

## DISEÑO DE CICLOS EN TRILLO

M. NOVO - A. CEDILLO

### INTRODUCCIÓN

Trillo es un reactor SIEMENS PWR de tres lazos, 3010 Mw de potencia térmica y 177 elementos combustibles (ECs), cada uno con 236 barras de combustible y 20 tubos guía en disposición de malla cuadrada de 16x16-20, sin tubo de instrumentación. Ni el EC ni el núcleo de Trillo son idénticos a los de ninguna otra central: Gösgen tiene un núcleo de 177 ECs e igual longitud activa, pero sus ECs son 15x15; varias otras centrales, todas ellas de cuatro lazos y núcleos de 193 ECs, usan elementos 16x16-20 idénticos transversalmente a los de Trillo, pero más largos. Siemens ha suministrado todo el combustible desde el primer ciclo, habiéndose fabricado ECs en sus factorías de Hanau y Lingen (RFA) y Richland (EE.UU.) así como en diversos subcontratistas de Inglaterra, Francia y Bélgica.

### CARACTERÍSTICAS ESPECÍFICAS DE TRILLO

Se citan algunas características de los PWR de Siemens que tienen importancia en relación al diseño de recargas:

- *Almacenamiento y reparación de combustible*

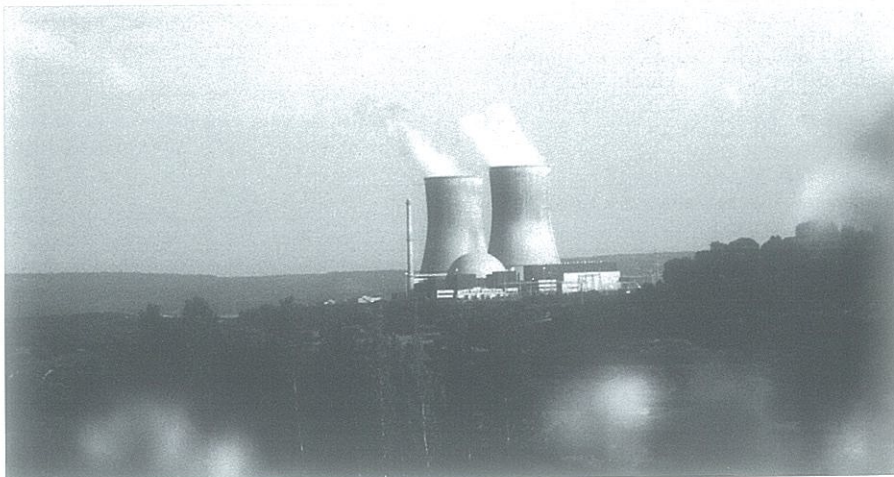
- La piscina de combustible está dentro de la contención, lo que agiliza el movimiento de combustible durante la parada, pero limita el espacio de almacenamiento y dificulta la reparación de combustible simultánea a los trabajos de recarga.

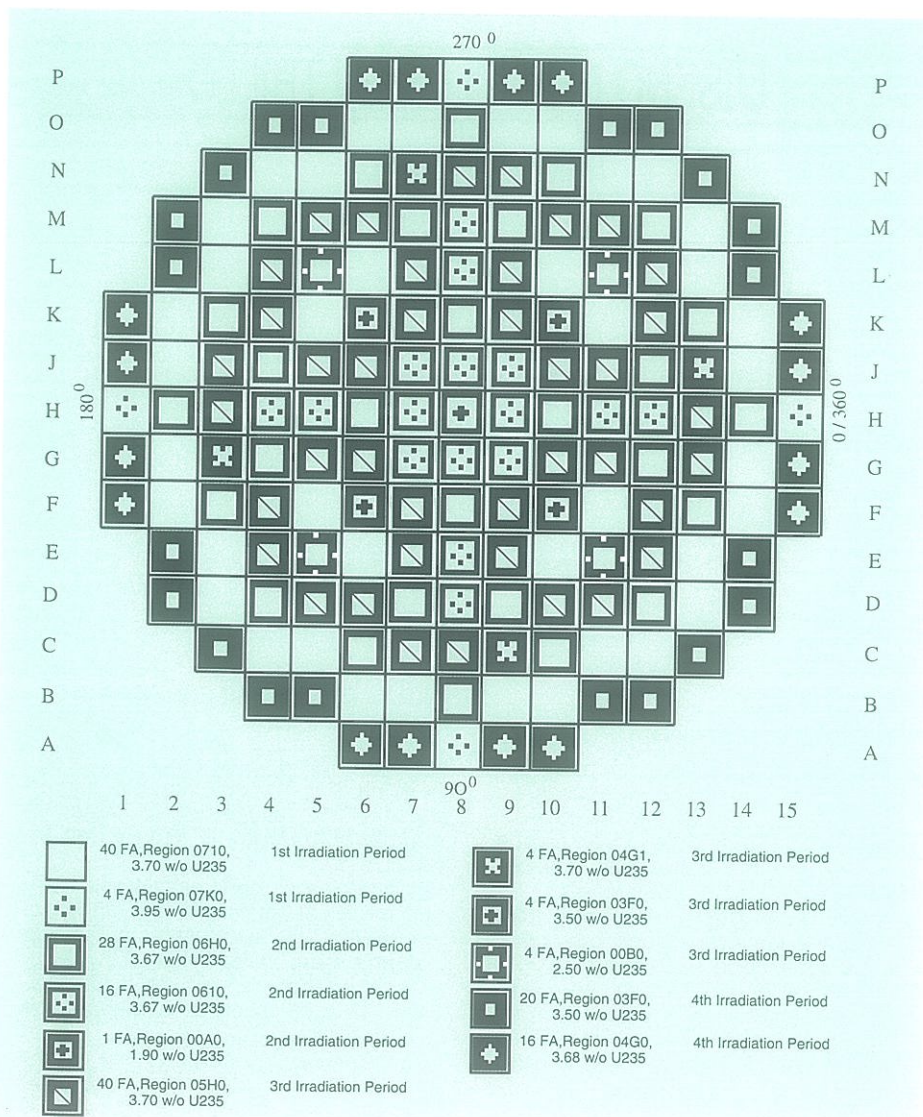
- El almacén de combustible nuevo consta de dos filas enfrentadas de bastidores separadas por un pasillo central. Los ECs se colocan lateralmente, lo que repercute en el tipo de accidente que hay que postular y en el enriquecimiento licenciable.

- Instalación permanente en la piscina de un equipo de sipping y otro de reparación de combustible, acorde

*Manuel NOVO SANJURJO  
Físico por la U. Complutense y  
Diplomado en Ingeniería Nuclear por la  
JEN. Trabaja en Trillo desde 1984 en el  
área de combustible.*

*Arturo LÓPEZ CEDILLO  
Madrid, 1953. En su época aún se hacía  
el Preu y más de un año de mili. Es  
Físico por la U. Complutense (1975) y  
Diplomado en Ingeniería Nuclear por la  
JEN (1981), año en que empezó a  
trabajar en Unión Eléctrica, Unión-  
Fenosa después y, desde 1994, en C.N.  
Trillo A.I.E., siempre en diseño de  
recargas, análisis de accidentes y áreas  
afines. Socio de la SNE.*





CT1, Cycle Z08. Schematic Loading Pattern.

## PARTICULARIDADES DE LAS RECARGAS EN PWR DE SIEMENS

Por comparación con otro tipo de centrales, destacan las siguientes:

- Desde bastante antes del inicio de la operación de Trillo, introducción del gadolinio como veneno integrado estándar (ventajas: eliminación de residuos, flexibilidad de diseño nuclear), en general utilizado para ciclos anuales de bajas fugas totales.

- Desde el principio de la energía nuclear en la RFA, reprocesamiento del combustible y reutilización del plutonio en ECs de óxidos mixtos (MOX).

Las dos características se dan simultáneamente en varias centrales PWR alemanas, por lo que se dispone de productos (ECs y métodos de diseño) muy contrastados en ambas áreas, aunque ninguno de ellos se haya utilizado todavía en Trillo.

- Operación en ciclos anuales. En la RFA, el incentivo de ciclos más largos no es grande, por la buena disponibilidad de las centrales y el alto coste de la energía de reposición: todos los PWR Siemens operan en ciclo anual.

- El espesor máximo de corrosión externa de la vaina es un límite de diseño cuyo cumplimiento se verifica por cálculo para cada nuevo núcleo. El modelo de corrosión tiene un parámetro libre, que depende del material de vaina. La validez del modelo se comprueba midiendo la corrosión de algunos ECs descargados.

## OBJETIVOS Y BASES PARA LA GESTIÓN DE LAS RECARGAS

Son bien conocidos los perjuicios que se derivan de los fallos de ECs (contaminación, dosis, indisponibilidad) por lo que en Trillo se da la mayor importancia al buen comportamiento y fiabilidad del combustible. De este principio básico se sigue el que, conservadoramente, como regla general, no se acepten modificaciones significativas de diseño que no estén bien probadas en otro reactor.

Además, Trillo opera de acuerdo con las siguientes bases y objetivos:

## T I CARACTERÍSTICAS DE LAS RECARGAS DE C.N. TRILLO

| REGIÓN    | Nº EC | w/o <sup>235</sup> U | QUEMADO (Mwd / kg) | TIPO EC / VAINA/ REJILLA       |
|-----------|-------|----------------------|--------------------|--------------------------------|
| 0 (NÚC 1) | 61    | 1,9                  | 22,2               | ESTÁNDAR/ ZRY /NO MEZCLADORA   |
| 0 (NÚC 1) | 68    | 2,53                 | 0,8                | IDEM                           |
| 0 (NÚC 1) | 48    | 3,23                 | 6,1                | IDEM                           |
| 1         | 56    | 3,33                 | 7,3                | ESTÁNDAR/ PCA1 / NO MEZCLADORA |
| 2         | 56    | 3,33                 | 7,6                | IDEM                           |
| 3         | 52    | 3,53                 | 9,2                | IDEM                           |
| 4         | 44    | 3,74                 | 1,4                | FOCUS / PCA2 /MEZCLADORA       |
| 5         | 44    | 3,74                 | 2,3                | IDEM                           |
| 6         | 44    | 3,74                 | 5,0                | FOCUS / DÚPLEX/ MEZCLADORA     |
| 7         | 40/4  | 3,7/3,95             | 45,2 / 47,7        | IDEM                           |

con el principio de operar núcleos sin fallos (véase más abajo)

### • Sistema de limitaciones (YT)

El YT es intermedio entre los sistemas de control (YR) y de protección (YZ), está diseñado con las mismas normas que éste y actúa automáticamente (en general, reduciendo potencia antes de que el YZ produzca el disparo) con prioridad a las acciones manuales del operador en caso de alcanzarse algún límite. El YT, si se producen desviaciones de determinadas variables de seguridad, obliga a que vuelvan a sus valores normales antes de que se alcancen los niveles de actuación del YZ. Entre muchas otras, el YT utiliza las señales de la instrumentación intranuclear que vigila ininterrumpidamente la distribución de potencia: con las señales de los 36 detectores neutrónicos intranucleares, por sí solos o en combinación con otras, se elaboran, por citar solo dos,

un límite cuya finalidad es evitar los fallos por PCI o un límite para la vigilancia del DNBR en 6 niveles axiales. Con este tipo de actuaciones, se facilita la operación y el conocimiento y ajuste de los márgenes de diseño.

T II  
CARACTERÍSTICAS DE LOS CICLOS DE C.N. TRILLO

| CICLO                | DURACIÓN (DEPP)       | ppm boro nat a BOC, eq Xe | OBSERVACIONES               |
|----------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 1                    | 393                   | aprox. 1300               | 68 arañas de borosilicato   |
| 2                    | 294                   | aprox. 1100               | Bajas fugas parciales (BFP) |
| 3                    | 325                   | aprox. 1200               | BFP                         |
| 4                    | 302                   | aprox. 1100               | BFP                         |
| 5                    | 321                   | aprox. 1100               | BFP                         |
| 6                    | 320                   | aprox. 1200               | BFP                         |
| 7                    | 329                   | aprox. 1150               | BFP                         |
| 8                    | 300 (Prevista)        | aprox. 1150               | BFP                         |
| SIGUIENTES (anuales) | aprox. 325 (Prevista) | aprox. 1200               | 3,85 w/o; Bajas Fugas Parc. |
| EQUILIBRIO 18 meses  | aprox. 490 (Prevista) | aprox 1750                | Estrategia estándar (1)     |
| EQUILIBRIO 18 meses  | aprox. 490 (Prevista) | aprox. 1600               | Estrategia "bajo Gd" (2)    |

(1) 68 ECs frescos: 40 con 8 barras de Gd al 7% (4,11% 235U); 28 ECs 4,15% 235U  
(2) 68 ECs frescos, cada uno con 12 barras de Gd al 2% y 4,15% 235U

- Aumento paulatino del quemado de descarga, para disminuir los costes globales del ciclo de combustible y optimar la capacidad de almacenamiento de la piscina.
- Para mantener bajas dosis en operación, se comienza cada ciclo sin elementos defectuosos. Esto obliga, si la radioquímica indica fallo de combustible, a localizar los ECs dañados (sipping húmedo con el equipo permanente en piscina), y rediseñar el núcleo siguiente durante la parada, por las razones antes expuestas.

## ESTRATEGIA ACTUAL: CICLOS DE 12 MESES

Trillo ha operado hasta hoy (ciclo octavo en curso) en ciclos anuales. Salvo el primero, han sido núcleos sin venenos quemables y de bajas fugas parciales. A pesar de no utilizar venenos, se ha llegado a más del 90% de bajas fugas (el grado de bajas fugas es el cociente entre el número de lados de la periferia ocupados por combustible parcialmente gastado y el número total). Se han reinserado sistemáticamente los ECs del primer núcleo. Los ciclos más recientes han sido de unos 300 DEPP, recargas de 44 ECs (1/4 de núcleo) y enriquecimientos del 3,7%. Para aumentar la longitud del ciclo hasta unos 320 DEPP se ha decidido, empezando el ciclo próximo, aumentar el enriquecimiento hasta el 3,85% sin variar lo demás.

El aumento del quemado ha obligado a mejorar los materiales de vaina para mantener el margen al límite de óxido externo, pasándose de zircaloy estándar (núcleo inicial) a zircaloy avanzado con bajo contenido en estaño (ciclos 2 a 6) y, desde entonces, vaina "Dúplex", construida a partir de dos tubos coextrusionados, el interno (90% del espesor total) de zircaloy y el externo, muy resistente a la corrosión, de una aleación de zirconio con contenido de estaño ya fuera de la especificación ASTM.

No hubo fallo de combustible en tres de los siete ciclos concluidos. En los otros, se detectaron en total cinco ECs con fugas. De ellos, en dos campañas, se repararon por Siemens tres, reutilizados después con normalidad, con un total de dos fallos por debris (uno de los cuales afectaba a dos varillas) y un fallo por fabricación de una rejilla. En total se sustituyeron cuatro barras. En ningún caso estuvo próximo el límite de ETFs. Además, se llevaron a cabo tres campañas de medidas de óxido en vaina. Por su potencial importancia para el futuro suministro, mencionemos que, si se cumple el programa actual, Trillo cargará cuatro "DEMOS" de ENUSA en la 9ª recarga.

## POSIBILIDADES PARA EL FUTURO: CICLOS DE 18 MESES

Ya en 1985, Trillo, en colaboración con

Siemens, diseñó un ciclo de 18 meses con bajas fugas totales, óxido de gadolinio y un enriquecimiento de sólo el 3,7%, máximo licenciado entonces, lo que limitaba el ciclo a 443 DEPP para una recarga de 72 ECs.

Muy recientemente, de nuevo con Siemens, se han completado los estudios nucleares y mecánicos para un nuevo ciclo, esta vez de 490 DEPP, 4,15% en 235U y recargas de 68 ECs, 40 con gadolinio (Figura II). La novedad es la opción de "bajo Gd", cargando por EC más varillas de menor concentración de veneno, reduciéndose significativamente las concentraciones de boro. Con cualquier opción, a mayor duración de ciclo, mayor coste de combustible: un 8% anual, aproximadamente, en nuestro caso, parte final del ciclo de combustible excluida.

El EC con gadolinio para un ciclo de 18 meses difiere poco del usado en la RFA para recargas anuales, por lo que el diseño nuclear, salvo la opción de bajo Gd, no supone gran novedad. La diferencia principal con un ciclo anual está en las concentraciones de boro necesarias para el de 18 meses, no solo porque obliguen a subir considerablemente las de tanques y acumuladores, sino porque no se pueden respetar totalmente las recomendaciones de pH para el primario y de concentración máxima de Li para el combustible. Una solución elegante es el empleo de boro enriquecido en 10B, que tiene no obstante los inconvenientes del coste, la relativa falta de experiencia en su uso (aunque al menos dos centrales Siemens están a punto de introducirlo) y el control de calidad suplementario. No se ha tomado aún una decisión definitiva sobre el cambio a 18 meses ni, obviamente, sobre los detalles mencionados.

## CAPACIDAD PROPIA DE DISEÑO DE RECARGAS

- En diseño nuclear, Trillo utiliza los códigos de Siemens (SAV90 sobre estimación de trabajo HP 715; programas

FASER, MEDIUM y PINPOW, fundamentalmente) para:

- controlar el diseño de cada ciclo y proponer alternativas al suministrador
- estudiar independientemente las posibles estrategias a largo plazo
- apoyar la operación de la central
- en su caso, evaluar combustibles de suministradores distintos a Siemens
- producir datos nucleares diversos (para cálculos económicos, para códigos termohidráulicos como COBRA o RELAP5, etc)

- En termohidráulica, en colaboración con PMSA, se ha trabajado (fundamental, aunque no exclusivamente, con RELAP5) en áreas que van del apoyo con cálculos propios al APS a la respuesta a preguntas del CSN, pasando por la formación de operadores o la revisión del Manual de Operación.

Pese a la experiencia acumulada y las herramientas y métodos disponibles, no se ha considerado conveniente hasta ahora diseñar las recargas independientemente del suministrador de combustible, por razones tales como que para licenciar una ingeniería de recargas independiente se necesita una dotación de personal cualificado difícil de justificar para una sola planta, o también porque el fabricante de ECs es el mismo hasta hoy que el suministrador del NSSS.

## RESUMEN

Ante todo, entendemos que, en el caso del combustible, nuestras tres viejas amigas la fiabilidad, la seguridad y la economía, no son variables independientes: un combustible no puede ser económico si no es primero seguro y fiable.

En otro sentido, las características de una central de tecnología única en España dan al diseño de ciclos de Trillo un carácter distintivo que quizá explique el que los autores, después de tantos años en el mismo negocio, aún consigan encontrar en él un interés que confían en haber sido capaces de contagiar al lector.