

TESIS CARRERA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA

**MODELADO Y ANÁLISIS DE UN SISTEMA DE
SEGURIDAD PASIVO DE EXTRACCIÓN DE CALOR
RESIDUAL PARA UN REACTOR INTEGRADO**

Ing. Diana Berenice Domanski
Autor

Dr. Marcelo Giménez
Director

Dr. Pablo Zanocco
Asesor

Marzo de 2018
Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
República Argentina



UNCUYO
UNIVERSIDAD
NACIONAL DE CUYO



RESUMEN

En la presente tesis se realiza el modelado y análisis determinista de un sistema de seguridad pasivo de extracción de calor residual (SSECR), mediante los cuales se pretende adquirir conocimiento al respecto, participar y dar soporte al diseño de reactores integrados.

Se exponen antecedentes sobre la experiencia operativa de este tipo de condensadores en reactores tipo BWR y se mencionan distintos reactores avanzados que los están incorporando en sus diseños. De esta búsqueda bibliográfica se encontró que este tipo de condensadores constituyen una buena opción para sistemas de remoción de calor residual ya que, en general, el historial de funcionamiento de los mismos en centrales nucleares ha sido bueno. Los análisis que se presentan en este trabajo se aplican a un reactor integrado tipo CAREM, por lo que se requirió un estudio previo de sus características principales y fenomenología involucrada, así como también, sobre los sistemas que posee, haciendo énfasis en el sistema de seguridad de extracción de calor residual que se toma como base para el trabajo.

Este sistema de seguridad opera condensando vapor del sistema primario en tubos que transfieren el calor a piletas ubicadas en la contención, y retornando el condensado al RPR mediante circulación natural. El mismo debe ser diseñado de acuerdo a ciertos criterios y consideraciones para cumplir con su función de limitar y reducir la presión en el reactor. Por lo tanto, con sustento analítico, se realiza un análisis detallado para establecer criterios de dimensionamiento para la potencia mínima que debe extraer el SSECR y para su altura respecto del nivel de agua dentro del recipiente de presión, a fin de que se establezca la circulación natural en el sistema para la remoción de potencia. Además, se presentan los criterios de dimensionamiento y cuantificación del volumen de agua mínimo requerido en las piletas a las cuales el SSECR entrega la potencia removida.

Luego, se describen las distintas etapas comprendidas en el análisis determinista de seguridad que se llevan a cabo para realizar este trabajo, siendo una de las principales tareas el desarrollo de un modelo detallado del sistema de extracción de calor residual y de la piletta a la cual se transfiere el calor, utilizando el código de planta RELAP5.

Una vez desarrollado este modelo, se lo utiliza de manera aislada (con datos del sistema primario como condiciones de contorno) para realizar una caracterización del sistema con los datos y características originales. Así, se estudia el comportamiento del fluido dentro de los tubos del condensador, se analizan los coeficientes de transferencia de calor donde se observa, entre otras cosas, que la resistencia térmica dominante es la del tubo. Asimismo, se obtiene la curva de eficiencia del equipo. Luego, se estudia la performance del sistema frente a variantes de diseño mediante estudios paramétricos en longitud de los tubos del condensador, fracción de vacío a la entrada del sistema y fricción equivalente del circuito. Se apreció una disminución en la eficiencia del equipo frente a una reducción en la longitud de los tubos, cuando el equipo funciona con líquido y frente a un aumento de las fricciones en el circuito.

Finalmente, este modelo del sistema de seguridad se integra al modelo RELAP5 existente del reactor para estudiar la fenomenología asociada a eventos donde interviene este sistema. Se analizan eventos de la familia de disminución de remoción de calor por el sistema secundario, en donde la función principalmente afectada es la de refrigeración del

sistema primario, verificándose que la actuación exitosa de este sistema de seguridad resulta suficiente para cumplir con las funciones de seguridad sin requerir acciones humanas. También se incluye la descripción de un evento de fallas múltiples a fin de demostrar la capacidad de auto-extinción del reactor, limitación de la presión y refrigeración adecuada a través del sistema de seguridad. En todos los casos, se verifica el cumplimiento de los criterios de diseño del equipo.

ABSTRACT

In the present thesis, the modeling and deterministic analysis of a Passive Heat Removal Safety System (PHRSS) is carried out. It is oriented to develop knowledge about this system in order to give support to the design of an integral-type reactor with passive safety systems.

The background of the operational experience of this type of condenser in BWR reactors is exposed and several advanced reactors are mentioned that are incorporating them in their design. From this bibliographic research it was found that these condensers are a good option for heat removal systems since, in general, their performance history in nuclear power plants has been good. The analyses presented in this paper are applied to a CAREM type reactor. For this purpose, the design characteristics, phenomena involved and main systems (emphasizing in the PHRSS) were previously studied.

This safety system operates by condensing steam from the primary system into condensers immersed in containment pools. Then, the condensate returns to the reactor vessel establishing a two-phase natural circulation circuit. It must be designed according to certain criteria and considerations to fulfill its function of limiting and reducing the pressure in the reactor. Therefore, with analytical support, a detailed analysis is carried out to establish sizing criteria for the minimum removal power required and for its height with respect to the water level inside the pressure vessel, in order to establish the circulation natural in the system. In addition, the sizing and quantification criteria of the minimum water volume required in the pools for heat transfer are presented.

Then, the different stages included in the deterministic safety analysis are described; being one of the main tasks the development of a detailed PHRSS model as well as the pool to which the heat is transferred, using the well known plant code RELAP5.

Once this model has been developed, some studies are made with the system isolated by setting boundary conditions to characterize its phenomenology under nominal operation and data. Thus, the behavior of the fluid inside the condenser tubes is studied, the heat transfer coefficients are analyzed where it is observed that the dominant one is the tube and the efficiency curve of the equipment is obtained. Then, the system performance is studied through out of parametric studies on the condenser tubes length, the void fraction at the system inlet and the equivalent friction of the circuit. A decrease in the PHRSS efficiency is observed when the condensers length is reduced, when the system runs with liquid and with an increase in the circuit friction.

Finally, the PHRSS model is integrated to an existing RELAP5 reactor model with the aim to analyze postulated events. Its performance and the plant evolution are analyzed in Loss of Heat Sink (LOHS). The PHRSS demand ensures cooling and decay heat removal without requiring power energy or human actions during 36 hours, avoiding the safety valves demand. Also it was included a LOHS simulation without SCRAM to demonstrate the reactor's self-extinguishing capability, pressure limitation and adequate cooling through the safety system. For all cases, compliance with the system design criteria is verified.

CONTENIDO

ABREVIATURAS.....	1
Capítulo 1 - INTRODUCCIÓN	3
1.1 - Conceptos generales.....	3
1.2 - Introducción a los condensadores de aislamiento.....	4
1.2.1 - Antecedentes y experiencia operativa.....	4
1.2.2 - Sistemas de remoción de calor residual en reactores avanzados	9
1.3 - Motivación y Objetivos.....	16
Capítulo 2 - REACTOR DE ESTUDIO	17
2.1 - Descripción general del reactor	17
2.2 - Principio de Defensa en Profundidad	18
2.3 - Sistemas importantes para la seguridad del reactor	21
2.3.1 - Sistemas de Reducción de Riesgo.....	21
2.3.2 - Sistemas de Seguridad - Línea Principal y Diversa de Protección	22
2.3.3 - Sistemas de Estado Seguro Final	24
2.3.4 - Sistemas de Extensión del Estado Seguro.....	24
2.3.5 - Sistemas de Mitigación de Accidentes Severos	24
Capítulo 3 - SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE CALOR RESIDUAL	25
3.1 - Función y descripción general del sistema de seguridad.....	25
3.1.1 - Circulación natural	26
3.2 - Base conceptual de diseño del SSECR	27
3.2.1 - Potencia de remoción de calor del SSECR	28
3.2.2 - Volumen de piletas.....	38
3.2.3 - Circulación natural	40
3.3 - Descripción del diseño adoptado	43
Capítulo 4 - ANÁLISIS DETERMINISTA	47
4.1 - Consideraciones generales	47
4.2 - Herramienta de cálculo	48
4.3 - Etapa Desarrollo de Modelo de Planta.....	48
4.3.1 - Descripción del desarrollo del modelo.....	49
4.3.2 - Modelos de los sistemas primario y secundario.....	50
4.3.3 - Modelos adicionales de sistemas	50
4.3.4 - Nodalización del SSECR	53
4.3.5 - Estado Estacionario de planta	59
4.4 - Etapa Simulación y Análisis de Eventos	62
4.5 - Etapa Verificación de Criterios.....	63
Capítulo 5 - CARACTERIZACIÓN DEL SSECR	65
5.1 - Comportamiento del fluido dentro de un tubo.....	65
5.2 - Análisis de los coeficientes de transferencia de calor.....	70
5.3 - Curva de eficiencia del sistema.....	75

Capítulo 6 - CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE VARIANTES DE DISEÑO	77
6.1 - Parametrización en la longitud de los tubos del condensador	77
6.1.1 - Aspectos relacionados con el input.....	77
6.1.2 - Potencia extraída en función de la longitud del tubo.....	78
6.1.3 - Coeficientes de transferencia de calor para distintas longitudes de tubo	82
6.1.4 - Curvas de eficiencia del SSECR.....	85
6.1.5 - Conclusiones.....	88
6.2 - Parametrización en la fracción de vacío a la entrada del SSECR	89
6.2.1 - Nodalización	89
6.2.2 - Sensibilidad del SSECR frente a distintas fracciones de vacío	90
6.2.3 - Otros análisis paramétricos	94
6.2.4 - Conclusiones	96
6.3 - Perfil de temperaturas dentro de un tubo del condensador.....	97
6.3.1 - Hipótesis y consideraciones generales para realizar los cálculos	97
6.3.2 - Desarrollo analítico para el cálculo de perfiles de temperatura.....	97
6.3.3 - Perfil de temperatura – Caso “temperatura superficial constante”	100
6.3.4 - Perfil de temperatura – Caso “coeficiente de transferencia de calor externo”	
.....	103
6.3.5 - Conclusiones	110
6.4 - Parametrización en la fricción equivalente del circuito.....	111
6.4.1 - Cálculo analítico	111
6.4.2 - Simulaciones RELAP5	114
6.4.3 - Comparación de resultados	114
6.4.4 - Conclusiones	116
Capítulo 7 - SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE EVENTOS DE DISMINUCIÓN DE REMOCIÓN DE CALOR POR EL SECUNDARIO	117
7.1 - Consideraciones generales sobre los eventos simulados	117
7.2 - Hipótesis generales de modelado	118
7.3 - Pérdida total de agua de alimentación a los GV	119
7.3.1 - Hipótesis particulares de modelado	120
7.3.2 - Descripción del evento.....	120
7.3.3 - Conclusiones	138
7.4 - Pérdida total del suministro eléctrico externo e interno (Station Blackout)....	140
7.4.1 - Hipótesis particulares de modelado	140
7.4.2 - Resumen de los sucesos más relevantes	140
7.5 - Cierre espurio de las válvulas de aislamiento del sistema secundario	141
7.5.1 - Hipótesis particulares de modelado	141
7.5.2 - Resumen de los sucesos más relevantes	141
7.6 - Resumen y comparación de los eventos simulados.....	142
Capítulo 8 - SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE UN EVENTO DE FALLAS MÚLTIPLES	147
8.1 - Hipótesis particulares de modelado	147
8.2 - Descripción del evento	147
8.3 - Conclusiones.....	160
Capítulo 9 - CONCLUSIONES	161

Apéndice A - Modelos de piletas del SSECR.....	169
Apéndice B - Regímenes de flujo en tubos horizontales	173
Apéndice C - Demostración analítica del modelado del condensador	175
Apéndice D - Desarrollo analítico para el cálculo de perfiles de temperaturas.....	179
REFERENCIAS.....	183
AGRADECIMIENTOS	187

Capítulo 9 - CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó el modelado y análisis determinista de un sistema de seguridad pasivo de extracción de calor residual (SSECR) de un reactor de potencia integrado tipo CAREM. Para esto, fue necesario estudiar la dinámica de estos reactores, analizando las características principales, la fenomenología involucrada y los sistemas que posee este reactor, enfatizando en el sistema de seguridad del tipo condensadores de aislamiento.

Respecto del sistema de seguridad evaluado y luego de un análisis exhaustivo basado en un análisis detallado de los mecanismos de transferencia de calor en los condensadores, de sus dimensiones y condiciones de funcionamiento (distintas presiones y títulos de entrada), se puede concluir en términos generales, que el mismo es un sistema robusto y que trabaja adecuadamente acoplado con el reactor incluso ante eventos postulados de falla de la extinción, llevando al reactor a una condición segura.

Por otro lado, es importante resaltar que la realización de esta tesis ha permitido obtener el conocimiento de la física y la capacidad de análisis de un sistema complejo como lo es un reactor integrado y un sistema de seguridad pasivo, en donde los acoples entre distintos fenómenos tanto termohidráulicos como neutrónicos domina la evolución de parámetros de referencia importantes para la seguridad.

También se obtuvo experiencia en el uso y manejo del código de cálculo RELAP5, pudiendo comprender las capacidades y limitaciones del código en lo relativo al modelado de un sistema pasivo que funciona por condensación de vapor y de eventos de pérdida de extracción de calor. Además, se logró adquirir los conocimientos necesarios para el desarrollo de modelos de planta y sistemas asociados en general.

Respecto a los condensadores de aislamiento y SSECR

En primer lugar, se realizó una introducción a los condensadores de aislamiento donde se expusieron antecedentes sobre la experiencia operativa de los mismos en reactores tipo BWR. En base a esta experiencia, se concluyó que éstos constituyen una buena opción para sistemas de remoción de calor residual ya que, en general, su historial de funcionamiento en centrales nucleares ha sido bueno. Esta conclusión es consistente con la decisión que han tomado numerosos diseñadores, los cuales están incorporando este tipo de condensadores en el diseño de reactores avanzados, a fin de mejorar la seguridad y la fiabilidad al reducir la dependencia del sistema con fuentes externas de energía e intervención humana.

Por otro lado, para cumplir con su función de limitar y reducir la presión en el RPR en caso de eventos con falla de los sistemas de extracción de calor activos, el sistema debe ser diseñado de acuerdo a ciertos criterios y consideraciones. Mediante una serie de análisis con sustento analítico se logró comprender la fenomenología involucrada en el funcionamiento del sistema. Esto permitió establecer criterios de dimensionamiento y cuantificación de parámetros tales como: potencia mínima requerida de extracción de calor, volumen mínimo requerido de agua en la pileta y altura requerida de los condensadores respecto del nivel de agua en el RPR.

Los resultados obtenidos fueron: 2 MW para la potencia, 78 m³ para el volumen de pileta, donde se observó que el 65% del total del volumen corresponde a la energía de decaimiento, y 6,65 m para la altura del equipo. Para este último caso, se observó que una modificación de aproximadamente $\pm 14\%$ en las fricciones del circuito, corresponde a una variación en altura de ± 1 m. En consecuencia, variaciones en este parámetro podría generar un impacto significativo en la altura de la contención, traduciéndose en costos.

Luego, se describieron distintas etapas comprendidas en el análisis determinista de seguridad que se llevaron a cabo para la realización de este trabajo. Dentro de este punto, las principales tareas fueron: el desarrollo de un modelo detallado del sistema de extracción de calor residual y de la pileta a la cual se transfiere el calor, y la simulación y análisis de eventos iniciantes donde se demande este sistema. Se logró desarrollar un modelo de SSECR detallado y un modelo de pileta simple, que cumplen con los criterios de diseño calculados previamente. Para esto, fue necesario aprender sobre las técnicas de modelado con el fin de poder comprender y predecir correctamente los comportamientos y fenomenología de los sistemas, además de la capacitación en el uso y manejo de la herramienta de cálculo RELAP5, código de planta verificado y validado para diversas aplicaciones, y ampliamente utilizado a nivel mundial.

Con este modelo aislado se realizó una caracterización del SSECR, lo que permitió entender el comportamiento del sistema y consolidar el modelo para luego poder realizar análisis de eventos iniciantes. Este estudio incluyó un análisis detallado sobre: el comportamiento del fluido dentro de los tubos, incluyendo regímenes de flujo, velocidades de las fases, fracción de vacío, títulos, etc., coeficientes de transferencia de calor en los condensadores considerando distintas presiones de primario y eficiencia del equipo.

Para una presión de 12,25 MPa se identificaron los regímenes de flujo “*annular mist*” en la primera parte de los tubos y “*horizontal stratified*” hacia el final, como era de esperarse en un tubo horizontal. Este último es el único régimen de flujo que se detecta a una presión de 4,7 MPa, diferencia que tiene que ver con las velocidades del fluido. La velocidad relativa es mayor a bajas presiones debido a una mayor velocidad del vapor, menos denso, lo cual se relaciona con los valores más altos de fracciones de vacío a 4,7 MPa. La relación de densidades depende de la presión, por ende, para un mismo título estático la fracción de vacío es mayor a menores presiones, lo cual explica la mayor fracción de vacío a presiones menores.

Del análisis de los coeficientes de transferencia de calor se verificó que el coeficiente de transferencia por conducción en el tubo es el que gobierna la transferencia de calor, debido al espesor del mismo. Esto hace que, en primera instancia, la potencia transferida dependa de la diferencia de temperaturas, la cual está dominada por la presión ya que el sistema primario se encuentra en saturación. No obstante, se encontró una dependencia de los coeficientes con la presión: al disminuir la presión disminuye la diferencia de temperaturas, provocando una disminución en la potencia. Esto a su vez, produce una reducción en el caudal de condensación, disminuye el Número de Reynolds induciendo finalmente una disminución del coeficiente del lado primario. Por otro lado, el coeficiente de transferencia del lado pileta también es menor a 4,7 MPa debido a que existe una disminución del ΔT entre la pared del tubo y la temperatura de la pileta, lo cual repercute directamente en este coeficiente.

Sin embargo, el impacto de las incertezas de los coeficientes de transferencia de calor del lado primario y pileta sobre el coeficiente global de transferencia queda restringido por el valor del coeficiente del tubo. Finalmente se relevó una curva de eficiencia del SSECR para distintas presiones de operación, observándose cómo disminuye la potencia del sistema conforme disminuye la presión del primario.

Respecto a la parametrización en la longitud de los tubos del condensador

Con el objetivo de analizar la posibilidad de tener un diseño más compacto, se analizó la potencia extraída en función de la longitud del tubo, coeficientes de transferencia de calor y curvas de eficiencia para diferentes configuraciones de tubos (longitud y cantidad) y teniendo en cuenta la potencia de remoción de calor de diseño (2 MW).

Las principales conclusiones y observaciones que se obtuvieron fueron:

- La conducción dentro del tubo es el factor restrictivo: gobierna en mayor proporción el intercambio de calor entre el sistema primario y la pileta del SSECR.
- La potencia y longitud de tubos no son proporcionales: una configuración de mayor cantidad de tubos más cortos, manteniendo el diámetro y espesor del tubo, no alcanza para extraer la potencia necesaria, es decir que no es válido utilizar la hipótesis de escaleo de potencia lineal constante. Esto se debe a que el caudal por tubo es menor, al igual que la velocidad del fluido y por ende el Número de Reynolds, afectando así el coeficiente de transferencia de calor del lado primario. Por lo tanto, si se mantiene el diámetro de los tubos, se debe compensar en longitud para extraer la potencia de diseño.
- La eficiencia del SSECR disminuye a menores presiones, observándose una relación aproximadamente lineal entre la potencia extraída y la presión del sistema primario.
- Es importante resaltar que al disminuir la longitud de los tubos disminuye el coeficiente de transferencia del lado primario (se reduce aún más la potencia), por lo tanto aumenta su sensibilidad frente a incertezas en dicho coeficiente. Esto podría llevar a un incremento en el margen necesario por incertezas, impactando así en la altura del equipo.

Respecto a la parametrización en la fracción de vacío a la entrada del SSECR

Debido a que podrían ocurrir eventos clasificados como de fallas múltiples con aumento significativo del nivel de líquido en el sistema primario, provocando así un ingreso no deseable de líquido a través de las tomas de vapor del SSECR, se realizó un análisis cualitativo de la potencia que extrae el sistema según distintas fracciones de vacío a la entrada.

Se puede concluir que frente a esta situación, la sensibilidad del equipo se ve medianamente afectada. Para las condiciones en que se realizó el estudio de variación de fracción de vacío, la potencia de extracción se redujo un 30%, al considerar los condensadores totalmente inundados.

Por otro lado, se observó un rango de fracciones de vacío (entre $\alpha = 0,5$ y $\alpha = 0,7$) para el cual se presentaron oscilaciones en las variables. Esto podría estar asociado a saltos en regímenes de flujo en la zona del condensador, donde se identificaron regímenes del

tipo intermitente conduciendo así a inestabilidades o como una consecuencia de la propagación de ondas a través del circuito cerrado de circulación natural. Por otro lado, no se descartaron posibles cuestiones numéricas con las correlaciones que utiliza el código.

Respecto a la fricción equivalente del circuito, se observó que cuando la fase vapor es la predominante, ésta no tiene influencia relevante en la potencia del equipo. No obstante, cuando el sistema funciona con líquido se pudo apreciar la importancia de las fricciones, lo cual tiene gran influencia en la eficiencia del sistema.

Respecto a la parametrización en la fricción equivalente del circuito

Este paramétrico surgió debido a la conclusión obtenida en el análisis previo sobre las fricciones. Allí, se observó que para el caso de SSECR inundado, la potencia que extrae el equipo varía frente a cambios en las fricciones. En este caso se espera que la potencia sea fuertemente dependiente del caudal de circulación. Por lo tanto, se evaluó la dependencia de la potencia del sistema con la fricción equivalente del circuito, para este caso particular de SSECR funcionando sólo con líquido. Se realizaron cálculos analíticos y se los comparó con simulaciones de RELAP5.

En general, mediante el cálculo analítico se logró complementar la comprensión sobre este tipo de circuitos, donde las fricciones juegan un papel importante en su condición de inundación. Además, se pudo realizar una verificación del modelo, la cual se considera satisfactoria respecto de las variaciones observadas en la potencia del sistema. La comparación entre los resultados analíticos y simulaciones RELAP5 fue satisfactoria aunque se observó una leve dispersión en los resultados producto del promediado de algunas propiedades del fluido.

En cuanto a los resultados del análisis en sí, se observó que al aumentar la fricción en el circuito, el caudal másico que circula por el mismo disminuye y por ende, la potencia que extrae el sistema es menor. Además, cuando el sistema funciona con líquido, las fricciones se vuelven importantes, impactando directamente en la eficiencia del sistema. Esto es un tema a tener presente frente a una situación de inundación de los condensadores.

Respecto al perfil de temperaturas dentro de un tubo del condensador

Con el objetivo de comprender fenomenologías y realizar una verificación del código de simulación, se llevó a cabo un desarrollo analítico en una sola fase (líquido) para obtener el perfil de temperaturas dentro de un tubo del condensador. Se analizaron dos casos: temperatura de pared externa constante y coeficiente de transferencia de calor externo.

En general se puede concluir que los cálculos analíticos y las simulaciones RELAP5 arrojan resultados comparables, obteniéndose resultados similares en las evoluciones de los parámetros analizados. Al desarrollar modelos analíticos simples se logró completar el entendimiento del análisis de los fenómenos físicos y demás resultados que se obtuvieron con el código RELAP5. Es decir, se pudo realizar una verificación del modelo, la cual se considera satisfactoria respecto de las variaciones observadas en los perfiles de temperatura y potencia del sistema.

Respecto a los perfiles de temperatura obtenidos, se encontró que cuando se considera temperatura de pared externa constante la diferencia entre resultados analíticos y RELAP5 es muy pequeña (2°C en temperatura y $0,04\text{ MW}$ en potencia de SSECR), siendo un poco mayor en el caso de considerar el coeficiente de transferencia de calor externo

(9,5°C y 0,21 MW). En ambos casos estas diferencias se deben al promediado de propiedades del fluido y consideraciones de variables constantes a lo largo del tubo. Además, para el último caso, se suman las aproximaciones en las propiedades del fluido externo y lo relativo al cálculo del coeficiente de transferencia de calor de la pileta, que fue lo que contribuyó en mayor medida a la diferencia entre los resultados. Por lo tanto se concluye que, esta diferencia se encuentra relacionada principalmente con la inclusión de la pileta, ya sea por el modelo simple de pileta utilizado o por la manera en que el código RELAP5 calcula el coeficiente de pileta según el modelado (y correlación que utiliza para el cálculo), entre otras cosas.

Además, se observó una gran dispersión entre los coeficientes de transferencia de calor del código y la literatura consultada. En la misma se pueden encontrar varias correlaciones para ebullición en piletas que involucran parámetros ajustables, que tienen constantes empíricas que pueden no estar representando lo que se desea, y por ende se obtienen diferentes valores para el coeficiente de transferencia utilizando los mismos datos de entrada. De todos modos, estas diferencias quedarían absorbidas por las incertezas que puede presentar dicho coeficiente (debido a que es complejo de representar adecuadamente con el modelo simple de pileta). Sin embargo, todo esto no tuvo gran impacto en el análisis presentado ya que, como se mencionó anteriormente, el coeficiente global de transferencia de calor queda restringido por el valor del coeficiente del tubo que es la resistencia dominante.

Respecto a la simulación y análisis de eventos iniciantes

Para estudiar la fenomenología asociada a eventos donde interviene este sistema, se integró el modelo aislado del SSECR al modelo detallado del reactor (sistema primario y secundario) existente y se simuló y analizaron EIPU de la familia de disminución de remoción de calor por el sistema secundario, en donde la función principalmente afectada es la de refrigeración. Se describió en detalle el evento de “pérdida de alimentación total a los generadores de vapor” y finalmente, se realizó una comparación con otros eventos de esta familia (“Station Black out”-SBO- y “cierre espurio de las válvulas de aislamiento de vapor vivo”).

En el evento de “pérdida de alimentación total a los generadores de vapor” se verificó la actuación exitosa del SSECR, lo cual resultó suficiente para cumplir con las funciones de seguridad asignadas durante el período de gracia, llevando la planta a un estado seguro a través de la refrigeración y despresurización del sistema primario sin requerir acciones humanas.

Asimismo, se comprobó el cumplimiento de los criterios de aceptación en Análisis Determinista de Seguridad para EIPU (DNBR, CPR, temperatura vaina, presión máxima en RPR, etc.). Los valores obtenidos en las simulaciones no superaron los límites fijados, siendo los márgenes respecto de estos parámetros muy amplios.

Respecto a los criterios de diseño de este sistema, se concluyó que:

- La actuación de una redundancia de este sistema alcanza para evitar la apertura de las válvulas de seguridad del sistema primario (14 MPa) y por ende, la posible derivación en un evento de pérdida de refrigerante ante la eventual falla abierta de alguna de ellas.
- No se produce la inundación de los condensadores.

- Al final del período de gracia el sistema primario queda con las condiciones adecuadas para que entren en funcionamiento los sistemas de estado seguro final.

De estos análisis se observó que existe un aumento considerable en el nivel del sistema primario, por lo que se recomienda que este parámetro se incluya en la lógica de disparo del SSECR. Esto permitiría disponer, además de la señal de muy alta presión, de otra señal de actuación más confiable respecto a su medición y así evitar la inundación de las tomas del sistema.

Respecto a la comparación de los tres eventos simulados, se encontró que existen diferencias en la evolución de la presión del sistema primario debido a la hipótesis conservativa de no considerar el primer parámetro de disparo del PSE. De considerarlo, en los eventos de “pérdida de alimentación total a los GV” y “cierre espurio de las MSIV”, la actuación del PSE ocurriría dentro del segundo de iniciado el evento y el comportamiento de la presión sería similar al evento “SBO”. Al considerar esta hipótesis, la diferencia en la evolución de la presión está relacionada con los desbalances de potencias presentes en cada caso. Para el evento “SBO”, el desbalance de potencia es menos significativo ya que desde el inicio del evento la potencia del reactor se encuentra en valores de decaimiento, y la actuación del SSECR ocurre un tiempo más tarde que en los otros casos. En consecuencia, la actuación temprana del PSE ante un “SBO” otorga un margen de tiempo considerable (del orden de 3000 segundos) para la recuperación del suministro eléctrico externo o alternativo.

Respecto del EPFM de pérdida de alimentación a los GV y falla de extinción

Para concluir con este trabajo, se incluyó la descripción de un evento de fallas múltiples, donde se simuló y analizó un evento altamente improbable de “pérdida total de alimentación a los GV con falla total de la extinción del reactor (PSE y SSE)”, para demostrar la capacidad de auto-extinción del reactor, limitación de la presión y refrigeración adecuada a través del SSECR.

La fenomenología en este EPFM fue similar a la descrita anteriormente con la salvedad de que el aumento de presión provocó la actuación del SSECR y la apertura de la primera válvula de seguridad del primario, ya que la potencia de extracción del SSECR en esa instancia es mucho menor que la potencia generada en el reactor. Se observó que la refrigeración del reactor mediante el SSECR permitió alcanzar la saturación del sistema primario con generación de vapor en el núcleo donde el reactor responde autoextinguiéndose, llevando la planta a una condición estable y controlada durante al menos la primera hora. Esto permitió concluir que se dispone de suficiente tiempo como para tomar acciones de mitigación, demostrándose así la robustez intrínseca del reactor y sus sistemas de seguridad.

Dado que no se establecen criterios de aceptación para este tipo de eventos, se los comparó con criterios más restrictivos como los fijados para EIPU (DNBR, CPR, temperatura vaina y presión máxima en RPR). Se observó que estos límites no se superan, lo que permitió comprobar que esta secuencia no lleva a daño de núcleo.

Tareas futuras

De acuerdo a los resultados observados durante el desarrollo de esta Maestría y como complemento de los estudios realizados en la misma, se proponen abordar las siguientes tareas:

- Realizar un modelo detallado de pileta a fin de poder representar adecuadamente los fenómenos que puedan ocurrir en la misma, como por ejemplo la circulación natural, estratificaciones y/o mezclado, como así también su interacción con la contención. Durante el desarrollo de esta Maestría se realizaron algunas nodalizaciones detalladas de pileta mediante un modelado progresivo: se partió del modelo simple utilizado para los análisis presentados y luego se fue aumentando la complejidad. Pero debido a que se observaron muchas oscilaciones, se decidió utilizar el modelo simple y postergar el estudio exhaustivo de este tema.
- Indagar y analizar correlaciones para los coeficientes de transferencia de calor, principalmente para ebullición en pileta. Esto debido a que se observó una gran dispersión entre los coeficientes que utiliza el código de cálculo y lo hallado en la literatura, en la cual a su vez se pueden encontrar distintas correlaciones que involucran parámetros ajustables.
- Estudiar en detalle las oscilaciones que se presentan cuando el sistema de seguridad funciona con mezcla bifásica (rango de fracciones de vacío 0,4-0,7): analizar si esto se encuentra relacionado con cambios en regímenes de flujo (*annular mist, slug, bubbly*) o tiene alguna otra base física.
- Simular y analizar eventos en los cuales se demande el SSECR, incorporando modificaciones o variantes, como por ejemplo: incluir el nivel de primario como parámetro de disparo del SSECR (ya que se observó un incremento considerable de esta variable en los eventos simulados), demandar las dos redundancias, considerar la pileta del sistema a una temperatura de 40°C (para analizar fenómenos de pileta como por ejemplo circulaciones en una fase), entre otras.