

AUMENTO DE LA LONGITUD DEL CICLO A 24 MESES EN REACTORES TIPO BWR

J. C. MANCHOBAS - A. GALICIA - M^a T. LÓPEZ CARBONELL

La mayoría de las plantas nucleares actualmente en funcionamiento comenzaron su operación en ciclos anuales). Los avances tecnológicos en el diseño del combustible, entre otros aspectos, han llevado a la mayoría de las empresas a establecer planes de aumento de la longitud del ciclo a 15, 18 ó 24 meses.

La central nuclear de Santa María de Garoña acometió su proyecto de transición hacia ciclos de 24 meses en el año 1990. CN Cofrentes, después de 14 ciclos de operación, acomete un nuevo hito dentro de su estrategia de conseguir un kilovatio seguro, fiable, respetuoso con el medio ambiente : el aumento del ciclo de operación a 24 meses.

Se trata en este artículo de dar a conocer la experiencia de una central que opera con esta duración de ciclo desde hace más de 12 años, desde el punto de vista del combustible y de la seguridad, y, por otro lado, describir el proceso que se está llevando a cabo en CN Cofrentes para implantar la operación en ciclos de dos años.

Most of the current nuclear power plants started their operation based on annual cycles. The technological advances in fuel design, together with other aspects, led the companies to establish plans to increase cycle length up to 15, 18 or 24 months.

Santa María de Garona NPP undertook the transition to 24 month cycles in 1990. Cofrentes NPP, after 14 cycles in operation and now operating 18-months length cycles, start a new leading project within its strategy to get a reliable, safe, and respectful with the environment kilowatt: the increase of the cycle length to 24 months.

The purpose of present article is to point out first the experience, focus on nuclear fuel and safety, of a plant operating 24.months cycles for more than 12 years, and on the other hand, to describe the studies that are carrying out in Cofrentes NPP related with the 24-months cycles at this plant.

INTRODUCCIÓN

La mayoría de las plantas nucleares actualmente en funcionamiento comenzaron su operación en ciclos anuales, tanto en los casos de las centrales de agua a presión (PWR), como en los de agua en ebullición (BWR). Los avances tecnológicos en el diseño del combustible y los altos niveles de disponibilidad conseguidos en la operación de nuestros reactores han llevado a la mayoría de las empresas a establecer planes de aumento de la longitud del ciclo a 15, 18 ó 24 meses. Las pri-

meras en establecer estos aumentos fueron las plantas americanas, tendiendo más a ciclos de 18 y 24 meses, mientras que las asiáticas y las europeas se han mantenido más en el modelo de ciclos de 12 meses. En la tabla 1 se muestran las centrales del tipo BWR que operan en 24 meses. Se incluye CN Cofrentes (actualmente en 18 meses) a efectos de comparación de sus características y a nivel informativo.

El aumento en la longitud del ciclo incrementa la producción de energía eléctrica y reduce el número de recargas de combustible necesarias durante la vida de la central. Esto conlleva un ahorro en el coste de operación y mantenimiento de la planta, aunque tiene como contrapartida un aumento del coste del combustible nuclear.

CN de Santa María de Garoña acometió su proyecto de transición hacia

Tabla 1.

PLANTA	Potencia MWt	Nº Elementos	Elementos recargados	Fracción recarga (%)	Quemado de Ciclo MWd/TMU
Nine Mile Point 2	3.467	764	248	0,32	16.890
Limerick 1	3.458	764	280	0,37	18.751
Grand Gulf	3.898	800	204	0,26	12.879
Browns Ferry 2	3.458	764	256	0,34	16.867
Limerick2	3.458	764	268	0,35	17.538
Peach Bottom 3	3.458	764	284	0,37	17.895
Browns Ferry 3	3.458	764	284	0,37	17.477
Peach Bottom 2	3.458	764	292	0,38	17.895
Susquehanna 2	3.489	764	300	0,39	16.759
Susquehanna 1	3.489	764	316	0,41	16.928
Columbia	3.486	764	300	0,39	15.858
Perry	3.758	748	304	0,41	16.030
COFRENTES	3.237	624	-	-	-
GAROÑA	1.831	400	112	0,28	14.110
Nine Mile Point 1	1.850	532	148	0,28	13.007
Pilgrim	1.998	580	144	0,25	13.911
Brunswick 2	2.728	560	248	0,44	16.888
Fitzpatrick	2.536	560	196	0,35	15.925
Hatch 1	2.763	560	184	0,33	13.900
Hatch 2	2.763	560	184	0,33	13.200

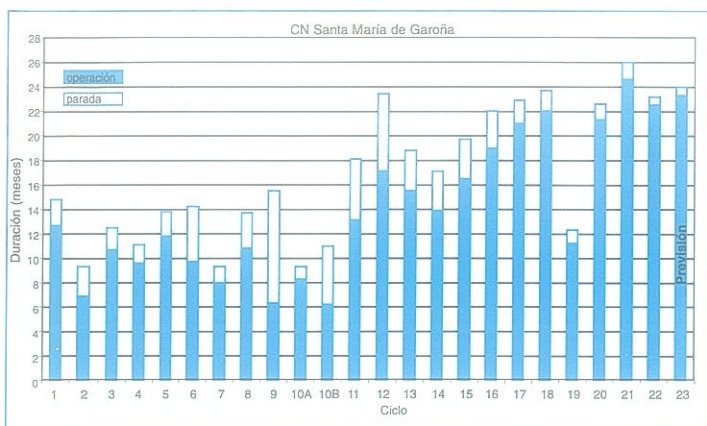


Figura 1. Duración de la operación a potencia y de las paradas

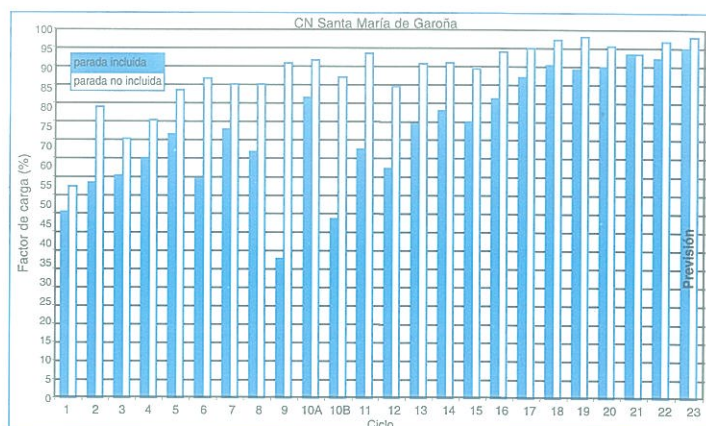


Figura 2. Factor de carga.

ciclos de 24 meses en el año 1990, operando desde entonces con esta longitud de ciclo.

CN Cofrentes, después de 14 ciclos de operación a potencia en los que se han producido hechos significativos que han redundado en la mejora de la operación de la planta, y a la vista de los resultados obtenidos por otras centrales de agua en ebullición, acomete un nuevo hito dentro de su estrategia de conseguir un kilovatio seguro, fiable, respetuoso con el medio ambiente y a un precio competitivo: el aumento del ciclo de operación a 24 meses.

OBJETIVOS

Los objetivos de este artículo son:

- Por un lado, dar a conocer la experiencia de una central que opera con ciclos de 24 meses desde hace más de 12 años, desde el punto de vista del combustible y de la seguridad (CN de Santa María de Garoña).
- Por otro lado, describir el proceso que se está llevando a cabo en CN Cofrentes para implantar la operación en ciclos de dos años.
- Mostrar la utilización de la metodología Giralda como medio para determinar el enriquecimiento de los elementos, que basados en los nuevos avances tecnológicos y los altos niveles de fiabilidad, que hagan posible un ciclo de 24 meses de duración.

SITUACIÓN ACTUAL EN SANTA MARÍA DE GAROÑA

En el mes de marzo del presente año la CN de Santa María de Garoña ha iniciado su vigésimo tercer ciclo de operación, cuya duración, como en el caso de sus precedentes más inmediatos, será de 24 meses.

Este ciclo se ha diseñado con el ob-

jetivo de generar una energía equivalente a 696 días de operación a plena potencia; el factor de carga previsto es del 98%, y se incluirá un período de 11 días de alargamiento de la operación por reducción de potencia. En cuanto al combustible, se han cargado 112 elementos frescos, lo que representa un tamaño de recarga equivalente al 28% del núcleo. Estos elementos han sido del diseño GE14, fabricados por ENUSA, y con un enriquecimiento medio del 3,87%.

Se espera que los ciclos inmediatamente futuros no se diferencien significativamente del actual, ni en cuanto a sus requisitos de diseño, ni en lo que respecta al tamaño y características del combustible a recargar.

EVOLUCIÓN OPERATIVA. INFLUENCIA DE LA DURACIÓN DEL CICLO

Para ilustrar la evolución del historial operativo en la CN de Santa María de Garoña, en la figura 1 se ha representado la duración de los distintos ciclos operados en la central. Como puede observarse, con el ciclo 16, iniciado en el año 1990, se procedió a una gradual transición hacia los ciclos de 24 meses, a partir de los ciclos de 18 meses en los que entonces se operaba.

Desde dicha fecha, y con la excepción del ciclo 19, reducido a 12 meses por la realización de una parada de inspección del barrilete del núcleo, se ha operado en ciclos básicamente de dos años. Las ligeras desviaciones con respecto a este objetivo que se observan en la figura se deben a que se acortó en mes y medio la operación del ciclo 20 por la necesidad de apantallar un elemento fallado con dos barras de control, lo que produjo la consiguiente pérdida de reactividad. Este acortamiento se tradujo, a su vez, en un alargamiento del siguiente ciclo.

Una primera conclusión que se puede extraer de la figura 1 es que desde el ciclo 16 hasta la fecha se han operado siete ciclos, uno de ellos anual, en tanto que si se hubiese continuado con la operación en ciclos de 18 meses, salvo uno de ellos que sería también anual, se habría operado un total de nueve ciclos en, aproximadamente, el mismo intervalo de tiempo. Es decir, y hasta el día de hoy, el cambio introducido en el año 1990 ha permitido reducir en dos el número de paradas de recarga, con la consiguiente mejora tanto en términos de disponibilidad como en lo que respecta a la dosis acumulada.

Cabe destacar también en la figura 1, la paulatina optimización de las paradas de recarga, hasta conseguir el objetivo actualmente establecido de 21 días.

Por su parte, en la figura 2 se muestra la evolución del factor de carga de cada ciclo, incluyendo o no en éste la parada de recarga. Como puede verse en la figura, en el pasado ciclo 22 se registró un factor de carga, con parada de recarga incluida, superior al 92%, cota que se espera rebasar en el ciclo 23, hasta alcanzar un valor en torno al 95%.

A la vista de estos nuevos resultados se puede formular una segunda conclusión, en el sentido de que los ciclos de 24 meses son, cuando menos, compatibles con altos factores de carga en operación y con cortas paradas de recarga.

ASPECTOS ECONÓMICOS Y TÉCNICOS

La operación en ciclos de 24 meses lleva consigo, y en comparación con ciclos de más corta duración, que el exceso de reactividad de los elementos combustibles que constituyen cada recarga sea mayor, lo que implica una mayor capacidad de control mediante

barras y mediante veneno consumible como el gadoleno. Quiere esto decir que, frente a las ventajas hasta ahora expuestas, los ciclos de 24 meses representan un aprovechamiento del combustible inferior al obtenido con ciclos más cortos.

Por ello, y para estimar el impacto que la operación en ciclos de 24 meses tiene en el caso concreto la CN de Santa María de Garoña, se muestra en la figura 3 y a partir del ciclo 15, como representativo de los ciclos de 18 meses, la evolución de las componentes del coste del combustible sobre la energía generada. Estas componentes han sido expresadas de forma intrínseca e independiente de los precios de mercado, es decir, como kg-U-nat / GWh, UTS/GWh, y número de elementos combustibles por TWh. Para evitar la distorsión que representaría el ciclo 19, ya que, en realidad, este ciclo anual fue diseñado y cargado para 24 meses de operación, se le ha agrupado con el ciclo 20.

En esta figura el gasto de U-nat se presenta una tendencia descendente a partir de los ciclos 19 y 20, hasta alcanzar un valor mínimo de 22 kg-U-nat/GWh en el ciclo presente. Otro tanto se puede afirmar con respecto al coste del enriquecimiento, si bien con una reducción menos acusada que la anterior, hasta llegar a un mínimo de 13 UTS/GWh. Finalmente, el tamaño de la recarga se ha mantenido relativamente estable, con un ligero descenso hasta los 112 elementos cargados en el último ciclo.

Esta variación de los costes intrínsecos del combustible pone de manifiesto, en primer lugar, la positiva evolución de su diseño, que les hace más eficientes desde el punto de vista neutrónico. Pero, al mismo tiempo, dicha variación permite afirmar que la operación en ciclos de 24 meses en un reactor del tamaño y densidad de potencia como los de la CN de Santa María de Garoña es factible sin que el coste del combustible se vea significativamente penalizado con respecto a ciclos más cortos en su duración y optimizados en lo que atañe exclusivamente a la utilización del combustible. Si sobre este panorama se superpone la evolución a la baja de los precios reales de mercado de los componentes del precio del combustible, se reafirma la reducida magnitud de la citada penalización económica.

En lo que respecta al diseño y operación de los ciclos, y más concretamente a los márgenes de seguridad disponibles, el hecho de tratarse de ciclos de 24 meses no ha supuesto ninguna res-

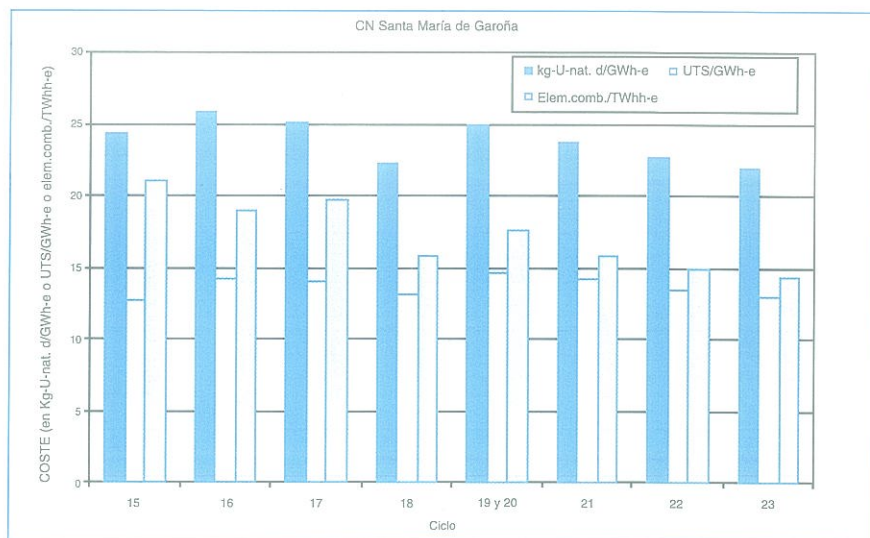


Figura 3. Evolución de los componentes del coste del combustible.

tricción o dificultad significativa. Tan sólo cabe señalar en este contexto la reciente necesidad de incrementar el contenido en boro del tanque del sistema de control por líquido de reserva para así garantizar el margen de parada requerido.

SITUACIÓN ACTUAL EN CN COFRENTES

CN Cofrentes se encuentra en la actualidad operando el ciclo 14 que arrancó en Marzo-2002, teniendo prevista su finalización en septiembre de 2003.

Los elementos nuevos cargados en el núcleo han sido 196 (76 del tipo Svea96 y 120 del tipo GE12) que suponen una fracción de recarga del 31.4 %.

Una característica importante a destacar en este ciclo, es el aumento al 110 % de potencia.

LONGITUD ÓPTIMA DEL CICLO EN CN COFRENTES

Los factores a tener en cuenta para establecer la duración óptima del ciclo de operación dependen de las características de la demanda eléctrica, del reactor (tecnología y comportamiento del combustible nuclear) y de la evolución económica del suministro del combustible.

La empresa eléctrica responsable de la explotación de la central establece unos objetivos iniciales de producción de energía basados en las previsiones del comportamiento de la demanda eléctrica. Del mismo modo, se seleccionan los periodos de tiempo en los que sería más conveniente la parada del reactor para proceder a su recarga,

y que básicamente se concentran en los periodos del año de menor demanda energética o de mayor disponibilidad de otras fuentes de energía como la hidráulica. Otros factores a tener en cuenta son el resto del sistema de generación y la disponibilidad y coste de la energía de sustitución.

Todos estos factores influyen decisivamente en la ubicación de las paradas de recarga, y son los responsables de que los ciclos de operación sean de 12, 18 ó 24 meses con las recargas frecuentemente situadas en primavera o en otoño.

CN Cofrentes comenzó su operación comercial en ciclos anuales (Ciclos 1 a 6), produciéndose una transición posterior a ciclos de 18 meses, situación en la que operan la mayoría de los reactores españoles en la actualidad.

Otras consideraciones que influyen en el establecimiento de la longitud del ciclo son los factores económicos asociados al suministro de combustible como el precio del Uranio, costes de enriquecimiento y conversión, calendario de anticipos, garantías y tasas de interés monetarias. Del mismo modo se debe tener en cuenta como referencia las circunstancias de la segunda parte del ciclo.

Todas estas consideraciones cierran el proceso de toma de decisiones que permite fijar los valores óptimos de cada parámetro. Otro dato de ajuste importante que se deduce de todo este proceso es la determinación de la extensión del ciclo que flexibiliza la parada de recarga.

Los factores que aconsejaron pasar a ciclos de 18 meses (500 depp aproximadamente) fueron el aumento de la disponibilidad y la reducción de dosis

debidas al número de paradas de recarga y una disminución de sus costes asociados, teniendo como contrapartida un aumento en los costes del combustible debido al incremento del enriquecimiento y a la menor eficacia del quemado. El beneficio neto de la producción y costes derivados de las paradas de recarga compensaban el incremento del coste del combustible.

EVOLUCIÓN DE LA LONGITUD DEL CICLO EN CN COFRENTES

La duración del ciclo en CN Cofrentes ha ido aumentando progresivamente hasta alcanzar valores estables correspondientes a los ciclos de 18 meses. En la siguiente tabla se observa la duración de cada uno de los ciclos en tiempo real.

Tabla 2. Evolución de la longitud del ciclo			
CICLO	LONGITUD (DIAS REALES)	LONGITUD (DEPP)	Nº MESES
1	510	338,6	12
2	288	272,2	
3	372	352,8	
4	327	319,8	
5	419	403,7	
6	431	400,0	18
7	533	508,5	
8	495	479,2	
9	518	495,4	
10	505	484,2	
11	530	490,5	
12	478	460,0	
13	505	486,1	
14	526	498,5	20
15	564 *		

* Estimado

DESARROLLO DEL PROYECTO DE CICLOS DE 24 MESES

La primera actividad a desarrollar consiste en describir el alcance de las actividades de este aumento de la duración del ciclo y realizar el estudio de viabilidad, tanto desde el punto de vista técnico como administrativo.

Será necesario evaluar el impacto de esta extensión sobre la documentación del Proyecto y sobre las diferentes actividades que desarrollan las organizaciones de CNC involucradas, así como determinar las actividades a desarrollar por las diferentes organizaciones implicadas en este proyecto.

La extensión de la duración del ciclo a 24 meses supone una modificación de las condiciones de operación licenciadas actualmente. Para poder operar bajo esas nuevas condiciones se requiere una autorización administrativa, que exige una actualización de análisis genéricos y documentos oficiales, incluyendo el Estudio Final de Seguridad, las Especificaciones Técnicas de Funcionamiento y el Manual de Requisitos de Operación.

A continuación se indican algunas de las actividades genéricas a realizar, directamente relacionadas con el combustible nuclear que se abordan en el artículo:

- Diseño de multiciclos
- Ciclo de equilibrio
- Impacto en la metodología Giralda

SITUACIÓN ACTUAL DISEÑO DE MULTICICLOS

En realidad, la transición hacia ciclos más largos se ha iniciado con el diseño del ciclo 15 cuya fecha de comienzo será finales de septiembre de 2003.

Este ciclo tiene una duración estimada de 20 meses, correspondiente a un quemado de 16435 MWd / TMU y a una energía total de 1827 GWd.

El trabajo relativo a la transición a 24 meses, en este momento, está enfocado en dos vías paralelas:

- Ciclos de transición
- Ciclo de equilibrio

Con respecto al primer punto, se están generando las librerías neutrónicas para elementos con un enriquecimiento medio del 4.20 % U-235 y con distintas concentraciones de Gadolinio que varían entre el 5 % y el 9% de Gd₂O₃. El máximo enriquecimiento de varilla es del 4.9 % U-235.

El enriquecimiento medio viene determinado por el de los segmentos axiales que constituyen el elemento.

Para el diseño en estudio, el rango varía entre el 4.46 y 4.55 % U-235.

Se contemplan cinco ciclos más 16, 17, 18, 19 y 20 en los que se prevé una longitud de ciclo de aproximadamente 19.6 GWd / TMU.

La representación de un cuarto del ciclo 20 se muestra en la figura 4, donde entran 256 elementos frescos (amarillo) que supone un 41% de fracción de recarga.

Las características del reactor y de su combustible condicionan distintos he-

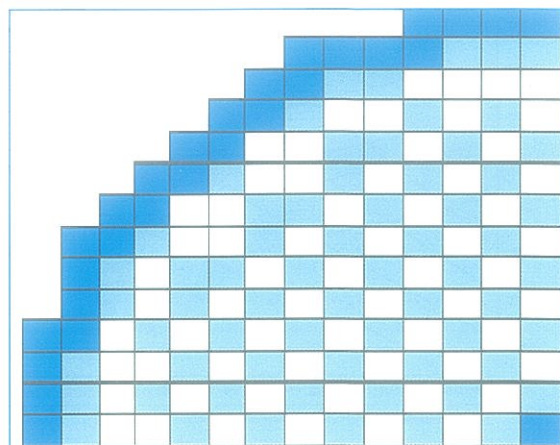


Figura 4.

chos referidos a las limitaciones de reactividad del núcleo, la existencia de límites térmicos de operación cuyos márgenes hay que garantizar en todo momento y los límites de diseño mecánico de los elementos combustibles.

Todos estos factores son los que definen la fracción del núcleo que se recarga en cada ciclo, el enriquecimiento medio de los lotes de combustible e incluso la cantidad de veneno consumible que hay que introducir, además de los quemados de descarga de cada lote.

Como es lógico, existen combinaciones entre el enriquecimiento medio de los elementos frescos, el quemado de descarga, la longitud del ciclo y la fracción de recarga, que hacen posible una gran cantidad de configuraciones de mapas de núcleo. Si se fija alguna de las características, las posibilidades se van reduciendo.

Manteniendo el enriquecimiento en los niveles actuales, alrededor del 4%, sería necesaria una fracción de recarga de aproximadamente el 50%, con un quemado de descarga de 40 GWd / TMU.

En la figura 5 se muestra una gráfica adaptada para CN Cofrentes en la que se relacionan de una forma empírica, enriquecimientos y quemados de descarga en función de la longitud del ciclo, basado en el método de evaluación de la referencia 4.

Con respecto a los ciclos de equilibrio, se tiene abierta otra línea de trabajo, paralela e independiente de la anterior, cuyo objeto es optimizar el enriquecimiento medio de los elementos.

La herramienta de trabajo, tanto para los ciclos de transición como para los ciclos de equilibrio, será EVACOM, que, entre otras aplicaciones, ejecuta el código Simulate-3 (código utilizado para simular CN Cofrentes dentro de la metodología Giralda), que permite

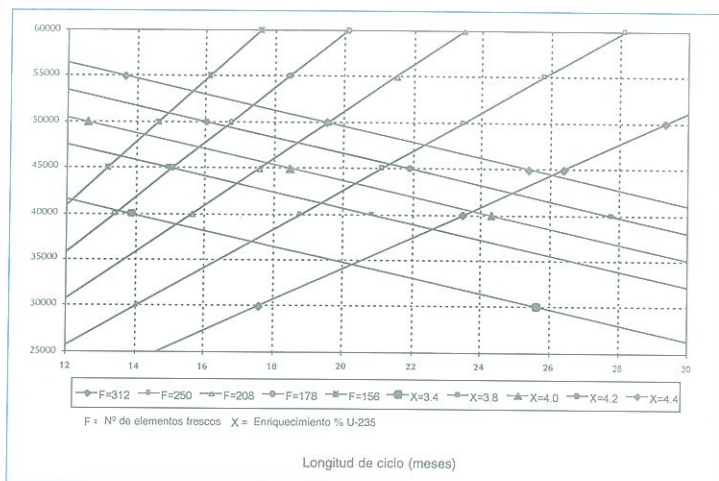


Figura 5. Mapa quemado-longitud de ciclo para Cofrentes.

obtener los quemados de descarga por lotes y el resto de parámetros nucleares.

QUEMADO DE DESCARGA POR CICLOS

Uno de los aspectos importantes a la hora de optimizar la operación de un ciclo es determinar el quemado con el que se descargan los elementos que van a la piscina de elementos gastados y que no van a residir más en el reactor.

En la figura 6 se muestra un resumen de los quemados de descarga por lotes para los ciclos de CN Cofrentes.

El aumento de la longitud del ciclo llevará consigo un aumento del quemado de descarga, cuyo valor será objeto de este estudio y que dependerá básicamente del enriquecimiento y de la fracción de recarga.

CONCLUSIONES

- En conclusión, la experiencia que desde el año 1990 se dispone en la CN de Santa María de Garoña con relación a los ciclos de 24 meses puede ser calificada como muy positiva. Estos ciclos, en el marco de la estrategia operativa actual basada en una parada de recarga de unos 20 días cada dos años, unida a un factor de carga superior al 98% durante la operación, permitirán que la central siga dando un notable ejemplo de operación en el futuro.

- CN Cofrentes acomete la transición hacia la operación de ciclos de 24 meses, como es habitual en un buen número de centrales nucleares americanas del mismo tipo, siguiendo una pauta optimizada de los procesos que se llevan a cabo, y siempre, respetando los criterios de seguridad que redundan en el óptimo funcionamiento de la Planta.

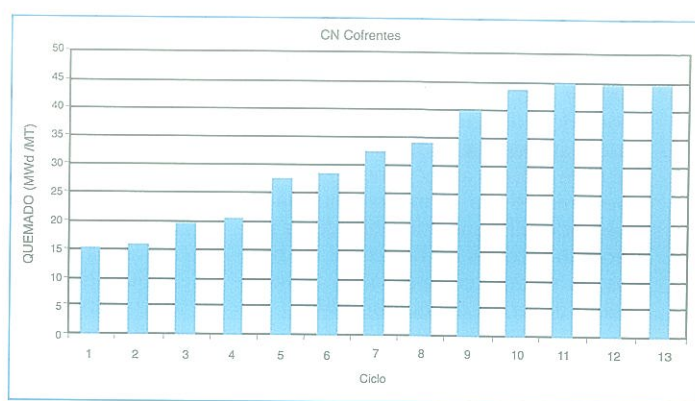


Figura 6. Quemado de descarga por ciclos.

La utilización de la metodología Giralda y demás herramientas de cálculo disponibles en Iberdrola, es la adecuada para la realización de este proyecto, dada la experiencia que se lleva acumulada y los resultados obtenidos.

- La realización de este estudio, además de servir para optimizar la operación del ciclo, se podrá utilizar para ampliar el conocimiento que sobre este tipo de materias se tiene en los reactores de agua en ebullición.

REFERENCIAS

- Artículo "A la búsqueda del quemado ideal", Diego Molina, Revista Nuclear España, nº 197, Mayo 2000.
- Informe técnico "Resumen energético de los ciclos de CN Cofrentes". It-cosnu-153. Septiembre 2002.
- Informes del BWROG-RAC.
- "Modeling and design of reload LWR cores for an ultra-long operating cycle". M.V. McMahon et al. MIT-NFC-TR-004, Rev1. September 1997.



Andrés GALICIA SAAVEDRA es ingeniero industrial, especialidad Técnicas Energéticas por la E.T.S.I.I. de Madrid y diplomado en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares de la JEN. Comenzó su carrera profesional en la Junta de Energía Nuclear de donde pasó en 1985 al Departamento de Ingeniería y análisis nucleares de Hidroeléctrica Española. Perteneció al grupo de Combustible Nuclear de Iberdrola desde su creación. Actualmente desarrolla su trabajo en el grupo de análisis neutrónico.



María Teresa LÓPEZ CARBONELL es licenciada en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid y diplomada en Ingeniería Nuclear por el Instituto de Estudios Nucleares de la JEN. Comenzó su carrera profesional en Iberdrola (antigua Hidroeléctrica Española) en 1973 incorporándose al Proyecto de CN Cofrentes. Perteneció al Grupo de Combustible Nuclear de Iberdrola desde su creación desarrollando su trabajo en el área de Análisis Neutrónicos.



Juan Carlos MANCHOBAS GOZALO, es ingeniero industrial por la E.T.S.I.I. de Bilbao. Inició su actividad profesional en 1975 en Sener en el campo de la Protección Radiológica. En la actualidad es responsable de la Sección de Combustible de Nuclenor, donde ingresó en 1987.