

27-02 Simulación CFD de un accidente de caída de un elemento combustible en piscina

B. Montero¹, R. Corpa², G. Jiménez¹, C. Muñoz-Reja²

¹ Departamento de Ingeniería Energética (Área Nuclear), Universidad Politécnica de Madrid

² ENUSA Industrias Avanzadas S.A.

I. INTRODUCCIÓN

La caída de un elemento combustible (EC) en la piscina de almacenamiento de combustible gastado está postulada como un accidente base de diseño.

Este evento, que potencialmente puede tener lugar durante las operaciones de manejo de combustible para recargar o descargar el núcleo y durante la carga de contenedores, podría conducir a la rotura de una o varias de las vainas con la consiguiente liberación de productos de fisión en el edificio de combustible.

La USNRC establece una metodología de estudio de este accidente muy conservadora, partiendo de la hipótesis de que el EC que cae es el de mayor inventario radiológico y asumiendo el escape total de éste, tras la rotura catastrófica de todas las vainas [1].

Los accidentes de caída de un EC en piscina que han tenido lugar en la historia de las centrales nucleares ponen de relieve el gran conservadurismo de estas hipótesis, en las que además se prescinde de considerar la influencia de la altura de caída. Se han producido varios accidentes de caída de ECs, tanto en aire [2] como en agua [3], y en rara ocasión se ha producido liberación de gases de fisión.

Las aproximaciones empleadas en la literatura hasta ahora se basan en el cálculo computacional (Yim et al [4], Wu et al [5]), o bien en la simplificación basada en suponer la conversión total de la energía potencial en cinética, [6].

ENUSA Industrias Avanzadas y la Universidad Politécnica de Madrid han trabajado conjuntamente en un proyecto de investigación para desarrollar una metodología que permita estudiar, considerando el amortiguamiento hidráulico, la velocidad de impacto de un EC PWR, factor de vital importancia para evaluar la

integridad tras el impacto, en función de la altura de caída.

Esta metodología se basará en la aplicación del código de dinámica de fluidos computacional (CFD, [7]) STAR-CCM+.

Los códigos CFD permiten calcular cualquier magnitud relacionada con el refrigerante basándose en una discretización del dominio limitada casi únicamente por la capacidad computacional de la que se disponga. Este tipo de códigos cada vez es más empleado en la industria nuclear.

II. METODOLOGÍA

El método empleado consiste en relacionar la altura de caída y la velocidad de impacto a través de la segunda ley de Newton:

$$M g - F_{\text{Empuje}} - F_{\text{Resistencia}} = M \, dv/dt$$

Donde el empuje es el peso del volumen de agua desplazado por el EC y la fuerza de resistencia hidrodinámica es función de la velocidad, el ángulo de caída y la geometría.

La dificultad de este problema se encuentra en calcular la resistencia hidrodinámica de una geometría tan compleja como un EC. A tal fin se ha empleado el código CFD STAR-CCM+, como se muestra en el diagrama del proceso seguido en la Figura 1.

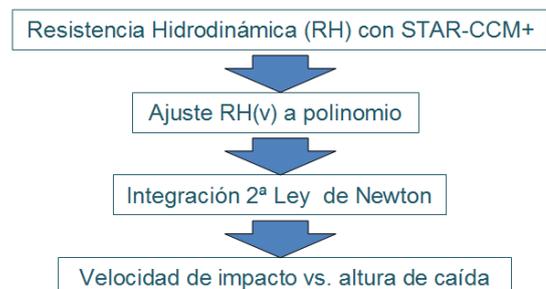


Figura 1. Proceso de cálculo.

Para el cálculo CFD se han considerado dos posiciones del elemento, cuya geometría y

componentes se muestran en la Figura 2, durante la caída: vertical y horizontal. Para cada posición se presentarán resultados para caídas desde 4 y 9 metros, por ser 4 m la altura de caída más probable (el combustible se maneja a esa altura en la piscina) y 9 m la más severa.

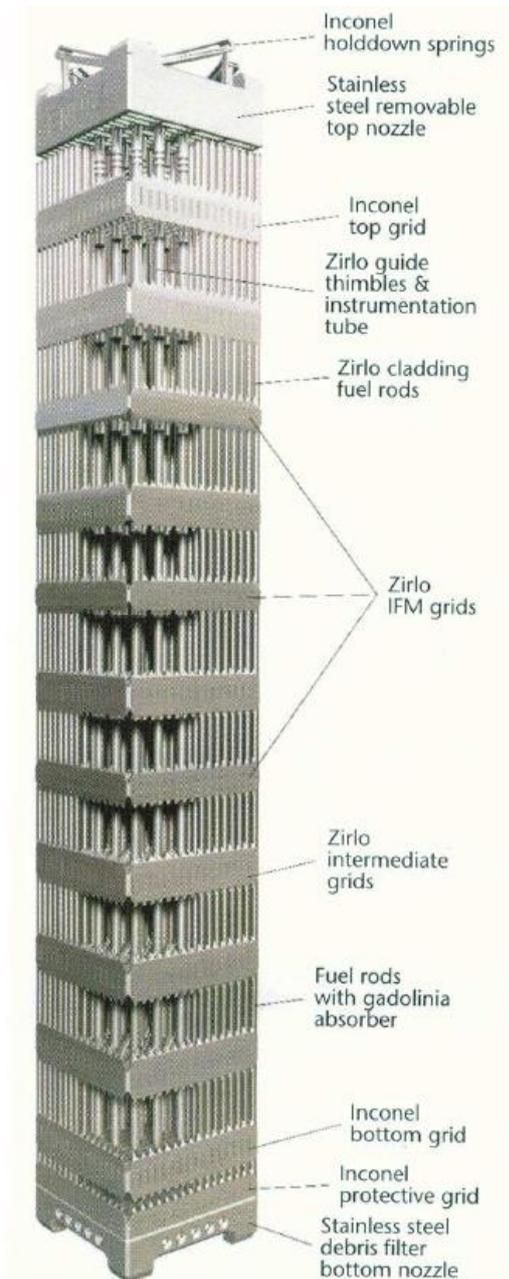
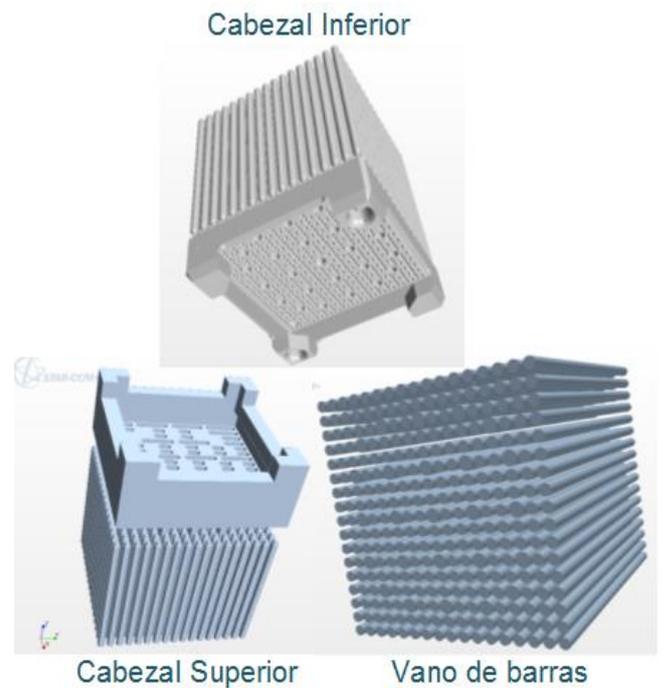
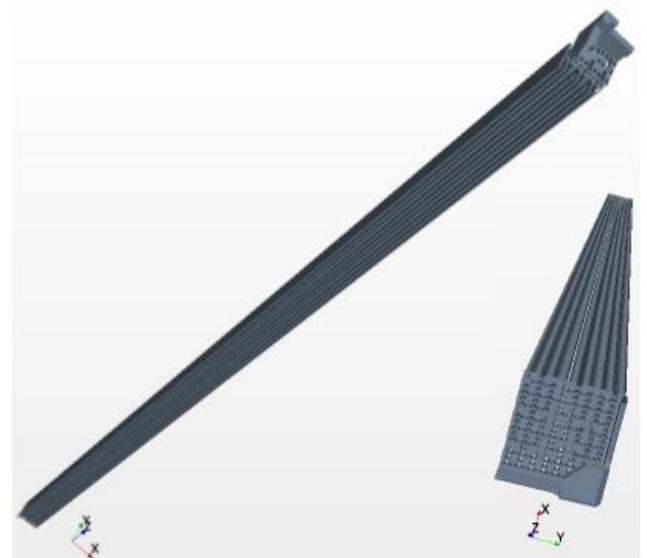


Figura 2. Elemento PWR 17x17

Dado el gran consumo de recursos computacionales de los códigos CFD, además de evaluar un modelo de elemento combustible simplificado, se ha estudiado un modelo adicional en el cuál se desglosa el mismo en sus componentes. En la Figura 3 se muestran los dos modelos empleados.



(a) Modelo por componentes



(b) Modelo completo

Figura 3. Modelos geométricos empleados

En ningún caso se han considerado rejillas debido al coste computacional que requiere simular un EC completo, pero se prevé que será uno de los desarrollos futuros a incorporar. Se simulan barras y tubos guía, además del cabezal superior y el inferior, que incorporan una pequeña sección de barras en el modelo desglosado en componentes.

Respecto a las simulaciones realizadas, se ha estudiado la resistencia hidrodinámica ("drag") tanto para cada componente como para el modelo de EC entero.

Las consideraciones realizadas en este estudio se resumen a continuación:

- Se simulan estados estacionarios de cada geometría y en cada orientación para distintas velocidades de entrada del agua. De estos resultados se infiere a posteriori el comportamiento para todo el rango de velocidades de interés.
- Puesto que la caída es de muy corta duración, se desprecia la transferencia de calor al agua y se supone que el EC no rota durante la caída.
- Se aplican condiciones de simetría para reducir los tiempos de cálculo.
- La malla empleada es poliédrica, con capas de celdas prismáticas ortogonales a las paredes que capturan el efecto de la capa límite.
- Los modelos físicos aplicados que más relevantes resultan son:
 - Estacionario y 3D
 - Modelo de turbulencia $k-\epsilon$ realizable
 - Agua líquida a $65\text{ }^{\circ}\text{C}$
 - Gravedad

En la región estudiada, se inyecta agua a la velocidad que se estudia en cada caso por la superficie inferior, saliendo el fluido por arriba. Se tienen condiciones de simetría y tipo pared en los laterales, véase la Figura 4.

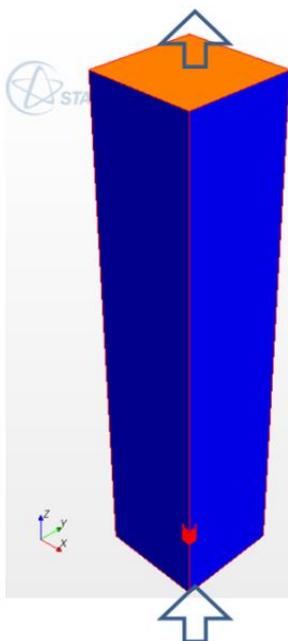
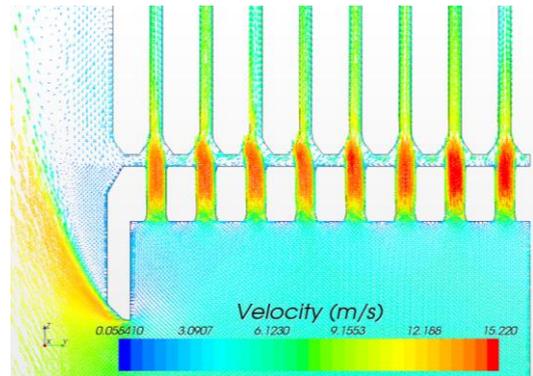


Figura 4. Esquema general del dominio

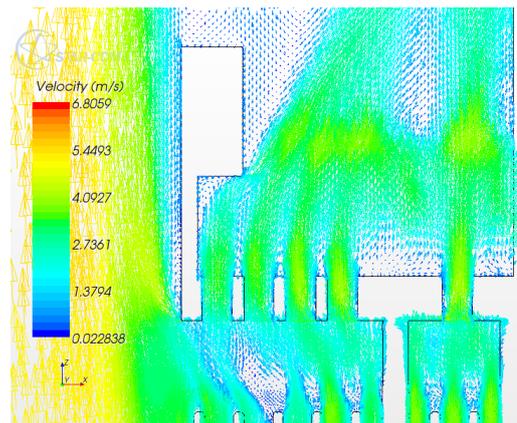
III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos permiten visualizar los campos de velocidad y presión, responsables de la fuerza de resistencia hidrodinámica. Es importante tener en cuenta que a mayor área opuesta al flujo y/o mayor velocidad de entrada del agua, mayor será la resistencia.

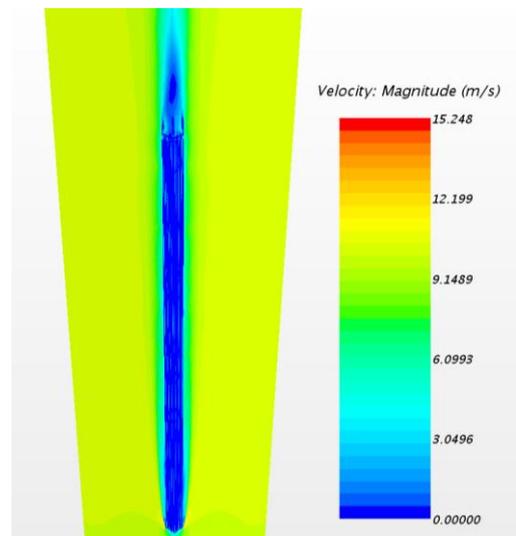
Algunos de estos campos de velocidad y presión se muestran en las Figuras 5 y 6.



(a) Velocidad a través del cabezal inferior vertical

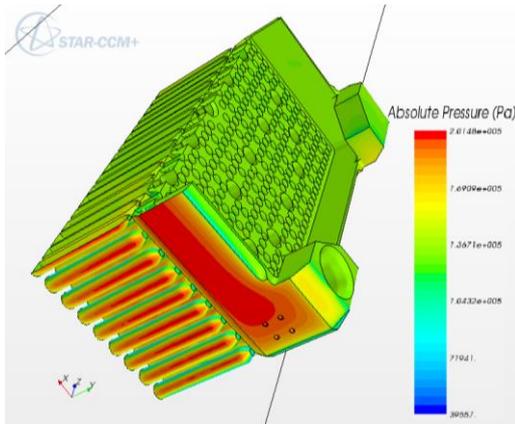


(b) Velocidad a través del cabezal superior vertical

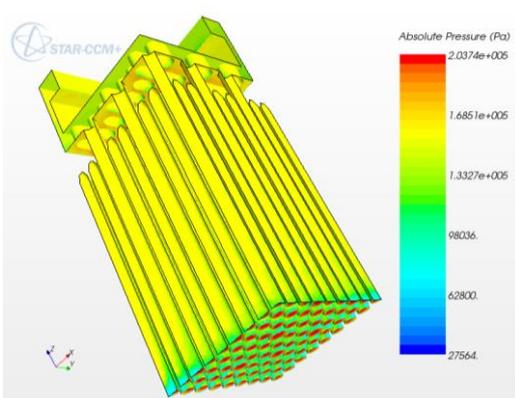


(c) Velocidad en torno al EC

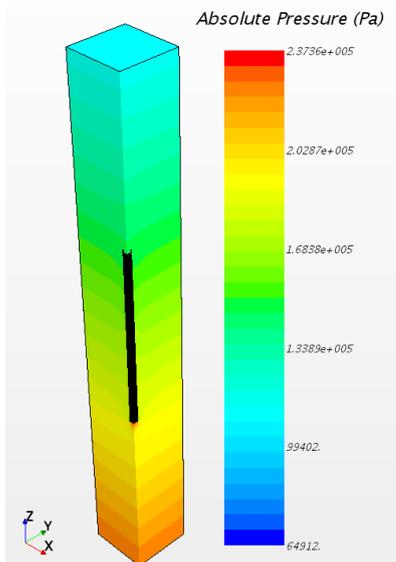
Figura 5. Ejemplos de campos de velocidad



(a) Presión sobre el cabezal inferior horizontal



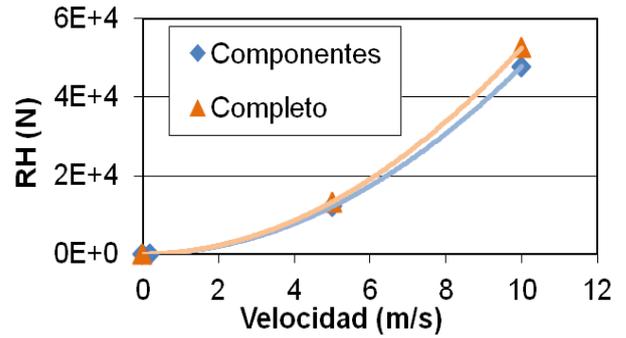
(b) Presión sobre el cabezal superior vertical



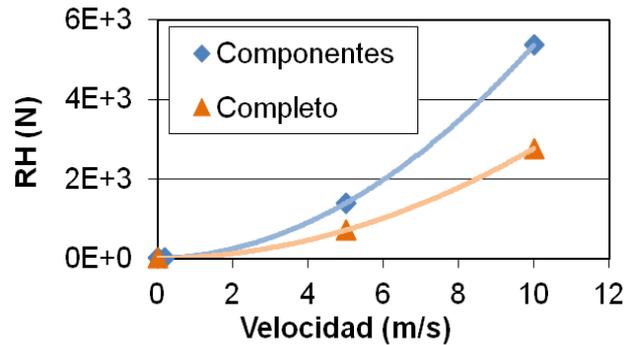
(c) Presión en torno al EC

Figura 6. Ejemplos de campos de presión

Se han computado los resultados de fuerza de resistencia hidrodinámica neta para cada geometría, ángulo de caída y velocidad de entrada del agua. Esta fuerza de amortiguamiento de la caída se grafica en la Figura 7 frente a la velocidad de entrada. Se presentan los resultados de los dos ángulos por separado.



(a) Resistencia hidrodinámica en horizontal



(b) Resistencia hidrodinámica en vertical

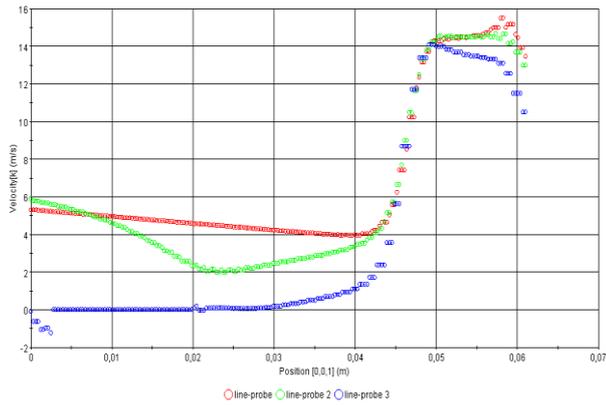
Figura 7. Fuerza en función de velocidad de entrada

La primera conclusión es que la fuerza de resistencia es mucho mayor en horizontal que en vertical. Este es el comportamiento esperado, pues el área opuesta al flujo en esta orientación es mucho mayor que en vertical, por lo que las fuerzas de presión serán mucho mayores en esta configuración.

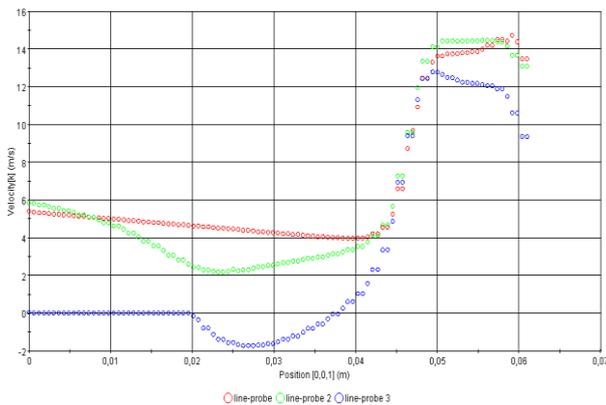
Se analizan a continuación los resultados de cada ángulo por separado. En horizontal, los resultados del EC completo y el EC desglosado en componentes son razonablemente similares, con diferencias del 9%, siendo el modelo de componentes más conservador y más sencillo (menor resistencia hidrodinámica implica menor amortiguamiento de la caída).

En vertical, el modelo desglosado por componentes predice el doble de resistencia que el modelo de EC completo. Las diferencias se generan en las barras y el cabezal superior. El origen de estas discrepancias reside en el apantallamiento del flujo que se produce en el EC completo, donde la velocidad del agua se reduce significativamente aguas abajo del cabezal inferior.

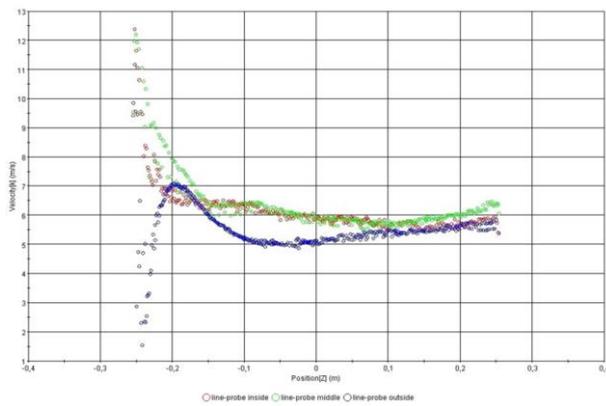
El apantallamiento mencionado se comprueba en la Figura 8, donde se compara la velocidad axial del agua a lo largo de 3 líneas de prueba para los dos modelos en el cabezal inferior y las barras, con la misma velocidad de entrada.



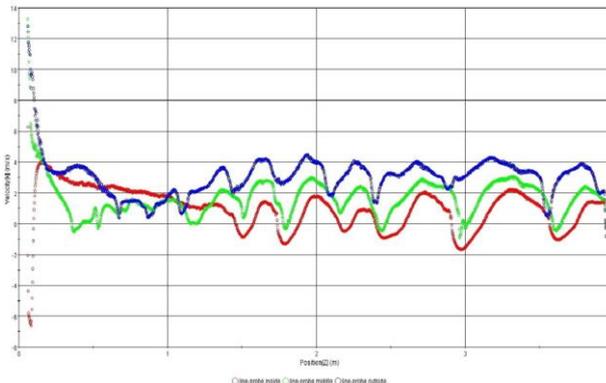
(a) Cabezal inferior- modelo de componentes



(b) Cabezal inferior – modelo EC entero



(c) Vano de barras – modelo de componentes



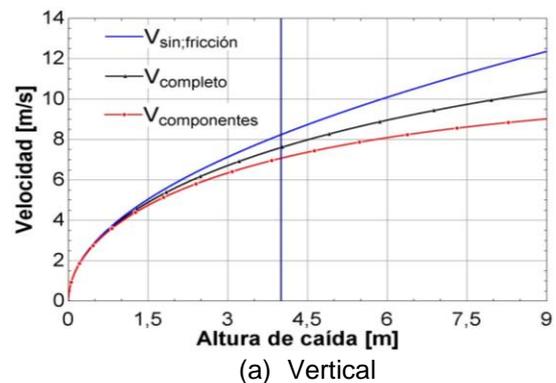
(d) Vano de barras – modelo EC entero

Figura 8. Velocidad a lo largo de líneas de prueba – comprobación del apantallamiento en vertical

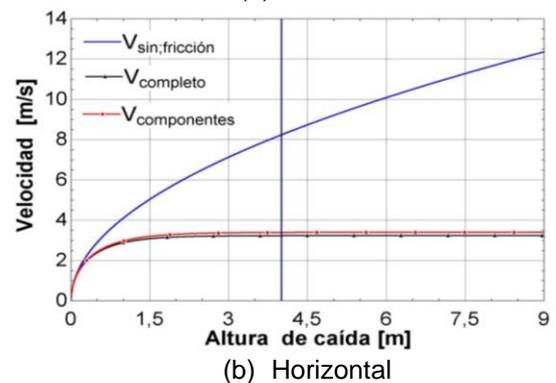
Comparando las Figuras 8(a) y (b) se concluye que los perfiles de velocidad para el cabezal inferior son prácticamente los mismos, a excepción de un pequeño desplazamiento en una zona de recirculación. La fuerza sobre el cabezal inferior es, así, prácticamente igual en los dos modelos.

Sin embargo, si se comparan las imágenes (c) y (d), se observa cómo la velocidad media en torno al vano de barras es de 6 m/s, mientras que en las barras del EC completo se ve reducida a 2 m/s. Conclusiones similares pueden extraerse para el cabezal superior, confirmando así el origen de las diferencias para el caso vertical. El modelo de EC completo será más conservador y realista que el modelo desglosado para el ángulo vertical.

Para finalizar, se ha obtenido la evolución de la caída en función de la altura para cada orientación y modelo. En las gráficas que se incluyen a continuación se han añadido a estos resultados los correspondientes a un modelo de conversión de energía cinética en energía potencial. Así, pueden contemplarse los beneficios de este trabajo, en el que se ha logrado reducir la estimación de la velocidad de impacto del EC desde las predicciones de esa simplificación hasta los valores mostrados en la Figura 9.



(a) Vertical



(b) Horizontal

Figura 9. Relación velocidad-altura recorrida en caída de un EC en agua

Nótese que la inclusión de la resistencia hidrodinámica introduce una velocidad límite, que para caída horizontal prácticamente se alcanza a partir de caídas de 2 metros de altura. Se aprecia igualmente cómo se amortigua mucho más la caída en esta orientación que en vertical, así como las diferencias entre los dos modelos que ya se han señalado a partir de la Figura 7.

Las velocidades de impacto obtenidas se podrán emplear para evaluar si se mantendría la estanqueidad de las vainas ante un accidente de caída de un EC PWR en la piscina de combustible, teniendo en cuenta la altura de caída.

IV. VALIDACIÓN

Se han comparado los resultados de velocidad y duración de la caída con un test experimental de caída de un EC para comprobar su validez. Esta validez queda comprobada con un margen de error aceptable ($\pm 3\%$ en duración, $\pm 5\%$ en velocidad de impacto), si bien los resultados experimentales concretos no se pueden mostrar por su carácter confidencial.

V. CONCLUSIONES

Se concluye así que se ha podido emplear un código CFD para estudiar la hidrodinámica de un EC, aplicando estos resultados al cálculo de la velocidad de impacto de un EC que cae en agua.

Respecto a los dos modelos estudiados, el modelo de componentes supone una buena aproximación al problema para caída de un EC en orientación horizontal, mientras que para el EC en vertical se preferirá el resultado del modelo completo, más conservador y realista. Las grandes diferencias observadas en los resultados de los dos modelos verticales se deben al apantallamiento del flujo tras el paso del agua a través del cabezal inferior. En horizontal esas diferencias son notablemente menores, pues la longitud de los modelos en la dirección del flujo es la misma en ambos casos.

Por último, se ha comprobado cómo el efecto de la resistencia hidrodinámica sobre la velocidad de impacto es significativo, especialmente si el EC cae en horizontal. Así, se ha conseguido una aproximación más

realista al análisis de la caída de un EC en una piscina de combustible.

VI. REFERENCIAS

- [1] USNRC, "Assumptions used for evaluating the potential radiological consequences of a fuel handling accident in the fuel handling and storage facility for boiling and pressurized water reactors", USNRC Regulatory Guide 1.25, 1972
- [2] HM Nuclear Installations Inspectorate, "An investigation into a dropped fuel element incident at Chapelcross Nuclear power station", Health and Safety Executive, 2002
- [3] Consejo de Seguridad Nuclear, "Acta de inspección CSN/AIN/COF/09/692", 2009
- [4] J.S. Yim et al, "Evaluation of fuel plate integrity during a fuel assembly drop accident using an energy method", 34th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors, 2012
- [5] H.J. Wu et al, "A Numerical Analysis for a BWR Fuel Assembly Drop Event", Journal of Nuclear Science and Technology, 43(9):1068–1073, 2006
- [6] General Electric-Hitachi, "ABWR Design Control Document, Rev. 0, chapter 15.7.4 - Fuel Handling Accident
- [7] John D. Anderson Jr., "Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications", McGraw-Hill, 1995
- [8] CD-Adapco, "STAR-CCM+ User Guide Version 8.04", 2013