

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS DE OPTIMIZACIÓN DE CICLOS EN C.N. ALMARAZ



LAURA ENCINAS REGUERO

Combustible. Diseño Nuclear – Monitorización
IBERDROLA GENERACIÓN NUCLEAR



JUAN ANTONIO BERMEJO PIÑAR

Combustible. Diseño y Seguridad de Recargas
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ-TRILLO (CNAT)



ALBERTO ORTEGO IÑIGO

Combustible. Jefe Diseño y Seguridad de Recargas
CENTRALES NUCLEARES ALMARAZ-TRILLO (CNAT)

INTRODUCCIÓN

Con el fin de establecer la mejor estrategia de gestión de ciclos hasta el cese previsto de la operación de C.N. Almaraz, se han llevado a cabo análisis de sensibilidad, comparando distintos escenarios, y teniendo en cuenta consideraciones tanto de la primera como de la segunda parte del ciclo.

Se ha desarrollado un procedimiento de análisis y comparación de escenarios que permitiría repetir el proceso en el futuro, en caso de que las hipótesis asumidas para la definición de los mismos cambien. Esto es muy relevante, puesto que el resultado del análisis de dichas estrategias es fuertemente dependiente de las condiciones de contorno.

En el presente artículo se describen las generalidades de las herramientas de simulación utilizadas, el método de análisis, se presentan comparaciones entre distintas estrategias (en función de las hipótesis asumidas) y se resumen los resultados más significativos y conclusiones, lo que ha permitido establecer una estrategia de gestión de ciclos como óptima hasta el cese previsto de la operación de C.N. Almaraz, para el escenario y condiciones de contorno asumidas.

ANTECEDENTES

Los primeros análisis internos realizados para establecer una estrategia de gestión óptima tienen su origen en 2016. Por aquel entonces, no se tenía certeza de la fecha prevista de cese, por lo que se asumió un horizonte de 40 años de operación, y se analizaron distintas estrategias tomando como referencia la experiencia internacional disponible. Se analizaron escenarios en los que se priorizaba la reducción de elementos frescos por su impacto en la gestión posterior como combustible gastado, así como su fuerte carga fiscal.

Con posterioridad, y una vez definidas las fechas previstas de cese en el PNIEC, se rehicieron todos estos análisis, dando como resultado la estrategia de ciclos en vigor. El procedimiento para definir esta estrategia y todos los análisis soporte realizados se resumen en este artículo.

DEFINICION DE ESTRATEGIAS

No es sencillo fijar de antemano unas pautas a la hora de seleccionar los escenarios a analizar. Por un lado, los resultados son muy dependientes de las condiciones de contorno y, en particular, de los parámetros a optimizar (producción,

coste de combustible, inventario de combustible gastado a gestionar con posterioridad) siendo, en algunos casos, imposible de armonizar en una única estrategia.

Hay ejemplos recientes de lo anterior y experiencia previa en plantas que ya han abordado su cese: plantas que han operado su último ciclo sin elementos frescos y con alargamientos extensos (caso de alguna central nuclear alemana, donde primaba reducir el número de elementos frescos por el fuerte impacto fiscal) y plantas donde se ha priorizado la operación al 100% hasta el cese de explotación, porque los precios de venta de la energía eran favorables. Como ejemplo de la complejidad de estos análisis, es destacable la experiencia de alguna planta belga que, habiendo definido una estrategia de operación hasta la fecha prevista de cese, tuvieron que dar marcha atrás y replantear la situación por cambios de última hora en las condiciones de contorno.

Con todo lo anterior en mente, se han analizado distintas estrategias poniendo el foco en la producción (energía generada) y en las necesidades de combustible, lo que permite valorar el coste de cada estrategia. Por otro lado, se ha comparado el inventario de combustible gastado generado, lo cual tiene implicaciones a efectos de su gestión posterior (necesidad de contenedores, vaciado temprano de piscinas) y tiene asimismo un impacto relevante a nivel fiscal (impuesto de combustible gastado). Sólo mediante una valoración global es posible establecer una estrategia válida en todos los aspectos. Se han evaluado distintas alternativas variando el lote de recarga (número de elementos frescos, enriquecimiento) y comparando todas ellas con el objetivo de seleccionar la más adecuada.

CONDICIONES DE CONTOURNO

Se ha evaluado el diseño de los ciclos restantes hasta el cese previsto de la operación de C.N. Almaraz. Se plantea como objetivo establecer una estrategia que aporte la mayor cantidad de energía posible, con el menor coste de combustible y minimizando la carga asociada al impuesto de combustible gastado. En todos los casos, para el diseño de los ciclos se han tratado de cumplir las siguientes premisas:

- Mantenerse en ciclos de aproximadamente 18 meses
- Mantener las paradas a principios de abril y octubre
- Se ha asumido un factor de operación del 97% para poder absorber en el futuro posibles reducciones de potencia (operación flexible) sin perder energía en el ciclo
- Mantener en piscina una cierta reserva de energía (lote de 4 elementos de 1^{er} ciclo) para cubrir el hipotético caso de fallo de un elemento muy reactivo sin perder energía en el ciclo (elementos de contingencia)
- Mantener reserva de elementos de 1^{er} ciclo para ser utilizados como elementos centrales
- Esquemas de bajas fugas totales
- Suficiente margen al límite de los parámetros de diseño nucleares habituales (Fq, FdH) que permita su licencia posterior como esquema de recarga válido por parte del suministrador con sus herramientas.

HERRAMIENTAS DE CALCULO

Para los análisis anteriores, se ha hecho uso de la herramienta EVACOM (Evaluación de Combustible) desarrollada por Iberdrola y que emplea como motor de cálculo los códigos

nucleares de Studsvik CASMO-4/SIMULATE-3, ampliamente contrastados y validados, y con experiencia de uso en distintas aplicaciones.

Esta herramienta, mediante una interfaz gráfica sencilla, permite la simulación de ciclos, siendo input para actividades de diseño nuclear tanto a corto como a largo plazo. Entre las aplicaciones más comunes destacan las siguientes:

- Diseño a corto plazo.
 - Verificación del diseño de los suministradores.
 - Búsqueda de esquemas de recarga, optimización y análisis de diseños alternativos.
- Diseño a largo plazo.
 - Análisis multiciclos (para determinación de necesidades de uranio y combustible futuras, cálculo de quemados de descarga, inventario de combustible gastado).
 - Comparación de estrategias a largo plazo.
 - Aspectos presupuestarios, cálculos económicos.
- Otros.
 - Información histórica detallada de todo el combustible de la central.
 - Generación de reportes variados en función de la necesidad.

Existe una amplia experiencia de utilización de esta herramienta por parte de Iberdrola, tanto para C.N. Cofrentes como para sus centrales participadas. En el caso de CNAT, se dispone de modelos nucleares de detalle tanto de las dos unidades de C.N. Almaraz como de C.N. Trillo, ampliamente contrastados y validados, y que son el punto de partida para alimentar esta herramienta.

En la Figura 1 se muestra la ventana principal de EVACOM donde puede verse, en este caso para la unidad 1 de C.N. Almaraz, su historia de operación desde el ciclo 1 hasta el ciclo actual. A la derecha de la imagen se detallan algunos de los parámetros principales de cada uno de los ciclos. Partiendo de cualquiera de los ciclos históricos cargados en la aplicación, es posible realizar tantos estudios como se desee, con las características que se necesiten, permitiendo comparar distintas alternativas en base a los resultados obtenidos tras la simulación.

En la Figura 2 se presenta la ventana de diseño de EVACOM. Cabe destacar que la simulación se realiza en un octavo de

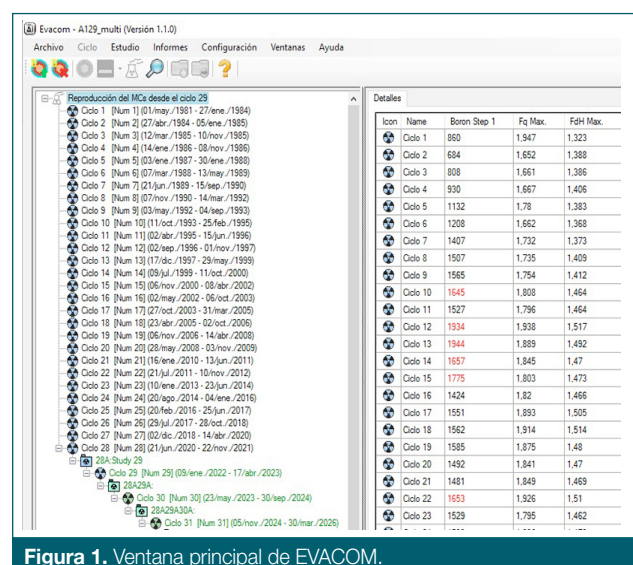
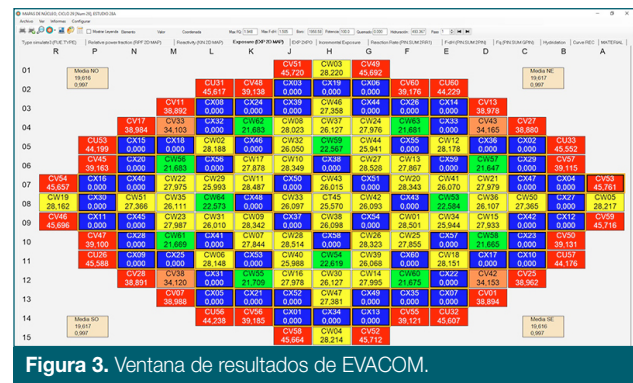
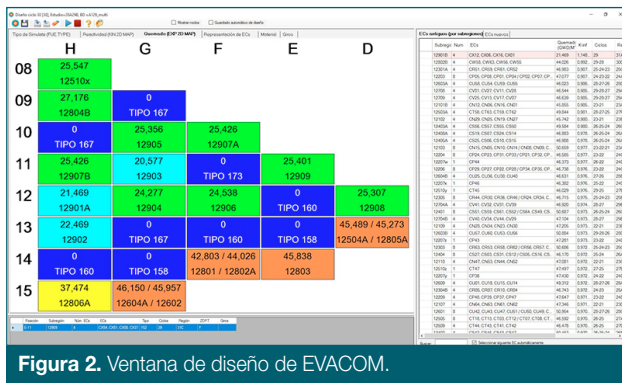


Figura 1. Ventana principal de EVACOM.



	Caso de referencia	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	Caso 7	Caso 8	Caso 9
Distribución elementos frescos	64-64-64-64-64	64-68-64-64-64	64-64-64-64-64	64-64-64-64-64	64-64-64-64-60	64-64-64-64-56	64-64-64-60-60	64-64-64-64-64	64-64-64-64-64	64-64-64-64-60
Inventario total	320	324	320	320	316	312	312	320	320	316
Enriquecimiento	4.60%	4.60%	4.70%	4.80%	4.80%	4.90%	4.90%	4.70% 4.80%	4.70% 4.80%	4.70% 4.80%
Elementos en piscina	2041	2045	2041	2041	2037	2033	2033	2041	2041	2037
Δ producción (*) (GWhe)	-	79	409	597	530	597	601	562	575	528
Δ presupuesto combustible (*)	-	0.91%	1.46%	2.92%	1.92%	2.32%	2.33%	2.33%	2.60%	1.61%
Δ ICG (*) (%)	-	0.90%	0.00%	0.00%	-1.11%	-2.24%	-2.24%	0.00%	0.00%	-1.11%
Δ producción vs presupuesto	-	-2.7	16.0	20.9	25.4	32.4	32.6	20.9	20.7	26.2

* comparado con el caso de referencia ** Impuesto de Combustible Gastado

Tabla 1. C.N. Almaraz 2. Detalle de los escenarios analizados.

núcleo para simplificar esta etapa. Partiendo del inventario de combustible fresco asumido al inicio del estudio, el usuario completa el diseño con el inventario de combustible gastado disponible en piscina (a la derecha de la imagen). Es posible seleccionar lotes de elementos, así como cambiarlos de posición de manera sencilla a través de la interfaz gráfica.

Finalmente, una vez completado el diseño, se ejecuta la simulación, visualizando las salidas de la ejecución del código en la ventana de resultados (Figura 3). La ventana cuenta con varias pestañas donde se puede visualizar, para cada elemento del núcleo, los parámetros más relevantes (potencia, quemado, reactividad, factores de pico de la distribución de potencia) para poder evaluar los resultados y reajustar el diseño en caso necesario. El proceso anterior se repite cuantas veces se requiera y los estudios quedan almacenados en la base de datos de cada unidad, de manera que siempre es posible volver atrás y rehacer un estudio en el futuro en caso de necesidad (por ejemplo, en caso de que las condiciones de contorno cambien).

ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS Y RESULTADOS

Como se mencionaba con anterioridad, para el análisis y búsqueda de escenarios se han planteado los siguientes objetivos:

- Minimizar el número de elementos frescos (impacto en el impuesto de combustible gastado).
- Maximizar la producción de energía (evitar alargamientos de ciclo extensos).
- Maximizar el quemado de combustible (minimizar el coste).

Ninguna estrategia permite optimizar simultáneamente todas las premisas, por lo que se han evaluado distintos escenarios cubriendo variaciones en el lote de recarga (número de elementos frescos, enriquecimiento) distribución de los mismos en los ciclos analizados, de manera que el análisis global de cada estrategia y su comparativa con el resto de escenarios permita seleccionar aquella que resulte más apropiada. Partiendo de un caso de referencia, se comparan las distintas estrategias poniendo el foco en:

- Aspectos presupuestarios (distribución anual).
- Coste de combustible.
- Producción de energía.
- Impuesto de combustible gastado.
- Inventario de combustible gastado.

Se han realizado análisis para las dos unidades de C.N. Almaraz. En la Tabla 1 se presentan de manera esquemática algunos de los escenarios analizados para la Unidad 2 (ciclos 27 a 31) con sus particularidades.

De la Figura 4 a la Figura 7 se presentan a modo de ejemplo alguna de las comparativas realizadas entre los distintos escenarios. En particular, la Figura 4 presenta las estimaciones presupuestarias anuales desde la fecha de realización de los análisis hasta la fecha prevista de cese, para cada una de las estrategias, la Figura 5 muestra la previsión en cuanto a impuesto de combustible gastado (nótese los años en los que no hay recarga) la Figura 6 la distribución prevista de quemados para el combustible gastado generado, y la Figura 7 compara los costes previstos de cada estrategia frente al caso base de referencia. Es llamativo como, sea cual sea la estrategia, el coste de los últimos ciclos aumenta de manera significativa. Esto es lógico y es debido a que los

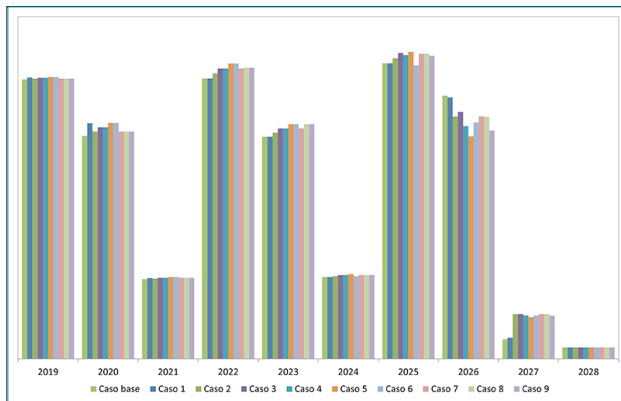


Figura 4. Estimaciones presupuestarias anuales para los distintos escenarios

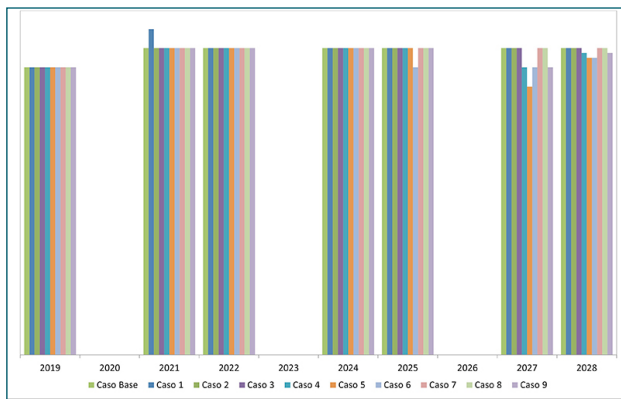


Figura 5. Impuesto de combustible gastado para los distintos escenarios,

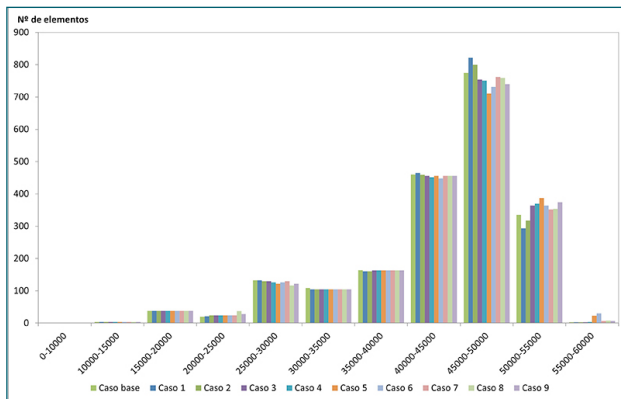


Figura 6. Distribución de quemado de los elementos tras el cese de la operación.

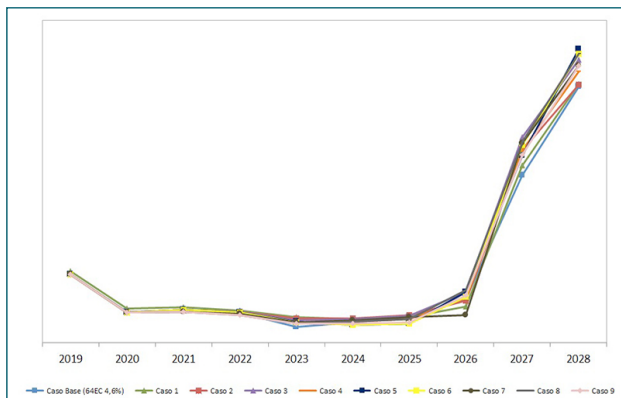


Figura 7. Coste de combustible para los distintos escenarios.

elementos que se cargan en dichos ciclos no se queman completamente, quedando en ellos una energía remanente que no se utiliza.

VALORACION DE RESULTADOS

Tras los análisis realizados, se concluye que las estrategias con aumento de enriquecimiento / reducción de elementos frescos son las más ventajosas. La razón reside, fundamentalmente, en el impacto asociado con el impuesto de combustible gastado, que desde su entrada en vigor en 2013 se ha convertido en una variable muy relevante en la gestión de combustible. Otra conclusión relevante de los análisis es que, cualquiera que sea la estrategia, el coste de combustible de los últimos ciclos se ve fuertemente penalizado. Esto podría mitigarse replanteando la estrategia en función de la evolución del precio de la energía durante los últimos ciclos, parámetro sobre el que claramente no tenemos control ni es sencillo hacer previsiones.

Con respecto a la segunda parte del ciclo, otra conclusión significativa es que no hay grandes diferencias entre las estrategias analizadas (en cuanto a inventario de combustible gastado generado) y lo que si se concluye es que será necesario licenciar un contenedor especial para poder descargar el combustible procedente de los últimos ciclos (muy caliente) y facilitar el vaciado temprano de las piscinas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han analizado distintas estrategias de gestión de ciclos, con el objetivo de establecer la mejor alternativa de cara a la operación de C.N. Almaraz hasta el cese previsto de explotación. Se han comparado las distintas estrategias poniendo el foco en aspectos presupuestarios, producción, coste de combustible, así como el impacto en la segunda parte del ciclo.

Se concluye de los análisis que las estrategias que implican una reducción del número de elementos frescos son las más ventajosas. Esto es debido a su repercusión sobre el impuesto de combustible gastado, que desde su entrada en vigor ha tenido un impacto relevante en el coste, y es por tanto un aspecto muy a tener en cuenta en la gestión de combustible.

Los análisis han permitido consolidar el aumento de enriquecimiento como la mejor estrategia para los ciclos actuales, lo que permite una reducción del lote de recarga manteniendo la longitud de los ciclos. Asimismo, el desarrollo de los trabajos ha permitido establecer un procedimiento de análisis y comparación de escenarios, que permitiría repetir el proceso en el futuro en caso de que las condiciones de contorno cambien. Esto es muy relevante puesto que el resultado del análisis de las estrategias es muy dependiente de las condiciones de contorno.

Los trabajos realizados son una muestra de las capacidades de la organización, fundamentales a la hora de soportar la toma de decisiones relacionadas con la gestión de combustible, y que permiten asimismo un mejor posicionamiento y capacidad de análisis independiente a los suministradores. En ese sentido, ha sido posible evaluar de manera interna otras propuestas de optimización recientes.

REFERENCIAS

- [1]. "A la búsqueda del quemado ideal" (D. Molina, Revista SNE, May-2000).
- [2]. "Herramienta EVACOM: Aplicaciones en el diseño nuclear de C.N. Almaraz" (L. Encinas, J. Bermejo, A. Ortego, 38ª Reunión Anual SNE, Cáceres, Oct-2012).
- [3]. "Herramienta EVACOM: Aplicaciones en el diseño nuclear de C.N. Trillo" (L. Encinas, J. Bermejo, A. Ortego, 39ª Reunión Anual SNE, Reus, Sept-2013).
- [4]. "PWR *In-core Fuel Management optimization for non-standard cycles*" (Janin, Seidl, Günther, Wensauer, Top Fuel 2015).
- [5]. "*Last core optimization activities at CNAT*" (L. Encinas, J. Bermejo, A. Ortego, Studsvik International User's Group Meeting, Dresden, Oct-2019).
- [6]. "Análisis de estrategias de optimización de ciclos en C.N. Almaraz" (L. Encinas, J. Bermejo, A. Ortego, 47ª Reunión Anual SNE, Cartagena, Sept-2022).■