



Diego MOLINA ORERO es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada (1979). Inició su actividad profesional en la Junta de Energía Nuclear (JEN), de donde pasó al Instituto Tecnológico de Postgraduados (ITP) participando en proyectos de Física de Reactores y Planificación Energética. En 1983 se incorporó al Departamento de Ingeniería y Análisis Nucleares de Hidroeléctrica Española desarrollando funciones de Diseño Nuclear y Gestión del Combustible de C.N. Cofrentes. Desde la formación de Iberdrola en 1992, se responsabilizó del licenciamiento de los códigos y métodos de cálculo nuclear dentro de la Unidad de Gestión de Combustibles. En la actualidad es el Jefe de Combustible Nuclear de Iberdrola.



Fernando SENDINO es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Valladolid. Inició su actividad profesional un año en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valladolid y cinco en la Universidad de Cantabria. Ingresó en Nuclenor a finales de 1974, habiendo participado en las áreas de combustible y licenciamiento, entre las que se incluyen varios cursos en General Electric (San Jose, Ca.) sobre ingeniería nuclear, gestión del núcleo y análisis de transitorios, durante diez meses. Desde 1980 representa a Nuclenor en el BWR Owners' Group americano y desde 1982 ha participado en el Comité de Licenciamiento del Grupo de Propietarios Españoles BWR. Desde 1986 es Jefe del Grupo de Licenciamiento y Combustible en el Área de Ingeniería de Nuclenor.

ESTRATEGIAS DE CICLOS DE OPERACIÓN EN REACTORES BWR

D. MOLINA - F. SENDINO

La longitud del ciclo de operación de un reactor BWR es el resultado de un proceso de optimización de costes compatible con las restricciones técnicas propias del combustible nuclear y de las peculiaridades de producción y demanda del sistema eléctrico en el que dicho reactor está integrado, así como del propio mantenimiento de la instalación.

Sin lugar a dudas la duración de cada etapa del ciclo, incluyendo la operación a plena potencia, la operación en régimen de extensión del ciclo y la parada de recarga, son el reflejo más evidente de la planificación estratégica con la que se ha diseñado la explotación del reactor.

Los métodos analíticos, utilizados para llevar a cabo la gestión del ciclo a corto plazo y planificar la explotación del reactor a medio y largo plazo (hasta alcanzar un hipotético equilibrio), han sufrido una enorme evolución en los últimos años como consecuencia de la complejidad con la que se diseñan los combustibles avanzados actuales, de las prestaciones de cálculo de las nuevas generaciones de ordenadores y de la importancia creciente concedida por los explotadores de los reactores a la optimización de sus costes globales.

De todo ello hablaremos en éste artículo con ejemplos prácticos derivados de nuestra experiencia en reactores BWR: C.N. Cofrentes y C.N. Sta. M^a de Gafnia.

CONSIDERACIONES PARA EL ESTABLECIMIENTO DE LA LONGITUD DEL CICLO DE OPERACIÓN

Los factores a tener en cuenta para establecer la duración óptima del ciclo de operación de un reactor BWR dependen de las características de la empresa eléctrica propietaria y del sistema eléctrico en su conjunto, del reactor (incluyendo la tecnología y el comportamiento del combustible nuclear), y de la evolución económica del suministro de combustible.

La empresa eléctrica encargada de la explotación del reactor establece unos objetivos iniciales de producción de energía basados en sus mejores previsiones del comportamiento de la demanda eléctrica. Del mismo modo, se

seleccionan unos períodos de tiempo en los que resultaría aceptable la parada del reactor para proceder a su recarga, y que típicamente se concentran en los períodos del año de menor demanda eléctrica o de mayor disponibilidad de otras fuentes de energía (caso hidráulico). Finalmente se consideran otros factores como la naturaleza y el estado de las restantes unidades de generación eléctrica del sistema, así como la disponibilidad y coste de la energía de sustitución.

Estos factores propios del sistema eléctrico influyen decisivamente en la ubicación de las paradas de recarga y en el planteamiento de los objetivos de duración de dichas paradas, y son los responsables de que los ciclos de operación sean normalmente de 12, 18 o 24 meses con paradas de recarga en primavera u otoño. Otras longitudes de ciclo provocarían un desplazamiento de la fecha de parada a lo largo del año hasta hacerla coincidir con algún período de alta demanda eléctrica que se pretende evitar.

El reactor y su combustible introducen consideraciones que tienen que ver con las limitaciones de reactividad del núcleo, con la existencia de unos límites térmicos de operación respecto de los cuales se deben conservar ciertos márgenes para garantizar la viabilidad y flexibilidad operativa de los ciclos, y con los propios límites de diseño mecánico de los elementos combustibles.

Estos factores técnicos del reactor se tienen en cuenta a la hora de definir la fracción del núcleo que se recarga en cada ciclo, el enriquecimiento medio de los lotes de combustible, las cantidades necesarias de venenos consumibles y los quemados de descarga de cada lote de combustible.

Finalmente existen consideraciones asociadas a los factores económicos del suministro de combustible: coste del Uranio, evolución y tendencias de los costes de enriquecimiento, conversión y fabricación, duración de cada proceso, calendario de anticipos, garantías y otras cláusulas contractuales, y por supuesto, tasas de interés monetarias. La solución y coste de la segunda parte del ciclo de combustible también está presente como referencia.

Estas últimas consideraciones de factores económicos cierran el proceso de toma de decisiones y permiten fijar los valores óptimos de cada parámetro dentro del margen que las consideraciones de suministro eléctrico y del reactor habían predefinido. Un elemento importante que se deduce de éste bucle de optimización es la cantidad de energía que se debe producir cada ciclo mediante la aplicación de técnicas de extensión mas allá del final de vida a plena potencia.

ETAPAS DEL CICLO DE OPERACIÓN EN UN REACTOR BWR

Podemos considerar el ciclo de operación de un reactor BWR dividido en tres etapas: la de operación a plena potencia, la de extensión una vez extraídas todas las barras de control y, finalmente, la de parada para recargar combustible. La etapa de operación a plena potencia abarca desde el inicio del ciclo hasta que se alcanzan las condiciones nominales de potencia y caudal del núcleo con todas las barras extraídas. Durante ésta etapa el control de la reactividad se realiza mediante el aumento o reducción del caudal del núcleo dentro de los márgenes que permita el dominio de operación (ver figura I) y mediante la inserción o extracción de las barras de control. Al principio del ciclo la reactividad del núcleo aumenta con el quemado como consecuencia de la paulatina desaparición del veneno consumible (Gadolinio) contenido en el combustible fresco y debe contrarrestarse con una mayor inserción de barras de control ó un menor caudal del núcleo. A mitad del ciclo las tendencias se invierten y el núcleo pierde reactividad con el quemado, compensándose con extracciones de barras

de control y aumentos del caudal del núcleo. El final del ciclo a plena potencia se obtiene cuando se han extraído todas las barras de control y el caudal se encuentra al 100%.

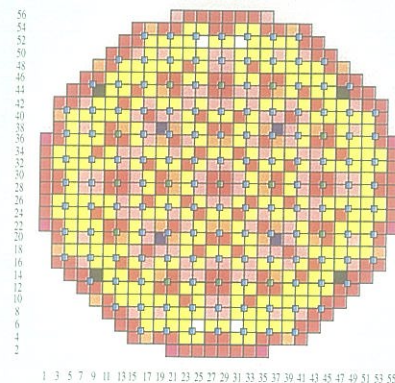
A partir de ése momento es posible continuar produciendo energía, pero los mecanismos existentes para compensar las pérdidas de reactividad debidas al quemado y mantener la criticidad del reactor implican la reducción paulatina de la potencia (térmica y/o eléctrica) por lo que se considera que se trata de una nueva etapa del ciclo denominada genéricamente "extensión del ciclo". El primero y más simple de los mecanismos es el "Coastdown" o pérdida automática de la potencia térmica compatible con la pérdida de reactividad del núcleo. El segundo y más sofisticado es la "Reducción Final de Temperatura del Agua de Alimentación" (FFWTR) que consiste en recuperar la reactividad aumentando el subenfriamiento de entrada al núcleo mediante el baipás de los calentadores del agua de alimentación. Este mecanismo permite mantener la potencia térmica pero provoca pérdidas de rendimiento que disminuyen la potencia eléctrica generada.

Existen otros mecanismos de extensión como el aumento del caudal del núcleo mas allá del 100% de su valor nominal o el aumento de la presión del reactor, que alteran el porcentaje medio de huecos presentes en el moderador y, consecuentemente, introducen mejoras en

la reactividad del núcleo. No obstante, su importancia en la extensión de los ciclos es menor por los estrechos márgenes existentes tanto para aumentar caudal como presión, pero ambos presentan el atractivo de ser compatibles con el mantenimiento de la plena potencia térmica y eléctrica.

El ciclo completo de operación finalizaría con la parada del reactor para llevar a cabo las actividades de recarga del combustible y

PISCIS
SM02
UITESA
RESULT
NULL
SHUFFLE
9 8
10 188
11 36
12 4
13 100
14 276
15 4
16 4



K-eff
percp
percw
Subcol
Hinlet
Tinlet
DomeP
CexitPr
Cycbur
Avebur
AVERA
DISTR

F II

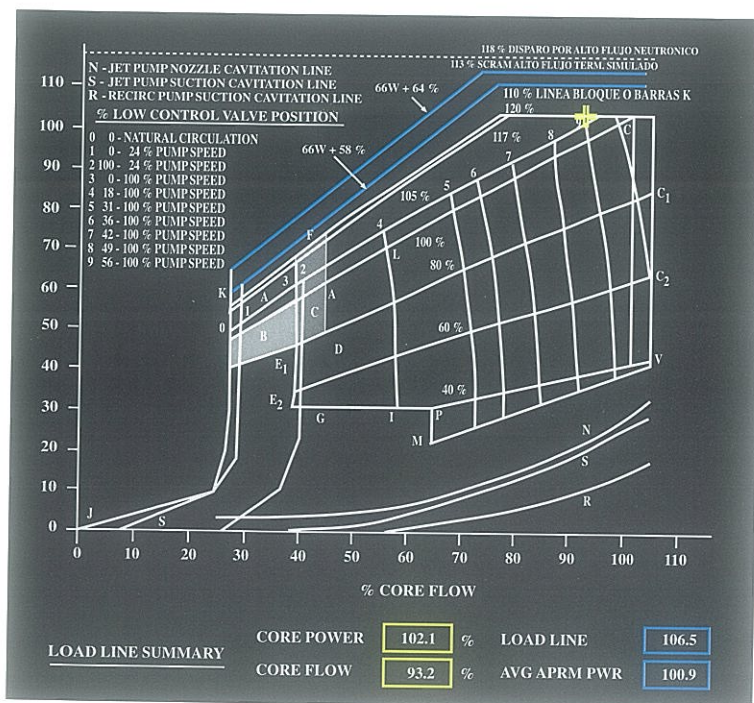
mantenimiento. Normalmente, son las segundas las que determinan la duración total de la parada.

MÉTODOS ANALÍTICOS APLICABLES AL CICLO DE OPERACIÓN

La selección y planificación del esquema de ciclos para un reactor BWR se realizaba inicialmente con modelos muy sencillos de reactividad lineal y suponiendo ciclos de equilibrio. Posteriormente, se realizaba un estudio detallado de los ciclos más próximos al de operación con modelos de simulación del núcleo, quemando sin barras de control, y manteniendo unas distribuciones de potencia y quemado constantes a lo largo del ciclo y que respondían al denominado "Principio de Haling". Finalmente el ciclo próximo se analizaba con modelos tridimensionales del núcleo detallados y quemando con los modelos de barras de control previstos.

La evolución de los diseños avanzados de combustible BWR incorporando zonas axiales de distinto enriquecimiento, de distinta concentración de Gadolinio e incluso de diferente número de varillas ha introducido también cambios profundos en los métodos de análisis y decisión del ciclo de operación, pues los resultados de los modelos de reactividad lineal son ahora poco representativos del comportamiento real del núcleo, los ciclos de equilibrio se han demostrado en buena medida inalcanzables y las evaluaciones de viabilidad basadas en modelos simplificados sin barras de control no garantizan la viabilidad real de operar el ciclo en cuestión dentro de los límites establecidos en las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento. Por el contrario se impone la aplicación de métodos avanzados y detallados también para aplicaciones multiciclos, en primer lugar por razones de fiabilidad de los resultados y

F I - Gráfico Potencia-Caudal



en segundo lugar porque la generación actual de ordenadores y estaciones de trabajo así lo permiten (Ver figura II).

EL CICLO DE OPERACIÓN DE C.N. COFRENTES

C.N. Cofrentes se encuentra finalizando su noveno ciclo de operación. Comenzó su explotación con ciclos anuales y actualmente opera en ciclos de 18 meses. La transición de un modelo a otro se llevó a cabo mediante dos ciclos consecutivos (el 5º y 6º) de 15 meses de duración. La evolución de los ciclos de operación de C.N. Cofrentes ha discurrido en paralelo a la de los diseños de combustible General Electric: Los ciclos anuales se alcanzaban con recargas de un 31% del total de elementos del núcleo, del tipo GE-7 (con 8x8 varillas), con un enriquecimiento medio entre el 2.63 w/o y el 2.84 w/o. La transición se llevó a cabo gracias a la aparición del diseño GE-10, que aunque mantenía la estructura de 8x8 varillas introducía notables mejoras de moderación con su barra de agua central y una mayor economía neutrónica al variar axialmente sus enriquecimientos y concentraciones de Gadolinio. El ciclo de 15 meses requería la renovación del 36% del núcleo en cada recarga empleando enriquecimientos medios del 3.25 w/o. Con la aparición en el mercado del combustible GE-11 (un combustible avanzado de 9x9 varillas) la C.N. Cofrentes se situó definitivamente en los ciclos de 18 meses volviendo a la situación inicial de renovación del 31% del núcleo pero ahora con un enriquecimiento medio del 3.63 w/o.

Consecuente con la estrategia de los ciclos de operación ha sido el comportamiento de los quemados de descarga de los lotes de combustible. Así los lotes de combustible GE-7 empleados para la consecución de los ciclos anuales se descargaron con unos quemados medios de 30000 MWD/TMU mientras que los actuales lotes de GE-11 tienen prevista una descarga de 45000 MWD/TMU.

La estructura del ciclo de operación actual de C.N. Cofrentes consiste, a grandes rasgos, en un período de 14 meses de producción al 102% de la potencia térmica nominal ("power uprate") logrado a comienzos del ciclo 4º) manteniendo el caudal del núcleo en el entorno del 80% de su valor nominal y controlando las variaciones de reactividad del núcleo mediante la inserción o extracción de las barras de control. Una vez que éstas han quedado totalmente extraídas se procede a aumentar el caudal del núcleo hasta más allá de su valor nominal (típicamente hasta el 104%) manteniendo en todo momento el 102% de potencia, y ésto proporciona 30 días de operación. El ciclo finaliza su producción con 60 días de alternancia de etapas de "Coastdown" con etapas de "Reducción de la temperatura del agua de alimentación". La situación finalmente alcanzada consiste en una potencia térmica del

90% y una eléctrica del 86%, siendo la pérdida de rendimiento consecuencia del enfriamiento del agua de alimentación en casi 100 °F.

Finalmente, el ciclo se completa con el período de parada de recarga que se programa a partir de la próxima en recargas cortas de 20 días de duración alternándose con recargas más largas (de 40 días), ofreciendo un objetivo medio de 20 días de parada por cada año de producción.

La C.N. Cofrentes dispone de una serie de flexibilidades de operación licenciadas para su aplicación en el ciclo. Las más apreciadas desde el punto de vista de la producción energética son el "power uprate" al 102% (y que en breve se ampliará al 105%), la extensión del mapa de operación a plena carga desde caudales del núcleo reducidos (80%) hasta caudales superiores al nominal (105%) y la reducción final de la temperatura del agua de alimentación. Otras opciones disponibles y de gran utilidad en caso de contingencias son la operación con un solo lazo de recirculación y la operación con temperatura reducida antes del final del ciclo.

EL CICLO DE OPERACIÓN DE C.N. GAROÑA

C.N. Santa María de Garoña opera desde 1990 en ciclos de operación de veinticuatro meses de longitud, habiendo operado con anterioridad en ciclos de dieciocho meses (desde 1982). Los factores de utilización logrados por la central han mejorado sensiblemente desde que se opera en ciclos de longitud superior al año, destacando el logro durante el año 1995, del 99,01 %, año en el que no hubo parada para recarga.

La sensible mejora lograda en la organización de los trabajos de inspección y mantenimiento - a pesar de los numerosos cambios de diseño acometidos en la recarga - está contribuyendo de modo importante a esta mejora en los resultados de explotación de la central.

Los parámetros típicos que vienen definiendo el diseño de la central, para los indicados ciclos de 24 meses, son de unos 831.500 MWD, usando inicialmente en el ciclo la estrategia de "spectral shift" (uso de un espectro neutrónico más duro, lo que contribuye a añadir más reactividad por fisiones del Pu-240) y que se corresponde con un caudal a través del núcleo del orden del 90 %. A ese quemado hay que añadirle unos 8.000 MWD al operar con caudal aumentado a través del núcleo (Increased Core Flow), lo que supone extender la operación de la central a plena potencia, aproximadamente una semana adicional. El caudal máximo que se puede lograr es del 105 %.

Una vez llegados al punto (100, 105), en el que todas las barras de control están totalmente extraídas y se ha agotado la posibilidad de aumentar el caudal, se sigue operando la central en la modalidad de "coastdown", en la que los puntos de

operación corresponden a valores decrecientes de la potencia térmica, a un ritmo de algo más de 0,3 %/día. En este modo de operación se suelen diseñar los últimos ciclos de 24 meses con una energía adicional a obtener de más de 52.000 MWD.

El combustible que se viene usando en C.N. Santa María de Garoña es el modelo GE8 desde 1990 y el GE11 desde 1994. Con este último, de cuyo modelo también se ha diseñado la actual recarga 18, se cargan alternativamente 108/112 elementos combustibles. En cuanto al enriquecimiento medio de la recarga está siendo del 3,83 % (tipo GE11).

El mapa de operación (ver figura I) incluye algunas de las modalidades antes indicadas, tales como la operación por debajo de las condiciones nominales de potencia térmica y caudal a través del núcleo, la zona de caudal aumentado a través del núcleo (Increased Core Flow). Por encima de la línea de barras de control del 100 % (aquella que contiene la sucesión de puntos que permiten alcanzar las condiciones nominales de operación (100 % de potencia térmica y 100 % de caudal total del núcleo) se puede operar en la zona extendida de carga (Extended Load Line), que permite, como se ha indicado más arriba, la operación con "spectral shift".

Sta. Mª de Garoña tiene licenciado desde hace varios años una estrecha franja que corresponde a la operación con una sola bomba de recirculación (Single Loop Operation), en caso de presentarse averías o problemas en un lazo de recirculación que obligaran a operar con un solo lazo de recirculación. En la zona de bajos caudales existe una zona en la que se imponen limitaciones operativas para evitar la inestabilidad termohidráulica, fenómeno que se presenta en los reactores BWR en determinadas condiciones de bajo caudal y con ciertos diseños de combustible y/o del núcleo.

En concreto, la zona comprendida entre el modelo de barras de control del 100 % y la línea de bloqueo de barras de control (que pasa por el punto (100, 108) y correspondiente a caudales del núcleo menores del 40 %, es la Región de Scram, donde si se entra por cualquier motivo se ha de realizar el disparo manual del reactor. Rodeando a esta zona (ver figura), existe la Región de Salida, que corresponde a puntos comprendidos entre las líneas del modelo de barras de control del 80 y del 100 % (con caudales del núcleo inferiores al 40 %) y a caudales del núcleo comprendidos entre el 40 y 45 % y por encima de la línea de barras del 80 %.

Ultimamente se ha añadido una tercera zona, conocida como Región de Entrada Controlada, comprendida entre las líneas del modelo de barras de control del 70 y del 80 % y para caudales totales del núcleo inferiores al 40 %. Para entrar voluntariamente en esta zona se ha de verificar el cumplimiento de condiciones indicadoras de que no se está cerca de la inestabilidad.