

Modelo de transmisión de calor por radiación en una piscina de combustible gastado mediante TRACE

F. Sánchez-Sáez, S. Carlos Alberola, S. Martorell Alsina, J. F. Villanueva López,
(Universitat Politècnica de València).

frasansa@etsii.upv.es

Resumen – El trabajo desarrollado consiste en la simulación termohidráulica de una piscina de combustible gastado al producirse un transitorio de pérdida de refrigerante con pérdida de refrigeración a través del canal de transferencia. La simulación se realiza con el código Best Estimate TRACE. Para seguir la evolución del comportamiento de la piscina, una variable importante a seguir es la temperatura de vaina, cuya evolución depende del calor que consiga emitir. En esta simulación se ha considerado la transmisión por convección y se ha comparado con la evolución de la variable si se considera convección más radiación. El modelo de radiación propuesto obtiene datos del código RADGEN para ser utilizados en TRACE. Con este modelo, se obtiene una evolución de la Temperatura de vaina en el transitorio menos conservadora.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de los diversos transitorios que pueden suceder en las piscinas de combustible gastado de las centrales nucleares ha cobrado una especial relevancia después del accidente de Fukushima (11 de Marzo de 2011), cuando un terremoto y el posterior tsunami causaron la pérdida de la capacidad de refrigeración adecuada de los reactores y las piscinas de combustible gastado de la central nuclear de Fukushima Daiichi en Japón [1].

Uno de los transitorios más severos que puede producirse en las piscinas de combustible gastado de una central nuclear es el transitorio en el que se produce una pérdida de la refrigeración acompañada de una pérdida del refrigerante a través del canal de transferencia.

Este transitorio, se ha estudiado con códigos *Best Estimate*, como TRACE y RELAP [2], considerando únicamente la transmisión de calor por conducción y por convección, pero debido a las altas temperaturas que se alcanzan en las barras de combustible, la transmisión de calor debida a la radiación puede no ser despreciable y habría que considerarla. Por este motivo, se ha realizado un modelo en TRACE que incluya la transmisión de calor por radiación. Para la correcta realización de este modelo hacen falta diversos parámetros geométricos que caracterizan la transmisión de calor por radiación, los cuales, se han obtenido mediante el código RADGEN [3], incluido dentro del paquete del código COBRA-SFS de la NEA.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DE RADIACIÓN.

Se ha activado el modelo de transmisión de calor por radiación de TRACE para posteriormente realizar la simulación del transitorio de la piscina de combustible gastado de Ascò. Se ha implementado para la zona de combustible más caliente, que es la correspondiente al núcleo recién extraído, que genera una potencia de 4.39MW sobre los 9.31MW del total de la piscina. En la figura 1 se muestra la distribución de las celdas de la piscina [4].

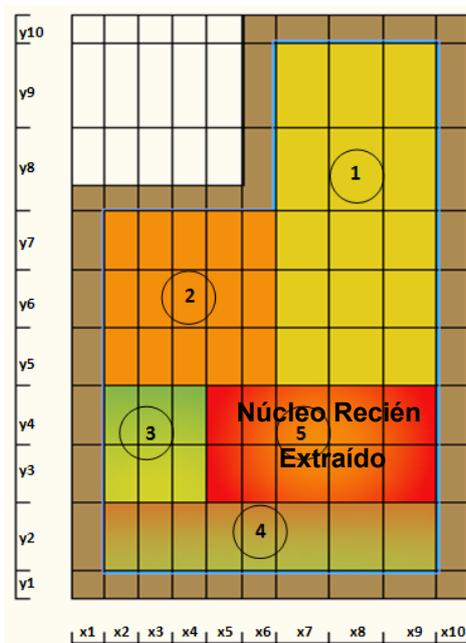


Figura 1. Distribución de los segmentos sobre el plano de la piscina.

Para la implementación del modelo de radiación se han introducido 10 estructuras de calor que conforman la envoltura de las 10 celdas pertenecientes al núcleo recién extraído. Estas estructuras ocupan los mismos niveles axiales donde están los elementos combustibles. Se han modelado con un espesor de 3 mm, y una anchura igual al perímetro de la celda a la cual envuelven. Se han modelado con el material *stainless steel 316*. Como condiciones de transmisión de calor, se asume que intercambian calor en su cara interna con las celdas hidrodinámicas que contienen.

La emisividad de la envoltura depende de la temperatura a la que se encuentra y se ha calculado a partir de los datos de emisividad a diferentes temperaturas del tipo de acero del que está hecha la envoltura, obtenidos de la referencia [5]:

Tabla 1. Datos de emisividad del SS 316

Material	Temperatura (K)	Emisividad (ϵ)
Stainless Steel 316	505	0.57
Stainless Steel 316	1222	0.66

Interpolando se obtiene la siguiente ecuación:

$$\epsilon = 0.5066 + 0.0001T \quad (T \text{ en K})$$

Por otra parte, la emisividad de las barras de los elementos combustibles se ha introducido constante con un valor de 0.8, que es el valor que se recomienda en la referencia [6] para las barras de los elementos de combustible de un PWR.

2.1 Parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo de radiación.

Para obtener los parámetros necesarios para el funcionamiento del modelo de radiación nos centraremos en el núcleo recién extraído, porque es donde se alcanzan primero las temperaturas a partir de las cuales la cantidad de calor transmitida por radiación es considerable. Cada una de las celdas que forman la región del núcleo recién extraído tienen dos estructuras de calor asociadas: una estructura de calor que simula las barras de combustible gastado y otra estructura de calor que simula la envoltura. Se asume que cada celda del núcleo recién extraído, sólo intercambia calor por radiación con las estructuras asociadas a la misma. En la figura 2 se muestran las 10 celdas en las que se ha dividido la región del núcleo recién extraído.

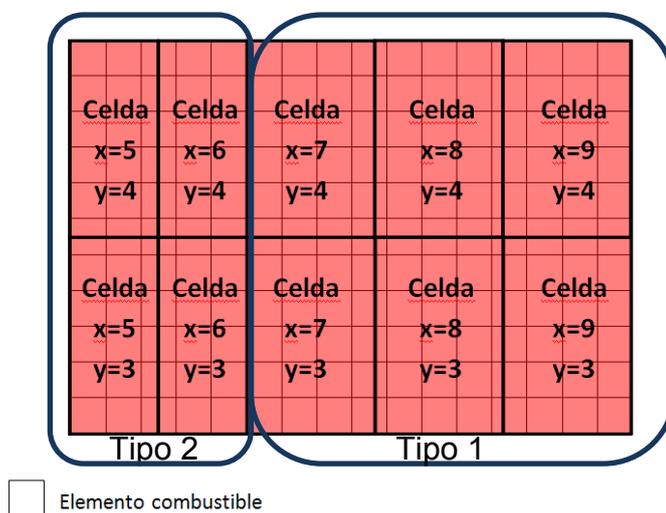


Figura 2. Celdas que conforman el núcleo recién extraído.

Se puede observar que hay 2 tamaños de celda diferente dentro del núcleo recién extraído: las celdas de tipo 1, que tienen 5948 barras de combustible gastado cada una, y las de tipo 2, que tienen 3795 barras cada una.

Una vez se tienen las estructuras de calor que participan en el intercambio de calor por radiación, es necesario introducir los factores de vista de estas estructuras de calor y las distancias medias entre las superficies del intercambio de calor por radiación. Como el número de barras de cada celda es muy elevado, se han obtenido los factores de forma y distancias agrupados. Para estimar estos valores se han hecho uso del subprograma RADGEN del paquete termohidráulico COBRA-SFS, obteniéndose:

Tabla 2. Factores de vista y distancias agrupadas

Tipo1				Tipo2			
FG₁₁	0.982366	L11	0.0048	FG₁₁	0.969995	L11	0.0050
FG₁₂	0.017633	L12	0.2970	FG₁₂	0.030004	L12	0.2800
FG₂₁	0.552841	L21	0.2970	FG₂₁	0.715393	L21	0.2800
FG₂₂	0.447158	L22	0.4340	FG₂₂	0.284606	L22	0.4780

Donde FG son los factores de forma agrupados, L las distancias agrupadas, el subíndice 1 hace referencia a las estructuras de calor que simulan las barras de combustible gastado y el subíndice 2 hace referencia a las estructuras de calor que conforman la envoltura de la celda.

Con estos datos, ya se puede implementar el modelo de radiación en TRACE, teniendo en cuenta que tiene las siguientes limitaciones:

- La transmisión de calor por radiación sólo se ha definido entre celdas pertenecientes al mismo nivel axial, por lo que los niveles axiales inferiores no se ven afectados por la transmisión de calor por radiación de niveles axiales superiores.
- Los factores de forma y las longitudes se han calculado agrupándolos, con lo que se ha perdido nivel de detalle.
- La geometría de las barras dentro de una celda, se ha de adaptar a una distribución cuadrada para poder calcular los factores de forma entre barras con el código RADGEN (aunque la geometría de la celda del modelo de TRACE sea rectangular), con lo que se distorsiona en cierta medida los resultados.

3. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CON/SIN EL MODELO DE RADIACIÓN.

Una vez introducida la transmisión de calor por radiación en la piscina, se ha ejecutado el modelo del transitorio que tiene como iniciador la pérdida de refrigeración con pérdida de refrigerante con el fin de evaluar el efecto del modelo de transmisión de calor por radiación sobre los tiempos en los que se producen los distintos fenómenos físicos a lo largo del transitorio.

En la figura 3, se muestra la temperatura de vaina para las 2 situaciones, con y sin transmisión de calor por radiación. La temperatura en la vaina del combustible es muy parecida en ambos casos hasta que se superan los 1000K (40000s), ya que hasta ese punto, la temperatura aún no es lo suficientemente elevada como para que el calor transferido por radiación sea significativo. A partir de este momento, se empieza a observar que si el modelo de transmisión de calor por radiación se encuentra activo, la temperatura máxima de vaina es inferior que en el caso donde no existe radiación. Esto es debido a que en el caso donde está activada la transmisión de calor por radiación se consigue extraer más calor de las barras de combustible. Es interesante hacer notar que en ambas situaciones, cuando la temperatura de vaina aumenta bruscamente, de manera casi vertical, a los 48000s y a los 50000s aproximadamente, con radiación y sin radiación respectivamente, es debido a la reacción exotérmica de producción de hidrógeno.

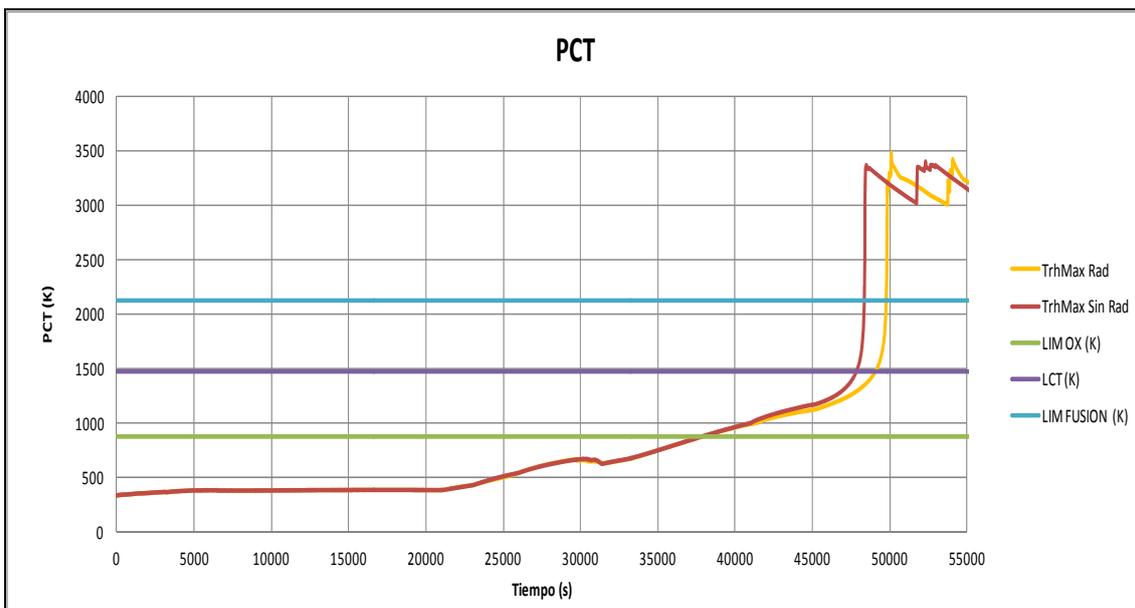


Figura 3. Evolución de la PCT con el tiempo

En la figura 4 se muestra la temperatura máxima de vaina entre 40000 y 54000s para poder observar mejor la diferencia entre ambos casos. El límite de temperatura de la vaina (1477K [7]) se alcanza a los 47775 segundos en el caso en el que no está activo el modelo de radiación, mientras que en el caso en el que sí que está activado, esta temperatura se alcanza a los 49125 segundos. Por tanto, el tiempo hasta alcanzar el límite de PCT se retrasa 1350 segundos.

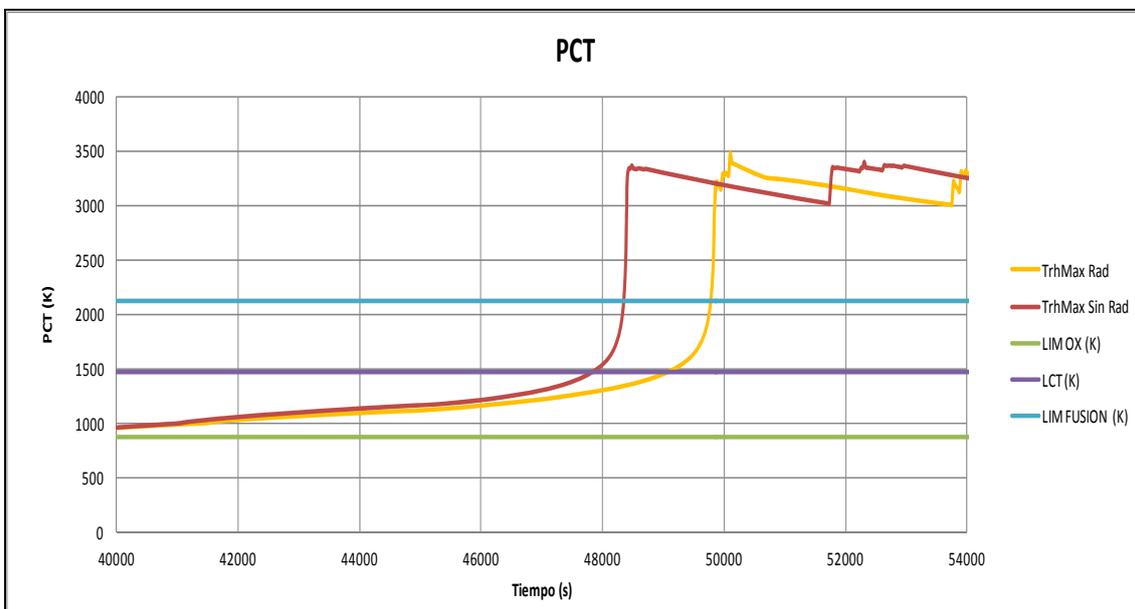


Figura 4. Evolución de la PCT con el tiempo. 40000 a 54000s.

En la figura 5 se muestra la evolución del calor transmitido por radiación con el tiempo. Se observa que, se empieza a transmitir calor por radiación en los últimos niveles axiales de las barras de combustible a partir de los 25000s, momento en el que la temperatura sobrepasa los 500 K (ver figura 3), aunque hasta los 40000s su contribución a la transmisión total de calor es discreta comparándolo con los 9.31 MW de calor residual que hay en la piscina.

Desde los 25000s la cantidad de calor transmitida por radiación va aumentando paulatinamente hasta que al llegar a los 50000s se produce un pico de aproximadamente 8.5 MW. Este pico es debido a que se produce la reacción exotérmica de producción de hidrógeno, del nivel axial 6, durante la cual, la temperatura de las barras en dicha zona aumenta bruscamente.

Una vez se ha oxidado completamente el zirconio del nivel axial 6 de la vaina, la contribución de la transmisión de calor por radiación en ese nivel disminuye significativamente. A los 54000s se produce el mismo fenómeno en el nivel axial 5 produciendo un segundo pico en la transmisión de calor por radiación, esta vez de 9 MW.

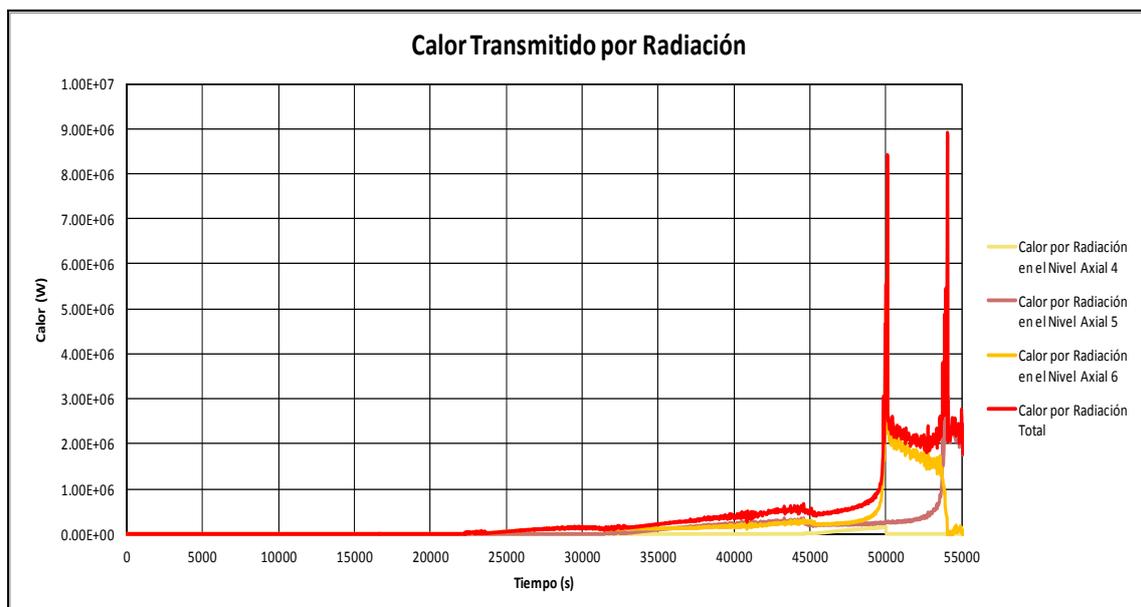


Figura 5. Evolución del calor transmitido por radiación con el tiempo

En la figura 6 se observa la evolución de la fracción de huecos en los últimos niveles axiales de las barras de combustible para los casos con/sin radiación (en la celda perteneciente al núcleo recién extraído $x=7$ $y=4$). Se observa que los tiempos en los que se produce el secado de los niveles es prácticamente el mismo para ambos casos. Esto es debido a la limitación del modelo de radiación en cuanto a que no permite la transmisión de calor por radiación entre niveles axiales diferentes.

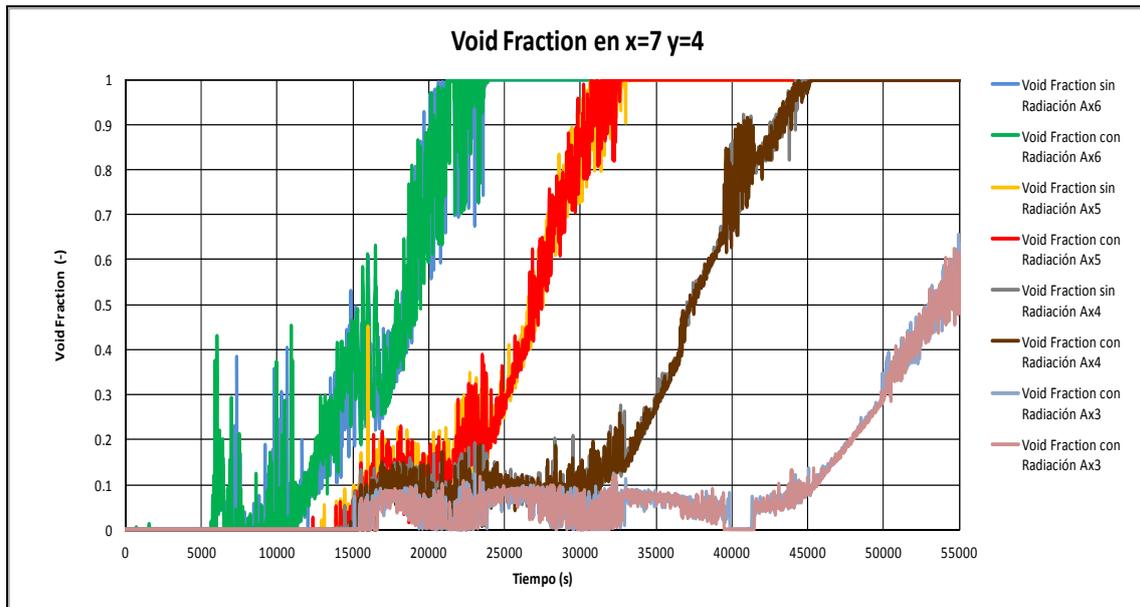


Figura 6. Evolución de la fracción de huecos en $x=7$ $y=4$

En cambio, en la figura 7 sí que se observa que cuando se produce el secado de un nivel axial, la temperatura del refrigerante que se alcanza en la celda es mayor en el caso que tiene el modelo de radiación activado, debido precisamente a la contribución de la trasmisión de calor entre las barras y el aire por radiación.

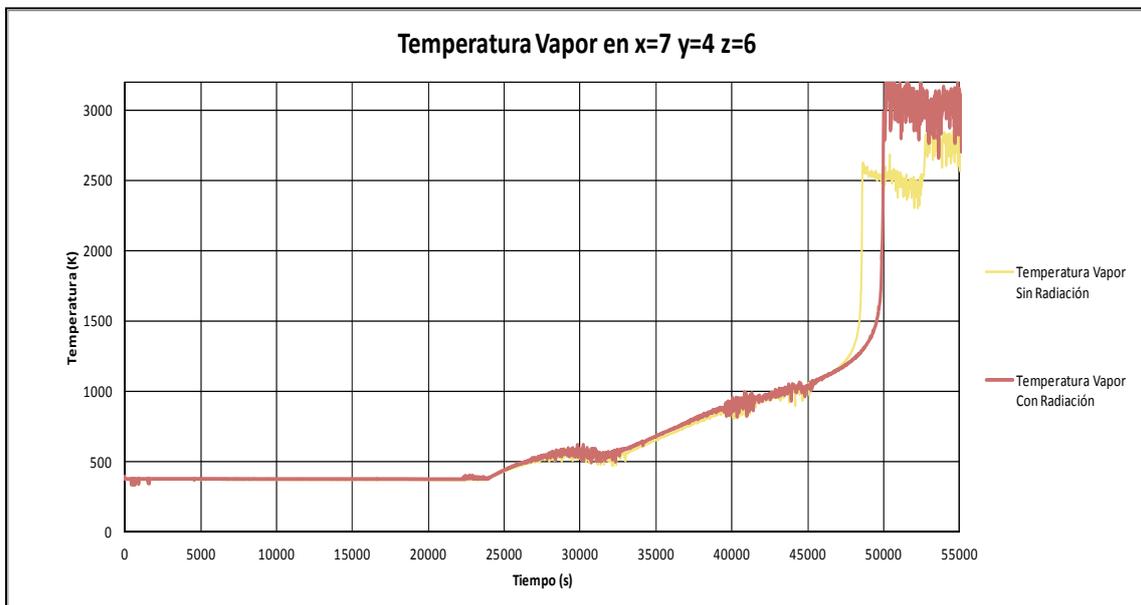


Figura 7. Evolución de la temperatura del refrigerante en $x=7$ $y=4$ $z=6$

4. CONCLUSIONES

El modelo predice una evolución coherente de la evacuación de calor de las barras de combustible con su entorno en un mismo nivel axial: en el modelo con radiación la subida de la temperatura de vaina es más lenta, y la temperatura del aire en las zonas donde se alcanzan las temperaturas de vaina más elevadas es mayor.

El modelo no puede reproducir el secado por radiación de niveles axiales inferiores que se producirían cuando el calor transmitido por radiación en los niveles axiales superiores es muy elevado (durante la reacción de liberación de hidrógeno), ya que el modelo no permite la transmisión de calor por radiación entre niveles axiales diferentes.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Consejo de Seguridad Nuclear dentro del contrato con referencia STN/2369/08/640. Además, los autores desean agradecer a la central nuclear de Ascó por los datos y ayuda suministrada para realizar este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] UPV-CSN. Documento nº UPV-RELAP-IN 008. Transitorios en parada: Escenarios en piscinas de combustible gastado. 2005.
- [2] Michael Weber “Ensuring Spent Fuel Pool Safety” American Nuclear Society Meeting June 28, 2011 1.
- [3] D. R. Rector. RADGEN: a radiation exchange factor generator for rod bundles. 1987.
- [4] Tecnatom s.a. ANA-17. Refrigeración y purificación del foso de combustible gastado. 2002.
- [5] Cole-Parmer. *Emissivity of Specific Materials*, (2011). Recuperado el 5 de Noviembre de 2012 desde <http://www.coleparmer.com/TechLibraryArticle/254>.
- [6] D. Carpenter, Assessment of Innovative Fuel Designs for High Performance Light Water Reactors. 2006.
- [7] CFR.50.46.NRC.