



OCDE/NEA INTERNATIONAL BENCHMARK EXERCISES: LA VALIDACIÓN DE LOS CÓDIGOS CFD APLICADOS A LA INDUSTRIA NUCLEAR

En los últimos años, debido, entre otros, a la ralentización de la industria nuclear, la inversión en el desarrollo y validación de los códigos CFD, aplicados específicamente a los problemas de la industria nuclear se ha visto seriamente lastrada. Así pues, los *International Benchmark Exercise* (IBE) auspiciados por la OCDE/NEA han sido una herramienta fundamental para poder analizar el uso de los códigos CFD en la industria nuclear, ya que si bien estos códigos ya son maduros en muchos campos, todavía existen dudas sobre ellos en aspectos críticos de los cálculos termohidráulicos, incluso en escenarios monofásicos. La Universitat Politècnica de València (UPV) y la Universitat Jaume I de Castellón (UJI), auspiciados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), han participado activamente en todos los *benchmarks* planteados, así como en las reuniones de expertos, elaborando parte de la documentación preparada por el grupo. En este trabajo, se realizará un resumen de la participación en los diferentes IBE, describiendo el *benchmark* en sí, el modelo CFD creado para el mismo, y las principales conclusiones a las que se llegó.

INTRODUCCIÓN

En mayo de 2002, la OCDE/NEA y el OIEA, de forma conjunta organizaron el *Exploratory Meeting of Experts to Define an Action Plan on the Application of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes to Nuclear Reactor Safety (NRS) Problems* en Aix-en-Provence (Francia) y, posteriormente, en Pisa, en ese mismo año, se celebró un segundo *meeting*, *Use of Computational Fluid Dynamics (CFD) Codes for Safety Analysis of Reactor Systems including Containment*. De éstos se concluyó la necesidad de crear una serie de grupos de trabajo (*Writing Groups*) destinados a estudiar y seguir las evoluciones de los códigos CFD (*Computational Fluid Dynamic*) y analizar la utilidad de los mismos en la industria nuclear, supervisados por el *Working Group on the Analysis and Management of Accidents (WGAMA) Committee* de la NEA. De los tres grupos de trabajo, el WG2, se dedicó principalmente a las bases para la evaluación de los códigos CFD, planificando una serie de actividades encaminadas a obtener una base de datos suficiente para validar

el uso de estos códigos en la industria nuclear.

La actividad del WG2 se centra en tres líneas. En primer lugar, promover el encuentro entre expertos, mediante la organización de *workshops*, como la serie de *workshops* CFD4NRS, que este año tiene programada su sexta edición en el Massachusetts Institute of Technology de EEUU, o reuniones periódicas en la sede de la NEA en los que plantear estudios y desarrollos de forma colaborativa entre expertos. En segundo lugar, crear una base de datos con los datos experimentales ya existentes, pero todavía no publicados, que permita realizar *benchmarks* internacionales, como la serie *International Benchmark Exercise* (IBE) que está por su cuarto ejercicio. Y, por último, crear un portal web tipo *wiki* para dar acceso a esta información a todos los usuarios (<https://www.oecd-nea.org/nsd/csni/cfd/>).

Desde el inicio de las actividades del WG2, la Universitat Politècnica de València (UPV) y la Universitat Jaume I de Castellón (UJI), auspiciados por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), han participado activamente

CARLOS PEÑA-MONFERRER

Personal Docente e Investigador en el Grupo de fluidos multifásicos.

UNIVERSITAT JAUME I (UJI)

Máster Oficial en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Instalaciones Industriales y Edificación e Ingeniero Industrial por la UJI.

ARTURO MIQUEL VEYRAT

Investigador en el Instituto de Ingeniería Energética.

UNIV. POLITÉCNICA DE VALENCIA (UPV)

Graduado en Física por la UPV y el Imperial College London

JOSÉ LUÍS MUÑOZ-COBO

Catedrático de Ingeniería Nuclear y director del Grupo de Termohidráulica e Ingeniería Nuclear del Instituto de Ingeniería Energética

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

SERGIO CHIVA VICENT

Profesor Titular del Área de Mecánica de Fluidos y responsable del Grupo de Investigación de Fluidos Multifásicos

UNIVERSITAT JAUME I

Doctor ingeniero industrial por la UPV

OECD / NEA INTERNATIONAL BENCHMARK EXERCISES: VALIDATION OF CFD CODES APPLIED NUCLEAR INDUSTRY

In the recent years, due, among others, the slowing down of the nuclear industry, investment in the development and validation of CFD codes, applied specifically to the problems of the nuclear industry has been seriously hampered. Thus the International Benchmark Exercise (IBE) sponsored by the OECD / NEA have been fundamental to analyze the use of CFD codes in the nuclear industry, because although these codes are mature in many fields, still exist doubts about them in critical aspects of thermohydraulic calculations, even in single-phase scenarios. The Polytechnic University of Valencia (UPV) and the Universitat Jaume I (UJI), sponsored by the Nuclear Safety Council (CSN), have actively participated in all benchmarks proposed by NEA, as well as in the expert meetings. In this paper, a summary of participation in the various IBE will be held, describing the benchmark itself, the CFD model created for it, and the main conclusions.

en todas sus iniciativas. Se han completado todos los *benchmarks* planeados, y se ha participado en las reuniones de expertos, elaborando parte de la documentación preparada por el grupo.

En los últimos años, debido, entre otras causas, a la ralentización de la industria nuclear, la inversión en el desarrollo y validación de estos códigos, aplicados específicamente a los problemas de la industria nuclear se ha visto seriamente lastrada. Así pues, los IBE son una herramienta fundamental para poder analizar el uso de los códigos CFD en la industria nuclear, ya que si bien estos códigos ya son maduros en muchos campos, todavía existen dudas sobre ellos en aspectos críticos de los cálculos termohidráulicos, incluso en escenarios monofásicos.

En este trabajo, se realizará un resumen de la participación en los diferentes IBE, describiendo el *benchmark* en sí, el modelo CFD creado para el mismo, y las principales conclusiones a las que se llegó.

IBE-1 OECD/NEA-VATTENFALL T-JUNCTION BENCHMARK EXERCISE, 2009

El primer *benchmark* fue dedicado al estudio de la mezcla, en una unión en T, de dos corrientes, una fría y una caliente. Este escenario puede crear grandes fluctuaciones de temperatura cerca de la pared, lo que causaría un ciclado térmico en el material de la tubería, induciendo un estrés térmico que podría derivar en la aparición de grietas por fatiga. Se trata de un problema ya estudiado en el contexto de los reactores rápidos LMFBR, donde se cree que es uno de los problemas más significativos, pero que toma importancia a raíz del incidente en la planta francesa Civaux-1 en 1998. Se trata de un fenómeno detectado en los sistemas RHR, que tendría un efecto serio en la gestión de la vida útil de las centrales, tanto de los PWR como de los BWR.

El fenómeno que se estudia resulta complicado de detectar, ya que los termopares usuales en las plantas no tienen la resolución temporal necesaria. La oscilación que se produce es debida a la alta turbulencia en la zona de mezcla, y conviven escalas de altas y bajas frecuencias. Parece que las altas frecuencias son disipa-

das por la inercia del material, y las bajas frecuencias serían las que tendrían un papel predominante. Pero todavía existe cierta controversia en el papel que juegan ambas en los fenómenos de producción de grietas y en su posterior propagación. Desde el punto de vista de la simulación mediante CFD se trata de un problema complicado. Los modelos de turbulencia URANS, *Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes*, usuales en la industria, proporcionan viscosidades turbulentas elevadas que mitigan, e incluso eliminan las oscilaciones en la zona de mezcla, por lo que hay que recurrir a modelos *Scale-Resolving Simulation* (SRS), tipo *Large Eddy Simulation* (LES), *Scale-Adaptive Simulation* (SAS) o *Detached Eddy Simulation* (DES) para poder predecir las oscilaciones. Aun así, es necesario

mucho trabajo de validación antes de tomar estos modelos como herramientas de predicción.

Se tomó como referencia el trabajo experimental del 2009 del Älvkarleby Laboratory del Vattenfall Research and Development sueco. Se trata de un tubo principal (diámetro interior de $D_h = 140$ mm) por el que transcurre agua a 19°C ($Pr = 7$) con un caudal de 9 l/s ($Re = 10^5$), y un tubo secundario de $D_v = 100$ mm, conectado a 90° , por el que se inyecta un caudal de 6 l/s ($Re = 8 \cdot 10^4$) a una temperatura de 36°C ($Pr = 5$). La relación de diámetros es de $1,4$ y la de caudales de $1,5$. Ambos conductos circulares están fabricados de material transparente. Las medidas de temperatura se realizaron mediante termopares, y las de velocidad mediante PIV.

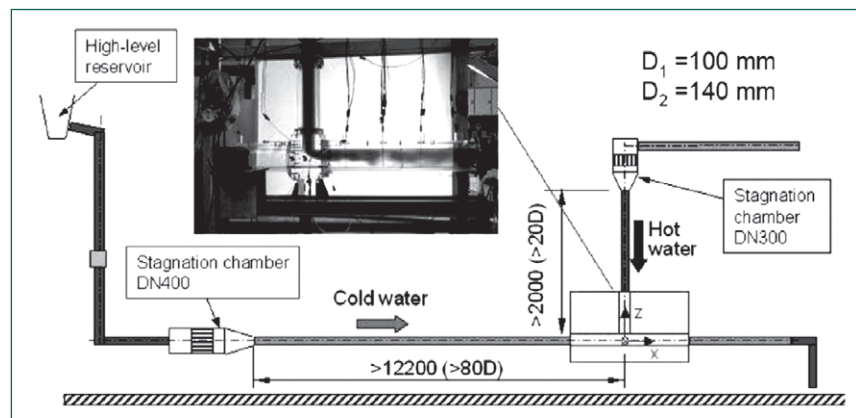


Figura 1. Esquema de la instalación experimental de Vattenfall.

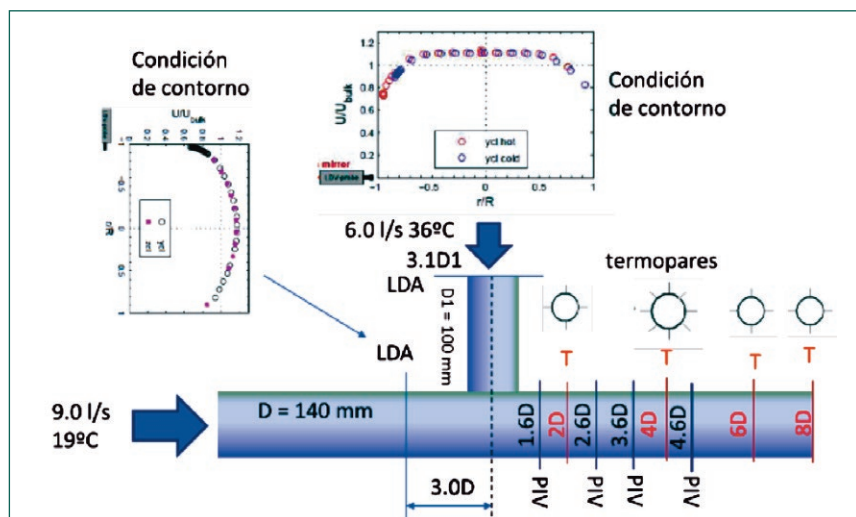


Figura 2. Esquema de las condiciones de contorno, y de las posiciones de medida. La velocidad se mide utilizando PIV a través de perfiles radiales, y la temperatura con termopares en las paredes con la disposición que se indica.

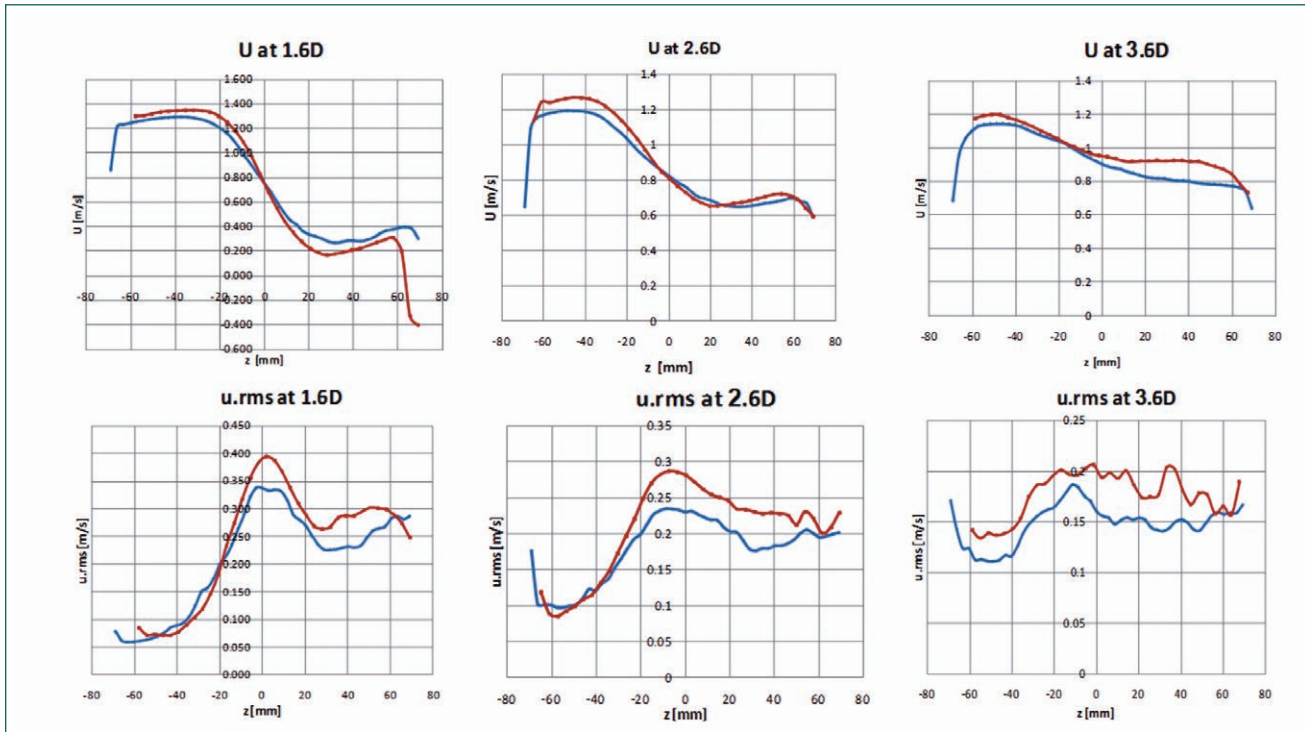


Figura 3. Distribución de velocidades en dirección axial, a lo largo de un perfil radial vertical (eje z) para diferentes posiciones, y RMS de la misma. Línea azul resultados del modelo, y línea roja, resultados experimentales.

Para modelar este *benchmark* se optó por utilizar LES como modelo de turbulencia, con WALE para el modelo *subgrid*, con un esquema advectivo de diferencias centrales. El problema se inicializó utilizando una solución mediante el modelo de turbulencia *Shear Stress Transport*, un híbrido entre el k-omega cerca de la pared y k-epsilon lejos de ella. Se analizó un transitorio de 6,9 segundos para tener suficiente estadística. El modelo que posee una malla hexaédrica de 3,4 millones de nodos, con un paso de tiempo de 0,0001 s y un y+ promedio

menor de 1, tardó más de 300 horas utilizando 4 PC en paralelo, core (TH) 2 Quad Q9550@2.83GHZ.

En la Figura 3 se muestra la distribución de velocidad en un perfil vertical para la componente axial de la velocidad, así como la RMS de la misma. Como se puede ver, los resultados coinciden muy bien con los datos experimentales, y sólo algunas discrepancias menores del 10% se pueden apreciar. La simulación ofrece resultados que capturan muy bien la física del fenómeno, ofreciendo idénticas tendencias.

En cuanto a la temperatura, el resultado es más complejo y difícil. Aun así, como se muestra en la Figura 4 se obtienen predicciones que se ajustan muy bien a los resultados experimentales, incluso en la predicción del espectro de oscilaciones. Se realiza un análisis de Fourier de las oscilaciones, que como misión tiene estudiar el espectro de la turbulencia, así como la amplitud a baja frecuencia de la temperatura, causante de la fatiga y la aparición de grietas. Así el análisis CFD y los resultados experimentales dan una fre-

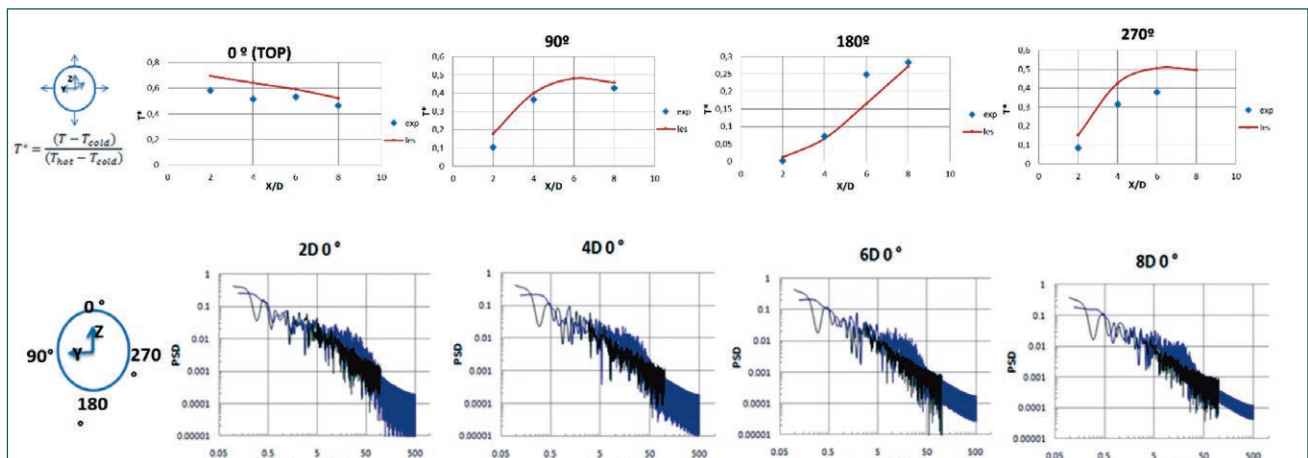


Figura 4. Distribución de la temperatura promedio normalizada (arriba) y PSD vs. Frecuencia para la media de la temperatura en el termopar superior a diferentes posiciones axiales (abajo).

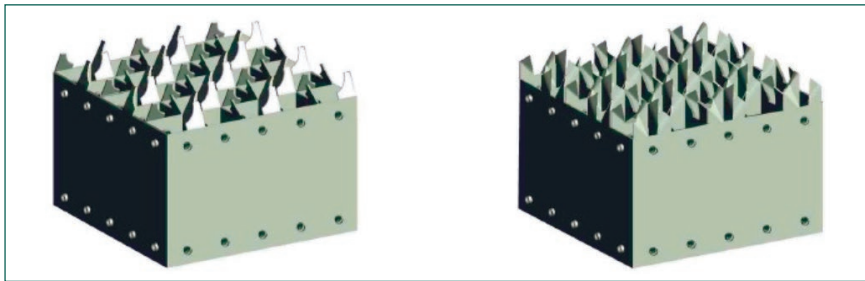


Figura 5. Tipos de rejilla utilizados en el benchmark, rejillas con álabes de tipo split (izquierda) y tipo swirl (derecha).

cuencia dominante alrededor de los 3,5 Hz en muchos de los termopares, pero con una caída rápida de la amplitud con la frecuencia.

Al *benchmark* se presentaron 29 simulaciones de otros tantos participantes. El grupo de la UPV y la UJI alcanzó la posición 11 del *ranking* en la simulación hidrodinámica y la 19 en la térmica. En general se puede concluir que la simulación mediante LES, con WALE para el modelo del *subgrid*, fue elegida de forma mayoritaria, y los resultados en general fueron satisfactorios, con predicciones muy cercanas a las experimentales en el caso de las velocidades. En la predicción de la temperatura el abanico fue mucho más amplio, y las dificultades para predecir bien los picos de frecuencia en los termopares se pusieron de manifiesto, aparte de dificultades en las mediciones cerca de las paredes del PIV que dificultó el análisis de las causas. Ninguna simulación fue capaz de predecir de forma correcta el comportamiento

de todos los termopares. Así pues, se puede concluir que los códigos CFD están ya en una fase muy madura cuando tratan en una única fase, pero que cuando se utilizan modelos turbulentos más complejos, es necesario seguir trabajando en la validación, sobre todo cuando se trata de extraer resultados de las oscilaciones proporcionadas por el código, donde la numérica juega un gran papel.

IBE-2 OECD/NEA KAERI ROD BUNDLE CFD BENCHMARK EXERCISE. 2011

Los elementos combustibles incluyen rejillas espaciadoras para mantener su estabilidad, y alterar la dinámica del fluido con la intención de mejorar la transferencia de calor desde las varillas al refrigerante. Conocer en detalle este fenómeno es clave para determinar el flujo de calor crítico (CHF), y con ello mejorar el margen de seguridad en los reactores PWR. El *benchmark* OECD/NEA-KAERI analiza el mezclado turbulento en un haz de barras con espaciadores, centrándose en el fenómeno turbulento

aguas abajo de la rejilla espaciadora. Los experimentos realizados para dicho *benchmark* proporcionan medidas del vector velocidad, intensidad turbulenta y vorticidad en los subcanales en diferentes posiciones aguas abajo de la rejilla espaciadora, utilizando dos tipos de álabes: *split* y *swirl* (Figura 5).

La instalación experimental MATIS-H, del Korea Atomic Energy Research Institute, KAERI, Figura 6, consiste en un canal de 170 x 170 mm de ancho y 4,67 de largo en el que se sitúa un haz de barras 5x5, con un diámetro de 25,4 mm y 3.863 mm de largo. El fluido de trabajo es agua, y toda la instalación es isoterma. En el *benchmark* se estudian dos tipos de rejillas espaciadoras, *split* y *swirl*. El ensayo se realiza a Reynolds de 50.000, lo que corresponde a una velocidad promedio, U_{bulk} , de 1,5 m/s, con fluido isoterma a 37°C y una presión de referencia de 1,57 bar. La instalación funciona en circuito cerrado. La medida de la velocidad se realiza mediante 2-D LDA en cuatro posiciones, 0,5, 1,0, 4,0 y 10 D_H aguas debajo de la rejilla (Figura 7). Para ello, la posición de medida se mantiene fija, y es la rejilla la que se mueve. Medidas aguas arriba se realizan para proporcionar la condición de contorno adecuada para la simulación.

Desde el punto de vista de la simulación de este escenario, la clave se sitúa claramente en el modelado de la turbulencia. Diversas escalas turbulentas tienen lugar en el dominio analizado, lo que dificulta la predicción de las fluctuaciones de la velocidad, y por tanto su mezclado, que resulta fundamental para predecir con

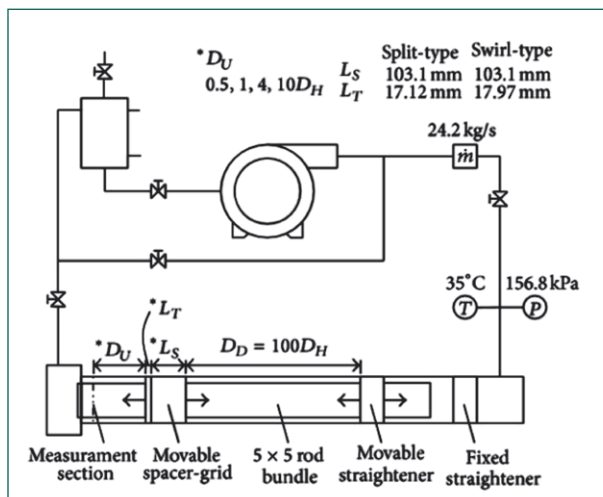


Figura 6. Diagrama de la instalación experimental KAERI (NEA/CSNI/R(2013)5).

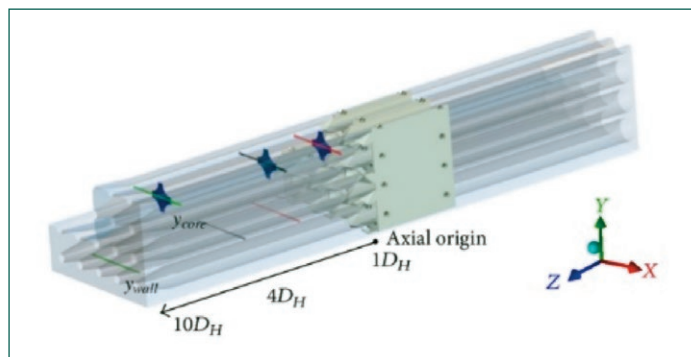


Figura 7. Esquema de los puntos de medida de velocidad después del espaciador.

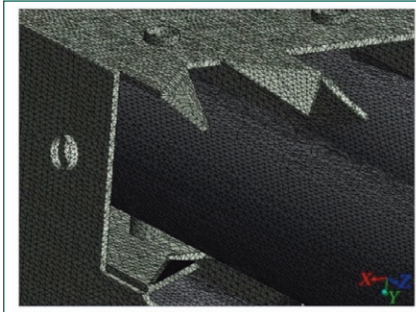


Figura 8. Detalle de la malla en el espaciador tipo *swirl*.

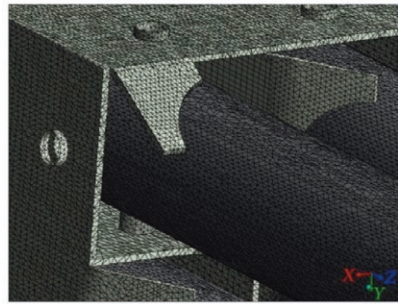


Figura 9. Detalle de la malla en el espaciador tipo *split*.

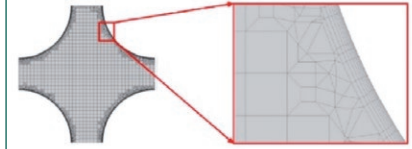


Figura 10. Detalle de la malla en un subcanal.

detalle el comportamiento producido por la rejilla. Los modelos RANS no resultan útiles, por lo que hay que utilizar modelos tipo *Scale-Resolving Simulation* (SRS), y en este caso se ha optado por LES con Smagorinsky como modelo de *subgrid*. Además se han tenido que elegir modelos con muy poca difusividad numérica para evitar la amortiguación de la turbulencia. Pero en este caso se añade otra dificultad, una geometría muy compleja propia de las rejillas. Ha sido necesario realizar una malla muy elaborada, que se adapte bien a las exigencias de las guías de buenas prácticas más usuales. La malla, híbrida, con mayoritaria participación de elementos hexaédricos, mantiene un y^+ en el rango de

0,06 y 2,68, con un valor promedio de 1,03, con al menos 10 capas prismáticas cerca de las paredes. La malla está compuesta de unos 26 millones de nodos de media, con un tamaño máximo de celda de 0,3 mm. La simulación se realizó utilizando 12 cores, y un tiempo de más de 300 h de CPU, simulando un total de 1,25 s, con pasos de tiempo de 0,0007 s, en los que se mantuvo el Courant en valores promedios de 1,3.

Los resultados obtenidos por la simulación del grupo UPV-UJI, cómo participación en el *benchmark*, fueron valorados como la mejor estimación con modelos LES. Los resultados obtenidos son difíciles de mostrar, por la gran cantidad de datos extraí-

dos. A modo de ejemplo se muestra en la siguiente imagen la validación para el espaciador con álabes de tipo *swirl* a las distancias de $1,0D_H$ y $4,0D_H$ y $10,0D_H$ y a una $y = 68,4$ mm. En la Figura 11 se muestran las componentes de la velocidad y sus RMS normalizados con la velocidad promedio del flujo en la dirección axial. Como se observa, salvo una pequeña discrepancia en los RMS de las componentes axial (dirección z), los resultados de la simulación predicen perfectamente en tendencia y número los resultados experimentales. Es importante destacar que los RMS sean bien predichos para que el proceso de mezcla sea correctamente calculado.

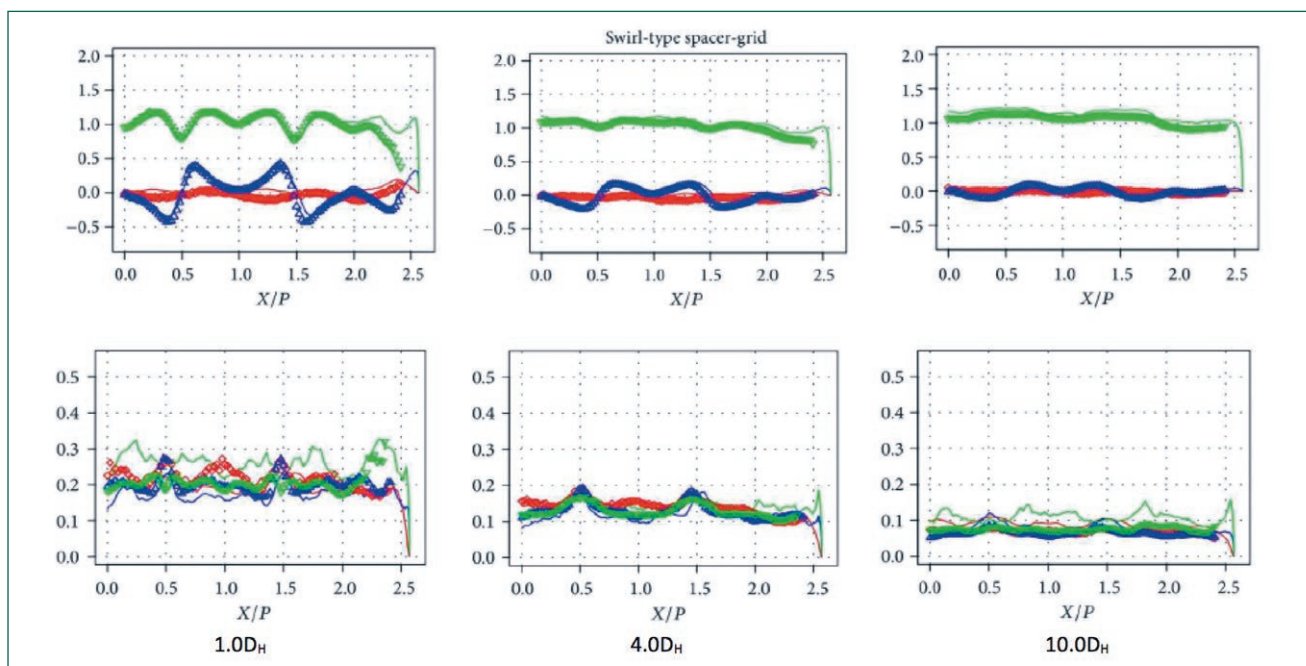


Figura 11. Valores promedios de la velocidad normalizados (U/U_{bulk}) (arriba) y RMS (abajo) normalizado $U_{i,rms}/U_{bulk}$ en diferentes posiciones aguas abajo de la rejilla espaciadora tipo *swirl*. Rojo dirección x, azul dirección y, verde dirección z. P es la distancia de varilla a varilla, 33,2 mm. Experimental: puntos, simulación: líneas.

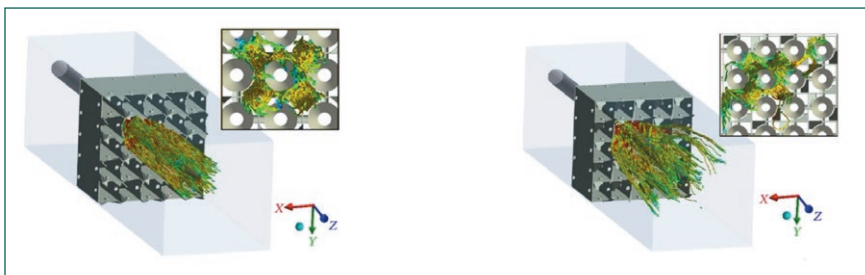


Figura 12. Análisis de las líneas de corriente en las dos configuraciones de las rejillas espaciadoras.

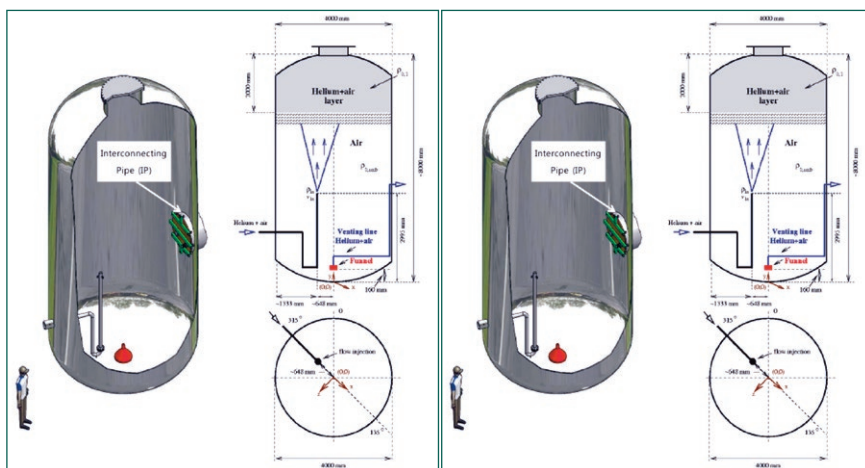


Figura 13. Diagrama esquemático de la vasija aislada, sistema de inyección, venteo y condiciones iniciales [OECD/NEA-PSI, 2014].

Figura 14. Descripción de la malla utilizada.

El análisis de las corrientes de flujo que salen de un subcanal (Figura 12) nos permite visualizar el efecto que tiene cada tipo de rejilla espaciadora en el mezclado del flujo a su paso por los álabes. Mientras que la de tipo *swirl* tiene un efecto de recirculación dentro de su subcanal, la de tipo *split* propicia el mezclado entre subcanales.

Al *benchmark* se presentaron 25 simulaciones, de 22 países. 15 optaron por modelos de turbulencia RANS, seis por modelos LES y cuatro por modelos híbridos. En general los modelos de turbulencia LES obtuvieron un ajuste considerablemente mejor en los perfiles de velocidad y en RMS, en contra los modelos RANS eran capaces de predecir de manera aproximada los perfiles de velocidad fallando en los picos máximos y mínimos y con discrepancias mayores en el caso de la comparación con los RMS. Dentro de la clasificación de resultados, las simulaciones realizadas por el grupo de la UPV y la UJI siempre estuvieron entre las cinco primeras, siendo la mejor clasificada en alguno de los apartados.

En general se puede concluir que es factible simular con éxito el flujo en una rejilla espaciadora con geometría real, y que los resultados obtenidos son fieles a la realidad si la malla y los modelos son elegidos de forma adecuada. El efecto de mezcla producido por los diferentes tipos de rejilla es analizado de forma correcta, por lo que el análisis mediante CFD puede ser una herramienta madura para el diseño y análisis en elementos combustibles si se consiguen resultados similares con la distribución de temperatura.

IBE-3 OECD/NEA-PSI CFD BENCHMARK EXERCISE, 2013

La respuesta termohidráulica que ocurre en la contención en condiciones de accidente, como el mezclado y distribución de hidrógeno tras un accidente severo, es un tema relevante que necesita ser investigado según expertos y organismos internacionales. Por tanto, se requiere el desarrollo y validación de códigos computacionales que puedan predecir correctamente la distribución de gas en la contención para efectuar análisis rela-

cionados con la seguridad, diseño o condiciones operacionales en reactores actuales o avanzados.

En el marco del tercer *benchmark* internacional promovido por la OECD/NEA, se ha efectuado un nuevo *test* en la instalación termohidráulica a gran escala Panda del Paul Scherrer Institut (PSI) suizo, para investigar el fenómeno de mezclado y erosión de la capa de hidrógeno estratificada en uno de los compartimentos de la instalación que quiere representar la contención. Por motivos prácticos y de seguridad se hace uso de helio en lugar de hidrógeno y aire en lugar de vapor para evitar la atmósfera explosiva que se quiere investigar. En este escenario se desea predecir la estructura de un flujo de inyección vertical compuesto por la mezcla aire/helio y el fenómeno asociado de mezclado y estratificación en el volumen de la contención. Con este *benchmark* se persigue evaluar el uso de códigos CFD en la predicción del mezclado de helio en un modelo a gran escala de vasija de contención analizando la erosión que genera un jet sobre una capa estable de hidrógeno en el volumen de contención como la que podría formarse durante un accidente severo.

La instalación es un tanque de 90 m³, con diámetro interior de 4 m y altura de 8 m que se asimila a uno de los pozos húmedos de la instalación Panda. Se realiza una inyección de una mezcla de aire y helio por una boquilla situada a 648 mm del eje del tanque. Durante todo el *test* se mantuvo constante la presión a 0,994 bars, venteando el gas desde la parte inferior del tanque. La instrumentación disponible es PIV para medidas 2D de la velocidad en una región del tanque, análisis de la concentración de gases mediante dos espectrómetros de masas que analizan muestras en continuo, y 266 termopares tipo K distribuidos por el tanque. El *test* se inicia con el tanque estratificado, con aire rico en helio en $y > 6000$ mm, y una zona de aire puro situado en $y < 5000$ mm. Durante cerca de 8000 segundos se inyecta una mezcla de 21,52 g/s de aire y 0,42 g/s de helio a temperatura que van desde 20 a 29,3°C.

En este caso el modelo CFD utiliza una malla con un número de nodos reducidos respecto al tamaño del

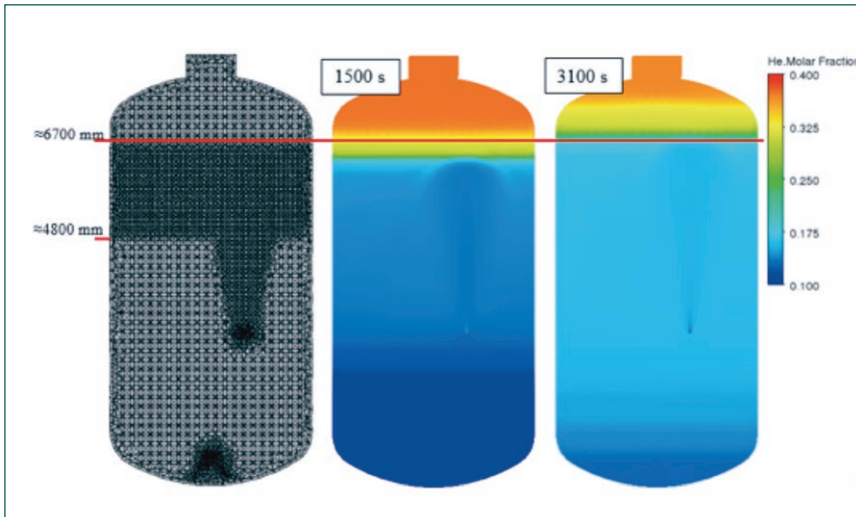


Figura 15. Valores de concentración de helio en los tiempo 1.500 y 3.100 s y representación de la malla.

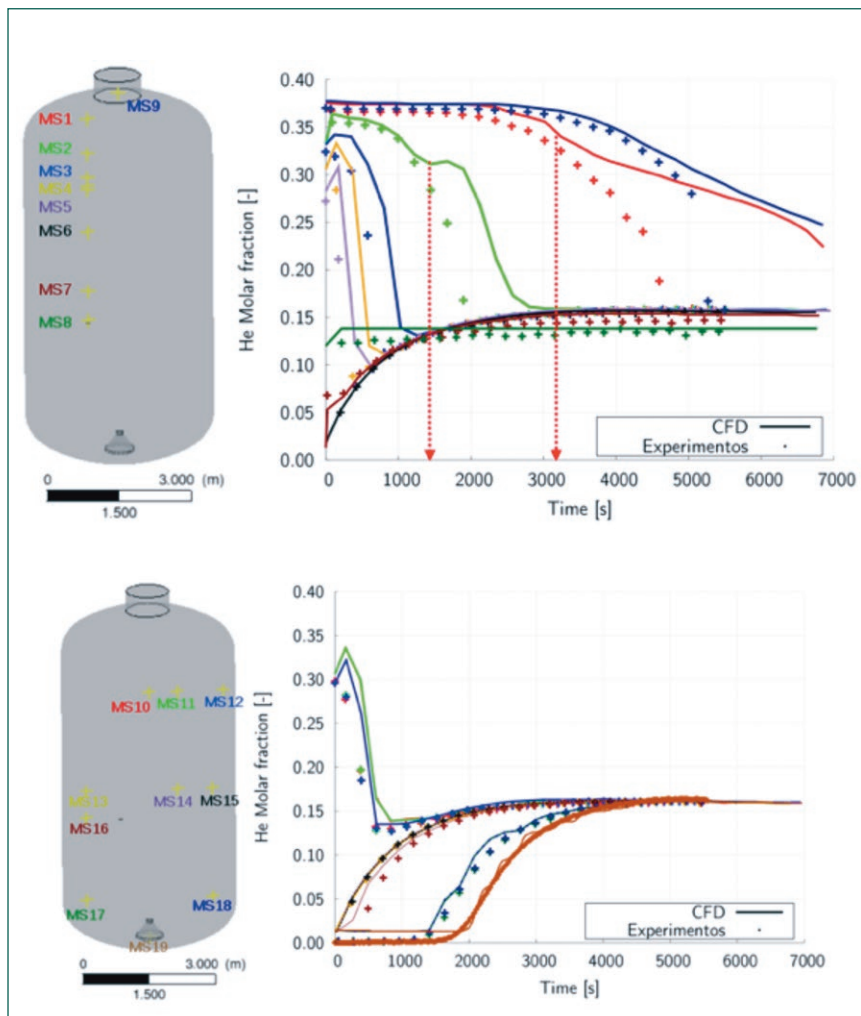


Figura 16. Comparación entre experimentos y resultados de la simulación de la concentración temporal de helio en los puntos de control mostrados en el margen izquierdo.

tanque por el larguísimo transitorio. La malla posee 710.000 nodos, con un tamaño máximo de celda 0,2 m. Debido a las bajas velocidades y las celdas grandes se optó por el modelo SST para la turbulencia. Se representó el fluido como una mezcla multicomponente compuesta por aire y helio, introduciendo un coeficiente de difusión binario adecuado para este test. La integración temporal se resuelve mediante un esquema tipo *Backward Euler* mientras que el término advectivo se resuelve para la ecuación del momento y turbulencia con el esquema de 2º orden o superior en función de las condiciones locales. El paso de tiempo se mantuvo fijo en 0,05 s.

La síntesis de resultados se realizó sobre un total de 19 participantes con comparaciones de evolución temporal de la concentración de helio, tiempo de erosión de la capa de helio, temperatura, perfiles de velocidad y RMS. La participación del grupo UPV y UJI obtuvo la 4ª posición en parámetros destacados como la concentración de helio. En la Figura 16 se muestra la comparación de resultados relativa a la evolución temporal de concentración de helio en diferentes posiciones de la vasija.

En general los resultados de concentración de helio se ajustan satisfactoriamente a los experimentos para la mayoría de los puntos de control, con discrepancias mayores en los puntos de control MS1 y MS2, alejados de la zona de inyección, donde el fenómeno de difusión tiene más relevancia.

Se puede concluir que aun en el caso de fenómenos sencillos, existe bastante diversidad en los resultados obtenidos por los participantes del ejercicio, aun utilizando modelos similares. Así pues, es necesario seguir los consejos de las guías de buenas prácticas, y el conocimiento adquirido en casos ya publicados y estudiados para evitar tomar decisiones erróneas en la simulación. Resulta obvio que modelos muchos más complejos de turbulencia como SAS pueden dar mejores predicciones frente a los modelos promediados tipo SST, pero necesitan de muchos recursos computacionales, y aun así su uso no siempre está justificado por los resultados que se obtienen. Los modelos tipo LES quedan descartados por el tamaño del problema en estos momentos.

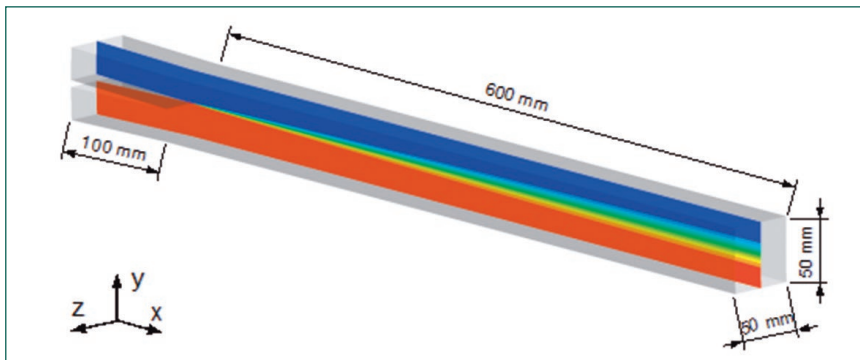


Figura 17. Esquema del experimento GEMIX.

IBE-4 OECD/NEA CFD BENCHMARK WITH UNCERTAINTY QUANTIFICATION, 2015

En 2015 se lanzó el último *benchmark*, que todavía no se ha concluido. El objetivo principal de este *benchmark* es evaluar distintos métodos de cuantificación de incertidumbre para simulaciones CFD. Se trata de un campo muy interesante, ya que a pesar de que los códigos CFD han demostrado ser de gran utilidad en el campo de la ingeniería nuclear, su uso está limitado por la falta de métodos que permitan estimar la incertidumbre de sus resultados de forma fiable y eficiente. El *benchmark* comenzó en junio de 2015 y los resultados se presentarán en septiembre de 2016.

Como los métodos de cuantificación de incertidumbre suelen requerir ejecutar la simulación muchas veces, se optó por un problema sencillo, para así reducir el tiempo de cálculo. El experimento, realizado en la instalación GEMIX del Paul Scherrer Institute (Figura 17) consiste en la mezcla turbulenta de dos corrientes de agua a diferente temperatura, introducidas por los dos brazos de un canal en forma de Y. Se hace uso de PIV en diferentes planos transversales, así como varios sensores WMS situados a

lo largo del canal, con ello se puede medir los perfiles de velocidad, energía cinética de turbulencia y concentración. Los datos experimentales se corresponden con dos perfiles verticales, situados en el plano central del canal, a $x=70$ mm y $x=450$ mm de la intersección de los brazos.

Las simulaciones se realizaron usando el modelo de turbulencia SST. Las simulaciones se realizaron siguiendo guías de buenas prácticas para garantizar unos resultados robustos. La malla empleada está formada por 210.000 prismas rectangulares, refinada cerca de las paredes y del plano medio horizontal. Como condición de entrada se impuso un flujo másico de 1 kg/s en cada brazo. Como condición de salida se impuso una presión relativa de 0 Pa.

El equipo de la UPV y la UJI ha optado por una técnica de cuantificación conocida como *Polynomial Chaos Expansion*. Este método, relativamente reciente, permite estimar de forma precisa la incertidumbre de la simulación, con la ventaja de requerir un número reducido de simulaciones. Como parámetros inciertos se tomaron los coeficientes del modelo de turbulencia $k-\omega$. En total, bastaron 16 simulaciones. Los resultados de los

casos publicados (Figuras 18, 19 y 20) indican un buen ajuste de la simulación a los datos experimentales, con una banda de error que incluye la mayor parte de las medidas.

- Report of the OECD/NEA-Vattenfall T-Junction Benchmark Exercise, Report No. NEA/CSNI/R(2011)-5.
- Report of the OECD/NEA KAERI Rod Bundle CFD Benchmark Exercise NEA/CSNI/R(2013) 5.
- The Nuclear Energy Agency/Paul Scherrer Institute Computation Fluid Dynamics Benchmark Exercise. NEA/CSNI/R(2016) 2.
- ASME, «Standard for verification and validation in computational fluid dynamics and heat transfer,» ASME, 2009.
- OECD/NEA/CSNI, «Best practice guidelines for the use of CFD in nuclear reactor safety applications - Revision,» OECD, 2015.
- B.L. Smith, J.H. Mahaffy, K. Angele. A CFD benchmarking exercise based on flow mixing in a T-junction. Nuclear Engineering and Design, Volume 264, November 2013, pages 80-88.
- C. Peña-Monferrer, J. L. Muñoz-Cobo, and S. Chiva, CFD Turbulence Study of PWR Spacer-Grids in a Rod Bundle, Science and Technology of Nuclear Installations, vol. 2014.
- Jae Ryong Lee, Jungwoo Kim, Chul-Hwa Song Synthesis of the turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids based on the OECD-KAERI CFD benchmark exercise. Nuclear Engineering and Design, Volume 279, November 2014, pages 3-18.
- Michele Andreani, Arnoldo Badillo, Ralf Kapulla Synthesis of the OECD/NEA-PSI CFD benchmark exercise. Nuclear Engineering and Design, Volume 299, 1 April 2016, pages 59-80.

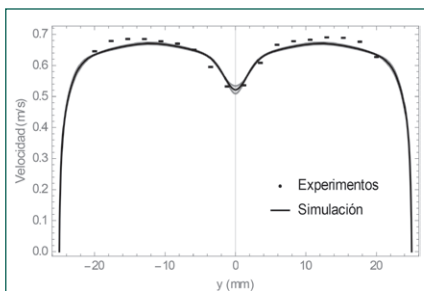


Figura 18. Perfil de velocidades.

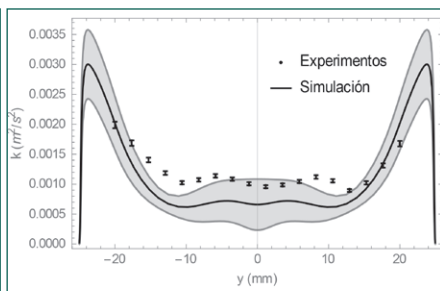


Figura 19. Perfil de energía cinética de turbulencia.

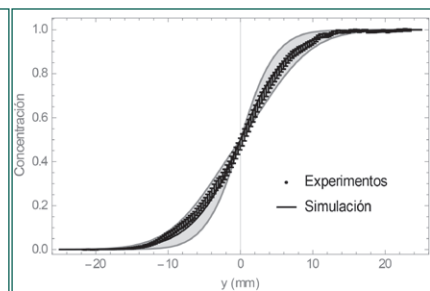


Figura 20. Perfil de concentración.