de una interfase líquido-vapor en el volumen j-ésimo y se calcula el nivel de mezcla como:

$$N_M = \sum_{j=1}^N L_{j-1} + h_j \quad (2)$$

Siendo h_j el valor de altura de líquido estimado por RELAP5 con la variable *vollef* en el volumen j-ésimo. El cálculo en RELAP5 se divide en cuatro partes:

1. Detección de un “nivel de mezcla”

Se consideran los volúmenes verticales, consecutivos K, L y M, con líquido en el volumen K, un nivel de mezcla en el volumen L, y vapor en el volumen M, tal como se ilustra en la Figura 6.

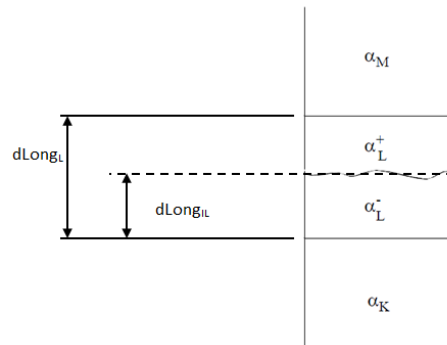


Figura 4: Nivel de mezcla y fracción de vacío en volúmenes verticales consecutivos

La detección del nivel de mezcla se determina comparando la fracción de vacío en los volúmenes consecutivos y comparando con valores determinados experimentalmente y a partir de experimentos numéricos.

2. Cálculo de parámetros de mezcla
3. Determinación del movimiento del nivel de mezcla entre volúmenes

Balance de masa y energía considerando dos fases: Se utiliza una expresión analítica basada en el balance de masa y energía en el que el nivel de mezcla,

$$Z_{NC} - Z_{NVG} = \int_{Z_{NVG}}^{Z_{NM}} \left(1 - \alpha + \alpha \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) dz \quad (3)$$

donde NC nivel colapsado y NGV es el nivel de mezcla.

Sun han propuesto la expresión (3) para determinar el nivel de mezcla basado en las leyes de conservación con el fin de determinar el inventario dentro del reactor (Sun, 1981). Los autores establecen relaciones para el cálculo de la fracción de vacío en diferentes regiones del canal calefaccionado y un modelo de drift flux.

3 SIMULACION DEL EVENTO

El análisis parte de un estado estacionario hidráulico y neutrónico, con condiciones nominales de potencia (100 MWt), y coeficientes de realimentación neutrónica correspondientes a un quemado de 270 días de operación. Para la simulación del evento, y para los casos I y II, se consideran las siguientes hipótesis:

- Corte de energía eléctrica (SBO) a $t = 0$ segundos.
- Apagado de las bombas de alimentación al sistema secundario debido a la pérdida de energía eléctrica.
- Cierre de la MSIV en el sistema secundario por bajo caudal de alimentación

- Apagado de las bombas de alimentación a los mecanismos hidráulicos de los mecanismos de control del PSE. Se asume que dichas bombas tienen una inercia de 3.0 segundos, y se considera 1.0 segundo adicional para la inserción de las barras
- Falla del PSE por atascamiento de barras
- Activación de las dos redundancias del SSE por acción del SSPR pasados 4.0 segundos de detectarse la falla del PSE
- Apertura de las válvulas de ecualización del SSE pasados 3.0 segundos desde su demanda.
- Apertura de las válvulas de inyección del SSE pasados 20 segundos desde la actuación del SSE. Se consideran 5 segundos de demora en el vapor que sale del RPR e ingresa a los presurizadores y una demora de 15 segundos para la inyección de boro desde los tanques de almacenamiento al RPR.
- Demanda del SSECR por acción del SSPR.
- Tiempo total de descarga de la solución dentro de un rango de 600-700 s.
- Descarga de la solución borada por gravedad en dos puntos: zona superior de la zona activa de GV -lado primario- y zona de núcleo, con caudales similares.
- El tiempo de simulación es de 7500 segundos.

Para el Caso II, se considera un incremento de 1 m^3 de líquido en el presurizador respecto de su valor nominal.

4 RESULTADOS

La pérdida de suministro de energía externo e interno produce instantáneamente la salida de servicio de todos los componentes activos, lo que lleva al apagado tanto de las bombas de alimentación del sistema secundario como de las bombas de alimentación a los mecanismos hidráulicos de las barras de control del PSE. En este último caso, las bombas tienen una inercia de 3.0 segundos, de acuerdo con las hipótesis planteadas. Asumiendo una demora de 1.0 segundos, se espera la actuación del PSE a los 4.0 segundos de iniciado el evento, pero se considera que no hay actuación del PSE. Luego de 4.0 segundos de la señal de inserción de barras, el SSPR detecta que éstas no se insertaron y se dispara el SSE a los 8 segundos. Su actuación se produce 3.0 segundos después con la apertura de las válvulas de ecualización en las dos redundancias del SSE. Con la actuación del SSE también dispara el SSECR, cuyas válvulas se abren con 5.0 segundos de demora y cumple con la función de refrigeración que no está provista por el sistema secundario.

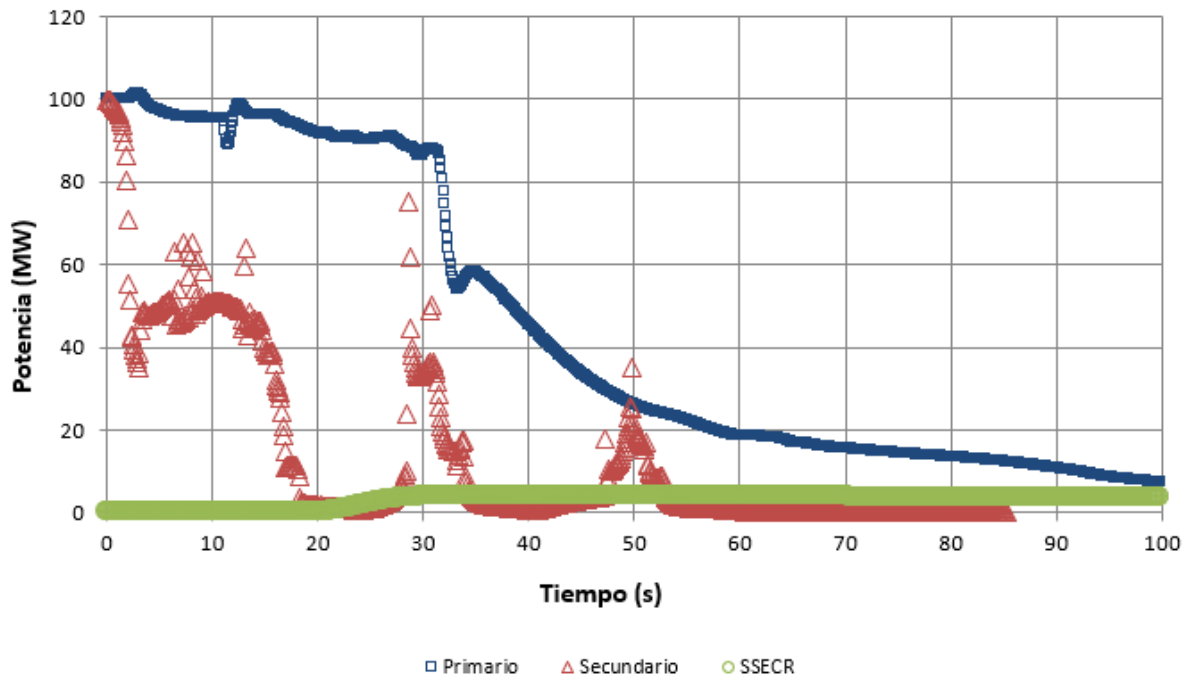


Figura 5: Potencia generada y extraída.

La apertura de las válvulas de equalización del SSE permite el ingreso de vapor del sistema primario al presurizador. Con la apertura de las válvulas de inyección de boro de las dos redundancias del SSE se produce la extinción de la reacción debido a que el boro provee de una reactividad negativa.

La evolución en la potencia generada y removida tanto por el sistema secundario como por el SSECR se ilustra en la Figura 5.

La remoción del calor de decaimiento se realiza por el SSECR. Los picos de potencia removida en el secundario se deben a aperturas de las válvulas de seguridad y de alivio.

Se observa un incremento inicial en la presión del sistema producto de que la potencia generada no puede ser removida. Esta presión luego se disminuye producto de la reducción en la potencia generada tras la intervención del SSE y del SSECR que remueve el calor de decaimiento.

El caudal total inyectado por el SSE y el caudal total que circula por el SSECR se ilustran en la Figura 6. El caudal provisto por el SIS se reduce a cero a aproximadamente 1000 segundos de iniciado el evento, al vaciarse los tanques de almacenamiento de boro y los presurizadores.

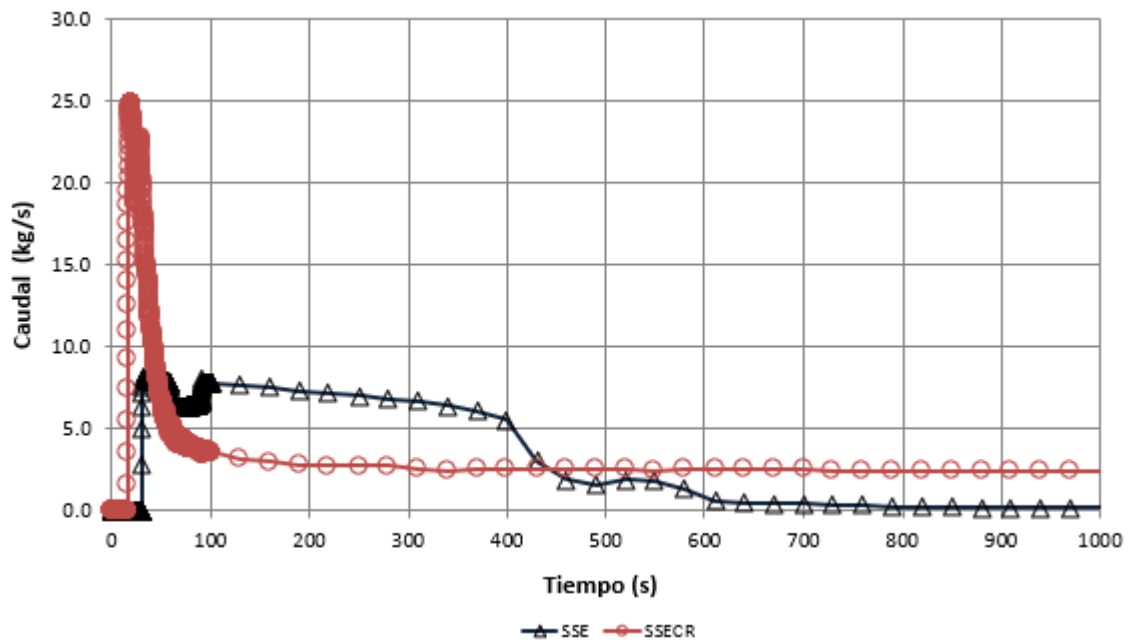


Figura 6: Caudal inyectado por el SSE y que circula por el SSECR

4.1 ANÁLISIS DEL NIVEL DE INVENTARIO EN EL REACTOR

Se presenta en la Figura 7 la **evolución** del nivel para, para el nivel de líquido nominal en los presurizadores (Caso I) y para el nivel aumentado (Caso II). Se distinguen los resultados de las tres opciones definidas para determinar el nivel de refrigerante dentro del recipiente depresión: Nivel colapsado, Nivel de la mezcla utilizando la expresión de RELAP5 y calculado a partir del modelo de Sun.

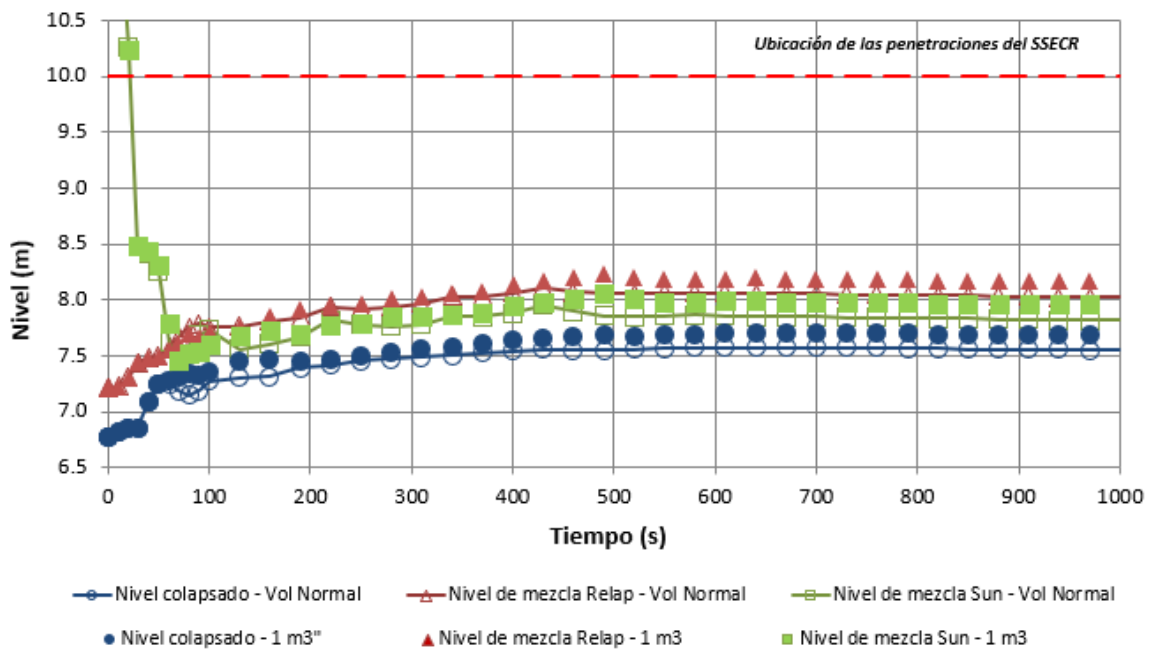


Figura 7: Nivel colapsado y nivel de mezcla para el volumen nominal de presurizadores (línea sólida) y para el volumen incrementado (línea punteada).

Tal como se esperaba, tanto el nivel colapsado como el nivel de mezcla para el caso del volumen de presurizador aumentado supera al máximo obtenido para el caso nominal. En referencia al nivel colapsado y al nivel de mezcla calculado por RELAP5, se observa una diferencia de, aproximadamente 0.4 m que se mantiene aproximadamente constante a lo largo del transitorio.

Para el modelo de Sun, el nivel de mezcla parece estar sobreestimado para el inicio del transitorio, acomodándose en un valor intermedio entre el nivel colapsado y el nivel de mezcla calculado por RELAP5, una vez avanzado el transitorio. El modelo de Sun es un modelo cuasi-estacionario, por lo que durante los primeros instantes sus resultados serán poco precisos. Se observa que el máximo nivel de mezcla alcanzado es de 8.2 m para el Caso II y este máximo supera en 0.2 m al máximo nivel de mezcla observado en el Caso I. Para penetraciones ubicadas a 10.0 m, la inyección de la solución borada en cualquiera de los casos no las afecta.

5 COMENTARIOS FINALES

En este trabajo se evaluó el evento Station Black Out en el reactor CAREM25 con falla del primer sistema de extinción del reactor y éxito del segundo sistema de extinción. Las simulaciones fueron realizadas con un modelo termo hidráulico desarrollado en RELAP5.

Se estudió la evolución en el nivel mediante la comparación del nivel colapsado y el nivel de mezcla y la posible afectación de las penetraciones del SSECR debido al incremento en estos niveles. El “nivel de mezcla” calculado con dos modelos diferentes siempre resulta mayor al “nivel colapsado” pero las diferencias suelen ser relativamente pequeñas, 40 cm en aproximadamente entre 7 y 8 m. Es decir, solo entre 5-6 %. Por consideraciones analíticas y métodos simples, el nivel de mezcla calculado queda contenido entre los que proporciona el RELAP5. En suma, el nivel de mezcla de RELAP5 resultó ser conservativo en relación otros modelos. Cabe mencionar que en el caso de formación de una interfase líquido-vapor difusa que contenga una “espuma”, la altura de la misma debería ser de al menos 5 veces superior a la diferencia entre el nivel colapsado y el nivel de mezcla para alcanzar las boquillas.

REFERENCIAS

- CNEA, *Capítulo 15 – Proyecto CAREM25. IS-CAREM25P-15 -B9720*. Rev.: 3, 2015.
- INVAP, *0869-5200-EICIN-008-A. Descripción del modelo de planta del reactor carem-25 para la simulación de eventos iniciantes*. 2018.
- United States Nuclear Regulatory Commission, 2001 and 2002, *Relap5/MOD3.3 manual, Volumen1-8*, by information service Laboratory Inc. Nuclear Safety NUREG/CR-5535/Rev.1. 2010.
- Sun, K. H., Romney B. D., and Peng, C. M., *The prediction of two-phase mixture level and hydrodynamically-controlled dryout under low flow conditions*, International Journal of Multiphase Flow 7(5):521-543, DOI: 10.1016/0301-9322(81)90056-2. 1981.