

## Incorporación de la variación de la conductividad con el quemado en el código de estabilidad predictivo LAPUR

A. Escrivá<sup>1</sup>, J.L. Muñoz-Cobo<sup>1</sup>, R. Merino<sup>1</sup>, J. Melara<sup>2</sup>, M. Albendea<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Ingeniería Energética

(Universitat Politècnica de València, Camino de Vera s/n, 46022 València)

Tlfn: 963877631, Email: aescriva@iqn.upv.es

<sup>2</sup>Iberdrola Generación

C/Tomás Redondo 1 28033 Madrid

**Resumen** – En el campo de la seguridad nuclear, el análisis de la estabilidad de los reactores de agua en ebullición supone uno de los mayores retos para los investigadores. Para estos cálculos se puede utilizar el código LAPUR que permite obtener los parámetros de estabilidad de la planta (Decay Ratio y Frecuencia), siendo este uno de los programas utilizados por IBERDROLA. Con la colaboración del grupo de investigación TIN de la Universidad Politécnica de Valencia, se ha incorporado un modelo de pérdida de conductividad del uranio con el quemado a LAPUR. Esta actualización permite que se reproduzca el fenómeno de forma más realista. Esta mejora se ha validado y verificado contrastando los resultados con valores de referencia.

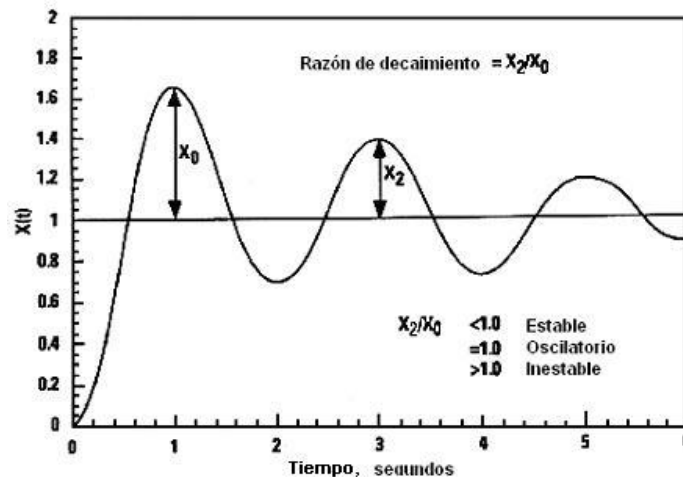
### 1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la seguridad nuclear, el análisis de la estabilidad de los reactores de agua en ebullición supone uno de los mayores retos para los investigadores. Para estos cálculos se puede utilizar el código LAPUR [1], una herramienta predictiva de parámetros de estabilidad (Decay Ratio y Frecuencia) para reactores de agua en ebullición, siendo este uno de los programas utilizados por IBERDROLA. Para el grupo IBERDROLA, la mejora y actualización de los programas informáticos utilizados para simulación son una prioridad. Con la colaboración del grupo de investigación TIN de la Universidad Politécnica de Valencia, se ha incorporado un modelo de pérdida de conductividad del uranio con el quemado a LAPUR. Esta actualización permite que se reproduzca el fenómeno de forma más realista. LAPUR es un código predictivo de gran velocidad de procesamiento que consta de dos módulos: uno encargado del cálculo del estado estacionario y otro que, trabajando en el campo de la frecuencia, realiza los cálculos correspondientes al transitorio. La incorporación del modelo de la variación de la reactividad del núcleo con el quemado del combustible ha afectado a los 2 módulos de LAPUR y se ha introducido como una opción de cálculo. Se ha validado y verificado la opción de cálculo implementada contrastando los resultados con valores de referencia.

### 2. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE ESTABILIDAD EN REACTORES BWR

El parámetro que se utiliza para medir la estabilidad es la razón de decaimiento o "Decay Ratio" (DR).

Los dos métodos básicos empleados para evaluar el DR a partir de una señal neutrónica se basan en la respuesta de impulso obtenida de un modelo autoregresivo o de la función de autocorrelación de dicha señal. Para estos métodos el DR se determina mediante el cálculo del cociente entre dos máximos consecutivos de estas funciones.



**Figura 1. Representación del “Decay Ratio”**

El DR del núcleo de un BWR, matemáticamente puede obtenerse mediante códigos de cálculo analíticos en el dominio de la frecuencia (LAPUR, FABLE, ODYSY, STAIF) o en el dominio de tiempos (TRAC-GE, RAMONA, SIMULATE-3K, ...). Si el valor obtenido es inferior a la unidad,  $DR < 1$ , el núcleo sería estable: si se le sometiera a una perturbación, la potencia oscilaría de manera amortiguada hasta un nuevo estado estacionario final.

### 3. BREVE DESCRIPCIÓN DEL CÓDIGO LAPUR

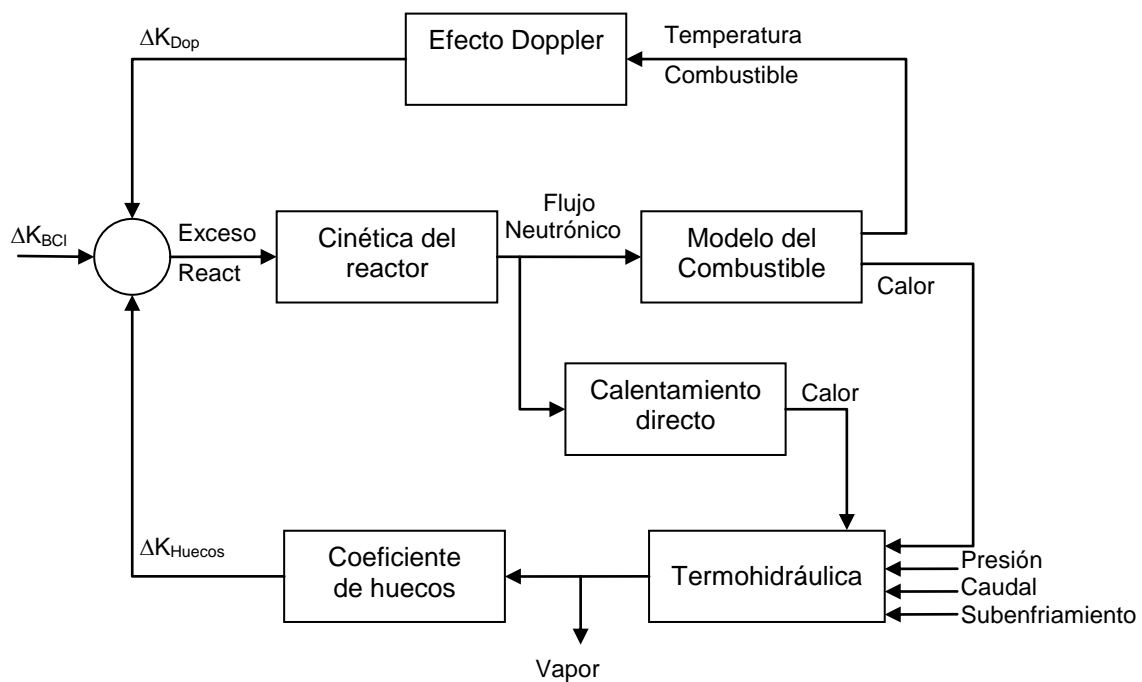
Uno de los códigos que se emplea para el cálculo de los parámetros que definen la estabilidad operacional de un BWR es el LAPUR [1]. Consta de dos módulos: LAPURX, que calcula las condiciones termohidráulicas en estado estacionario, y LAPURW, que calcula la razón de amortiguamiento o “decay ratio” en el dominio de la frecuencia, utilizando cinética puntual.

En los reactores BWR tenemos dos lazos dinámicos que están interaccionando: el lazo dinámico y el lazo termohidráulico. El acople entre estos dos lazos se debe al fluido refrigerante-moderador, ya que la moderación neutrónica depende de la densidad del moderador. En la figura 1 mostramos el esquema de la interrelación entre los mecanismos físicos que gobiernan la respuesta dinámica de un reactor BWR. Como se puede observar, las perturbaciones de reactividad tienen dos vías de entrada, por actuación de las barras de control o por variación de los parámetros del refrigerante como la presión, el caudal o el subenfriamiento del agua de alimentación. Cualquiera de estas perturbaciones da lugar a una variación en la población neutrónica que varía la fracción de huecos en el núcleo que, a su vez, afecta a la población neutrónica. Los parámetros más importantes que afectan a la estabilidad de un núcleo son los coeficientes de reactividad por huecos, la longitud de la zona de ebullición, la velocidad de los huecos y la constante de tiempo del combustible.

Otro mecanismo que añade reactividad por realimentación negativa al núcleo es la debida al efecto Doppler. Este efecto se debe a la dependencia con la temperatura que presenta la absorción neutrónica del U-238 presente en el combustible. La magnitud de la reactividad Doppler es pequeña comparada con la reactividad por huecos, pero su inmediatez la hace importante en los transitorios.

En el código LAPUR, los elementos combustibles que forman el núcleo se agrupan en “canales”. En este código, el núcleo se ve como un grupo de canales paralelos por los

que circula el agua y refrigera las fuentes de calor en forma de varillas de combustible. En los canales podemos tener tres regiones a lo largo de un canal. Siguiendo la dirección del flujo tendremos en la parte inferior la región de no-ebullición, a continuación la región de ebullición sub-enfriada, y en la parte superior del canal la región de ebullición completa. Los plenos inferior y superior del núcleo son comunes para todos los canales y nos suministran el acople hidrodinámico de los canales.



**Figura 2. Esquema de la dinámica de un reactor BWR.**

Para obtener la estabilidad en cada canal del reactor necesitamos conocer la respuesta de la caída de presión a lo largo de los canales para las perturbaciones de:

- caudal de entrada  $\delta y_{en}$ ,
- temperatura de entrada  $\delta T_{en}$ , y
- calor generado en el combustible  $\delta q$ .

El conocimiento de esta respuesta nos permite, por medio de los coeficientes de reactividad por densidad adecuados, determinar las funciones de transferencia de reactividad por realimentación.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE LA VARIACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD CON EL QUEMADO EN EL CÓDIGO LAPUR

Después de realizar una exhaustiva búsqueda bibliográfica de los diferentes modelos que representa la variación de la conductividad con el quemado, se ha decidido implementar un modelo basado en el NFI (Nuclear Fuels Industries) [2] actualizado. Este modelo es aplicable para pastillas de combustibles con una densidad teórica del 95%. El modelo NFI es similar a otros modelos que nos dan la conductividad térmica del combustible, está formado por un término principal que es inversamente proporcional a una función que depende de la temperatura  $A+BT$  (término fonón<sup>1</sup>), con factores dependientes del quemado en el denominador, más términos que modelan la contribución electrónica a la transferencia de calor a altas temperaturas.

El modelo implementado también considera la presencia de gadolinio. La adición de gadolinia ( $Gd_2O_3$ ) junto con el combustible proporciona un veneno consumible para el control de los picos de potencia (exceso de reactividad) en los elementos combustibles al principio de su vida. La adición suele ser inferior a un 10 %wt. La presencia de gadolinia en el combustible no irradiado afecta a su conductividad térmica ya que afecta a la red cristalina y el modo de transferencia de calor fonónico. Para tener en cuenta este efecto se ha decidido utilizar Massih y colaboradores (1992) quienes introdujeron un nuevo término en el denominador.

La expresión finalmente implementada en el código LAPUR para una densidad teórica del 95% ha sido:

$$K_{95} = \frac{1}{A + BT + f(Bu) + (1 - 0.9 \exp(-0.04Bu))g(Bu)h(T) + a \cdot \text{gad}} + \frac{E}{T^2} \exp(-F/T)$$

donde

- $K_{95}$  = Conductividad térmica para una densidad teórica del 95% [W/m K]
- $T$  = Temperatura [K]
- $Bu$  = Quemado [GWd/MTU]
- $f(Bu)$  = Efecto de los productos de fisión en la red cristalina =  $0.00187 \cdot Bu$
- $g(Bu)$  = Efectos de los defectos de irradiación =  $0.038 \cdot Bu^{0.28}$
- $h(T)$  = Dependencia de la temperatura en el recocido (calentamiento y enfriamiento) con defectos de irradiación  $\frac{1}{1 + 396e^{-Q/T}}$
- $\text{gad}$  = porcentaje en peso de gadolinia
- $A$  = 0.0452 m K/W
- $a$  = 1.1599
- $B$  = 2.46E-4 m/W
- $C$  = 5.47E-9 W/m K<sup>3</sup>
- $D$  = 2.29E14 W/m K<sup>5</sup>
- $E$  = 3.5E9 W K/m

<sup>1</sup> Un fonón es una cuasipartícula o modo cuantizado vibratorio que tiene lugar en redes cristalinas como la red atómica de un sólido. El estudio de los fonones es una parte importante en la Física del estado sólido debido a que desempeñan una función muy importante en muchas de sus propiedades físicas, incluidas las conductividades térmica y eléctrica.

$$F = 16361 \text{ K}$$

$$Q = 6380 \text{ K}$$

A continuación se aplica una corrección para tener en cuenta la densidad real que se considere en el combustible:

$$K = 1.0789 \cdot K_{95} \frac{d}{1.0 + 0.5(1.0 - d)}$$

Siendo

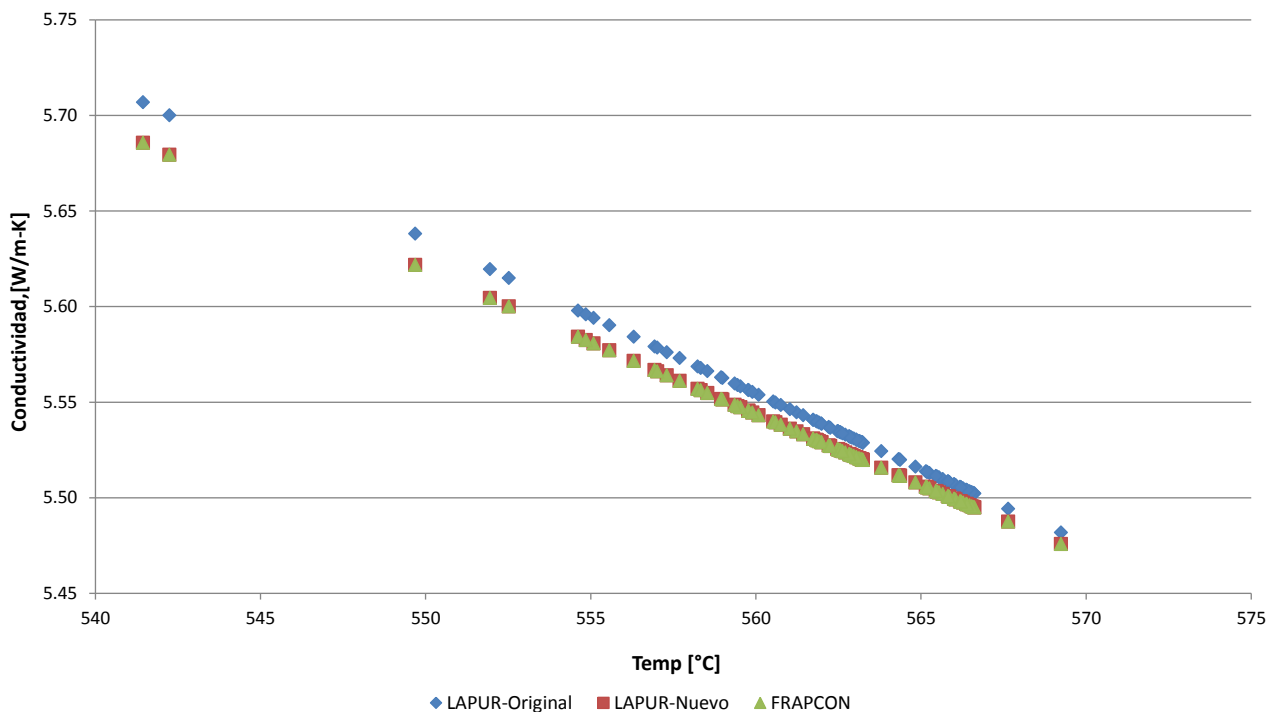
d= relación de densidades del combustible.

#### 4.1. Verificación y validación del modelo de quemado

Para verificar y validar el modelo se ha comparado los resultados de conductividad obtenidos con el código LAPUR sin considerar el efecto del quemado y considerando el efecto del quemado. También se han comparado estos resultados con los valores que obtiene un código para analizar combustibles, el FRAPCON [3].

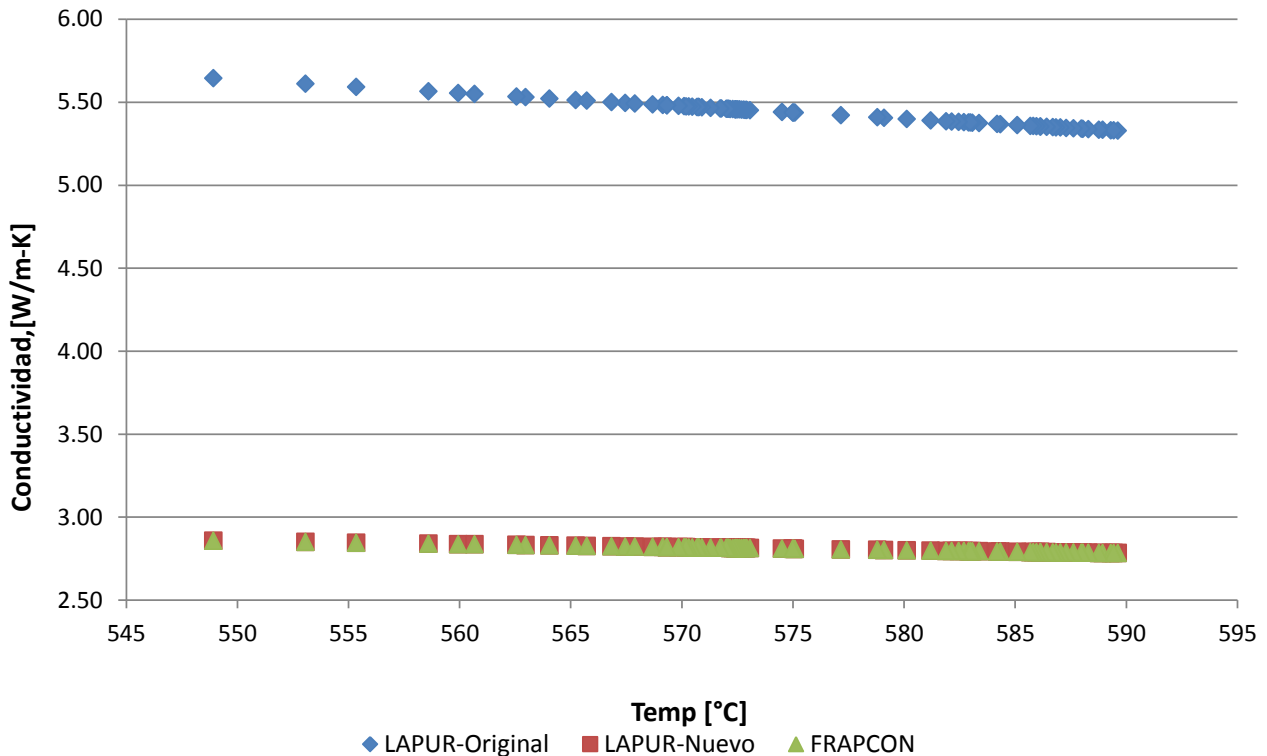
En las figuras 1 y 2 se muestran dos canales uno con quemado cero y otro con quemado de 44 GWD/mT, respectivamente.

Cuando no consideramos quemado se aprecian ligeras diferencias entre la correlación original del LAPUR y la nueva correlación implementada. Sin embargo los valores obtenidos con FRAPCON son similares a los obtenidos con LAPUR utilizando la nueva correlación.



**Figura 1. Conductividad con el quemado en función de la temperatura para un canal sin quemado.**

Cuando se considera el quemado, figura 2, se aprecian grandes diferencias entre la correlación original del LAPUR y la nueva correlación implementada. Pero, como también ocurría en el ejemplo anterior, los valores obtenidos con FRAPCON son similares a los obtenidos con LAPUR utilizando la nueva correlación. En esta figura se aprecia claramente la degradación de la conductividad con el quemado.



**Figura 2. Conductividad con el quemado en función de la temperatura para un canal con un quemado de 44 GWD/mT.**

Como conclusión podemos decir que la nueva correlación para considerar el efecto del quemado en la conductividad del combustible está correctamente implementada en el código LAPUR, y tiene un efecto apreciable a medida que el quemado aumenta.

## 5. EFECTO EN LA ESTABILIDAD DE LA NUEVA CORRELACIÓN

Para ver el efecto del quemado en los parámetros de estabilidad se han ejecutado 3 casos diferentes. En el primero se considera que los canales del núcleo tienen 4 quemados diferentes, entre 0 y 44 GWD/mT. En el segundo considera que el combustible es fresco. En el tercero se ha supuesto que todo el combustible tiene el mismo quemado 15 GWD/mT. En la tabla 1 se muestran los resultados obtenidos.

Caso	LAPUR 6.1.r1 Sin considerar el quemado		LAPUR 6.1.r1	
	DR	FREQ	DR	FREQ
1	0.88	0.45	0.77	0.44
2	0.55	0.44	0.55	0.44
3	0.55	0.44	0.49	0.44

**Tabla 1. Comparativa de los valores de parámetros de estabilidad obtenidos sin considerar y considerando el quemado**

El análisis de los resultados muestra que cuando se considera que no hay quemado los resultados, al utilizar la nueva correlación, son los mismos que se obtenían en la versión anterior de LAPUR (caso 2).

En cambio, para los otros dos casos, la inclusión de factores de quemado no nulos provoca una reducción del valor de los parámetros de estabilidad respecto al método utilizado en la versión anterior del LAPUR. Se aprecia una reducción entre el 0.06 y el 0.11 en el valor de la DR, permaneciendo la frecuencia prácticamente constante. Es decir, que la gran variación de conductividad que se produce al considerar el quemado (ver figura 2) da lugar a una reducción significativa del valor de la DR.

## 6. CONCLUSIONES

En los cálculos de estabilidad que se estaban realizando con el código LAPUR no se estaba considerando el efecto que tiene el quemado en la conductividad del combustible. Se ha realizado una exhaustiva búsqueda bibliográfica para ver cuál era el modelo más adecuado para implementarlo en el código LAPUR. Una vez seleccionado se ha analizado los valores de conductividades obtenidos considerando quemado y sin considerarlo. Estos valores se han verificado y validado con comparándolos con valores de referencia obtenidos del código FRAPCON.

Se ha visto que considerar el quemado hace que el valor de la conductividad del combustible varíe significativamente.

A continuación se han estudiado 3 casos con el código LAPUR considerando diferentes quemados. Los resultados muestran que al considerar el efecto del quemado en la conductividad el valor de la DR disminuye apreciablemente (entre 0.06 y 0.11) mientras que el valor de la frecuencia no varía.

## REFERENCIAS

- [1] A. Escrivá, J.L. Muñoz Cobo, J. Melara, M. Albendea, J. March-Leuba. "LAPUR 6.0 User's Manual". NUREG/CR-6958. 2007.
- [2] K.Ohira, N. Itagaki. "Thermal Conductivity Measurements of High Burnup UO2 Pellet and a Benchmark Calculation of Fuel Center Temperature," em Proceedings of the ANS International Topical Meeting on LWR Fuel Performance, pp. 541-549. March 2-6, 1997, Portland, Oregon. 1997.

- [3] D. D. Lanning, C. E. Beyer, K.J.Geelhood. “FRAPCON-3 Updates, Including Mixed-Oxide Fuel Properties”. NUREG/CR-6534. 2005