

# Metodología de Crédito al Quemado para el almacenamiento de elementos combustibles PWR en una piscina de combustible gastado utilizando el código SCALE6.1 (TRITON6 y CSAS6)

V.F. Castro<sup>a</sup> R. Miró<sup>a</sup>, G. Verdú<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Instituto Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM), Universitat Politècnica de València  
Camí de Vera, s/n. 46071, Valencia (España)

[vifacastro@posgrado.upv.es](mailto:vifacastro@posgrado.upv.es), [rmiro@iqn.upv.es](mailto:rmiro@iqn.upv.es), [gverdu@iqn.upv.es](mailto:gverdu@iqn.upv.es)

**SINOPSIS** En este trabajo se ha desarrollado una metodología de Crédito al Quemado para obtener la Curva de Reactividad Equivalente (REC). Esta curva de descarga determina el lugar de almacenamiento de un elemento combustible en una piscina de combustible gastado, a partir de un perfil hipotético de quemado axial, que es más conservador que cualquier perfil real. Se ha utilizado la secuencia de quemado TRITON y de criticidad CSAS6, ambos con el código de transporte KENO-VI, disponibles en el sistema de códigos SCALE6.1.

## 1. INTRODUCCIÓN

Elementos combustibles no irradiados tienen una composición bien definida, lo que proporciona un abordaje sencillo y delimitador para el análisis de seguridad respecto a la criticidad tanto en su transporte como en su almacenamiento [1]. En el pasado, estos análisis de criticidad suponían que los elementos combustibles eran nuevos con un contenido isotópico correspondiente al máximo enriquecimiento posible. Sin embargo, con esta hipótesis se ignoraba el decremento de la reactividad como resultado de la irradiación en el interior del reactor y se torna excesivamente conservadora para altos quemados [2]. El concepto de dar crédito a la reducción de la reactividad por efecto del quemado del elemento combustible se denomina Crédito al Quemado. Esta reducción de la reactividad que surge con el quemado se debe a cambios en la concentración de nucleídos fisionables y la producción de nucleídos absorbentes de neutrones.

El progreso en este campo alcanzado en las últimas décadas ha permitido la publicación de la guía ISG8 (Interim Staff Guidance 8) por la NRC (U.S Nuclear Regulatory Commission). Actualmente se encuentra en la segunda revisión, publicada en 2002 y contiene orientaciones para darse crédito al quemado en el transporte y almacenamiento de toneles. La publicación de tercera revisión, prevista para 2011, se ha retardado debido a la escasez de datos experimentales adecuados y, se presume, va a contemplar orientaciones más completas y actuales para el crédito al quemado [3,4].

Criterios en materia de la análisis de criticidad se han basado en norma 10 CFR 50.68 (Title 10, Code of Federal Regulations, section 50.68) [5] y el memorando [L.I. Kopp, 1998]. Se asume la hipótesis de que la piscina de combustible no ha perdido el boro disuelto en su interior cuando se da Crédito al Boro.

1. Para piscinas BWR o PWR en donde no se dé crédito al boro soluble, los análisis de criticidad cumplirán la siguiente condición que se incorporará a las especificaciones técnicas de planta:
  - a) *En el caso de almacenamientos de combustible gastado, suponiendo el combustible con la máxima reactividad permisible, e inundados con agua no borada en condiciones de máxima densidad, la constante de multiplicación efectiva máxima deberá ser menor que 0.95, incluyendo las incertidumbres mecánicas y de cálculo, con una probabilidad del 95% y un nivel de confianza del 95%.*
2. En el caso de crédito parcial de boro soluble, los análisis de criticidad en PWR cumplirán dos condiciones independientes que se incorporarán en las especificaciones técnicas de planta:
  - a) *En el caso de almacenamiento de combustible gastado, suponiendo el combustible con la máxima reactividad permisible, e inundado con agua no borada en condiciones de máxima densidad, la constante de multiplicación efectiva máxima deberá ser menor que 1, incluyendo las incertidumbres mecánicas y de cálculo, con una probabilidad del 95% y un nivel de confianza del 95%.*
  - b) *En el caso de almacenamiento de combustible gastado, suponiendo el combustible con la máxima reactividad permisible, e inundado con agua borada de concentración  $[c]$ <sup>1</sup> ppm en condiciones de máxima densidad, la constante de multiplicación efectiva máxima deberá ser menor que 0.95, incluyendo las incertidumbres mecánicas y de cálculo, con una probabilidad del 95% y un nivel de confianza del 95%.*

Siguiendo las recomendaciones de la [ISG8R2, 2002], los métodos de análisis de criticidad de seguridad adecuada deben tener en cuenta todas las características neutrónicas y geométricas del lugar de almacenamiento. En particular, los bastidores de almacenamiento que contienen capas de materiales absorbentes de neutrones, o material estructural envenenado (agua borada por ejemplo), necesitan modelos detallados.

Las recomendaciones de la ISG8R2 también requieren la validación de las herramientas de análisis a partir de datos medidos para determinar el sesgo y la incertidumbre adecuados [7]. En este trabajo el sistema de código de SCALE6.1 se utilizó con el fin de obtener detalles de quemado del combustible fresco (concentraciones isotópicas) utilizando TRITON, para su posterior utilización en el análisis de criticidad en la piscina de almacenamiento de combustible gastado, con CSAS6.

## **2. METODOLOGÍA DE CRÉDITO AL QUEMADO**

La metodología consiste en determinar la curva REC que proporciona, basándose en el enriquecimiento inicial del elemento combustible y en su quemado medio ( $e \bar{B}$ ), el lugar de almacenamiento de dicho elemento en la piscina de combustible gastado. Para eso, se hace

---

<sup>1</sup>[c] es la concentración de boro requerida para mantener el límite  $0.95 k_{ef}$  (obtenida sin considerar accidentes).

necesario definir el límite superior subcrítico (LSS) que es el límite que adquiere la constante de multiplicación efectiva en condiciones de seguridad. El LSS se ha determinado con experimentos críticos, utilizados como benchmark, disponibles para el código SCALE6.1 juntamente con sus incertidumbres. Además se tiene que determinar el nivel de confianza estadístico a utilizar en los cálculos del sesgo. Una vez establecido el sesgo y la incertidumbre del sesgo más conservadores, se establece el LSS, que es definido cómo el límite de seguridad para decidir cuándo un sistema es seguro en términos de criticidad.

## 2.1 Determinación del límite superior subcrítico (LSS)

Para una configuración subcrítica dada es necesario tener la confianza de que el cálculo de la constante de multiplicación efectiva del sistema,  $k_{ef}$ , garantice la subcriticidad con un determinado nivel de confianza. Eso implica la determinación de un margen aceptable basado en sesgos e incertidumbres asociadas a los códigos y a los datos utilizados para el cálculo de  $k_{ef}$ . De la definición, el LSS viene dado por:

$$k_s + \Delta k_s \leq k_a = LSS = k_c - \delta k_c - \Delta k_m - \Delta k_{BU} \quad (1)$$

$k_c$  - constante de multiplicación efectiva obtenida por simulación, bajo hipótesis muy conservadoras, del sistema considerado.

$\Delta k_c$  - incertidumbres estadísticas de las técnicas de cálculo y del diseño en la  $k_c$ .

$k_c$  - media de las constantes efectivas de multiplicación de los experimentos *benchmark* utilizando un método de cálculo particular.

$\delta k_c$  - incertidumbre en los experimentos *benchmark*. Deberá incluir tanto la incertidumbre en los experimentos *benchmark* como las incertidumbres en el sesgo que resulte de la extrapolación de estos experimentos al rango de parámetros asociados al diseño del almacenamiento de combustible.

$\Delta k_m$  - margen de subcriticidad bajo las limitaciones de operación (normalmente 0.05).

$\Delta k_{BU}$  - incertidumbre que se incluirá cuando se da crédito al quemado. Tiene en cuenta la incertidumbre asociada a los cálculos de quemado que se han realizado con el fin de obtener las densidades isotópicas de los elementos del combustible gastado, y la debida a la variación axial en el perfil de quemado.

El valor  $k_c$  no tiene porque ser constante respecto al rango de parámetros de interés. Si existiera una tendencia que diera lugar a que los valores de  $k_{ef}$  del *benchmark* variaran con uno o más parámetros (enriquecimiento, energía media de fisión,...), esto obligaría a determinar el sesgo  $\beta = (1 - k_c)$  a partir del mejor ajuste de los valores de  $k_{ef}$  calculados, en función del parámetro de dependencia. Además, la tendencia deberá ser tenida en cuenta si se realiza una extrapolación fuera del rango de validación. El conjunto de experimentos críticos utilizados como *benchmark*

para el cálculo de  $\beta$  se consideran representativos de la composición, configuración y características nucleares del sistema cuyo cálculo de criticidad se describe.

Dos métodos distintos se aplicaron para determinar la incertidumbre en  $\delta k_c$ , con un nivel de confianza de un 95% [Parks, 2003]:

- Método 1: Abordaje de intervalo cerrado uniforme de una cara (Estándar 95/95)
- Método 2: Banda de confianza con un margen administrativo (Estándar 95%)

Los resultados parciales obtenidos para los diferentes grupos de experimentos, utilizando la librería de 44 grupos, aparecen en la tabla XX, donde  $N$  es el número de casos en cada experimento,  $k_c$  es el valor medio de los  $N$  experimentos y  $\delta k_c^{(i)}$ , es la incertidumbre en la determinación del sesgo medio  $\beta = (1 - k_c)$  del método  $i$ , calculadas como tolerancias 95/95.

Experimentos	N	$k_c$	$C_{\alpha P}^{(1)}$	$C_{\alpha P}^{(2)}$	$S_p$	$\delta k_c^{(1)}$	$\delta k_c^{(2)}$
VALSCALE	73	1.0001	1.9656	1.9732	$6.5929 \cdot 10^{-3}$	0.01295904	0.0130092
BORO	24	0.99638	2.3422	2.3956	$3.8532 \cdot 10^{-3}$	0.00902497	0.0092307

Para el conjunto de experimentos estándar para la validación del 6.1, VALSCALE, se obtienen unos valores de  $\beta^{VS}$  y  $\Delta\beta^{VS}$  de:

$$\begin{aligned} \beta^{VS} &= 1 - k_c^{VS} = 1 - 1.0001 = -0.0001 & \Delta\beta^{VS} &= \delta k_c^{VS} = 0.0130092 \\ LSS^{VS} &= 1 - \Delta\beta^{VS} = 1 - 0.0130092 = 0.9869908 & & \text{para } \beta^{VS} < 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Aunque en la CFR, el valor de  $LSS$  tiene en cuenta el sesgo, tanto si es positivo como negativo, en este trabajo, a fin de ser conservadores, no se tiene en cuenta si es negativo.

Para el conjunto de experimentos que contienen boro, BORO, los valores de  $\beta^B$  y  $\Delta\beta^B$  son:

$$\begin{aligned} \beta^B &= 1 - k_c^B = 1 - 0.99638 = 0.00362 & \Delta\beta^B &= \delta k_c^B = 0.0092307 \\ LSS^B &= 0.95 - \beta^B - \Delta\beta^B = 0.95 - 0.00362 - 0.0092307 = 0.9371493 & & \text{para } \beta^B > 0 \end{aligned} \quad (3)$$

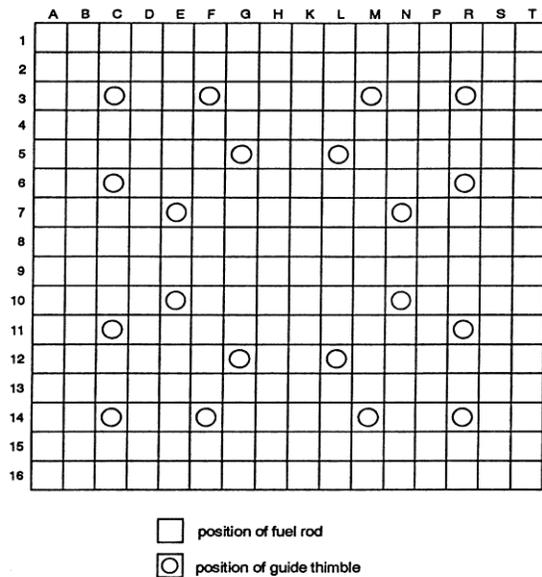
Una vez establecido el sesgo y la incertidumbre del sesgo más conservadores, se establece el  $LSS$ , que es el límite de seguridad para decidir cuándo un almacén es seguro en términos de criticidad.

### 3. METODOLOGÍA DE CRÉDITO AL QUEMADO PARA UN TÍPICO PWR

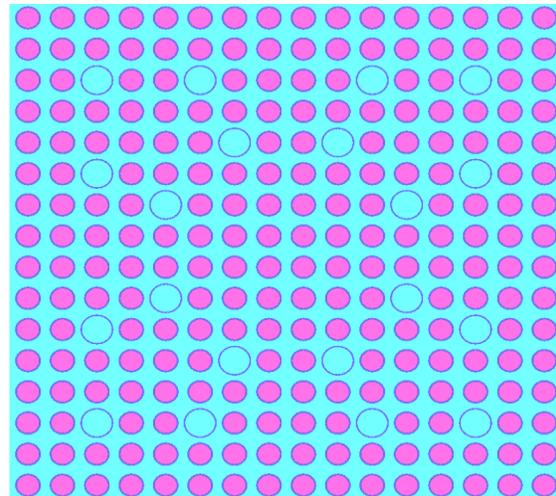
El cálculo del quemado del combustible dentro del sistema SCALE6.1 se realiza con la secuencia TRITON. Su principal empleo ha sido, el cálculo de la isotopía del combustible quemado, para su utilización en subsiguientes análisis de criticidad dando crédito al quemado en el código CSAS6.

#### 3.1 Configuración del combustible

La configuración de los elementos de combustible KWU considerados en el presente estudio aparece en la figura 1. En la figura 2 se presenta el modelo de un elemento combustible utilizado en el código SCALE6.1.



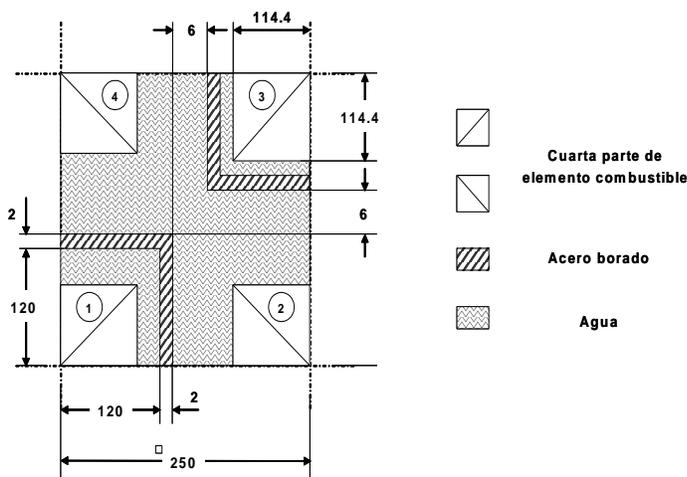
**Figura 1.** Distribución de tubos guía en un elemento combustible.



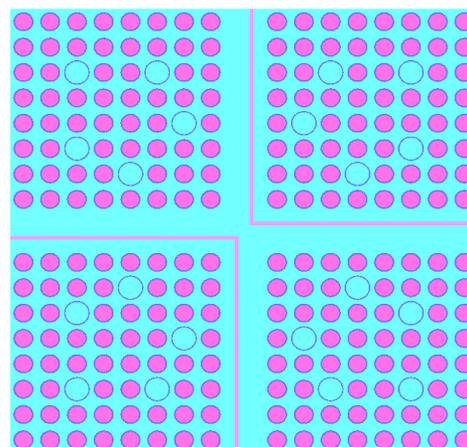
**Figura 2.** Modelo de un elemento combustible en KENO3D.

### 3.2 Configuración de la piscina de combustibles gastados

La piscina de combustible puede modelarse a partir de una **celda base** o **de referencia**, con unas condiciones de contorno de reflexión especular en los ejes XYZ, excepto en el caso de crédito al quemado axial, donde la reflexión será en los ejes X e Y exclusivamente (figura 3 y 4).



**Figura 3.** Esquema del modelo de celda de referencia.



**Figura 4.** Celda de referencia en KENO3D

## 4. METODOLOGÍA DE CRÉDITO AL QUEMADO AXIAL

### 4.1 Introducción

Cuando un elemento combustible se introduce en un reactor PWR, el flujo neutrónico cuasi-senoidal comenzará a quemar más el elemento por la zona central que por los extremos. La forma cuasi-senoidal del flujo es consecuencia de muchos factores, entre ellos, las fugas en los extremos y la concentración de productos de fisión en la parte central del elemento.

Cuando se asume una distribución isotópica axialmente uniforme, la región más reactiva del elemento es el plano medio axial. El flujo neutrónico es menor en los extremos que en la región central, ya que las fugas son mayores en los bordes del elemento. Sin embargo, en realidad, la región más reactiva del combustible gastado se encuentra en los bordes, donde existe un equilibrio entre la reactividad debida al bajo quemado y el incremento de las pérdidas de neutrones por el extremo del combustible.

Para bajos quemados medios, del orden de los 20 GWd/TU, la máxima tasa de fisiones ocurre en el centro axial o cerca de él. La aproximación de quemado axial uniforme distribuye el quemado uniformemente a lo largo de la longitud del elemento. De esta forma, artificialmente se compensa el decremento de reactividad de la zona central con el incremento de los bordes, resultando una configuración más reactiva, y por lo tanto más conservadora, que el perfil real.

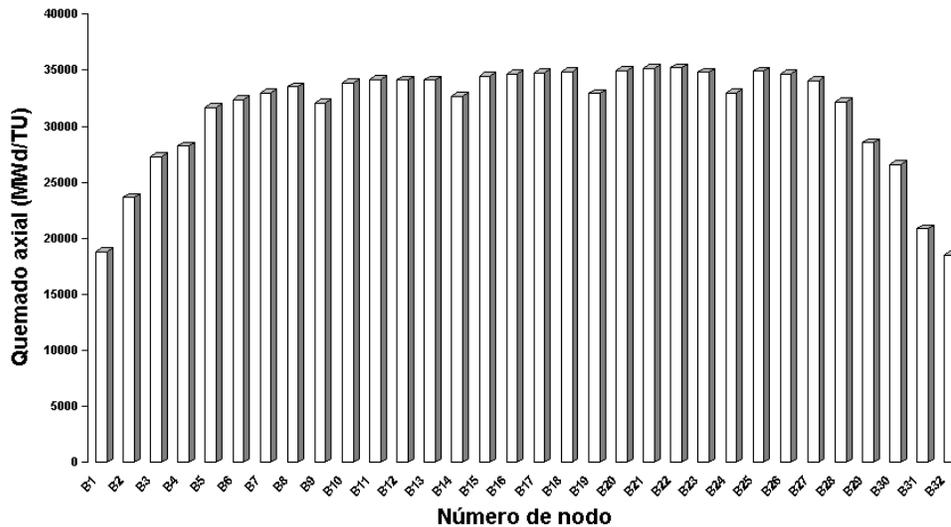
Sin embargo, conforme aumenta el quemado medio, el equilibrio que se obtenía entre la región central y los bordes desaparece, por lo que la hipótesis de quemado uniforme deja de ser conservadora. Se denomina Efecto de Borde (End Effect) al aumento de reactividad en los extremos de un elemento combustible por la disminución del flujo neutrónico debida a las fugas.

Si se quiere aproximar numéricamente la variación isotópica axial es necesario discretizar el perfil de quemado axial por zonas, suponiendo dentro de cada zona un quemado constante. Se define como nodo el punto medio de cada zona.

Las concentraciones isotópicas pueden ser estimadas usando un único cálculo de decaimiento con SAS2H para cada quemado en cada nodo axial. El número y tamaño de las zonas axiales requeridas para tratar apropiadamente las variaciones de quemado axial deben ser determinadas con un estudio paramétrico, aunque siempre será función de la base de datos de perfiles reales existentes. En la presente metodología se consideró, debido a los datos disponibles, que cada perfil se divide en 32 nodos.

En la figura 5 puede observarse un perfil típico del quemado axial de un elemento combustible PWR con 32 nodos, donde el nodo **B1** representa el extremo inferior del elemento y el nodo **B32** el superior.

**Distribución axial de quemado  
para un elemento combustible de un reactor PWR**



**Figura 5.** Distribución de quemado axial para un elemento combustible de un reactor PWR.

## 4.2 Objeto de la metodología

El objeto de la presente metodología es la obtención de un perfil hipotético de quemado axial que, siendo más conservador que el perfil de quemado uniforme para altos quemados y altos enriquecimientos, sea modelado de acuerdo al quemado físico real. Dicho perfil se empleará en el diseño de la Curva de Reactividad Equivalente (*REC*) para la descarga de elementos combustibles en a piscina de combustibles gastados.

Se hicieron cálculos con diferentes configuraciones de perfiles hipotéticos cambiando parámetros de efecto de borde '*k*', que indica cuantos nodos definen cada una de las pendientes del efecto de borde, y de quemado mínimo '*p*', que define el quemado de la pendiente teniendo en cuenta la desviación típica muestral del ajuste de la nube de puntos para uno de los nodos. Se ha elegido grupos de quemado de 28, 34 y 40 GWd/TU con un enriquecimiento inicial de 3.7%.

Utilizando la metodología de Wilks a 95/95 se ha obtenido la  $k_{ef}$  de perfiles reales dentro de los rangos de quemado elegidos. La  $k_{ef}$  más conservadora será el límite de tolerancia, a cual se va comparar con los perfiles hipotéticos estudiados.

Los resultados de los perfiles hipotéticos y el perfil real más conservador para cada grupo de quemado medio siguen en las tablas 1 a 4 abajo:

**Tabla 1:** Valores de la  $k_{ef}$  para los perfiles simétrico, asimétrico izquierda y derecha con un quemado medio de 28 GWd/TU.

Parameter k	Parameter p	Symmetric	Left asymmetric	Right asymmetric
5	0	$0.94593 \pm 0.00104$	-	-
	1	$0.95075 \pm 0.00088$	$0.94891 \pm 0.00098$	$0.95008 \pm 0.00096$
	2	$0.95266 \pm 0.00099$	$0.95062 \pm 0.00088$	$0.95342 \pm 0.00092$
	3	$0.95638 \pm 0.00095$	$0.95148 \pm 0.00086$	$0.95544 \pm 0.00103$
	4	$0.95870 \pm 0.00088$	$0.95538 \pm 0.00096$	$0.95771 \pm 0.00107$
	5	$0.95721 \pm 0.00098$	$0.95798 \pm 0.00100$	<b><math>0.96118 \pm 0.00098</math></b>
7	7	-	$0.96030 \pm 0.00113$	-

**Tabla 2:** Valores de la  $k_{ef}$  para los perfiles simétrico, asimétrico izquierda y derecha con un quemado medio de 34 GWd/TU.

Parameter k	Parameter p	Symmetric	Left asymmetric	Right asymmetric
5	0	$0.91104 \pm 0.00094$	-	-
	1	$0.91322 \pm 0.00133$	$0.91071 \pm 0.00104$	$0.90838 \pm 0.00103$
	2	$0.91266 \pm 0.00095$	$0.91130 \pm 0.00092$	$0.91363 \pm 0.00093$
	3	$0.91586 \pm 0.00095$	$0.91114 \pm 0.00094$	$0.91513 \pm 0.00101$
	4	$0.91655 \pm 0.00109$	$0.91541 \pm 0.00084$	$0.91880 \pm 0.00099$
	5	$0.91895 \pm 0.00096$	$0.91586 \pm 0.00085$	<b><math>0.92034 \pm 0.00104</math></b>
7	7	-	$0.91962 \pm 0.00091$	-

**Tabla 3:** Valores de la  $k_{ef}$  para los perfiles simétrico, asimétrico izquierda y derecha con un quemado medio de 40 GWd/TU.

Parameter k	Parameter p	Symmetric	Left asymmetric	Right asymmetric
5	0	$0.87480 \pm 0.00093$	-	-
	1	$0.87652 \pm 0.00154$	$0.87583 \pm 0.00084$	$0.87825 \pm 0.00095$
	2	$0.88129 \pm 0.00092$	$0.87392 \pm 0.00092$	$0.87835 \pm 0.00104$
	3	$0.88181 \pm 0.00085$	$0.87489 \pm 0.00093$	$0.88301 \pm 0.00139$
	4	$0.88352 \pm 0.00120$	$0.87745 \pm 0.00106$	<b><math>0.88498 \pm 0.00132</math></b>
	5	$0.88213 \pm 0.00098$	$0.87563 \pm 0.00087$	$0.88370 \pm 0.00119$
7	7	-	$0.87938 \pm 0.00108$	-

**Tabla 4:** Valores de le  $k_{ef}$  de perfiles reales más conservadores para los diferentes rangos de quemado

	28 GWd/TU	34 GWd/TU	40 GWd/TU
Perfil real	$0.95342 \pm 0.00089$	$0.91545 \pm 0.00082$	$0.87721 \pm 0.00090$

Como se observa de los análisis, se comprueba que el perfil asimétrico por la derecha proporciona una criticidad mayor que el perfil asimétrico por la izquierda, para casi la totalidad de los casos. Los resultados obtenidos tanto con el perfil simétrico como con el asimétrico por la derecha son muy parecidos. Aunque muchos de los perfiles estudiados superan el límite de tolerancias fijado por los perfiles reales, se ha escogido un perfil que, además, modele correctamente la fenomenología física del quemado. Además, por lógica el perfil asimétrico derecha proporcionará una  $k_{ef}$  mayor que el simétrico. A continuación se comparan los límites de tolerancia (perfiles reales) con los valores para dicho perfil.

- Quemado medio de 28 GWd/TU  $k_{ef}^{p=5}(28) = 0.96118 > 0.95342$
- Quemado medio de 34 GWd/TU  $k_{ef}^{p=5}(34) = 0.92034 > 0.91545$
- Quemado medio de 40 GWd/TU  $k_{ef}^{p=5}(40) = 0.88370 > 0.87721$

Como conclusión, se tomará como perfil conservador, el perfil p=5 asimétrico derecha. Como puede observarse, las  $k_{ef}$  del perfil hipotético son fuertemente conservadoras.

## 5. CURVA DE DESCARGA

La obtención de la curva REC sigue la misma metodología de todo el trabajo y se realiza de acuerdo a un análisis de isotopía y de criticidad. Para cada enriquecimiento inicial se modela la evolución isotópica del combustible con el quemado, mientras que con el sistema de códigos SCALE6.1 se analiza la evolución de la constante de multiplicación efectiva  $k_{ef}$  con diferentes quemados. Una vez añadidas las incertidumbres debidas al código y al modelo se obtiene el quemado mínimo que cumple con el criterio de permanencia en la piscina.

Cuando un elemento combustible tiene que ser almacenado en la piscina, se utiliza su enriquecimiento inicial y su quemado medio para escoger la región donde ha de ser almacenado. Todos los puntos de la curva REC pertenecen a un mismo valor de  $k_{ef}$  correspondiente al valor del límite superior subcrítico ( $LSS$ ), obtenido de la validación del sistema de códigos SCALE6.1, por lo que los puntos REC son valores limitantes en cuanto a seguridad.

### 5.1 Curva REC para quemado uniforme y para quemado con el perfil más conservador.

El cálculo de la curva REC en condiciones de quemado uniforme se ha realizado para diferentes enriquecimientos en  $^{235}U$ . En los modelos empleados para quemado uniforme en el cálculo de criticidad, se asume que la geometría se extiende de forma infinita en las tres dimensiones, XYZ. Se han ejecutado diferentes casos, calculando, en primer lugar, la isotopía del combustible para cada quemado medio uniforme. Posteriormente, se introduce la isotopía en la secuencia de criticidad para calcular la reactividad para esa combinación de quemado medio y enriquecimiento inicial.

De acuerdo con lo que ha sido calculado anteriormente, del resultado de la validación se obtuvieron unos valores de  $\beta^{VS}$  y  $\Delta\beta^{VS}$  de

$$\beta^{VS} = 1 - k_c^{VS} = 1 - 1.0001 = -0.0001 \quad \Delta\beta^{VS} = \delta k_c^{VS} = 0.0130092$$

Como el límite superior subcrítico ( $LSS$ ) es una función que depende de cada uno de los modelos ejecutados, el límite subcrítico se descompone en cada uno de sus factores, de forma que la inequación queda como

$$k_s + 2\sigma^{MC} + \Delta k_{BU} \leq 1 - \Delta\beta^{VS} = 0.9869908 \quad (4)$$

- $\sigma^{MC}$  - es la desviación típica de Monte Carlo.
- $k_s$  - es el valor de  $k_{ef}$  dando crédito al quemado.
- $\Delta k_{BU}$  -  $0.05 \cdot (k_{nuevo} - k_s)$ , según la normativa [2].

El sesgo  $\beta^{VS}$  no se ha incorporado en la inecuación a fin de ser conservadores.

Los puntos de la REC de descarga se obtienen a partir de los puntos *REC* de corte que corresponden al límite conservador de las curvas ( $k_{ef} X$  quemado), con un 95/95, para cada uno de los enriquecimientos escogidos.

## 6. CONCLUSIONES

Cuando aumenta el enriquecimiento inicial de un elemento combustible, dar crédito al quemado uniforme deja de ser una hipótesis conservadora para altos quemados. En este informe se recoge la metodología mediante la cual, se obtiene un perfil de quemado axial conservador, para la obtención de la curva *REC* de descarga.

En primer lugar, y a partir de los perfiles de quemado reales, se ha definido un perfil teórico conservador, comprobándose, para diferentes grados de quemado y diferentes enriquecimientos, que dicho perfil teórico resulta más limitante en términos de criticidad que cualquiera de los perfiles reales medidos. Además, se ha observado que dicho perfil presenta una dependencia con el enriquecimiento igual a la del perfil de quemado uniforme.

Se considera que la metodología expuesta permite llevar a cabo de forma conservadora el tratamiento de los perfiles axiales de quemado aplicables a análisis de criticidad.

## REFERENCIAS

- [1] U.S. Nuclear Regulatory Commission Interim Staff Guidance 8 – Revision 2, *'Burnup Credit in the Criticality Safety Analyses of PWR Spent Fuel in Transport and Storage Casks'*. Nuclear Regulatory Commission. 2002
- [2] J.C. Wagner, M.D. DeHart, *'Review of Axial Burnup Distribution Considerations for Burnup Credit Calculations'*. Oak Ridge National Laboratory. March 2000.
- [3] A. Machiels, *'Burnup Credit Methodology - Spent Nuclear Fuel Transportation Applications'*. Electric Power Research Institute (EPRI). Report. 2010.
- [4] C.V. Parks, et. al., *'Full Burnup Credit in Transport and Storage Casks: Benefits and Implementation'*. American Nuclear Society 2006 International High-Level Radioactive Waste Management Conference. April 30 – May 4, 2006. Las Vegas, Nevada.
- [5] 10 CFR 50.68, *'Criticality Accident Requirements'*. U.S. Nuclear Regulatory Commission
- [6] NRC memorandum from L. I. Kopp to T. Collins, *'Guidance on the Regulatory Requirements for Criticality Safety Analysis of the Fuel Storage at Light-Water Reactor Plants'*, U. S. Nuclear Regulatory Commission. Agosto 1998.
- [7] C.V. Parks. *'Recommendations for PWR Storage and Transportation Casks That Use Burnup Credit'*. 2003 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, "Progress Through Cooperation". March 30 – April 2, 2003. Las Vegas, Nevada.