

## CÁLCULO “BEST-ESTIMATE” DE LA CAPA DE ÓXIDO EN COMBUSTIBLES TIPO MTR CON EL CÓDIGO CITVAP

**Carlos Pavón, Ignacio Mochi, Alicia Doval y Eduardo Villarino**

*División de Ingeniería Nuclear, INVAP SE, San Carlos de Bariloche, cpavon@invap.com.ar, imochi@invap.com.ar, doval@invap.com.ar, men@invap.com.ar, <http://www.invap.com.ar/>*

**Palabras Clave:** Capa de óxido, Al 6061, Combustible, MTR, CITVAP, FLUX.

**Resumen.** La formación de una capa de óxido en los elementos combustibles tipo MTR es un problema operativo a tener en cuenta en el diseño de reactores de investigación de alta performance. Si bien esta capa de óxido no representa un problema de seguridad nuclear, debe tenerse en cuenta ya que alcanzado un cierto espesor, la misma comienza a desprenderse pudiendo dañar la integridad de la vaina.

Esta capa de óxido se calcula con correlaciones que integran información de la neutrónica y termo-hidráulica del núcleo, además de las condiciones de la química del agua refrigerante y condiciones operativas del elemento combustible.

Hasta el presente este cálculo se realiza de manera conservativa, pero el diseño cada vez más exigente de la performance de los reactores, lleva a la necesidad de contar con una herramienta que permita una predicción más realista (best-estimate) de la mencionada capa.

El método de cálculo neutrónico de reactores utilizado por INVAP se encuentra en permanente desarrollo buscando mejorar las opciones de cálculo disponibles para el usuario. Como parte de dicho proceso, a partir de la versión de CITVAP v3.8 y su pos-procesador, FLUX v2.7, se ha implementado una opción que permite al usuario estimar, de manera más realista el espesor de la capa de óxido formada sobre las placas con vaina de aluminio para elementos combustibles tipo MTR.

La correlación utilizada para calcular el espesor de la capa de óxido tiene en cuenta parámetros diversos durante la operación del reactor como ser: la potencia generada en la placa combustible, las condiciones termo-hidráulicas de la vaina combustible, así como las condiciones de la química del agua.

El código CITVAP calcula la generación de potencia en todo el núcleo y la temperatura del refrigerante, de la vaina y del combustible, (pudiéndose incluir o no la realimentación termo-hidráulica en el cálculo neutrónico por la variación de dichos parámetros).

El código y la nueva opción implementada permiten realizar una evaluación de cada elemento combustible en la región más exigida térmicamente durante toda su estadía en el reactor, desde la inserción del elemento combustible fresco en el núcleo hasta su extracción. Con esta información y la correlación adecuada se puede estimar el crecimiento de la capa de óxido en cada combustible.

Toda esta realimentación entre las distintas ingenierías involucradas, incluyendo la operación del reactor, permiten la automatización y simplificación del cálculo tomando en cuenta las condiciones locales del combustible a medida que el reactor opera en vez de una envolvente que si bien es conservativa resulta útil a los fines del diseño.

El objeto de esta nueva opción de cálculo radica en la obtención de un valor más preciso para el espesor de la capa de óxido en función de los parámetros locales que gobiernan el fenómeno.

Como parte de este trabajo se presenta un modelo de núcleo y elemento combustible genéricos y los resultados obtenidos para corroborar la correcta implementación de la nueva opción en el proceso de verificación. También se presentará un análisis práctico para el núcleo y elemento combustible del RA-10.

## 1 INTRODUCCIÓN

El código neutrónico de INVAP, CITVAP (Mochi, 2011), y su pos-procesador, FLUX (Mochi, 2011), tienen la capacidad de calcular el espesor de la capa de óxido formada en las paredes de la vaina de un elemento combustible utilizando la correlación provista por Kim (2008). Esta correlación es la que se utiliza hoy en día para calcular el espesor de la capa de óxido.

Para ello el post procesador extrae de la base de datos generada por CITVAP los parámetros termo-hidráulicos necesarios (temperatura de pared, flujo calórico y velocidad del refrigerante) y demanda al usuario el pH del refrigerante.

La correlación utilizada exige tanto que el paso de tiempo de CITVAP sea de un día así como la adición de una tarjeta termo-hidráulica dentro del input. Esta tarjeta incluye las características geométricas del elemento combustible, conductividades térmicas, velocidad del refrigerante, altura de la columna de agua sobre el núcleo, temperatura de entrada del refrigerante, dirección del caudal, criterios de convergencia, criterios para la nodalización del modelo y por último parámetros para el tratamiento de las incertezas de modo estadístico.

A fin de realizar la verificación de la nueva funcionalidad de CITVAP y FLUX se recurrió a un núcleo teórico propuesto por IAEA, elegido por su modelado simple, con uranio altamente enriquecido y cuya potencia se fijó a 30 MW a fin de obtener una capa de óxido de espesor cercana a los 50  $\mu\text{m}$ .

Por otro lado se analizó un caso práctico comparando los resultados obtenidos para la capa de óxido en el proyecto RA-10 y aquel obtenido utilizando la nueva opción. En este caso, dado que se busca un ejemplo de aplicación meramente demostrativo, no se utiliza un núcleo completamente optimizado para la operación.

## 2 VERIFICACIÓN

En la Figura 1 se observa un esquema del núcleo utilizado para la verificación. Para más información ver IAEA TECDOC 233 (1980).

Para realizar la verificación de la nueva utilidad de los códigos se comparó el resultado obtenido por estos con aquel realizado en una planilla Excel con la misma correlación y set de datos.

Los cálculos se realizaron con todas las barras de control completamente extraídas.

Se simuló una estrategia de recambio de elementos combustibles usando movimientos simétricos, el combustible analizado se inserta por la posición 16 de la grilla (Figura 1), se lo mueve a la posición 20, luego la 19 y por último a la posición 15 hasta su extracción, este procedimiento se encuentra resumido en la Tabla 1 y el factor de pico calculado para el elemento combustible se muestra en la Figura 2.

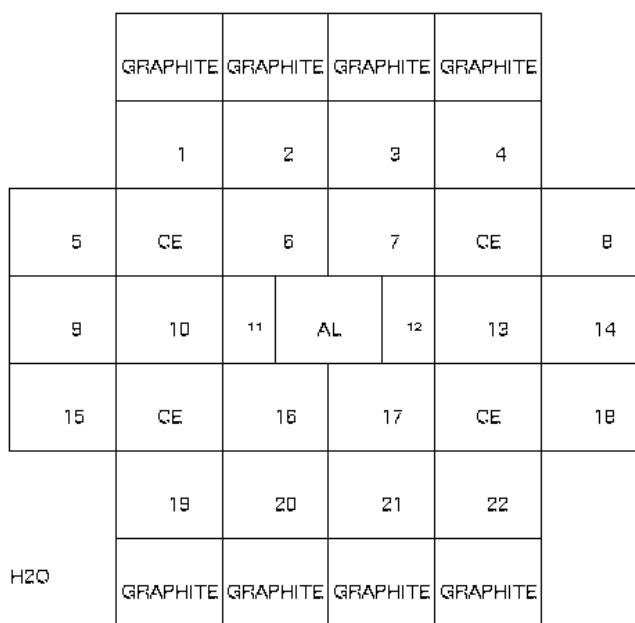


Figura 1: Esquema del núcleo utilizado

Posición	Días de operación [d]
16	0 a 35
20	36 a 70
19	71 a 105
15	106 a 140

Tabla 1: Movimiento del elemento combustible dentro del núcleo

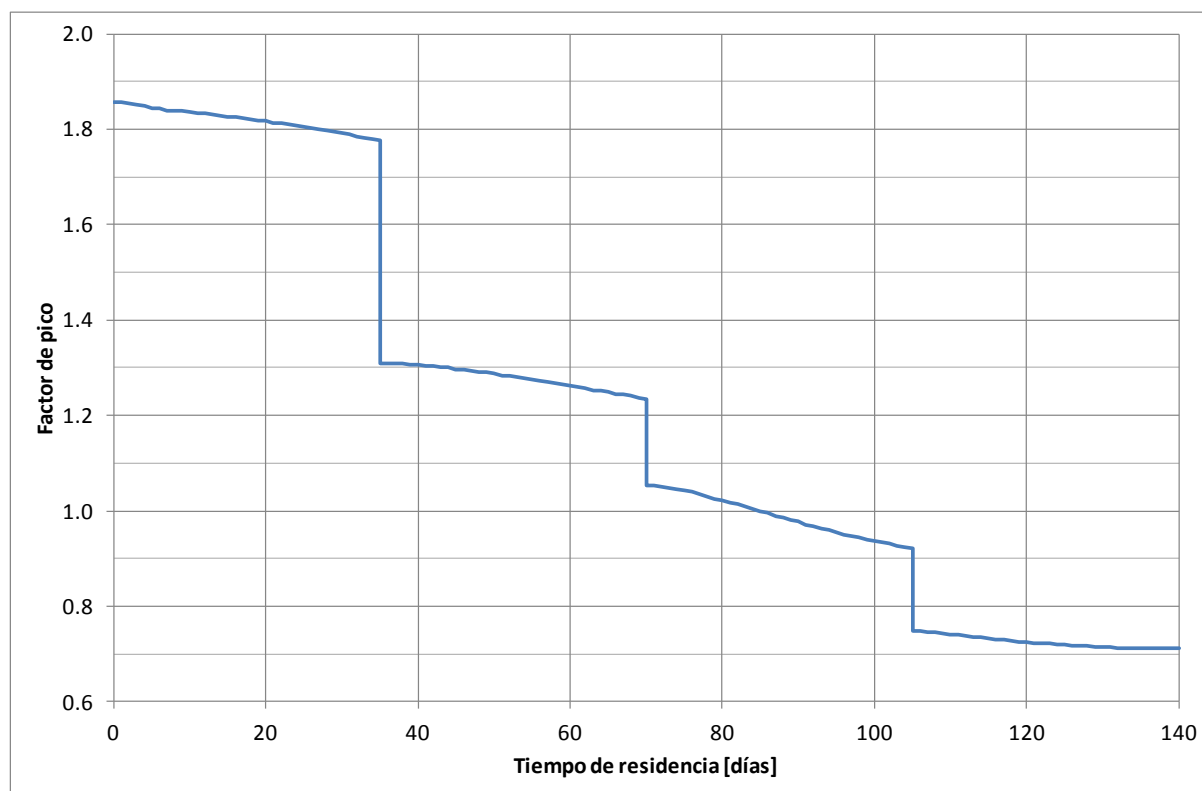


Figura 2: Factor de pico del elemento combustible analizado

La capa de óxido generada se muestra en la Figura 3. La curva obtenida es de tipo “best-estimate” ya que no se utilizan incertezas en su cálculo, aún así se la puede considerar conservativa ya que se calcula con la máxima temperatura de pared y flujo calórico en cada paso, aunque estos no coincidan en su posición entre sí o entre pasos temporales.

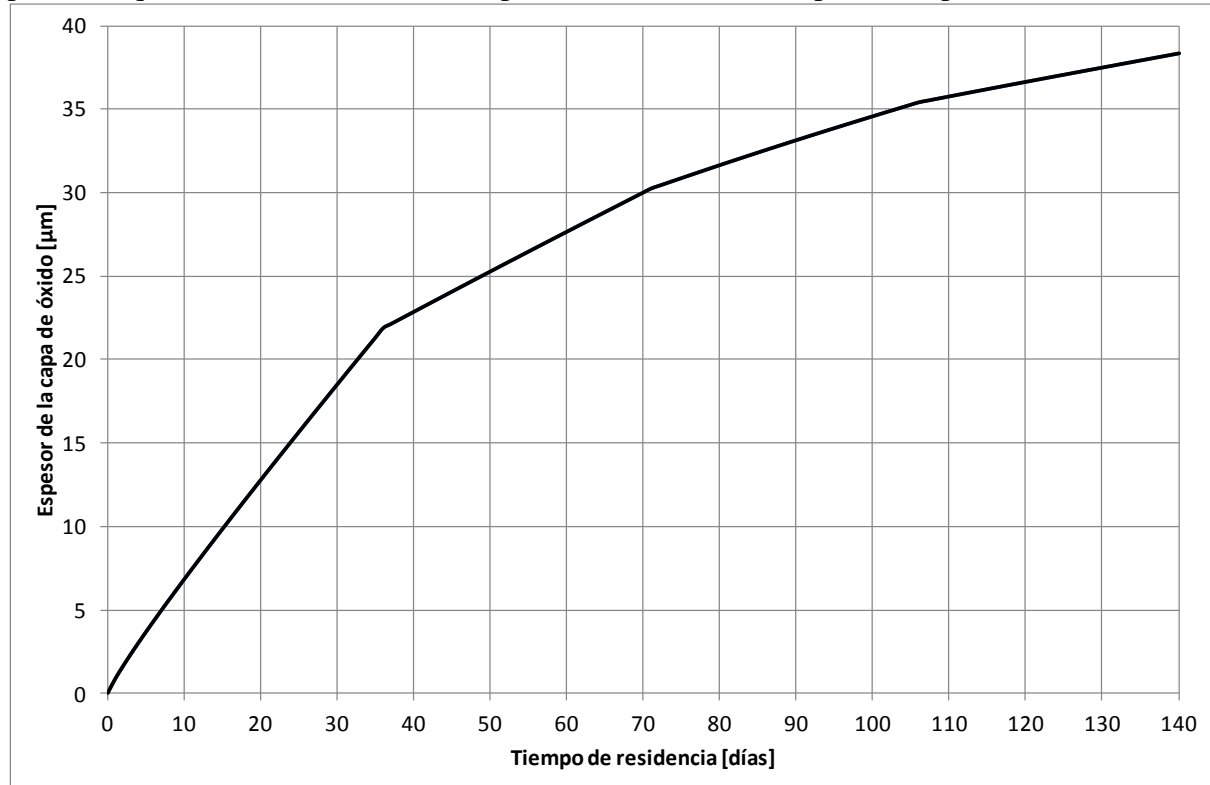


Figura 3: Crecimiento de la capa de óxido

Solo una de las curvas es visible ya que los valores obtenidos por código y aquellos de la planilla Excel son coincidentes.

Otros casos fueron analizados, variando el pH y sin hacer movimiento de elementos combustibles, y en todos ellos se produce la misma compatibilidad entre las curvas de espesor de la capa de óxido.

### 3 EJEMPLO DE APLICACIÓN - RA-10

El modelo de reactor utilizado en este ejemplo de aplicación junto con la definición de los materiales y condiciones generales de operación corresponden a datos preliminares de la etapa de ingeniería conceptual.

Dado que se busca calcular un parámetro que está fuertemente vinculado con la temperatura de pared del combustible a través del factor de pico, las barras de control se posicionaron considerando una condición de criticidad esperada para operación normal (es decir, que brinde la menor perturbación posible a las facilidades de irradiación rápidas). Las barras de control centrales se mantuvieron completamente extraídas mientras que las demás se utilizaron para alcanzar en cada paso el estado de criticidad.

El pH utilizado es de 6.5 para ser consistente con el cálculo de espesor de capa de óxido con el que se contrastan los valores calculados por CITVAP - FLUX.

El programa de recambio de combustibles utilizado no es simétrico, como en el caso anterior, por lo que se analiza la formación de capa de óxido en todas las cadenas. Los elementos combustibles se discriminan por el canal en el que ingresan al núcleo, es decir,

posiciones 5, 15, 7 y 13. En la Figura 4 se muestra el esquema de numeración utilizado.

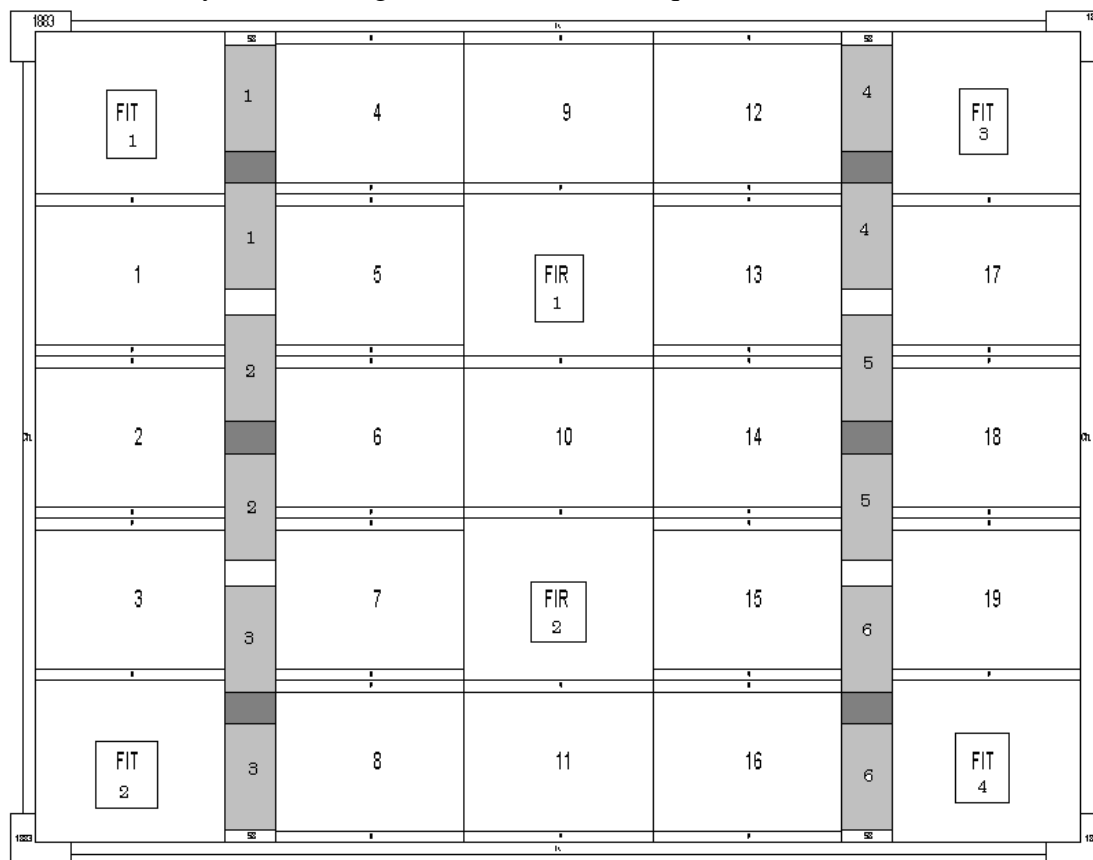


Figura 4: Esquema de numeración utilizado

Los factores de pico calculados con CITVAP representan, en este caso, estados de operación nominal más realistas que el valor genérico considerado de manera temprana en la etapa de ingeniería conceptual a modo de envolvente. Los mismos pueden verse para cada combustible en la Figura 5, donde también se muestra el valor utilizado para el cálculo preliminar de capa de óxido dentro del proyecto. Se observa que se han tomado una distinta cantidad de ciclos para los combustibles entre los grupos de neutrónica, quienes proveyeron datos del núcleo, y termo-hidráulica, quienes proveyeron el cálculo preliminar de capa de óxido.

Al igual que en el caso anterior los valores obtenidos de espesor de capa de óxido son conservativos al considerar el punto más desfavorable (para cada combustible) para su cálculo a pesar de que la máxima temperatura de pared y potencia superficial no ocurran en la misma posición o placa en cálculos sucesivos. Por otro lado se alejan de esta cualidad al no hacer uso de incertezas en los parámetros involucrados.

Los resultados de capa de óxido alcanzados para cada elemento combustible y la envolvente calculada por el proyecto se muestran en la Figura 6. Se observa que el espesor calculado como envolvente alcanza un valor de 45  $\mu\text{m}$  a los 130 días mientras que el máximo valor calculado por CITVAP - FLUX es de 20.3  $\mu\text{m}$

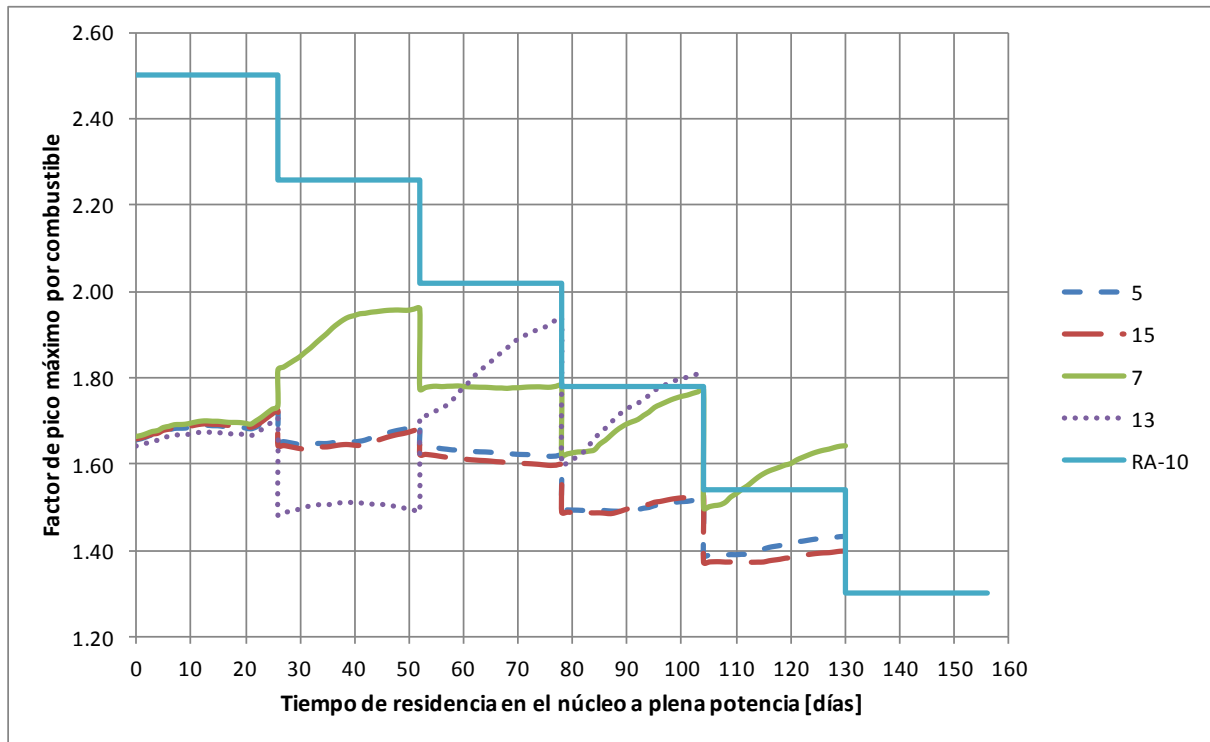


Figura 5: Factor de pico máximo por combustible para diferentes posiciones de inserción en el núcleo

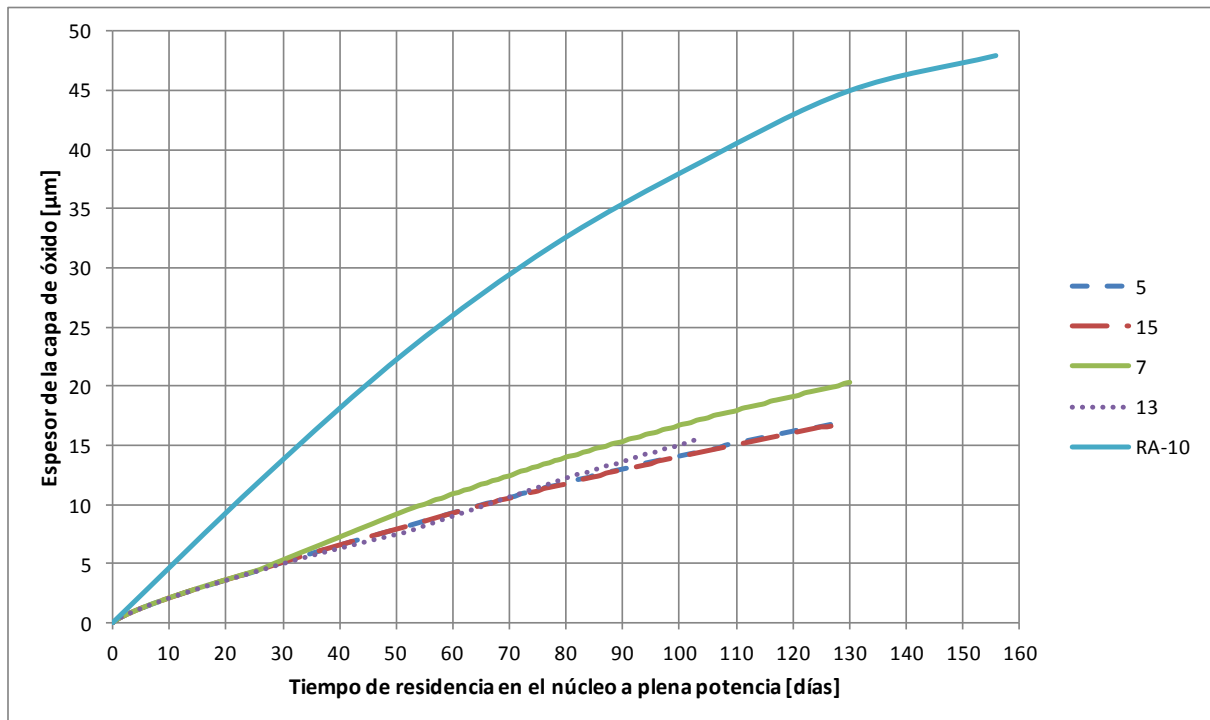


Figura 6: Espesor de la capa de óxido por combustible para diferentes posiciones de inserción en el núcleo

#### 4 CONCLUSIONES

Se ha desarrollado una herramienta que permite el cálculo del espesor de la capa de óxido de modo “best-estimate”, esta permitirá a futuro tener un seguimiento más realista del parámetro analizado en etapas avanzadas de ingeniería.

Por otro lado el cálculo de tipo envolvente seguirá siendo necesario durante el diseño del elemento combustible a fin de evaluar el diseño y las condiciones de operación en etapas tempranas de la ingeniería.

De la verificación, al obtener por ambos métodos la misma curva, se puede concluir que CITVAP produce los parámetros termo-hidráulicos y FLUX los adquiere correctamente.

Tal como se muestra en la comparación, el post-procesador calcula adecuadamente el crecimiento de la capa de óxido, según la correlación utilizada. De esta manera errores en la implementación de la correlación pueden ser descartados.

El ejemplo de aplicación permite ver que el cálculo realizado es del tipo “best-estimate” en cuanto que queda contemplado por la envolvente utilizada en el proyecto.

## 5 REFERENCES

IAEA TECDOC 233, “Research reactor code conversion from the use of highly enriched uranium to the use of low enriched uranium fuels guidebook”, page 70, IAEA, 1980.

Mochi I., “INVAP's Nuclear Calculation System”, Science and Technology of Nuclear Installations (Volume 2011, Article ID 215363)

Kim Y. S., “Oxidation of aluminum alloy cladding for research and test reactor fuel”, Journal of Nuclear Materials N° 378 pág. 220-228, 2008.