SEGUIMIENTO DE LA REACTIVIDAD DURANTE LOS ARRANQUES EN COFRENTES

YOLANDA TOFIÑO GÓMEZ
Técnico de Combustible
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR SAU

JUAN JOSÉ MOLINA HERNÁNDEZ
Jefe de Ingeniería Nuclear
Central Nuclear de Cofrentes
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR SAU

JOSE MANUEL DEY NAVARRO
Responsable de Análisis Neutrónicos
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR SAU

INTRODUCCIÓN

El proceso de arranque de un reactor nuclear es una tarea compleja que requiere de habilidad por parte del operador y de una instrumentación precisa que sea capaz de controlar la subida de potencia durante todo el proceso.

La central nuclear de Cofrentes dispone de un sistema on-line de monitorización propio, que además de servir para vigilar la operación del núcleo, permite hacer predicciones de cualquier maniobra que se quiera realizar, incluido el proceso de arranque.

Tener predicciones de las maniobras planificadas, permite al operador actuar con mayor seguridad y reducir la improvisación y con ello la probabilidad del error humano. Para que una predicción sea útil, es necesario que los datos de partida sean de calidad y la información obtenida pueda procesarse de manera adecuada con el fin de potenciar los resultados de las predicciones simuladas.

VARIABLES O CONDICIONES QUE INFLUYEN EN LOS ARRANQUES

Que la predicción de un arranque sea lo más aproximada a la realidad depende de las condiciones de contorno que sean utilizadas para su evaluación. Las variables o las condiciones que se deben conocer de la planta para poder reproducir un arranque son las siguientes:

Temperatura del moderador

La temperatura del moderador o agua de alimentación determina como se va a moderar los neutrones. Cuanto menor sea la temperatura más se moderan los neutrones (reducen su velocidad y por tanto su energía) y pueden ser capturados de forma más efectiva por el combustible para producir nuevas fisiones aumentando con ello la reactividad.

Los neutrones que se liberan en las fisiones, si no se frenan tienen muy baja probabilidad de fisionar un núcleo U-238. Algunos son capturados por el U-238 (q no fisiona) y la ma-

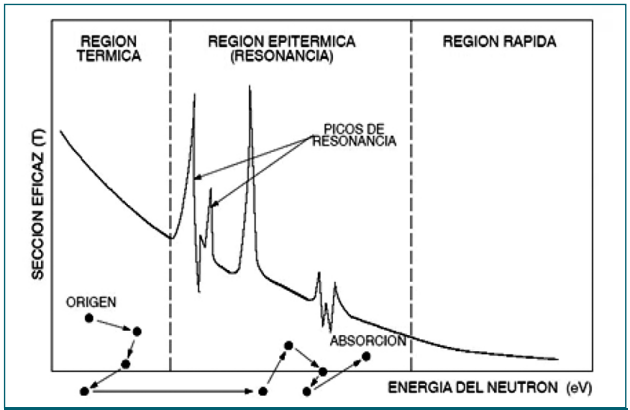

Figura 1. Sección eficaz versus energía de un neutrón.

yor parte escapan del núcleo o son absorbidos por las barras de control.

Xenón

El xenón es un veneno neutrónico o absorbente de neutrones, que impide que se produzcan reacciones nucleares y, por tanto, no deja crecer la reactividad. En operación a potencia constante alcanza una concentración de equilibrio. Después de la parada, al cesar la conversión en Xe-136 por absorción neutrónica, aumenta la concentración de Xe-135 en virtud de la desintegración del I-135 acumulado, hasta alcanzar un valor máximo (pico de xenon) al cabo de 10 o 15 horas. Pasado este tiempo la concentración de I-135 se va agotando por decaimiento. La generación de Xe-135 por decaimiento del I-135 no consigue equilibrar la pérdida de Xe-135 haciendo que la concentración de Xe-135 vaya disminuyendo de forma gradual.

Reactividad (K)

La reactividad es el cambio fraccional de la cantidad de neutrones por cada generación de reacciones de fisión. Es una forma de medir si está aumentando el número de neutrones (reactividad positiva) o si está disminuyendo (reactividad negativa).

Controlar reactividad significa controlar la cantidad de neutrones en el reactor y esto se hace insertando o extrayendo las barras de control.

Barras de control

Las barras de control contienen un veneno neutrónico (boro) y cuando se produce la extracción de barras según la secuencia decidida, se extrae dicho veneno de forma ordenada y se producen inserciones de reactividad positiva. Estas inserciones de reactividad definen el autovalor o k-efectiva.

Secuencia de barras de control

La central nuclear de Cofrentes usa una Configuración Convencional de Barras de Control. Las barras de control están agrupadas en Secuencia A1, A2, B1 y B2 [2] usando todas ellas durante el ciclo con el fin de quemar el núcleo de la manera más simétrica posible.

Criticidad

Término utilizado en física del reactor para describir la condición existente cuando el número de neutrones producidos por la fisión coincide con el número de neutrones absorbidos (por materiales fisiles o no fisiles) y fugados del reactor. Un reactor es, por tanto, crítico cuando se establece en él una reacción nuclear en cadena autosostenida (constante de multiplicación neutrónica K igual a 1). En un reactor crítico la población neutrónica permanece constante, su cantidad en el núcleo es estable.

Arranque

La principal característica del arranque de un reactor nuclear es que debemos añadir grandes cantidades de reactividad positiva o, dicho de otra forma, extraer grandes cantidades de reactividad negativa (absorbentes neutrónicos para conseguir que el reactor sea crítico). Por lo tanto, para insertar reactividad positiva se retira veneno neutrónico o lo que es lo mismo se extraen barras desde su posición completamente insertadas.

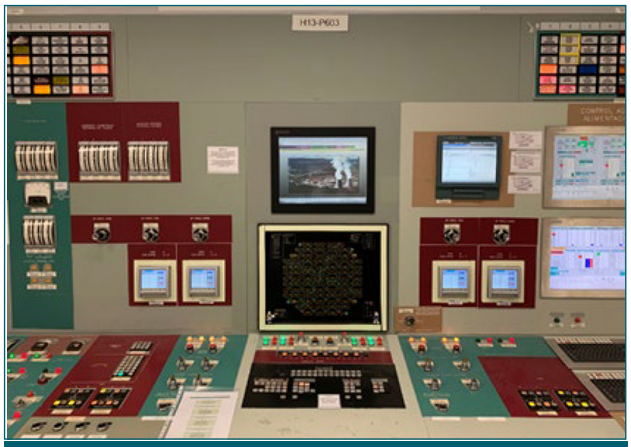

Figura 2. Consola de control de C.N. Cofrentes.

Instrumentación

Para arrancar el reactor, el operador deberá tomar varias precauciones y disponer de instrumentos bien calibrados que midan el flujo neutrónico, la temperatura media del primario, la presión del primario,…entre otros.

Periodo

Tiempo que tardan los neutrones en doblar su población.

IRMS

Vigila los niveles de flujo neutrónico entre los intervalos de fuente y de potencia, durante el arranque y parada del reactor (calentamiento).

Los IRM, constan de ocho canales de instrumentación que están distribuidos en dos grupos de cuatro (A/C/E/G y B/D/F/H) asignados a los dos sistemas de disparo (A y B) del sistema de protección del reactor.

Para hacer un seguimiento del flujo neutrónico/potencia en el rango de vigilancia de los IRMs, se divide en 10 rangos del 1 al 10, pasando del 1 al inmediatamente superior conforme aumenta el flujo neutrónico/potencia para mantener dentro de la escala del registrador la señal de salida del canal asociado de IRM, durante las variaciones de potencia del reactor. Esto se realiza mediante ocho conmutadores de rango.

PREDICCIÓN DE CRITICIDAD PARA EL ARRANQUE

Una vez definidas y conocidas las condiciones a las que se va a producir el arranque y previo a iniciar la extracción de las barras de control, el operador de reactor recibe del Departamento de Ingeniería Nuclear (INNU) la posición de barras de control con la que se prevé el reactor se haga crítico (PEC), el rango de criticidad esperado (ERC) y el punto de mantenimiento de sub-criticidad (SHC) [4].

El PEC es elaborado por la Unidad de Ingeniería Nuclear de la central nuclear de Cofrentes (INNU) junto con el apoyo técnico de la unidad de Combustible Nuclear (CONUC). Para calcular la posición de barras de control con la que se prevé se haga el reactor crítico, se realiza una o varias simulaciones basadas en hipótesis en las que se va a producir el arranque. En base a estas hipótesis, se determina el modelo de barras de control que corresponda al valor de K efectiva igual o inmediatamente superior a la K efectiva esperada de

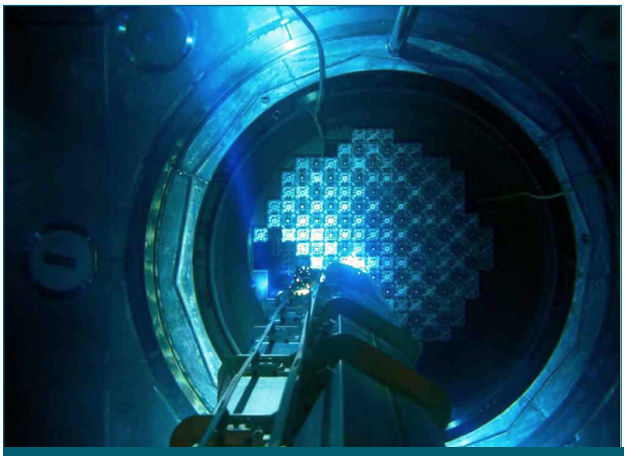

Figura 3. Recarga de combustible en C.N. Cofrentes.

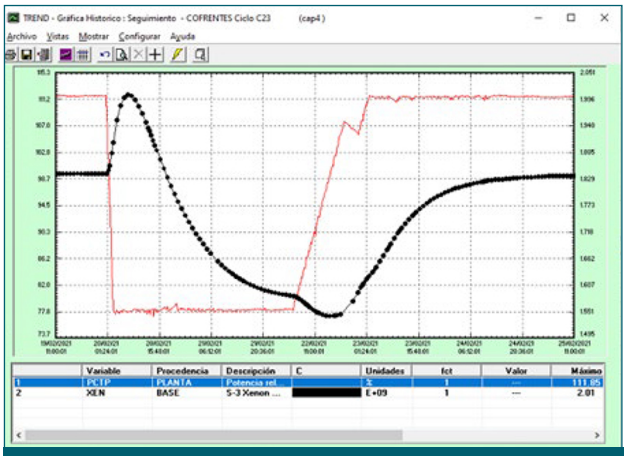

Figura 4. Transitorio de xenón durante una parada [5].

criticidad. Se indica grupo, banco, barra y muesca en la que se prevé se alcance la criticidad.

La carga nuclear de un reactor nuclear se diseña de manera que pueda operarse todo un ciclo (24 meses en el caso de CN Cofrentes) sin parar, teniéndose que arrancar únicamente tras la finalización de la Recarga de combustible. En ocasiones, durante la operación del ciclo, se producen paradas no programadas que requieren de predicciones más complejas donde hay que considerar la incertidumbre de las condiciones en las que se producirá el arranque y teniendo en cuenta el posible transitorio de xenón.

Para realizar una predicción de criticidad, partiendo de unas condiciones frías o calientes, se comienza a extraer barras de control siguiendo una secuencia de barras de control. Si el arranque es después de una recarga el arranque se suele realizar con barras en secuencia A2. Si el arranque se produce después de una parada con el ciclo en operación, normalmente el arranque se realiza con la misma secuencia de operación previa a la parada, pero si está cerca un cambio de secuencia puede interesar realizar un cambio de secuencia con el fin de reducir indisponibilidades.

Durante el tiempo que pasa, desde que se produce la parada hasta que se alcanza el pico de Xe-135, se inyecta reactividad negativa al sistema por lo que la reactividad del núcleo es menor y la criticidad podría suceder en posiciones de barras de control posteriores. Una vez superado el pico de Xe-135 (entre 7 y 10 horas dependiendo de la potencia previa a la parada) su disminución inyecta reactividad positiva al sistema y la criticidad podría suceder en posiciones previas. Por lo tanto, si el arranque se produce antes de los 4-5 días tras la parada (antes de que el núcleo alcance un nuevo equilibrio) hay que considerar estas dos fases de la evolución del transitorios del xenón. Por ello, es importante conocer el momento del ciclo para determinar la concentración de xenón y su impacto global en la reactividad y tenerlo en cuenta en la simulación.

Se dispone de una estadística de K críticas o autovalores de referencia basada en las criticidades en frio reales de arranques previos cuyo promedio es usado para el diseño del ciclo siguiente (dentro de una incertidumbre). Esta K crítica será la K esperada para un arranque que suceda en condiciones similares, condiciones frías a principio de ciclo después de la recarga. Cuando los arranques se producen en otro momento del ciclo y/o en condiciones diferentes no se puede usar como K crítica o esperada el promedio con las criticidades a BOC y es necesario estimar la K introduciendo correcciones debidas al quemado del núcleo en el momento de la parada.

En la predicción de criticidad, se van extrayendo barras de control y calculando la reactividad acumulada (autovalor o k efectiva) que es comparada con la K crítica o K esperada donde se espera que el núcleo sea crítico. Una vez sea alcanzada esta será la posición estimada de criticidad.

Conocida esta información, se realizan 2 predicciones de criticidad completas, una con SIMULATE3 y otra con CAPRICORE, se comparan y confirma que no hay desviación, trasmitiéndose al operador la PEC estimada según se solicita en los procedimientos de arranque.

Con la mejor estimación de la Posición Estimada de Criticidad y con la autorización del jefe de Turno, el operador empieza a extraer barras de control para ir aumentando la cantidad de neutrones que generan las fisiones.

El operador continúa añadiendo reactividad positiva mediante extracción de barras de control según la secuencia correspondiente. Cuando observa que se produce un ligero aumento del número de neutrones sin mover las barras de control, es decir, aumento en la lectura de IRM y disminución del periodo, podría estar cerca de la criticidad. Si dejando pasar el tiempo y cambiando el rango de IRM el periodo vuelve a infinito entonces el reactor no es crítico.

Si por el contrario aumentando de rango los IRM para que entren en escala el periodo alcanza un equilibrio en un periodo mayor de 50 segundos el operador tiene la primera indicación de que el rector es CRÍTICO. De hecho, en esa situación, el reactor es ligeramente SUPERCRÍTICO. En ese momento, el operador estabiliza el reactor (quizá insertando un poco las barras de control) y anuncia que el reactor es CRÍTICO, anotando la hora y los parámetros para futuras referencias.

MEJORA EN LA PREDICCIÓN DE LA POSICIÓN ESTIMADA DE CRITICIDAD

Hasta el SCRAM producido el 11 de septiembre, en las predicciones de criticidad INNU utilizaba los datos del Informe de Gestión del Ciclo donde se recoge la aproximación a cri-

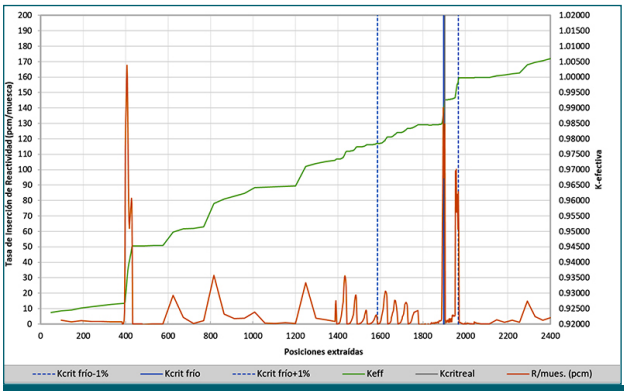

Figura 5. Mapa de Inserción de Reactividad.

ticidad en condiciones frías y usaba la herramienta oficial de monitorización y predicción, CAPRICORE, para determinar la posición más probable donde alcanzar criticidad. Por otro lado, la unidad de CONUC realizaba simulaciones independientes con las condiciones más probables de arranque a través de una herramienta independiente, SIMULATE-3 aplicando correcciones por temperatura y periodo.

Tras el SCRAM, ambas organizaciones analizaron el escenario donde se produjo la parada automática. De este análisis se observó que durante los movimientos de barras de control previos se produjo una gran inserción de reactividad al extraer unas determinadas muescas de una barra de control, generando el transitorio que el operador no fue capaz de gestionar y llevó a la planta a parada no planificada. Esta inserción de reactividad no estaba identificada, aunque si se disponía de los datos donde se indicaban las reactividades de cada movimiento a través del Informe de Gestión del Ciclo.

De esta evaluación se decidió, que además de suministrar la reactividad en cada movimiento, se debía mostrar la inserción de reactividad de cada extracción de muesca de barra de control durante el proceso de arranque. Como mejora en los procesos de arranque se generó el Mapa de Inserción de Reactividad o MIR, herramienta de gran utilidad que aporta un gran valor añadido a las predicciones de criticidad. El MIR muestra una hoja de ruta de inserción de reactividad en el proceso de extracción de barras de control durante el arranque.

En la Figura 6 se representa la misma información recogida en la Figura 5 anterior pero con el detalle de la barra de control que es extraída y su muesca. Adicionalmente se muestra, el detalle de los picos que se observan en este Mapa de Inserción de Reactividad.

El proceso para establecer una predicción de criticidad y los datos disponibles y trasmitidos son los mismos, lo que mejora es la manera de suministrar la información. Se plotea la diferencia de reactividad entre la extracción de una muesca y la siguiente (reactividad insertada) y se representa la media por posición de barra (siendo una muesca 2 posiciones de barra).

A través de esta gráfica se muestra el rango de probabilidad donde el reactor se puede hacer crítico (+/-1% de K crítica), bajo las condiciones consideradas en la simulación. Si en este rango se produce una inserción de reactividad grande, el operador debe tomar especial atención a la extracción de dichas muescas ya que la probabilidad de que el reactor se haga crítico se incrementa.

Además del rango de criticidad, este mapa muestra los posibles picos de reactividad insertados que se pueden producir en ciertos pasos de la extracción. Conocidos estos picos el operador puede esperar en ellos posibles respuestas inusuales en la instrumentación. Esto puede evitar reacciones improvisadas. Otra utilidad de este mapa es la de suministrar recomendaciones de las condiciones en las que se debe realizar el arranque. Por ejemplo, mantener la temperatura del agua de alimentación dentro de un rango para

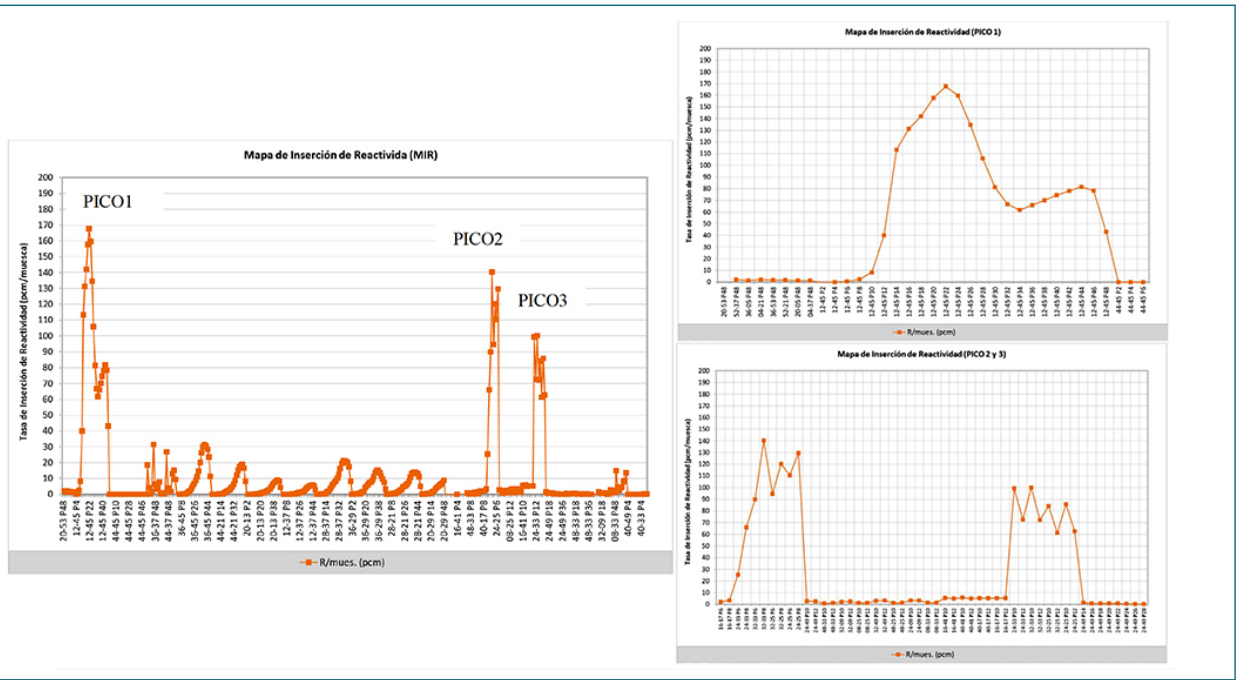

Figura 6. Detalle de la Inserción de Reactividad de cada movimiento en la extracción de barras de control.

reducir los picos de reactividad insertada o adelantarlos o atrasarlos según convenga.

El MIR varia siempre que las condiciones de la planta, en el momento del arranque, lo hagan; como temperatura del reactor, tiempo desde la parada, concentración del xenón,… etc. Estas variaciones hay que tenerlas en cuenta y rehacer las predicciones para obtener nuevos resultados y mapas con el fin de que el operador disponga de la información más realista en el momento del arranque.

CONCLUSIONES

El proceso de arranque y aproximación a criticidad de un reactor nuclear es una actividad compleja y crítica, que requiere de una gran habilidad del operador. Disponer con antelación de la mayor información posible del proceso de arranque supone de gran utilidad, aportando seguridad al operador y a toda la Sala de Control, reduciendo la posible improvisación y evitando por ello posibles errores.

El Mapa de Inserción de Reactividad o MIR es una guía de la reactividad que se va a insertar en el núcleo en cada uno de los movimientos de barras de control durante el proceso de arranque. Esta guía será válida para las hipótesis de las condiciones de arranque que se hayan considerado para elaborar el MIR, si las condiciones del arranque cambian las hipótesis con las que se desarrolla el MIR deben cambiar y elaborar un MIR nuevo.

El MIR no solo muestra la mejor posición estimada de criticidad si no también las precauciones que se pueden tener en cuenta durante la aproximación de criticidad.

El uso de esta herramienta está a disposición del operador desde el comienzo del Ciclo 24 y ha sido una herramienta de gran utilidad en los arranques intermedios que han tenido lugar durante la operación del Ciclo 24 pudiendo haber evitado algún retraso en el proceso de arranque.

REFERENCIAS

[1]. ISN 2021-7, Rev. 0. “IFEOI 2021-07 SCRAM del Reactor Subcrítico por Señal de muy Alta Escala de IRM durante el Arranque”. Octubre de 2021.
[2]. PCC/20, Rev. 10. “Desarrollo del Modelo de Barras de Control y Secuencia”. Enero de 2006.
[3]. IT-CONUC-496, Rev. 0. “Informe de Gestión del Ciclo 24 de C.N. COFRENTES”. Noviembre de 2021.
[4]. PCC/10, Rev. 4. “Estimación de Posición Crítica de Barras de Control”. Noviembre de 2017.
[5]. NT-CONUC-917, Rev. 0. “Evolución del xenón con Operación Flexible”. Octubre de 2019.■