



Diego MOLINA ORERO es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad de Granada (1979). Inició su actividad profesional en el Instituto Tecnológico para Posgraduados (ITP) donde participó en distintos proyectos dentro del campo de la Física de Reactores y Planificación Energética. Desde 1983 trabaja en Hidroeléctrica Española en aspectos relacionados con el Diseño Nuclear y la Gestión de Combustible de C. N. Cofrentes, dentro del Departamento de Ingeniería y Análisis Nucleares. Es miembro de la Sociedad Nuclear Española desde 1981.



Jesús OLMOS CLAVIJO es Ingeniero Industrial, especialidad Técnicas Energéticas, por la ETSIM (1984). Inició la actividad profesional en el Instituto de Fusión Nuclear de la UPM como investigador en Física de Reactores y Desarrollo de modelos nucleares para centrales PWR. En 1986 ingresó en el Departamento de Ingeniería y Análisis Nucleares de Hidroeléctrica Española trabajando en la actualidad en el área de análisis del núcleo para centrales PWR participadas y formando parte del grupo de Gestión del combustible de CN Cofrentes.

REACTOR BWR

OPTIMIZACION DE LA EXTENSION DEL CICLO DE OPERACION

D. MOLINA - J. OLMOS

INTRODUCCION Y OBJETIVOS

El final de vida de un ciclo de operación en un reactor de agua en ebullición se alcanza al llegar a la situación de todas las barras de control extraídas del núcleo para condiciones nominales de potencia y caudal.

Alcanzado éste existen mecanismos de extensión que nos permiten obtener una mayor longitud del ciclo añadiendo reactividad al núcleo.

Desde el punto de vista de la gestión del combustible, la extensión del ciclo presenta la ventaja del aprovechamiento de una energía adicional correspondiente a los elementos combustibles que han de ser descargados al final del ciclo.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que algunos mecanismos de extensión del ciclo requieren una operación a potencia eléctrica inferior a la nominal lo que se traduce en una pérdida de producción que hay que sustituir. El coste de la energía de sustitución será, por tanto, un parámetro clave en la decisión de extender o no el ciclo y en qué cuantía hacerlo.

En este trabajo se describe un modelo que ayuda a obtener el valor óptimo de la energía a producir por extensión del ciclo mediante un balance entre el beneficio por ahorro de combustible y las variaciones en el coste de la energía de sustitución.

MECANISMOS DE EXTENSION

Los mecanismos de extensión del ciclo habituales en un reactor de agua en ebullición son los siguientes:

- Desplazamiento espectral: Consiste en favorecer la producción de Plutonio durante la etapa inicial del ciclo por endurecimiento del espectro neutrónico. Este desplazamiento hacia energías más rápidas se puede provocar reduciendo el caudal del núcleo o desplazando la distribución axial de potencia hacia los primeros nodos del núcleo. En ambos casos se tendrá un mayor contenido en huecos en la parte superior del núcleo lo que conducirá a un espectro más duro y a la consiguiente generación de plu-

tonio que se quemará en las etapas finales del ciclo prolongando la vida de éste.

- Aumento del caudal del núcleo: Incrementa la reactividad del núcleo al reducir el contenido de huecos. Suele utilizarse en combinación con el mecanismo de desplazamiento espectral.
- Incremento de presión: Actúa también reduciendo el contenido de huecos.
- Reducción de la temperatura del agua de alimentación: Al igual que el mecanismo anterior aumenta la reactividad del núcleo por disminución del contenido de huecos. La potencia térmica del núcleo permanece en el valor nominal reduciéndose el rendimiento del ciclo termodinámico por lo que la potencia eléctrica producida disminuye con la extensión.
- Reducción de potencia: En este caso, el aumento de reactividad del núcleo es aportado por el coeficiente de potencia. Tanto la potencia térmica como la eléctrica disminuyen durante la extensión.

De los cinco mecanismos considerados, los tres primeros no afectan a la potencia eléctrica de la central que permanece en su valor nominal siendo, por tanto, siempre recomendables desde el punto de vista de la energía del ciclo.

Tanto la reducción final de temperatura del agua de alimentación como la reducción final de potencia térmica afectan a la producción de energía eléctrica de la central debiéndose evaluar las ventajas e inconvenientes de su aplicación.

MODELO DE OPTIMIZACION

Siguiendo la secuencia lógica de aplicación se supone en este modelo una extensión diferenciada en dos fases consecutivas: la primera mediante reducción de temperatura de agua de alimentación (FFWTR), y la segunda mediante reducción de potencia (Coast-down).

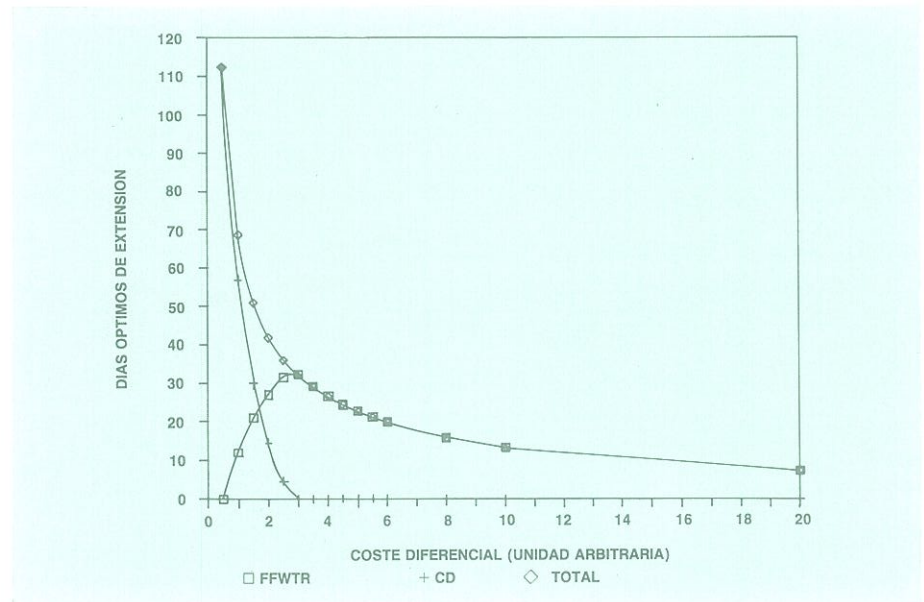
Durante el FFWTR se supone una potencia térmica constante y de valor igual al nominal, mientras la eléctrica decae de forma acelerada según una ley ($\alpha + \beta t$).

Si la duración del FFWTR es de " d_i " días, la energía eléctrica producida en este periodo será:

$$E_e(d_i) = \int_0^{d_i} P(t) dt =$$

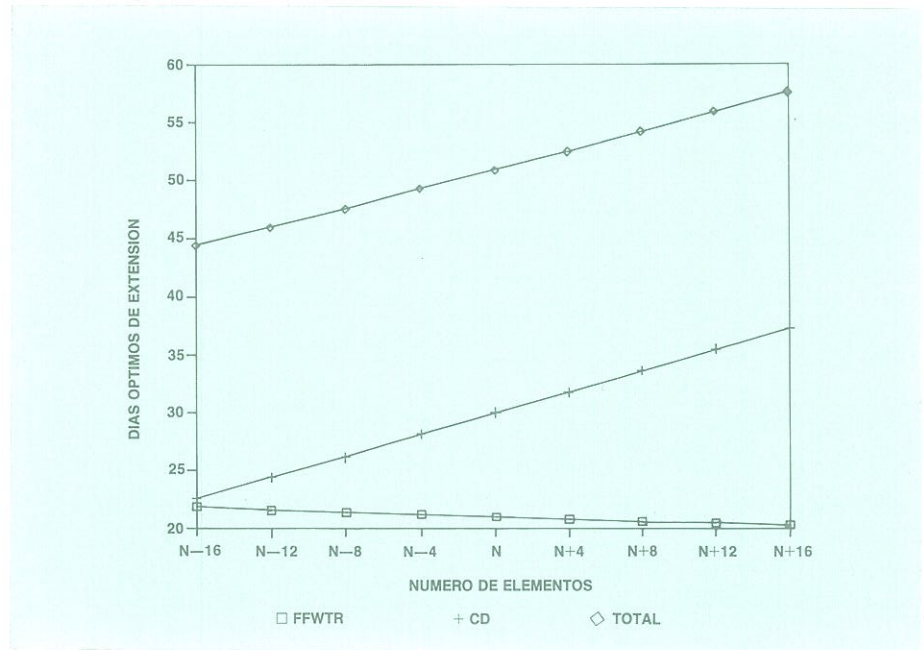
$$= P_o \left[d_i - \frac{\alpha}{200} d_i^2 - \frac{\beta}{300} d_i^3 \right]$$

donde P_o es la potencia eléctrica inicial (nominal).



F I Extensión de ciclos (sensibilidad al coste energía de sustitución).

F II Extensión de ciclos (sensibilidad a la fracción de recarga).



La energía térmica producida de forma útil, es decir, aquella que de no haberse aplicado FFWTR hubiese sido necesario producir para generar la misma cantidad de energía eléctrica es:

$$E_{T_{\text{útil}}}(d_i) =$$

$$= P_{T_o} \left[d_i - \frac{\alpha}{200} d_i^2 - \frac{\beta}{300} d_i^3 \right]$$

En realidad, la energía térmica producida ha sido igual al producto de la potencia térmica nominal (P_{T_o}) por los días de FFWTR (d_i), pero al haber estado produ-

ciendo en condiciones de rendimiento inferior al teórico ha sido necesario quemar el núcleo más que en condiciones normales para producir una misma cantidad de energía eléctrica. La cantidad extra de energía térmica que se ha infrutilizado será la diferencia entre la total producida y la "útil" definida anteriormente, es decir:

$$E_{T_{\text{infr}}} (d_i) = P_{T_o} * d_i - E_{T_{\text{útil}}} (d_i)$$

El beneficio que supone la aplicación del FFWTR radica en la energía extra que se obtiene de aquellos elementos combustibles que van a ser descargados,

pues los que permanecen en el núcleo al ciclo siguiente están simplemente anticipando su producción. Cuantitativamente:

$$E_{\text{Extra}}(df) = E_{\text{Util}}(df) * f * r$$

siendo f la fracción de recarga y r el factor de potencia relativa de los elementos a descargar.

Por el contrario se incurre en pérdidas por dos conceptos: en primer lugar por la fracción de la energía térmica infrautilizada que se extrae de los elementos que van a permanecer en el núcleo y en segundo lugar por los costes de la energía de sustitución necesaria para reponer la energía eléctrica no producida.

Si a los beneficios evaluados anteriormente le descontamos los dos conceptos de pérdidas obtendremos la función económica a maximizar en función de los días de aplicación de FFWTR.

El siguiente paso en la definición del modelo de optimización es la aplicación del Coastdown tras haberse agotado la fase de FFWTR.

El Coastdown presenta como condiciones iniciales las que se dieron al final del FFWTR, es decir, potencia térmica nominal y potencia eléctrica:

$$P_i = P_o \left(1 - \frac{\alpha}{100} d_i - \frac{\beta}{100} d_i^2 \right)$$

Desde esas condiciones iniciales se supone que el Coastdown evoluciona con unas pérdidas diarias del porcentaje de la potencia nominal de valor Y , constante e igual en pendiente térmica y eléctrica. Por tanto, las energías térmicas y eléctricas producidas se obtienen inte-

grando la potencia entre 0 y d_c , es decir,

$$E_T(d_c) = P_{T_o} \left(d_c - \frac{Y}{200} d_c^2 \right)$$

$$E(d_c) = P_o \left(1 - \frac{\alpha}{100} df - \frac{\beta}{100} d_i^2 \right) d_c - P_o \frac{Y}{200} d_c^2$$

Debido a que la aplicación previa del FFWTR provoca el mantenimiento de un deterioro en el rendimiento de la unidad, es necesario mantener los conceptos de energía térmica útil e infrautilizada para formular el modelo de Coastdown.

Al igual que antes, los beneficios se derivan de la fracción de la energía térmica útil que ha sido obtenida a partir de los elementos que van a ser descargados, mientras que las pérdidas se valoran a través de la energía térmica infrautilizada correspondiente a los elementos que permanecen en el núcleo y, por supuesto, la energía eléctrica de sustitución.

Restando las pérdidas de los beneficios se obtiene la función a maximizar para el Coastdown.

Acumulando finalmente las ecuaciones de optimización del FFWTR y Coastdown se obtiene la ecuación a maximizar en función de los días de aplicación del FFWTR (d_i) y Coastdown (d_c).

APLICACION DEL MODELO. CONCLUSIONES

El modelo matemático descrito en el

capítulo anterior ha sido programado y aplicado a un caso típico de reactor de agua en ebullición.

Se han analizado dos casos básicos para ciclos de equilibrio de 12 y 18 meses. A continuación se han perturbado aisladamente cada uno de los parámetros de entrada para observar la sensibilidad de los días óptimos de extensión del ciclo.

El conjunto de parámetros a perturbar es el siguiente:

- Coste diferencial energía sustitución (Ptas/kWh).
- Fracción de recarga.
- Factor de pico potencia elem. descargar.
- Pendiente de Coastdown (%/día).

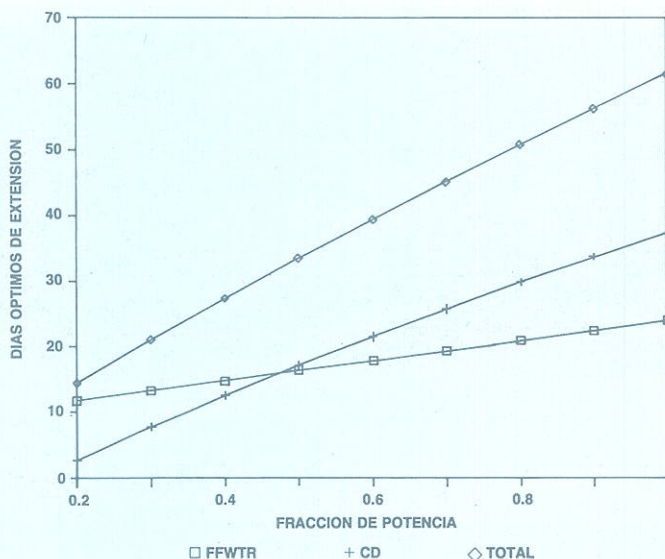
Obteniéndose los resultados que aparecen en las figuras I a IV y que conducen a las siguientes conclusiones.

Los días de FFWTR tienen siempre un valor de saturación dado el carácter de "aceleración" que implica la pérdida de rendimiento. En primera aproximación el FFWTR debe detenerse, y, por tanto, iniciarse el CD cuando la pendiente de pérdida de potencia eléctrica se iguala con la pendiente del CD. Esta circunstancia ocurre en torno a los 30 d de iniciarse la extensión, y, por tanto, las extensiones prolongadas siempre tendrán lugar favoreciendo el empleo de CD.

A su vez, aquellas situaciones que favorecen largos CD tienen un efecto de realimentación sobre el FFWTR con tendencia a reducir su duración, con el objetivo de favorecer que el largo período de CD tenga lugar con un mejor rendimiento.

Los costes de producción debidos al ciclo de combustible constituyen una de las bases importantes de cuantificación de los beneficios de la extensión, observándose una tendencia a favorecer su duración a medida que éstos aumentan. Ello es debido a que una producción extra de energía durante la extensión representa más beneficios cuanto más cara resulte producirla en condiciones normales de operación. No obstante, y dado que también participa como contrapartida lo que hemos dado en llamar la "energía infrautilizada", el ritmo de incremento de los días óptimos de extensión crece con los costes de producción, pero de una forma más suave.

El efecto de los costes de producción sobre la extensión es siempre el mismo independientemente de la causa que origine el aumento o disminución de costes, como puede ser la variación del precio de un elemento combustible, la variación del número de elementos a cargar (fracción de recarga), la variación en la energía producible del ciclo por efecto del diseño del núcleo o del propio



F III Extensión de ciclos (sensibilidad a la fracción de potencia del elemento de descarga).

elemento y las estrategias de gestión y operación aplicadas en el ciclo.

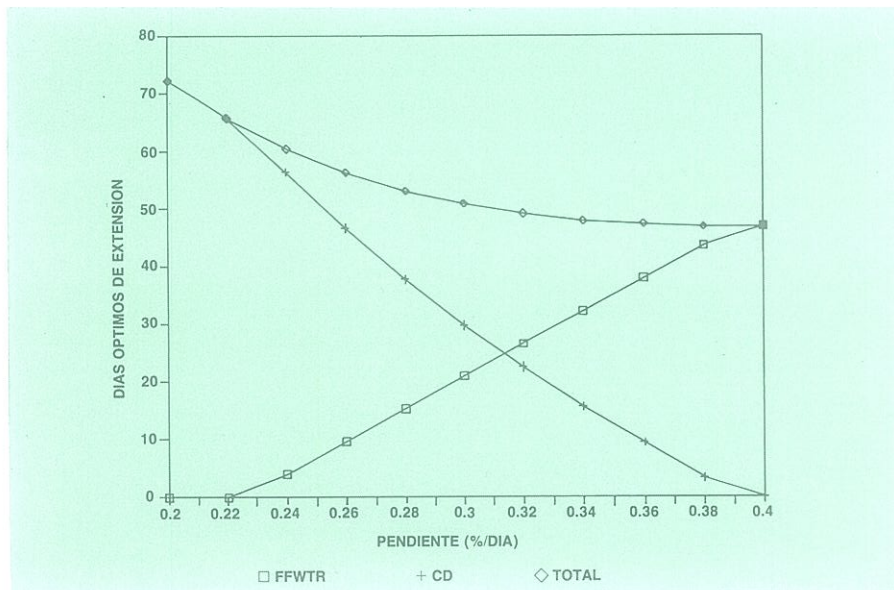
En principio, y suponiendo que se puedan conseguir ciclos de distinta longitud que mantengan unos mismos costes de producción (por unidad de energía producida), la longitud óptima de extensión es independiente de la propia longitud del ciclo.

La duración óptima de la extensión y el coste diferencial de sustitución son variables acopladas. El incremento de energía extraída a un ciclo hace que el coste del kwh disminuya aumentando el coste diferencial de la energía de sustitución y disminuyendo, por tanto, la extensión óptima a realizar.

Solamente en caso de unos costes de energía de sustitución muy bajos, la extensión debe ser prolongada.

Otro factor con efecto importante sobre la extensión es el nivel de potencia al que operan los elementos combustibles que van a ser descargados. Cuanto más bajo sea éste, menos fracción de la energía que se va a producir en la extensión es realmente extra y no un simple anticipo de la producible en el ciclo siguiente. Por tanto, cuanto menor sea el nivel de potencia de los elementos a descargar menos interés ofrece la extensión del ciclo.

Un punto crítico en la elección del



F IV Extensión de ciclos (sensibilidad a la pendiente del Coastdown).

número de días de extensión y el mecanismo a aplicar es la pendiente de pérdida de potencia del Coastdown. Cuanto más lento evolucione el Coast-

down más se favorece su aplicación en detrimento del FFWTR y viceversa. La suma total de días de extensión disminuye con la pendiente del Coastdown.