

DISEÑO BALANCEADO DE SISTEMAS DE SEGURIDAD DEL REACTOR AVANZADO CAREM

Grinblat, P.; Giménez, M. y Schlamp, M.

Div. Seguridad Nuclear - Centro Atómico Bariloche - CNEA

grinblat@cab.cnea.gov.ar, gimenez@cab.cnea.gov.ar, schlamp@cab.cnea.gov.ar

Resumen

En el marco de la oferta de energía eléctrica, los reactores nucleares deben satisfacer las demandas de performance requeridas por el mercado y la población. Éstas se relacionan principalmente con los resultados económicos y con la seguridad de la planta. Se describen en este trabajo nuevos avances en la metodología de optimización económica del reactor analizando su seguridad en etapas tempranas de la ingeniería, desarrollada con el objetivo de balancear estos aspectos importantes del diseño.

En particular se describe el acople existente al dimensionar para el reactor CAREM el Sistema de Inyección de Emergencia, el Sistema de Extracción del Calor Residual y la altura de la contención para que cumplan con sus respectivas funciones de seguridad. Se muestran los nuevos modelos agregados a la herramienta que implementa la metodología para balancear estos diseños, y finalmente se muestran los resultados de las optimizaciones realizadas aplicándola. De este trabajo surge además un criterio para definir el diámetro máximo de las roturas admisibles en las penetraciones al Recipiente de Presión del Reactor.

Se concluye que la aplicación de la metodología y la herramienta desarrolladas demuestran las ventajas que brindan al diseño de reactores para que el mismo esté adecuadamente balanceado y optimizado.

Objetivo y alcance

El objetivo de este trabajo se centra en presentar la aplicación de la nueva metodología de optimización económica del diseño conceptual del reactor CAREM que incorpora la seguridad en el diseño conceptual para obtener un diseño balanceado. En particular y a modo de verificación, se utiliza el código IREP3 desarrollado para tal fin, para optimizar conjuntamente los diseños del Sistema de Inyección de Emergencia y del Sistema de Extracción de Calor Residual. Dado que este último sistema impacta en forma directa en la altura de la contención, la misma resulta optimizada económicamente. Este proceso se realiza considerando la respuesta del reactor ante accidentes por pérdida de refrigerante y por pérdida de los generadores de vapor.

Introducción

En el marco de la oferta de energía eléctrica, los reactores nucleares deben satisfacer las demandas de performance requeridas por el mercado y la población. Éstas tienen que

ver principalmente con los resultados económicos y con la seguridad de la planta. Es por esto que se necesita de un buen balance entre estos dos aspectos significativos del diseño; no se justifica una seguridad excesiva a cualquier costo y, por otra parte, la búsqueda de resultados económicos no pueden poner en riesgo la seguridad del reactor y de la población. En trabajos presentados anteriormente en reuniones de la AATN [1, 2] se han expuesto la metodología desarrollada para llevar esto a cabo, la implementación en una herramienta computacional y la aplicación al diseño del reactor CAREM y a uno de sus sistemas de seguridad. A continuación se mostrarán nuevos avances en la metodología [3], para más adelante mostrar el planteo del estudio analizado para este trabajo, el procedimiento aplicado y finalmente los resultados y conclusiones que hemos obtenido.

Metodología

La optimización integral debe hacerse a partir de la etapa conceptual de la ingeniería, con el objeto de garantizar que el reactor siga siendo seguro y competitivo. Para llevar esto a cabo, la propuesta para el proceso de diseño global en la etapa conceptual es:

- 1) **Diseño conceptual preliminar y optimización cualitativa basada en el juicio de los diseñadores.** Etapa basada en la experiencia de los diseñadores y resultados de investigación, reconociendo alternativas que apuntan a simplificar el diseño y a reducir los eventos iniciantes y disminuir su incidencia, entre otros objetivos de diseño para tomar las decisiones más sensatas. Diversas alternativas para los sistemas de seguridad y de procesos se proponen en esta etapa, para ser evaluados en la siguiente. De esta manera se obtiene la base de diseño.
- 2) **Diseño conceptual integral y optimización cuantitativa.** Esta segunda etapa consiste de un proceso integral de optimización del diseño para mejorar la figura de mérito que dice cuán bueno es un diseño, por ejemplo en relación a su performance económica. Para llevar esto a cabo se requieren los módulos de dimensionamiento neutrónico, termohidráulico, mecánico, de evaluación de seguridad y económica. Los de seguridad se utilizan para simular la performance de la planta en el estado estacionario y en transitorios o accidentes y para caracterizarla por medio de indicadores de seguridad. Esta evaluación se realiza para cada conjunto de parámetros de diseño que define un posible diseño del reactor que pudiese encontrarse a lo largo del proceso de optimización. Los objetivos de seguridad determinados por los reguladores y diseñadores son implementados en prácticos objetivos de seguridad cuantitativos. Los mismos se aplican como límites a los indicadores de seguridad elegidos y por lo tanto se consideran como restricciones en los parámetros de diseño. Luego se calcula la figura de mérito económica, dados los valores de los principales parámetros de diseño. Finalmente, la optimización entrega un nuevo juego de parámetros de diseño mejorando el valor de la figura de mérito. Esta etapa se repite hasta que el diseño converge.
- 3) **Diseño conceptual final basado en el juicio de expertos.** Evaluando los resultados de las alternativas, se eligen las mejores opciones de diseño. Eventualmente, será necesaria una retroalimentación hacia los pasos anteriores.

Utilizando la nueva metodología, el balance entre la economía y la seguridad se obtiene a través de la realimentación entre las características del diseño y los criterios de seguridad establecidos, el cual aparece en el transcurso del proceso de optimización. El equilibrio así alcanzado garantiza que la búsqueda de menores costos no ponga en juego la seguridad del reactor, y que los costos de los reactores más seguros no crezcan ilimitadamente.

En esta serie de trabajos nos ocupamos principalmente de la implementación de la segunda etapa en una herramienta computacional y de su aplicación a diversos casos concretos. La novedosa metodología, que incorpora la evaluación de la seguridad y la dinámica de la planta en una etapa temprana de la ingeniería del reactor, se basa en optimizar los parámetros que más influyen en la economía del reactor, evaluando paso a paso la seguridad del mismo. El nivel de seguridad de cada diseño se caracteriza mediante *indicadores de seguridad* u *observables* que surgen de la evaluación de la respuesta del reactor ante distintos eventos iniciantes. A estos observables, a su vez, se le aplican restricciones. De esta manera, de ser necesario, el vector de cambio en los parámetros de diseño propuesto por la optimización económica es desviado para que no se violen estos límites.

El reactor CAREM y sus Sistemas de Seguridad

La metodología y la herramienta desarrolladas fueron aplicadas al diseño de los sistemas de seguridad del reactor CAREM, teniendo en cuenta su respuesta ante algunos eventos iniciantes particulares. Este reactor es de tipo integrado –todo el circuito primario dentro de un único recipiente de presión (RPR)– y autopresurizado. Cuenta además con sistemas de seguridad pasivos que garantizan la performance buscada en seguridad. Estos son el Primer Sistema de Extinción (PSE) con barras absorbentes, el Segundo Sistema de Extinción (SSE) con agua borada a presión, el Sistema de Inyección de Emergencia (SIE) con tanques de agua y de aire ejerciendo la presión para que ingrese al RPR en caso de necesidad, el Sistema de Extracción de Calor Residual (SECR) que condensa vapor del domo del reactor dentro de tubos condensadores alojados en una pileta de agua colocada en un nivel superior de la contención, siendo la gravedad la fuerza impulsora de este circuito, y la contención, del tipo supresión de presión, que evita la potencial liberación de productos radiactivos al medioambiente en caso de que ocurra un accidente.

Planteo de la aplicación

En este trabajo se aplica la metodología, incluyendo nuevos modelos de los sistemas de seguridad y de secuencias accidentales en el código IREP3, para optimizar el costo total de la planta resolviendo el acople entre los diseños del SIE, SECR y contención (en forma aún parcial). A continuación se explicará dicho proceso.

El diámetro máximo de las penetraciones al RPR, que en caso de rotura de las mismas ocasionaría un accidente por pérdida de refrigerante (LOCA), es una de las variables de diseño que más influye en el dimensionamiento de los parámetros del SIE de forma tal que pueda cumplir con las restricciones colocadas al tiempo mínimo de descubrimiento

de núcleo y al margen de masa mínimo dentro del RPR, que son los observables de esta secuencia accidental (**Figura 1**). Dicho diámetro también tiene influencia directa en otros sistemas de procesos como el de remoción de calor en parada entre otros. La severidad del LOCA crece (disminuye el valor de dichos observables) cuanto mayor es dicho diámetro. En la base de diseño del CAREM-25 (prototipo) este diámetro máximo estaba fijado de antemano de manera tentativa, y se busca con este trabajo un criterio alternativo para obtenerlo de una manera costo-efectiva para aplicarlo en el diseño de los reactores CAREM de distintas potencias.

El SECR, por su parte, es utilizado para reducir la presión y extraer el calor de decaimiento en accidentes por pérdida de fuente fría (LOHS), es decir de los generadores de vapor. La presión máxima alcanzada es un observable representativo de este caso y se utiliza para definir la potencia máxima a remover por el sistema y por ende su caudal. Este equipo de condensadores se conecta al RPR, tanto para la extracción de vapor como para el retorno del condensado, mediante tubos cuyo diámetro es el mayor permitido por diseño de penetración al RPR, dado que es un sistema que funciona por circulación natural. El caudal circulante por el SECR queda determinado por el balance entre la fuerza boyante y la fuerza debida a la fricción. Cuanto mayor sea el diámetro de penetración en el RPR, menor será la fricción, permitiendo que la altura que separa la piletta del SECR con el RPR –generadora de la fuerza boyante– sea menor. Debido a esto se podrá reducir el costo de la contención, ya que su altura está determinada por la cota del SECR. Pero, por otra parte, el aumento en dicho diámetro incrementará el costo del SIE ya que se requerirá una mayor prestación.

Lo que proponemos en este trabajo es optimizar dicho diámetro de penetración al RPR para reducir el costo total de la instalación mediante un adecuado balance entre la altura de la contención y los parámetros del SIE. En esta primera etapa, que estaría dentro de un proceso más global de optimización, se mantiene sin optimizar y como condición de contorno, la potencia a remover por el SECR, conservando el diseño de los condensadores. En esta optimización se consideraran las restricciones para los observables representativos del LOCA que condicionan al diseño del SIE.

Procedimiento

Lo primero que se hizo fue formalizar la selección de observables para las dos secuencias accidentales como se muestra en los cuadros **Tabla 1** para los LOCAs [4] (también mostrados en la **Figura 1**) y **Tabla 2** para los LOHSs.

Otras de las tareas que fueron necesarias antes de llevar a cabo las optimizaciones, fueron desarrollar e implementar en el código los modelos para llegar al dimensionamiento y costeo de la contención¹. También se modeló el balance de fuerzas en el circuito del SECR para garantizar que al variar los parámetros de interés (diámetro de penetración y altura sobre el RPR) se siga removiendo la potencia requerida. Se partió de la ecuación de momento del diseño original:

¹ En esta etapa se calculó la variación de costo respecto al diseño original considerando únicamente una variación en la altura. Se proyecta más adelante realizar un diseño completo que incluya modelos termohidráulicos que permitan simular la respuesta de la contención para evaluar observables que permitan correlacionar su respuesta con parámetros de diseño.

$$\oint \text{Fuerzas de Fricción} = \oint \text{Fuerza Boyante}$$

y se le agregaron los términos debidos a la modificación en los diámetros de penetración al RPR y en la altura entre el RPR y la pileta del SECR (los restantes parámetros del SECR no fueron modificados):

$$\oint \text{de Fricción} + \frac{\text{Variación debida a cambios en los parámetros de diseño}}{\text{Original}} = \oint \text{Boyante} + \frac{\text{Variación debida a cambios en los parámetros de diseño}}{\text{Original}}$$

En la nueva ecuación obtenida restando miembro a miembro los términos de ambas ecuaciones, se cancelan los términos provenientes del diseño original y queda una relación entre las modificaciones en los parámetros mencionados, en la cual puede despejarse la variación en la altura buscada:

$$H_{LC} - H_{LC,0} = \frac{\frac{8n\&^2}{\pi^2 \rho_v C_d^2} \left(\frac{1}{D_{RotMax}^4} - \frac{1}{D_{RotMax,0}^4} \right) + \frac{8n\&^2 f_{AcomLiq} L_{AcomLiq}}{\pi^2 \rho_l} \left(\frac{1}{D_{AcomLiq}^5} - \frac{1}{D_{AcomLiq,0}^5} \right)}{(\rho_l - \rho_v)g - \frac{8n\&^2}{\pi^2} \left(\frac{f_{LV}}{\rho_v D_{LV}^5} - \frac{f_{LC}}{\rho_l D_{LC}^5} \right)}$$

En esta ecuación $n\&$ es el caudal, H representa a la altura entre la salida del condensador y la acometida de líquido que reingresa al RPR, D al diámetro, ρ a la densidad, f al factor de fricción; el subíndice 0 hace referencia al diseño original, LV a la línea de vapor, LC a la línea de condensado; y C_d es el coeficiente de descarga de la placa orificio con la que se modela la caída de presión a la salida del RPR.

De esta manera se calcula el incremento requerido en la altura para remover la potencia necesaria al variar los demás parámetros del SECR mencionados anteriormente. El costo de la contención se obtiene sumándole al valor original, el monto debido al material extra necesario considerando esta diferencia de alturas (calculando el incremento en el volumen de hormigón y la superficie cubierta por el liner).

Resultados

Se llevaron a cabo diversas optimizaciones para los sistemas de seguridad del prototipo CAREM 25. En primer lugar se efectuaron algunas mediante distintos itinerarios en el espacio de los parámetros de diseño. Esto quiere decir, por ejemplo, liberando en primer término aquellos correspondientes al SIE y luego el diámetro de la salida del RPV hacia el SECR, o viceversa, o distintas combinaciones y alternando en diferentes etapas del proceso. También se comenzaron optimizaciones con distintos puntos de partida. Se hizo esto así debido a que el método utilizado encuentra mínimos locales. Se eligió luego aquél que mejores resultados económicos arrojaba. En todos los casos los criterios de seguridad adoptados fueron: que en caso de LOCA el margen de masa mínimo sobre el núcleo previo a la inyección del SIE sea mayor que 4000 kg y que el tiempo de descubrimiento supere las 48 horas; y que el SECR sea capaz de remover 2 MW en caso de de un accidente tipo LOHS. Los costos específicos de los materiales utilizados se

muestran en la **Tabla 3**. Los mismos son valores estimados y que su variación relativa influye en los resultados del proceso de optimización.

Con la optimización que resultó ser la más conveniente, se obtuvo una reducción total en el costo (del SIE y la contención) del 5.8% con respecto a los valores originales, un 29.3% más que optimizando el SIE independientemente. En particular la altura de la contención se vio incrementada en 81.3 cm, la presión del SIE se redujo 237 kPa, su volumen de líquido en 3.8 m³ y su volumen de aire en 8.2 m³. El valor máximo para el diámetro de penetración en el recipiente de presión del reactor obtenido aplicando este criterio es de 3.61 cm ó 1.425 pulgadas.

Para verificar que el óptimo obtenido era correcto, se efectuaron más optimizaciones sobredimensionando y subdimensionando la altura de la contención en los puntos de partida, obteniendo siempre que el óptimo se encuentra incrementando la altura de la contención y reduciendo los parámetros del SIE.

Conclusiones

La metodología desarrollada para balancear la seguridad con la economía de la planta y su implementación en un código, se aplicó a la optimización conjunta del Sistema de Inyección de Emergencia y la altura de la contención para cubrir adecuadamente accidentes por pérdida de refrigerante y accidentes por pérdida de fuente fría. Como resultado derivado de este proceso surge además un criterio para fijar el valor máximo para el diámetro de penetración en el recipiente de presión del reactor, basado en un diseño costo-efectivo. Esto muestra una de las potencialidades de la herramienta desarrollada, además de las relacionadas con estrategias y sistemas alternativos para cumplir las funciones de seguridad. Los resultados preliminares son satisfactorios al reducir más los costos inherentes a la seguridad manteniendo la performance y demuestran la capacidad de la metodología, aunque si bien los valores numéricos obtenidos son tentativos y pueden variar al implementarse los modelos de la contención, de los sistemas y accidentes pendientes, así como también del costo específico de cada componente o sistema modelado.

Referencias

[1] **Grinblat, P.; Schlamp, M.; Brasnarof, D. y Giménez, M.:** “*Metodología para la Integración de la Seguridad en la Optimización del Diseño de Reactores Avanzados*”. Trabajo presentado en AATN 2001, Buenos Aires.

[2] **Grinblat, P.; Schlamp, M.; Brasnarof, D. y Giménez, M.:** “*Integración de la Seguridad en la Optimización del Diseño de Reactores Avanzados: Aplicación considerando Accidentes por Pérdida de Refrigerante*”. Trabajo presentado en AATN 2001, Buenos Aires.

[3] **M. Giménez; P. Grinblat y M. Schlamp:** “*A New Cost-Effective Methodology for Nuclear Reactor Conceptual Design*” Enviado a la IAEA por contrato 604-II-200141511. Abril 2002

[4] **M. Giménez; P. Grinblat y M. Schlamp:** “*A New Cost-Effective Methodology for Nuclear Reactor Conceptual Design: Case Study for Loss of Coolant Accidents*” Enviado a la IAEA por contrato 604-II-200141511. Abril 2002

Figuras y Tablas

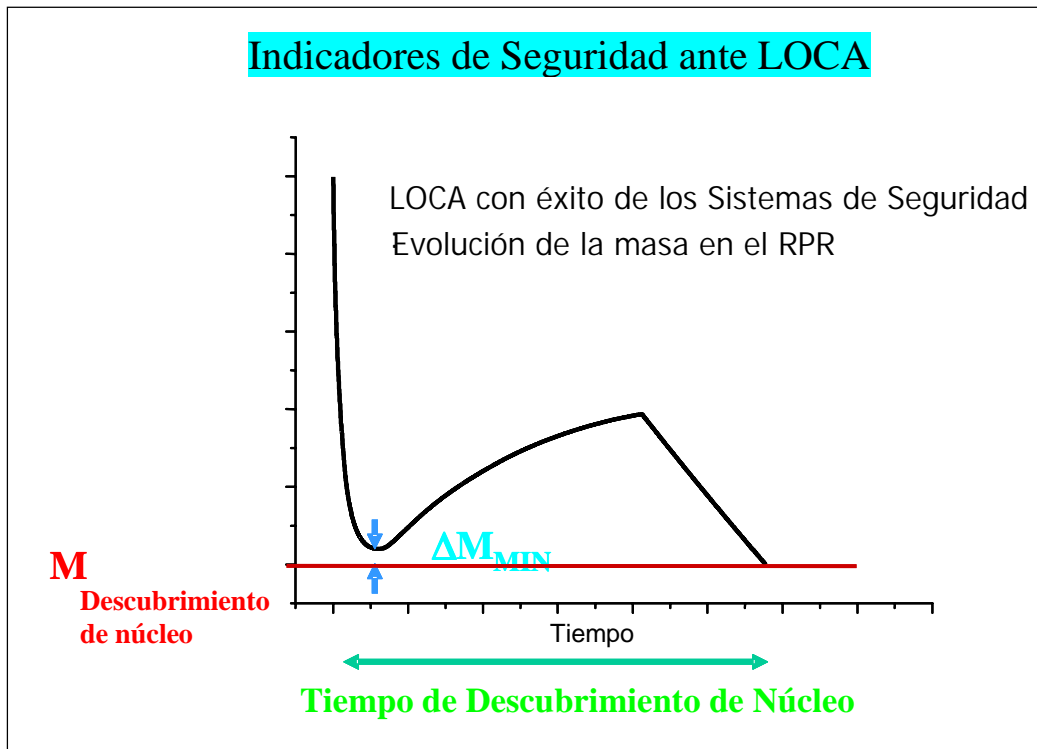


Figura 1: Evolución de la masa de agua en el sistema primario ante un accidente por pérdida de refrigerante. Se muestran los observables para este transitorio.

Evento Iniciante Postulado		Ruptura de una cañería localizada en la región superior del RPR cuando el reactor opera a plena potencia	
Fenómeno Físico Potencial		El agua se evapora y escapa a través de la rotura hasta que su nivel alcanza aquél del núcleo	
Criterio de Diseño		Evitar fusión de núcleo	
Sistemas de Seguridad para la mitigación		PSE, SSE, SECR, SIE	
Análisis de la Performance de Seguridad	Tiempo Transcurrido desde Evento Iniciante	Corto Plazo	Largo Plazo
	Resultados de las Simulaciones	El inventario de agua se pierde rápidamente por la alta presión del primario ya que activación del SIE no es inmediata	Cuando se vacía el SIE, el nivel de agua decrece a un menor ritmo dada la menor presión y la menor potencia de decaimiento
	Indicador de Seguridad	Margen de Masa Mínimo (δM_{min})	Tiempo de Descubrimiento de Núcleo (t_{CU})
	Objetivo de Seguridad	Las incertezas del modelo están cubiertas para este indicador de manera que no ocurra un descubrimiento temprano de núcleo	Ninguna acción necesaria del operador y tiempo suficiente para obtener medios externos de refrigeración
	Valor Límite Utilizado para Optimizaciones	4000 kg	48 horas

Tabla 1: Selección de indicadores de seguridad para accidentes por pérdida de refrigerante.

Evento Iniciante Postulado	Pérdida total de los generadores de vapor	
Fenómeno Físico Potencial	La presión interna en el RPR aumenta debido al calor de decaimiento, hasta que se supera la presión de diseño	
Criterio de Diseño	Evitar la rotura catastrófica del recipiente de presión y causar LOCAs al abrirse las válvulas de seguridad	
Sistemas de Seguridad para la mitigación	PSE, SSE, SECR	
Análisis de la Performance de Seguridad	Resultados de Simulaciones	Al activarse el SECR, la presión del sistema primario disminuye rápidamente hasta que sature. Una vez que se alcanza esta condición la presión vuelve a aumentar hasta que la potencia removida pasa a ser mayor que la potencia de decaimiento, punto donde se alcanza la máxima presión.
	Indicador de Seguridad	Presión máxima del primario (implementado con potencia del SECR) ²
	Objetivo de Seguridad	La presión máxima que alcanza el sistema primario se mantiene por debajo de la presión de apertura de las válvulas de seguridad de forma tal de evitar un LOCA en caso de que estas válvulas abriesen y fallasen en modo abierto
	Valor Límite Utilizado para Optimizaciones	Presión de apertura de apertura de las válvulas de seguridad reducida en un margen ²

Tabla 2: Selección de indicadores de seguridad para accidentes por pérdida de fuente fría.

² En esta etapa no se completó la integración del modelo de cálculo de LOHS al código de optimización, lo que se hizo fue mantener constante la potencia máxima removida por el SECR lo que garantiza que la presión no superará el valor límite.

Material	Costo Específico
Hormigón	500 \$/m ³
Liner	2.5 \$/kg
Acero SIE	30 \$/kg

Tabla 3: Costos específicos de los materiales utilizados en las optimizaciones

BALANCED DESIGN OF SAFETY SYSTEMS OF CAREM ADVANCED REACTOR

Nuclear Power Plants must meet the performance that the market and the population demand in order to be part of the electricity supply industry. It is related mainly with the results of reactor's economy and safety. New advances in the methodology developed for reactor economic optimization analyzing its safety at an early engineering stage, aiming at balancing these important features of the design, are presented in this work.

In particular, the coupling that appears when dimensioning the Emergency Injection System, the Residual Heat Removal System and the containment height of CAREM reactor is described. The new models appended to the computer code that embodies the methodology to balance de designs are shown. Finally the results obtained with the optimizations when applying it are presented. Furthermore, a criterion to establish the maximal diameter for acceptable breaks in RPV's penetrations arises from this work.

The application of the methodology and the computer code developed turns out to prove the advantages they provide to reactor design so that the plants are properly balanced and optimized.