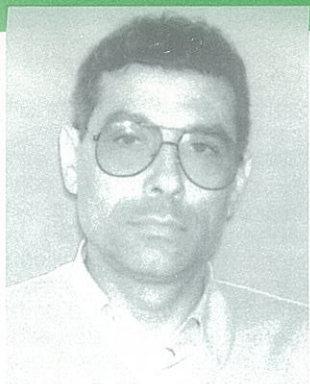




Francisco ALCANTUD CAYUELA es licenciado en Ciencias Físicas y Perito Industrial Eléctrico. Ha trabajado con Hidroeléctrica Española, S. A., desde el año 1965, y está destinado en la Central Nuclear de Cofrentes desde 1975, trabajando en la organización de construcción hasta 1980. A partir de ese año desempeñó el cargo de jefe de Ingeniería de Explotación, y desde el pasado año 1987 el de Jefe de Producción en dicha Central.



Félix CASTRILLO PORRES es Ingeniero Naval (promoción 1974). Ha desarrollado su actividad profesional en el campo de la Dinámica de estructuras y medición de vibraciones hasta el año 1983, en que ingresó en Hidroeléctrica Española, incorporándose al Servicio de Ingeniería y Análisis Nucleares en el área de Termohidráulica.



Juan SERRA TORRES es Ingeniero Industrial por la ETSI de Madrid. Trabajó en Empresarios Agrupados en la Sección de Tuberías entre 1981 y 1983, siendo Ingeniero Responsable de Proyecto de Análisis de Tuberías para la CN de Trillo. Ingresó en Hidroeléctrica Española en 1983, desarrollando actividades de Termohidráulica para la CN de Cofrentes desde esa fecha.

PROGRAMA DE MEJORA DE LA CAPACIDAD EN REACTORES DE AGUA EN EBULLICION

F. ALCANTUD - F. CASTRILLO - J. SERRA

INTRODUCCION

La experiencia de operación acumulada de las distintas centrales de agua en ebullición, juntamente con el esfuerzo de diseño realizado por los suministradores principales, unido al sobredimensionamiento de los sistemas y equipos de las plantas en sus diseños originales, han llevado a la definición de distintas opciones y estrategias de operación que, siendo económicamente atractivas, tienen como objeto prolongar el aprovechamiento del núcleo, aumentar la potencia de operación de

la unidad, mejorar el rendimiento del ciclo, incrementar el factor de carga y la disponibilidad de la central o flexibilizar la operación de la planta.

A continuación se resumen brevemente las alternativas más importantes disponibles para centrales BWR:

- MEOD (Extensión Máxima del Mapa de Operación)

Consistente en una ampliación del mapa de operación que puede subdividirse en dos zonas: extensión del mapa por encima de la línea del 100 % de barras de control (maximum extended load line) y extensión del mapa por

la zona de máximo caudal del núcleo (increase core flow) (ver figura II).

– FWHOS (Calentador de Agua de Alimentación Fuera de Servicio)

Esta opción permite operar durante un tiempo prolongado con un calentador fuera de servicio y al nivel de potencia que los análisis correspondientes determinen como máximo posible.

– SLO (Operación con un Solo Lazo de Recirculación)

Opción que permite continuar en operación con un solo lazo de recirculación en servicio.

– FFWR (Reducción Final de la Temperatura del Agua de Alimentación)

Reducción de temperatura del agua de alimentación provocada al final de ciclo para conseguir un aumento en la reactividad del núcleo que le permita prolongar su situación de potencia térmica nominal.

– (PU) Potencia Aumentada

Opción que permite el licenciamiento de la planta para operar continuamente a un nivel de potencia superior al nominal de Especificaciones Técnicas.

– Decaimiento de Potencia al Final del Ciclo

Estrategia de prolongación de ciclos consistente en continuar la operación de la unidad una vez alcanzada la situación de "todas las barras de control fuera" sin alterar la temperatura del agua de alimentación y permitiendo que la potencia térmica vaya reduciéndose a la vez que la propia reactividad del núcleo.

– Corrimiento Espectral

Estrategia de operación consistente en situar la unidad a potencia térmica nominal y caudal del núcleo reducido con objeto de aumentar el contenido de huecos del núcleo, lo que endurece el espectro neutrónico favoreciendo la creación de plutonio al principio del ciclo. Este plutonio podrá utilizarse como combustible al final del propio ciclo.

– Operación a Secuencia de Barras de Control Constante

Diseño del núcleo que permite afrontar la operación de un ciclo completo sin necesidad de efectuar cambios de secuencia de barras de control, para lo cual las celdas que van a permanecer incontroladas se cargan con elementos frescos y el combustible de baja reactividad se carga en celdas controladas.

– Aumento de Quemado

En el término "aumento de quemado" se ha englobado tanto el diseño de ciclos de mayor longitud mediante el incremento del enriquecimiento promedio de recarga como el empleo de tipos de combustible más avanzadas con los que se consigue un mayor quemado de descarga.

Estas opciones y estrategias de operación, en conjunto, tienen como características comunes, el poder ser abordadas con pocos o ningún cambio en sistemas ni equipos de la central.

PROGRAMA DE MEJORA DE LA CAPACIDAD DEL REACTOR EN LA CN COFRENTES

Dados los grandes márgenes existentes en el diseño original del sistema nuclear y convencional de la Central Nuclear de Cofrentes, Hidroeléctrica Española, S. A., decidió implantar un programa de mejora de la capacidad del reactor con el objetivo de hacerlo operativo para el inicio del ciclo 4.

Después de un detenido estudio en el que se analizaron todas las diferentes opciones posibles descritas en el apartado anterior, se decidió iniciar el programa con el licenciamiento de las siguientes alternativas:

– Ampliación del mapa de operación (MEOD).

– Aumento de la potencia de operación hasta el 102 % de la nominal (PU). La selección se realizó en base a la importancia para la economía y flexibilidad de operación de la central, a la rapidez de incorporación de las mejoras y a la positiva experiencia de otras centrales en donde ya estaban operativas dichas opciones. El resto de las opciones y estrategias de operación, o bien ya han sido implantadas en la central o serán objeto de consideraciones futuras por parte de HE, por lo que no serán comentadas en este artículo.

En octubre de 1986 se presentó ante el Consejo de Seguridad Nuclear una propuesta del programa que fue favorablemente acogida. La fase de cálculos necesarios para la licencia comenzó en enero de 1987, con una duración programada de unos seis meses. En febrero de 1987 se emitió un informe genérico preliminar del programa que se presentó en el MINER, Dirección Provincial de Valencia. La presentación del análisis de seguridad específico de la CN Cofrentes ante la Administración se produjo en septiembre de 1987, siendo finalmente concedido el permiso de explotación provisional en marzo de 1988, días antes del inicio del Ciclo 4 de la operación de la CN Cofrentes.

La figura I muestra el mapa de operación de Cofrentes antes de la implementación del MEOD + PU. La figura II muestra el mapa ampliado al máximo de las posibilidades de la planta y la figura III presenta el nuevo mapa de operación de Cofrentes con las mejoras incorporadas, que es operativo desde el inicio del Ciclo 4.

El MEOD, como se puede apreciar en la figura II, permite ampliar considerablemente el mapa de operación, tanto en la zona de línea de barras de control constantes (ELL) como en la del 100 % de caudal del núcleo (ICF), lo que proporciona una gran flexibilidad operacional, a la vez que una sensible mejora en el factor de capacidad de la planta. La frontera de la zona ELL está limitada por un caudal del 80 % a una potencia del 102 %, y su línea de barras de control constantes correspondiente (línea de barras del 121 % aproximadamente). Esta frontera fue determinada por General Electric Co. como la más alta línea de barras operacionalmente alcanzable cumpliendo con límites térmicos y márgenes de reactividad admisibles de diseño. El límite de la zona de caudal aumentado (ICF) queda determinado por una potencia del 102 % y caudal del 108 %, y por la línea correspondiente a una posición de válvula de control de caudal de recirculación (FCV) constante. Tal como se aprecia en la figura III, sólo se ha licenciado el ICF hasta el 105 % de caudal en el núcleo, habiendo requerido el CSN análisis adicionales para el licenciamiento de toda la región hasta el 108 %.

La capacidad de operar en la zona de ELL posibilita los arranques con líneas de barras superiores a la del 100 %, que compensan las pérdidas de potencia por transitorios de xenon hasta alcanzar la plena carga estable, ya que se requería, en ocasiones, de sucesivos ajustes con barras de control y recirculación hasta conseguir el punto de operación estable deseado. Todo ello agravado adicionalmente por los límites de la interacción vaina-combustible (PCI). Estos inconvenientes en los arranques quedan eliminados al poder arrancar con líneas de barras de control superiores al 100 % y compensar los decrementos de reactividad con incrementos de caudal en el núcleo, puesto que se consigue la plena carga con caudales considerablemente inferiores al nominal. Una vez alcanzada la plena carga, la zona de ICF permite compensar las pérdidas de reactividad por incremento del quemado del ciclo, aumentando el caudal del núcleo sin necesidad de extraer barras de control.

Lo que resulta especialmente interesante al final del ciclo, cuando ya se han extraído todas las barras de control.

Los estudios de viabilidad de un PU para la central nuclear de Cofrentes indican que la planta puede operar de un modo continuo y seguro aproximadamente a un 105 % de su potencia eléctrica licenciada (104,2 % de potencia térmica en el reactor).

La factibilidad real de esta mejora se

hace patente en la experiencia de CN Leibstadt (Suiza), que opera a un 104,2 % de potencia térmica con un mapa de operación ampliado hasta el 105 % del caudal nominal del núcleo.

En el caso de Cofrentes, el *power uprate* se ha afrontado en dos pasos; el primero de ellos recoge un incremento de potencia de un 2 % (es el actualmente operativo) y el segundo, que recogerá un PU hasta 104,2 % de potencia térmica, será implementado en la unidad en un futuro próximo, una vez que se ha haya ganado experiencia operacional a potencia aumentada al 102 %.

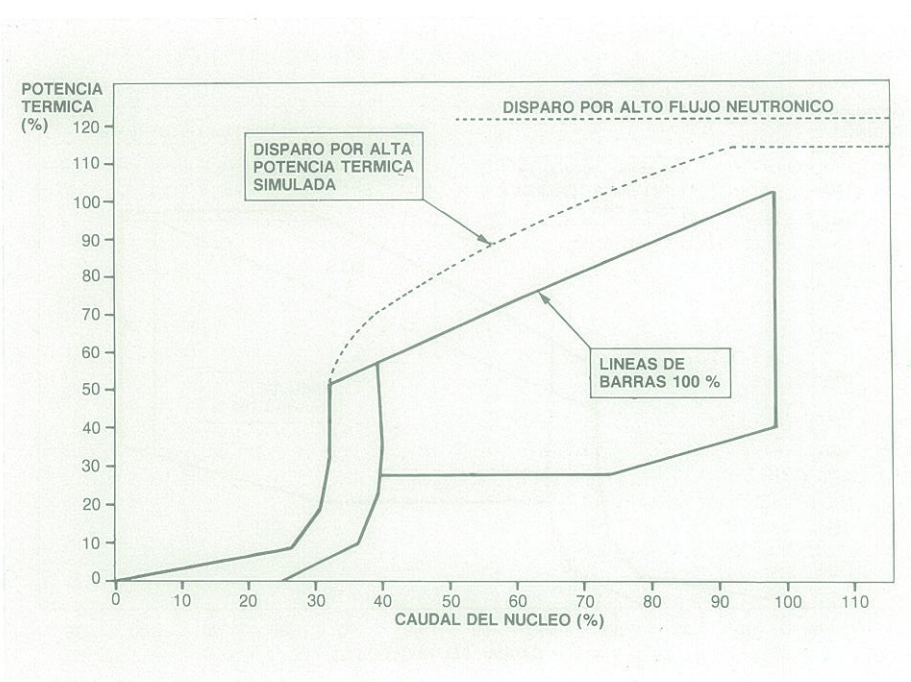
La diferencia fundamental a nivel de análisis necesarios para la licencia del 102 ó 104,2 % de potencia, es que en el primer caso no es necesario el reanálisis completo del ECCS, puesto que continúan siendo válidos los realizados en el EFS, calculados a un 104,2 % de potencia, lo que cubre sobradamente la operación al 102 % cumpliendo con el 2 % de extra-margen exigido en la guía reguladora 1.49 (referencia 1) y en el 10CFR50 apéndice K (referencia 2). Sin embargo, el incrementar la potencia térmica hasta el 104,2 % requerirá un análisis completo del ECCS a un nivel de potencia $1,02 \times 104,2 \%$ para el accidente base de diseño (DBA).

El resto de los análisis necesarios para la licencia del MEOD + PU han sido realizados de modo que cubran un futuro incremento de la potencia térmica al 104,2 % y con caudales en el núcleo del 108 % del nominal a máxima carga.

ANÁLISIS REALIZADOS PARA LA IMPLEMENTACION DEL MEOD + PU

Con anterioridad a la implantación del MEOD + PU ha sido necesario realizar una serie de análisis y evaluaciones que garanticen una operación segura y fiable de todos los sistemas afectados y sirvan de base para las modificaciones requeridas en especificaciones técnicas, tarados y límites admisibles de operación. Tales análisis abarcan una reevaluación de prácticamente todos los sistemas nucleares (NSSS) y convencionales (BOP) de la central con análisis específicos en las áreas en que han sido necesarios (transitorios, análisis mecánicos de internos de la vasija, etc.), que concluyen en la generación del apéndice 15C del Estudio Final de Seguridad de la CN Cofrentes (referencia 3).

Los cálculos fueron realizados por General Electric Co. en el área de análisis de transitorios a potencia y caudal reducido o con reducción final de la temperatura del agua de alimentación; análisis mecánicos en los internos de



FI CN Cofrentes. Mapa de Operación (original)

la vasija, análisis del ECCS en la región del MEOD, evaluaciones de fluencia de la vasija, vibraciones, turbogenerador, etc.; por ENUSA en el área de análisis de transitorios en condiciones de máxima potencia y caudales nominal y máximo, y por Empresarios Agrupados (ingeniería principal en la construcción de la central) en el área del BOP y de evaluaciones termomecánicas de sistemas.

Todos los cálculos realizados cubren la operación de la central a un 104,2 % de potencia térmica, aun cuando en este primer nivel de licenciamiento sólo se operará al 102 %.

Se presenta a continuación una somera descripción de la verificación de la capacidad de los sistemas y de los análisis de seguridad realizados.

VERIFICACION DE LA CAPACIDAD DE LOS SISTEMAS

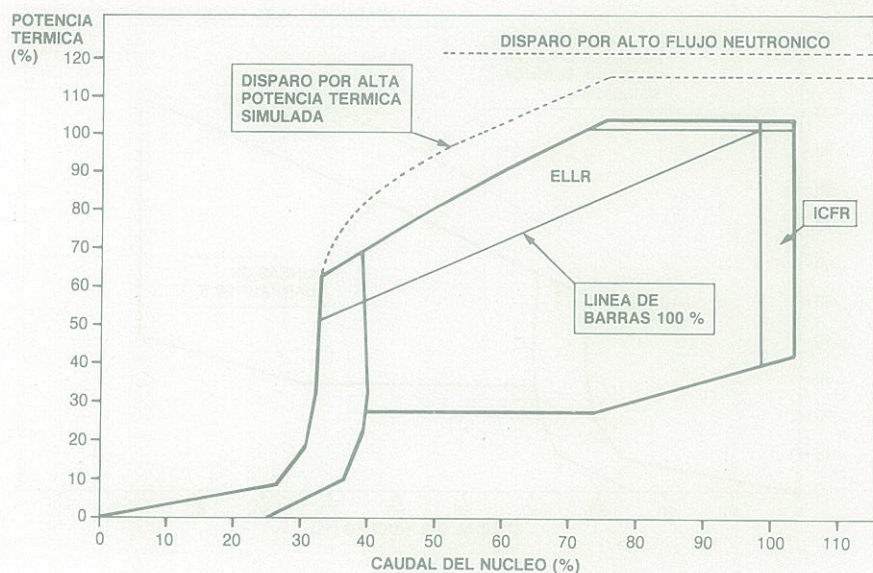
Se evaluó el impacto de la ampliación del mapa de operación y nivel de potencia en los equipos y sistemas de la central. Esta evaluación incluye sistemas auxiliares, tensiones en sistemas y tuberías, diferencias de presión y vibraciones en internos de la vasija, y efectos de la irradiación sobre la fractura frágil de la vasija.

Los análisis de diferencia de presión en internos se realizaron en las condiciones más limitativas de la envolvente del mapa extendido, a 106,3 % de potencia, 108 % de caudal, y a 40 % de potencia, 114 % de caudal. El objetivo

de los análisis fue determinar las máximas diferencias de presión para los distintos componentes, en condiciones de estado estacionario normal, alterado, emergencia y accidente, y compararla con las obtenidas en análisis previos. La evaluación mecánica de internos de la vasija incluyó la revisión de niveles de tensiones en bombas de chorro, placa soporte del núcleo, placa soporte superior, separadores y secadores de vapor, envoltura del núcleo, tubos guía de las barras de control, alojamiento de los accionadores de las barras de control, líneas y toberas del HPCS (sistema de rociado del núcleo a alta presión), tubos guía internos al núcleo, piezas soporte del combustible, etc., comprobando que no excedían los límites admisibles.

Se realizó una evaluación de la respuesta de vibración de los internos de la vasija en el rango de potencia y caudal aumentados. El análisis fue semiempírico, basado principalmente en las mediciones de vibraciones durante la puesta en marcha del reactor de Kuosheng I, que tiene un tamaño y diseño interno del reactor idéntico al de Cofrentes. La conclusión fue que el reactor de Cofrentes puede operar dentro de los nuevos límites sin provocar vibraciones inaceptables que puedan causar fallos por fatiga en sus componentes internos.

Se evaluaron también las cargas de levantamiento de elementos combustibles, comprobando que el levantamiento en condiciones de accidente



F II CN Cofrentes. Mapa de Operación ampliado (PU 102 %)

resultaba ser una pequeña fracción de los límites admisibles de diseño.

Se realizó una evaluación del sistema de recirculación para determinar su máxima capacidad, concluyendo que ésta sería del 108 % como máximo, operando a un 104,2 % de potencia térmica y con la válvula de control de caudal de recirculación totalmente abierta.

Al disminuir la potencia con posición de las FCV constante, se incrementa el caudal en el núcleo como consecuencia de la disminución de los factores de multiplicación bifásicos de fricción, ya que disminuye la fracción de huecos en el núcleo, pudiéndose obtener caudales de hasta un 114 % del nominal al 40 % de potencia, lo que constituye el extremo inferior derecho del mapa máximo de operación de Cofrentes (ver figura III). La conclusión del estudio fue que los incrementos de caudal y potencia analizados son perfectamente asimilables por el sistema de recirculación.

Se evaluó la capacidad de las líneas de vapor y válvulas de control de turbina (TCV) para acomodar un incremento de un 5 % de caudal de vapor. Deduciéndose que las TCV tenían un suficiente margen de control incrementando ligeramente el tarado del regulador, caso de ser necesario, para evitar la operación con las TCV excesivamente abiertas, lo que llevaría a grandes desplazamientos del posicionador de la válvula para pequeñas modificaciones de su caudal de paso, con la consiguiente pérdida de capacidad

de regulación. Con el objeto de disponer de un adecuado margen en las válvulas, se decidió incrementar la presión de operación en el domo de la vasija en 10 psi, pasando de 1060 a 1070 psia.

Este incremento de presión en el domo hizo necesario modificar los tarados de las válvulas de alivio/seguridad (SRV) aumentándolos en 10 psi tanto en su lógica normal como de bajo-bajo punto de tarado, con objeto de seguir manteniendo el mismo margen ante sobrepresiones. Por el mismo motivo, fue necesario incrementar los tarados del disparo del reactor y disparo de las bombas de recirculación por alta presión.

La evaluación del sistema de bypass operando al 105 % de caudal de vapor y 1070 psia de presión en el domo mostró que las seis válvulas de bypass disponían de una capacidad del 35 % del caudal de vapor aumentado.

La posibilidad de operar en la zona extendida del mapa de operación y a potencia superior a la nominal hicieron modificar los tarados de bloqueo de extracción de barras de control, y disparo del reactor por alta potencia térmica simulada.

Otros sistemas evaluados fueron los siguientes:

- Sistema de Extracción de Calor Residual (RHRS).
- Sistemas de Inyección de Alta Presión.
- Sistema de Control Líquido de Reserva (SBLCS).

- Sistema de Condensado y Agua de Alimentación.
- Sistema de Limpieza del Agua del Reactor.
- Sistema Hidráulico de Accionamiento de las Barras de Control (CRDS).
- Análisis de esfuerzos en las Tuberías del Sistema Primario.
- Sistema cerrado del Agua de Enfriamiento (CCW).
- Sistema de Refrigeración y Limpieza de la Piscina de Combustible.
- Sistemas eléctricos de la central (turbogenerador, conductos de barra de fase aislada a 20 KV, transformador principal, transformadores auxiliares, barras de fase aisladas de 6,3 KV).
- Vasija del reactor (fluencia, fractura frágil).
- Agua de Servicio Esencial (ESW) y Sumidero Final de Calor (UHS).
- Sistema de Tratamiento de Condensado.
- Eyectores de aire.
- Condensador y Sistema de Agua de Circulación.
- Sistemas de Ventilación.
- Presurización de Subcompartimentos.
- Sistema de Evacuación de Gases Radiactivos.
- Análisis Radiológicos.
- Balances Térmicos.
- Estudios de Estabilidad.

ANÁLISIS DE SEGURIDAD

Se han revisado los análisis de transitorios del capítulo 15 del EFS, actualizando los transitorios limitativos a las condiciones nuevas del mapa ampliado y con unos parámetros nucleares correspondientes a fin de ciclo de equilibrio de dieciocho meses. La potencia inicial en los análisis fue de 3015 MWt (104,2 %) al igual que en los análisis originales del EFS, y el caudal del 100 % y 108 %, pues se comprobó que estas condiciones envuelven a las de caudal inferior al nominal.

Los resultados de los análisis muestran que los límites térmicos de operación se ven penalizados para la condición de máximo caudal, respecto a las condiciones nominales (1,21 frente a 1,18 de razón de potencia crítica mínima (MCPR) para el transitorio limitativo); sin embargo, se pueden mantener los límites originales de MCPR para caudal aumentado tomando crédito del hecho de que la velocidad de inserción de barras considerada en los análisis es muy conservadora respecto a la real medida en la planta. De esta forma se pueden emplear límites de MCPR utilizando la opción B de General Electric Co. (referencia 4) si es preciso para la zona de caudal aumentado.

Se han realizado análisis de transitorios en condiciones de baja potencia y

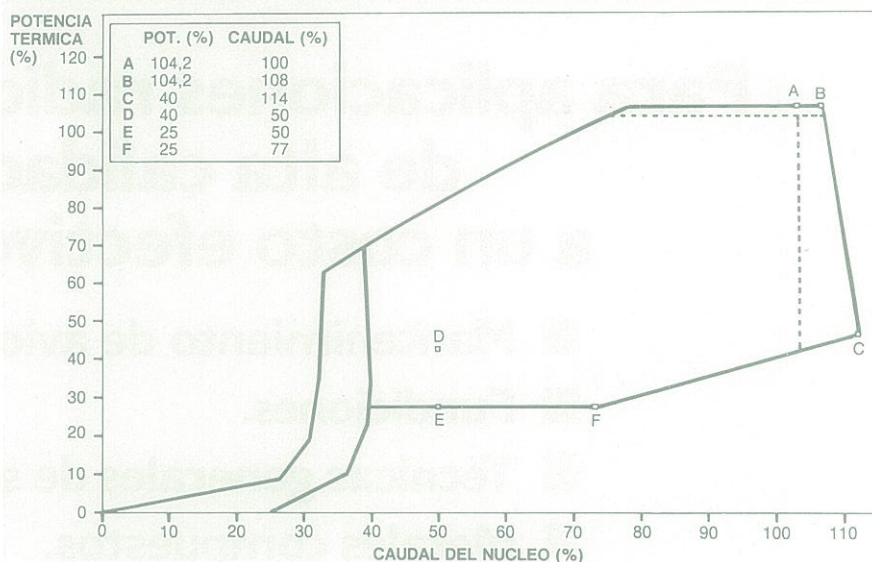
caudal con objeto de verificar los resultados y tendencias de los análisis genéricos, y de generar y actualizar las correcciones a los límites térmicos MCPR y MAPLHGR) nominales cuando se opera en las citadas condiciones. Los análisis de pérdida de refrigerante (LOCA) originales del EFS se realizaron al 104,2 % de potencia térmica y 100 % de caudal, que cubren el 2 % de incremento requerido para la potencia licenciada; sin embargo, al introducir el mapa ampliado de operación es necesario verificar el cumplimiento de los criterios de diseño para las nuevas condiciones. La condición más desfavorable para la temperatura máxima en vainas corresponde a la de menor caudal del núcleo en la línea de barras de máxima potencia, al existir la posibilidad de aparición del fenómeno de "transición temprana de ebullición", originado cuando se pierde la ebullición nucleada en el nodo de mayor potencia antes del descubrimiento de las toberas de las bombas de chorro, en la primera fase del accidente.

Para comprobar el cumplimiento de los criterios de diseño se emplearon resultados de análisis genéricos, verificados por análisis específicos de la CN Cofrentes. Estos últimos fueron realizados para una potencia térmica inicial del 106,3 % con objeto de que sean así mismo aplicables a un futuro incremento de la potencia de operación hasta el 104,2 %.

Se ha revisado también la respuesta de contención para comprobar que su comportamiento ante accidentes, tanto a corto como a largo plazo, cumple con los límites de diseño para las nuevas condiciones de operación. En la respuesta a corto plazo se consideró la condición más desfavorable de rotura de una línea de recirculación en condiciones de máximo subenfriamiento en el "barrilete" de la vasija. Esta condición corresponde al 62 % de potencia, 32 % de caudal con temperatura reducida de agua de alimentación. Para verificar la respuesta a largo plazo de la temperatura máxima en la piscina de supresión ha sido necesario eliminar ciertos conservadurismos simplificados que se habían empleado en los análisis originales del EFS:

- Reducción de la liberación de calor de decaimiento al aplicar el nuevo Standart ANSI/ANS-5.1.
- Consideración de sumideros de calor estructurales.

Todos los análisis de seguridad realizados se han documentado en el apéndice 15c del EFS de Cofrentes (referencia 3), en el que se incluyen también resultados de balances térmicos, evaluación de sistemas, análisis radiológicos y modificaciones en tarados de instrumentos.



F III CN Cofrentes. Condiciones para análisis de transitorios

PRUEBAS

Se programaron dos tipos de pruebas para la verificación del funcionamiento del reactor en las nuevas áreas del Mapa de Operación. El primer tipo corresponde a la estabilidad termohidráulica, comprobando si la respuesta a una perturbación tiene carácter oscilatorio o no. Esta prueba consiste en la introducción de una barra de control una o dos muescas de forma que provoque una variación importante de flujo neutrónico local, medido en el LPRM más próximo. Se registran las respuestas de LPRM y APRM y se verifica que son amortiguadas. Asimismo, se realiza la prueba provocando una perturbación de presión en el reactor. Esta prueba se realiza en condiciones de caudal del núcleo aproximado del 50 % con la máxima potencia permitida, con el mínimo caudal posible para la potencia del 102 % y con el máximo caudal para la potencia del 102 %.

El segundo tipo de pruebas corresponde a tomas de lectura del sistema de recirculación para comprobar su funcionamiento a lo largo de la línea de máxima potencia y en la zona de máximo caudal con máxima potencia. Estas pruebas incluyen también medidas de vibraciones en las tuberías de recirculación.

CONSIDERACIONES FINALES

En el momento de la redacción de este artículo se dispone de resultados pre-

liminares de las pruebas realizadas en la CN Cofrentes, que confirman el buen comportamiento de la planta en las nuevas condiciones del mapa ampliado, habiéndose alcanzado la situación de 102 % de potencia y caudal en el núcleo ligeramente inferior al 105 % con las válvulas de control de caudal de recirculación (FCV) totalmente abiertas, lo que constituye el extremo superior derecho del mapa de operación actual de la central, sin ningún tipo de inconvenientes. Las medidas de vibraciones efectuadas en las tuberías del sistema de recirculación confirman que éstas se mantienen con un gran margen dentro de los valores límites de diseño.

Hidroeléctrica Española, S. A., está analizando la posibilidad de continuar con el Programa de Mejora de la Capacidad del Reactor de la Central Nuclear de Cofrentes, incrementando la potencia hasta el 105 % e incorporando alguna otra de las opciones anteriormente enumeradas.

REFERENCIAS

- (1) Regulatory Guide 1.49, *Power Levels of Nuclear Power Plants*.
- (2) Title 10, Chapter 1, Code of Federal Regulations, Part 50, Appendix K.
- (3) Apéndice 15C del Estudio Final de Seguridad de la Central Nuclear de Cofrentes.
- (4) GESSAR II General Electric Standart Safety Analysis Report.