

ESTUDIO DE LA ESTRATIFICACIÓN DE TEMPERATURA EN LA RAMA FRÍA DE UN PWR CON EL CÓDIGO CFD ANSYS-CFX

M. Martínez^a, T. Barrachina^a, R. Miró^a, S. Chiva^b, G. Verdú^a

^aInstituto de Seguridad Nuclear, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Universitat Politècnica de València - UPV
Camí de Vera s/n, 46021 Valencia

momarlia@iqn.upv.es, tbarrachina@iqn.upv.es, rmiro@iqn.upv.es, gverdu@iqn.upv.es

^bDepartamento de Ingeniería Mecánica y Construcción
Universitat Jaume I, Castellón de la Plana
schiva@emc.uji.es

SINOPSIS

El shock térmico presurizado (PTS – Pressurized Thermal Shock) es un tema importante en la seguridad de los reactores nucleares. El PTS ocurre cuando la pared de la vasija caliente se expone a un fluido a baja temperatura y alta presión durante la inyección de refrigerante de emergencia tras un accidente de pérdida de refrigerante (LOCA - Loss Of Coolant Accident).

Este tipo de sucesos en los que la vasija se refrigera de manera excesiva pueden afectar a la seguridad debido a que el estrés térmico al que se somete a la vasija junto con la irradiación que ésta soporta produce una pérdida de ductilidad de la vasija.

Una de las series de test realizados dentro del proyecto OECD ROSA investiga la estratificación de temperatura en las ramas frías y en el downcomer de un PWR durante la inyección de agua de los ECCS bajo condiciones de circulación natural monofásica y bifásica. El primer test, T1-1 se realiza en condiciones cuasi-estáticas con diferentes inventarios de masa. La condición inicial del test corresponde a la circulación natural a 15.5 MPa y 100% de inventario en el primario con una potencia del reactor del 2% de la potencia nominal a escala. El agua de los ECCS a 300K se inyecta en las ramas frías A y B, en este orden una detrás de la otra, durante 80s aplicando dos diferentes flujos máxicos de entrada de los ECCS.

En este artículo se presentan los resultados del análisis completo del Test 1-1 del proyecto OECD ROSA mediante el código ANSYS-CFX. El objetivo de este estudio es la validación del código para la simulación de casos en los que las fuerzas de empuje juegan un papel importante junto con la utilización de diferentes modelos de turbulencia que tiene implementados el código ANSYS-CFX.

1. INTRODUCCIÓN

La importancia del estudio de la estratificación térmica en el caudal de la rama fría se basa en que esta estratificación puede provocar una pluma de agua fría en el downcomer y afectar a la integridad de la vasija del reactor. La pared de la vasija del reactor en contacto con la pluma sufre un enfriamiento rápido a alta presión, fenómeno que es conocido como Shock Térmico Presurizado (*Pressurized Thermal Shock - PTS*).

Un PTS severo se puede producir durante un accidente de pérdida de refrigerante (*Loss of Coolant Accident - LOCA*), cuando se requiere la inyección de agua fría desde los sistemas de refrigeración de emergencia (*Emergency Core Cooling System - ECCS*).

Con el objetivo de analizar este fenómeno con códigos de dinámica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) se han llevado a cabo diversos proyectos

internacionales para validar los resultados obtenidos proporcionando datos experimentales. Uno de estos proyectos es el proyecto OECD/NEA ROSA (*Rig-of-Safety Assessment*) que proporciona una base de datos experimental para validar la capacidad de predicción y la precisión de los códigos para la simulación de, entre otros, la estratificación de temperatura durante la inyección de agua de los ECCS.

En el marco del proyecto OECD ROSA se ha realizado diversos test en la instalación japonesa ROSA/LSTF (*Large Scale Test Facility*). Esta instalación es una réplica a escala de una planta PWR modelo de Westinghouse. Uno de estos test, el denominado Test 1-1, se realizó en el año 2006 con el objetivo de obtener distribuciones de temperatura en las ramas frías y en downcomer durante la inyección de los ECCS para la verificación de los códigos y los modelos [1].

En este artículo se presentan los resultados obtenidos del análisis completo del Test 1-1 del proyecto OECD ROSA mediante el código CFD comercial ANSYS-CFX [2]. El objetivo de este estudio es la validación del código para la simulación de fenómenos en los que las fuerzas de empuje juegan un papel importante.

2. ANÁLISIS DE LA ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA

En el test 1-1 se recogieron datos en diferentes condiciones durante la inyección de agua fría procedente de los ECCS: con flujo monofásico y bifásico bajo condiciones de circulación natural. El caso que se ha simulado corresponde con las condiciones de flujo monofásico.

El proceso de simulación seguido para analizar la estratificación térmica se basa en la guía de mejores prácticas para el uso de CFD en aplicaciones de seguridad en reactores nucleares [3].

Este apartado se organiza siguiendo la secuencia de simulación: geometría, definición de la malla, condiciones de contorno, esquemas de resolución y modelos de turbulencia.

2.1. Geometría

El tramo de tubería de la rama fría modelado comprende desde la salida de la bomba de agua de alimentación hasta el downcomer.

La línea de inyección de los ECCS se conecta a la rama fría por la parte superior y está situada a 1430 mm desde el downcomer.

El downcomer se ha modelado utilizando la condición de contorno de simetría que permite definir únicamente la mitad del mismo. La figura 1 muestra el modelo en ANSYS-CFX.

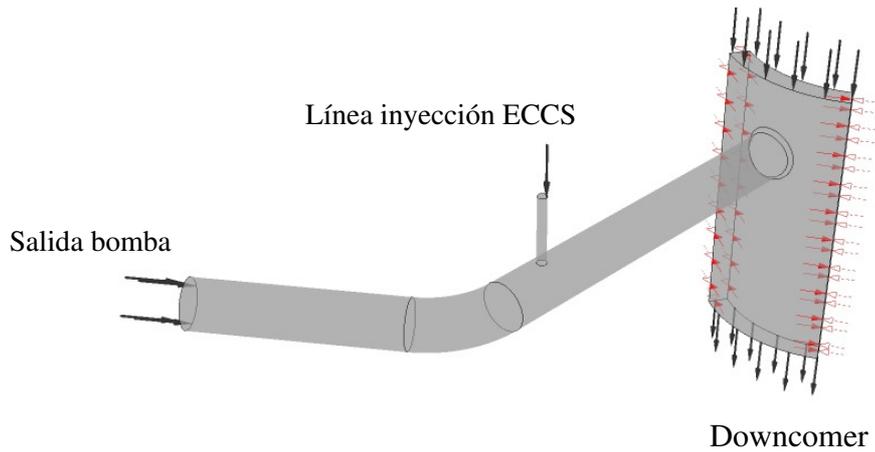


Figura 1. Modelo en ANSYS-CFX.

2.2. Generación de la malla

La malla se ha generado automáticamente utilizando el procedimiento de “inflation” en los vértices del dominio, como se muestra en la figura 2. El número total de elementos de la malla es 1388862.

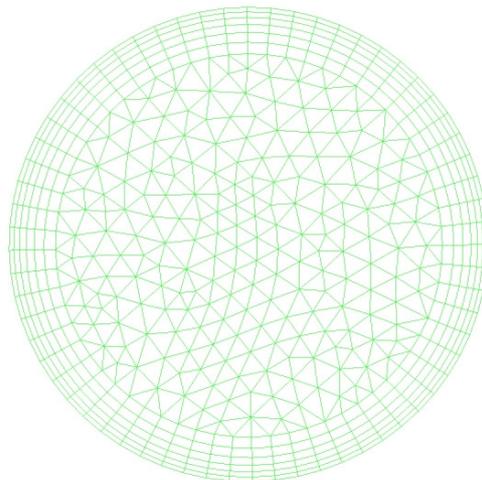


Figura 2. Detalle de la malla en las superficies.

2.3. Características del fluido

Debido a que las diferencias en la densidad del agua entre los caudales de la rama fría y la línea de ECCS es alrededor del 20%, las fuerzas de empuje se han tenido en cuenta en la simulación. Para flujos monofásicos se utiliza el modelo *Full Buoyancy Model (Density Difference)* cuando la densidad del fluido es una función de la temperatura o de la presión. La densidad de referencia del modelo se toma igual a 763.32 kg/m^3 , que es un valor aproximado de la densidad media en todo el dominio.

Se ha supuesto que el fluido en la tubería principal está estancado con una temperatura 553.5 K y una presión de 15.5 MPa.

2.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno impuestas son: caudal másico a la salida de la bomba de agua de alimentación y en la entrada de los ECCS y presión en la parte inferior del downcomer.

Las paredes del dominio: la pared de la tubería principal, la pared de la tubería de los ECCS y la pared de la vasija del reactor se han considerado paredes adiabáticas.

Como se ha mencionado anteriormente, en el downcomer se ha impuesto condiciones de simetría en los lados izquierdo y derecho.

2.5. Esquemas de resolución

Los términos de advección en las ecuaciones de volúmenes finitos discretizadas se calculan utilizando el esquema de alta resolución. El esquema numérico elegido para la turbulencia es el de primer orden.

El criterio de convergencia es residuo RMS menor de 0.0001 para las ecuaciones de continuidad, momento, energía y turbulencia.

El paso de tiempo se ha fijado en 0.01 s.

2.6. Modelos de turbulencia

Se ha analizado el fenómeno de la estratificación térmica con dos modelos de turbulencia para estudiar su influencia en los resultados: el modelo k-epsilon ($k-\epsilon$) y el *Shear Stress Transport* model (SST).

3. RESULTADOS

Los datos experimentales del proyecto OECD ROSA son propietarios; por tanto los resultados solo se pueden mostrar de una manera cualitativa.

En la instalación LSTF, los termopares están situados en cuatro posiciones diferentes en la rama fría. Los resultados obtenidos se van a comparar con las medidas realizadas en la sección TE-2, situada en la rama fría entre la inyección de los ECCS y el downcomer, concretamente a 707 mm de la línea de inyección de los ECCS.

Hay en total 21 termopares colocados como se indica la figura 3.

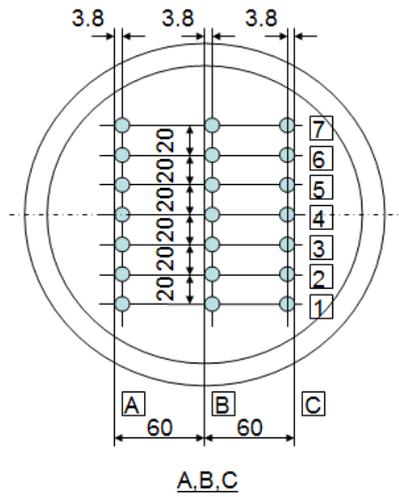


Figura 3. Posición de los termopares en la sección TE-2.

La distribución de temperatura obtenida con el código ANSYS-CFX para los dos modelos de turbulencia considerados se muestran en las figuras 4 a 7.

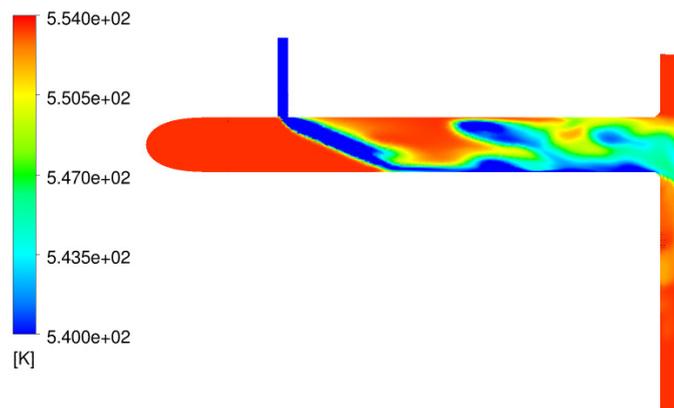


Figura 4. Distribución de temperatura con el modelo *k-epsilon*.

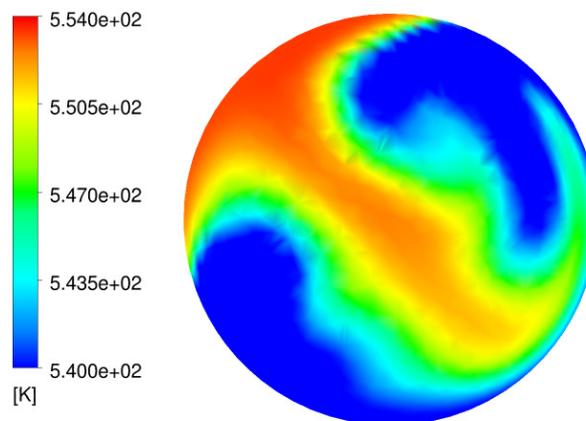


Figura 5. Distribución de temperatura con el modelo *k-epsilon* en la sección TE-2.

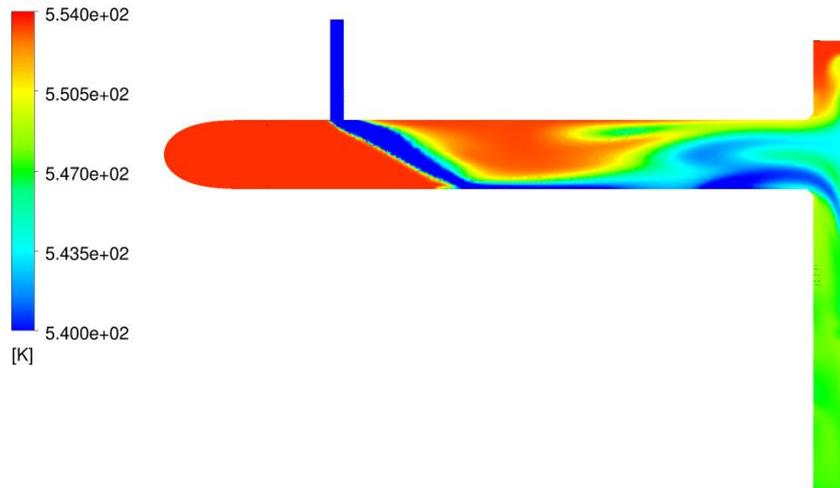


Figura 6. Distribución de temperatura con el modelo *SST*.

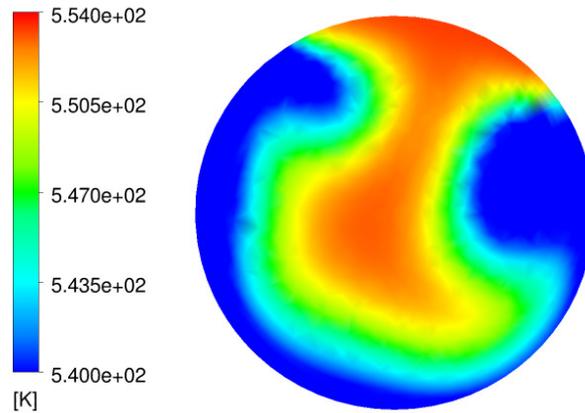


Figura 7. Distribución de temperatura con el modelo *SST* en la sección TE-2.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo constituye una primera aproximación para la cualificación del código CFD comercial ANSYS-CFX code para la simulación del fenómeno de estratificación térmica.

Dado que el modelo $k-\varepsilon$ no es capaz de reproducir los fenómenos de turbulencia con fuertes anisotropías, los mejores resultados se obtienen con el modelo *SST* como era de esperar.

De las figuras 4 y 6 se puede observar que se produce una estratificación térmica en el fluido de la rama caliente. El agua más fría se mantiene en la parte inferior de la tubería mientras que el agua caliente ocupa la parte superior de la misma. La capa de agua fría inferior no se mezcla con la capa caliente, siendo más notable este fenómeno con el modelo *SST*.

En las figuras 5 y 7 se plasma la principal diferencia entre los dos modelos de turbulencia. En el caso del modelo $k-\varepsilon$, el gradiente máximo de temperatura no está localizado en la línea vertical central de la sección TE-2B, como ocurre con el modelo *SST*. Los resultados obtenidos con el modelo *SST* se corresponden con los resultados experimentales.

Trabajos futuros en este campo incluirán el estudio de la influencia de las características de la malla y otros modelos de turbulencia en los resultados.

REFERENCIAS

1. JAEA, *Final data report of EOCED/NEA ROSA project test I-1*. (2008).
2. ANSYS CFX Reference Guide. Release 12.1. ANSYS, Inc. (November 2009).
3. J. Mahaffy et al, *Best Practice Guidelines for the Use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications*. NEA report, NEA/CSNI/R(2007)5.
4. T. Farkas, I, Tóth. “Fluent analysis of a ROSA cold leg stratification test”, *Nuclear Engineering and Design*, **240**, pp. 2169-2175 (2010).