

FLUIDODINÁMICA COMPUTACIONAL Y SUS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA NUCLEAR

Jorge Aldama (ENUSA), Lluís Batet (UPC), Sergio Chiva (UJI)
Francisco Martín-Fuertes (CIEMAT),
Elisabet Mas de les Valls (UPC) y Rafael Miró (UPV)

INTRODUCCIÓN

Los denominados 'códigos CFD' o de fluidodinámica computacional se vienen aplicando cada vez con mayor frecuencia al análisis de procesos de sistemas de fluidos, en apoyo de tareas de diseño y análisis de seguridad. Esto sucede en todos los campos de la ingeniería, y la nuclear no es una excepción. ¿Qué nuevo conocimiento aportan estas herramientas en comparación con métodos clásicos?

Un ejemplo cotidiano lo encontramos en la disolución de un terrón de azúcar en el líquido de un vaso. Al remover el líquido con una cuchara notamos la resistencia al movimiento mientras observamos en la superficie la formación de ondas. La disolución completa del terrón al cabo de cierto tiempo es fácil de predecir, pero determinar la forma de la superficie libre no es tan fácil. Una particularidad de los fluidos es que, si bien el efecto global es conocido y previsible, el efecto local no lo es, aunque sea perfectamente visible. En general en muchos casos prácticos esto no es importante, o bien se puede enmascarar bajo

efectos globales, pero en otros casos sí puede serlo, especialmente cuando se quiere optimizar diseños o reducir conservadurismos. Si nos referimos al sector nuclear, es fácil, por ejemplo, determinar la velocidad media del fluido que cruza un elemento de combustible; pero el movimiento alrededor de una de las pequeñas aletas en el interior del elemento es otro tema. Y sin embargo, en este caso se trata de un aspecto fundamental para determinar la capacidad de refrigeración del fluido y por tanto la potencia máxima admisible (figura 1).

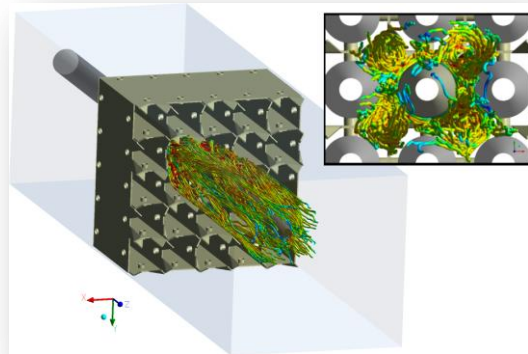


Figura 1.- Vectores de la velocidad del agua a su paso por una rejilla del combustible nuclear. La rejilla representada tiene de dimensiones 5 * 5 * 2 cm. [ref. 1]

FUNDAMENTOS

La formulación del movimiento de los fluidos desde el punto de vista macroscópico se conoce desde el siglo XVII, pero su resolución analítica sólo es abordable en los casos más sencillos. La práctica clásica se apoya en ciertos parámetros tabulados obtenidos en experimentos básicos. Por ejemplo, puede estimarse así la pérdida de carga de un fluido al atravesar tuberías, haces de tubos o estrechamientos. En los casos más complejos se recurre directamente a la experimentación con maquetas o prototipos completos, como se hace en túneles de viento o en pruebas en el mar con barcos. Las implicaciones económicas en tales casos resultan evidentes.

Cuando se quiere profundizar en el detalle hay que resolver las ecuaciones por métodos numéricos computacionales tipo CFD, donde la descripción a nivel local o diferencial del movimiento fluido tiene su base en las ecuaciones de Navier-Stokes (NS). Estas ecuaciones explican el cambio en la cantidad de movimiento de una 'gota' de fluido (un diferencial) como consecuencia de las presiones en su entorno inmediato, de campos de fuerza que actúan (gravedad, electromagnetismo, etc.) y de una propiedad intrínseca del fluido que llamamos viscosidad. La formulación macroscópica puede obtenerse después a partir de esta relación básica haciendo suposiciones simplificadoras. Sin embargo para resolver el detalle local no se pueden hacer tales simplificaciones, y dicha ecuación es demasiado complicada para obtener soluciones analíticas.

Planteada en el eje x , la primera de las tres ecuaciones de NS en el caso habitual de fluido incompresible presenta la siguiente expresión:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Aquí, el lado izquierdo de la igualdad representa el cambio de la cantidad de movimiento (derivada material) y el derecho las causas que lo provocan. Las componentes de la velocidad en el punto estudiado, u , v y w , son incógnitas del problema; p y ρ son la presión y la densidad respectivamente y μ es la viscosidad; X es la componente de cualquier otra fuerza que actúe en el fluido.

En la citada ecuación, el campo de presiones es también una incógnita, lo que unido a la no linealidad del término convectivo obliga a afinar en las técnicas de resolución. Por ejemplo, en los métodos básicos se parte de una estimación inicial del mapa de presiones y velocidades, incluso grosera, que después se debe comprobar tras obtener una solución provisional. Dicha solución se vuelve a usar como base de partida para una nueva solución. El proceso se repite con iteraciones sucesivas que van refinando los valores de presiones y velocidades hasta que cambian poco, por debajo de un cierto criterio. En ese momento se considera que el mapa de soluciones ha convergido.

Cabe añadir que en un código CFD las ecuaciones de Navier-Stokes se completan con la ecuación diferencial de conservación de la masa,

aunque también es habitual considerar la ecuación de conservación de la masa ya incluida cuando nos referimos a las ecuaciones de NS en general.

Pero el problema a resolver puede ser algo más complicado. Si tenemos una mezcla de fluidos en la misma fase se dice que es multi-componente, y la conservación de la masa se plantea para cada componente, esté en la fase que esté. Si hay fluidos en distinta fase se dice que el sistema es multifásico, y habrá que plantear términos de intercambio entre fases (ecuaciones de cierre). En caso de que la ecuación de la energía no se plantee, el problema resuelto es de fluidos isoterms, pero en caso de que existan fuentes o sumideros de energía e interese conocer las temperaturas se debe añadir la ecuación de conservación de la energía para cada fase. En estos casos también se cuenta con la ecuación de estado del fluido, que relaciona su densidad con la presión y la temperatura.

El sistema de ecuaciones se puede extender en función del fenómeno a estudiar. Un ejemplo sería la interacción de un campo magnético con un flujo de metal líquido; en este caso, a las ecuaciones anteriormente mencionadas se deberían añadir las ecuaciones de Maxwell y una nueva contribución al término X de la ecuación (1), correspondiente a la fuerza de Lorentz.

Un aspecto específico de estos códigos es el tratamiento de la turbulencia, pues el régimen turbulento aparece en la inmensa mayoría de casos prácticos. La turbulencia es una característica del fluido que tie-

ne su base en un componente aleatorio del movimiento de las partículas, y constituye un aspecto crucial para la obtención de buenos resultados con un código CFD. En principio, con las ecuaciones de Navier-Stokes se podría resolver cualquier campo fluido, sin embargo en el caso de que los flujos sean turbulentos el tamaño de la malla debería estar por debajo del tamaño de los torbellinos más pequeños, pero esto haría que el número de nodos planteados fuese enorme e inaplicable a problemas de ámbito industrial. Por esta razón se utilizan los denominados modelos de turbulencia, que por medio de aproximaciones (ecuaciones de transporte adicionales, correlaciones, funciones de filtro) permiten resolverla de forma práctica. Sin embargo, el comportamiento de estos modelos es dependiente del problema que se quiere resolver, por lo que hay que desarrollar una buena experiencia que permita elegir el modelo adecuado para cada aplicación y el ajuste de los coeficientes relacionados.

Por su carácter fundamental en este tipo de códigos, el lector más interesado puede encontrar una descripción somera de modelos de turbulencia al final de esta nota.

MANEJO PRÁCTICO DEL CÓDIGO CFD

Resumiendo, un código CFD resuelve mediante métodos numéricos las ecuaciones de conservación, y se apoya en una serie de algoritmos que facilitan la convergencia de la solución partiendo de un valor inicial. Sería en sí mismo, un programa tipo 'solver' que resuelve ecuaciones diferenciales.

Normalmente este programa auxiliar tipo 'solver' se asocia a paquetes o conjuntos de programas que permiten realizar el proceso completo de simulación CFD, típicamente estructurado en varias etapas:

- Etapa preparatoria: Se utilizan en esta fase programas para construir la geometría del problema, definir la malla de cálculo, las condiciones de contorno, las condiciones iniciales y para activar los modelos y ecuaciones concretas a resolver. Los siguientes tipos de programa se usan en sus correspondientes etapas preparatorias:
 - CAD ('Computer-Aided Design', Diseño Asistido por Ordenador): Son programas que permiten construir la geometría 3D, de amplia aplicación en el diseño mecánico. Buenos ejemplos pueden ser Catia, SolidWorks, ProEnginee, los paquetes de AutoDesk o DesigModeler entre otros. La mayoría de paquetes proporcionan un 'software' de dibujo. Formatos como IGES, STL, STEP o ACIS por ejemplo, suelen ser aceptados por la mayoría de códigos CFD.
 - Mallador: Es el 'software' más específico, y suele tener una curva de aprendizaje bastante pronunciada. Pensemos que el tamaño de la malla puede oscilar entre los miles y los millones de puntos, en función de la potencia de cálculo disponible. Es aconsejable que el analista dedique gran atención a realizar una malla de calidad, ya que se reducirá el tiempo de cálculo y se asegurará una buena convergencia del resultado (es decir, con un limitado error de truncación). Software como Gridgen, PointWise, GridPro, ICEM, Gambit, GMSH, SALOME o EnGrid son ejemplos representativos.
 - Preprocesador: Suele estar integrado en el código CFD en sí, y se trata de un 'software' (básicamente tipo GUI, 'Graphical User Interface') que permite crear el fichero de comandos que proporcione el acceso del 'solver' a la malla, seleccione los modelos a resolver, elija los algoritmos que permitan resolver el sistema, las condiciones iniciales y determine el carácter y condiciones de la simulación en sí. La experiencia del usuario también es vital en esta fase para elegir condiciones de contorno, pues es frecuente tener que limitar el espacio de interés en la definición del problema, con lo que se ven afectadas dichas condiciones de contorno y por tanto la solución del problema.
- 'Solver': Tipo de programa auxiliar que resuelve las ecuaciones de conservación en el dominio o región definida con el preprocesador.
- Post-procesador: Es el programa que permite analizar y visualizar el resultado del cálculo. Se usan herramientas que presentan los resultados en planos, superficies, líneas y puntos, y permiten el análisis de variables de campo, vectores, iso-líneas, etc. Es evidente que interpretar la ingente

cantidad de información generada constituye un problema por sí mismo. Ejemplos de estos programas son EnSight, Paraview, FieldView o TecPlot entre otros.

TIPOS DE CÓDIGOS

En la actualidad existen muchos códigos CFD a disposición del usuario, por lo que no resulta apropiado hacer un listado completo de ellos. Presentaremos tres grandes grupos en función de características comunes:

- **Códigos comerciales multi-propósito:** Son códigos comercializados por grandes compañías que desarrollan programas para diseño industrial y herramientas CAD/CAE como ANSYS o CD-Adapco. Este tipo de códigos no son específicos de una determinada aplicación por lo que presentan multitud de modelos y opciones para el usuario. Abarcan desde flujos monofásicos, multifásicos, multicomponentes, una amplia gama de modelos turbulentos, compresibilidad, combustión, etc. Además suelen ir acompañados de potentes programas de pre y post proceso que facilitan su utilización. Su mayor desventaja surge en el caso de que la aplicación necesite un modelo específico que no estuviese implementado, lo que obliga al usuario a desarrollarlo e implantarlo a través de subrutinas de usuario o funciones de control, al no estar disponibles los programas fuente distribuidos. Además, este tipo de códigos podrían necesitar una validación específica en su campo de aplicación que complementa la vali-

dación genérica de los desarrolladores. Ejemplos de estos códigos son FLUENT, ANSYS-CFX, STAR-CCM+, Numeca, o los clásicos Phoenics, COMSOL y FLOW-3D.

- **Códigos específicos para un tipo de aplicaciones o industria:** Estos códigos pueden ser comerciales o gratuitos (aunque no libres), y se han desarrollado típicamente por centros de investigación. La ventaja de este tipo de códigos es que presentan modelos específicos para un determinado campo de fenómenos, lo que reduce o elimina las necesidades del usuario en la implementación de modelos específicos. Suelen disponer de un número amplio de ejercicios de validación en su campo de aplicación, hechos por desarrolladores y usuarios que trabajan en el mismo campo, y suelen estar bien documentados. Por el contrario, su principal desventaja es la dificultad de aplicarlos a otros campos. Además, los preprocesadores y postprocesadores no suelen ser tan potentes como los de los códigos comerciales. Ejemplos dentro de la industria nuclear son GASFLOW y TONUS para estudios de hidrogeno y termohidráulica de la contención de centrales nucleares.
- **Códigos libres:** Son códigos desarrollados como 'software libre' por determinadas fundaciones o instituciones, lo que implica la disponibilidad general de los mismos, normalmente en plataformas también libres como Linux. Pueden ser multipropósito o

específicos de una aplicación. Sus mayores ventajas son el coste nulo de licencia y el creciente número de usuarios, que se está extendiendo desde el ámbito académico al propiamente industrial. Sus mayores desventajas son en algunos casos la rigidez de uso, las dificultades de instalación en distintas plataformas de Linux o incluso Windows, o las dificultades iniciales de manejo por el incompleto desarrollo de los manuales. Además, en algunos casos el preprocesador es menos versátil que el de grandes códigos comerciales. Ejemplos de estos códigos son OpenFOAM, código multipropósito, que dispone de mallador propio y con una interfaz que permite el uso del post-procesador 'Paraview', también libre (además, tiene conversores a Fluent y CFX, tanto para la malla como para el post-procesado); SATURNE, desarrollado por EDF para el sector energético, principalmente nuclear; o FDS para el análisis de incendios.

APLICACIONES

El ámbito de aplicación de los códigos CFD en el campo nuclear es amplio y se extiende más allá de su utilización en la investigación, de tal forma que se puede afirmar que "siempre que se tenga un fluido y una necesidad de mejora ahí se podrá aplicar un CFD". Actualmente estas aplicaciones se podrían agrupar en cuatro categorías: fenomenología de accidente severo, diseño de elementos combustibles, aplicaciones a operación de reactores actuales y diseño de nuevos sistemas de fisión/ fusión.

- **El accidente severo y otros tipos de accidentes** es uno de los campos donde más frecuentemente se han aplicado códigos CFD en la industria nuclear. Ejemplos de aplicaciones son: distribución y combustión de hidrógeno en contención de centrales [ref. 2], dilución de boro en rama fría, recirculación de vapor en rama caliente, circulación natural en piscinas de corio fundido, deposición de aerosoles en tubos en los generadores de vapor, y estratificación en piscinas de supresión. En la figura 2 se muestra un ejemplo de aplicación al estudio de riesgo de combustión de hidrógeno en contención.
- **El diseño y optimización de elementos combustibles** se apoya actualmente en códigos CFD. Por un lado, los análisis monofásicos permiten la mejora de todas las partes que forman los elementos combustibles PWR, como por ejemplo las aletas de la rejilla vista en la figura 1. Por otro lado, el creciente desarrollo de los modelos bifásicos está haciendo que también estos cada vez sean más útiles para la industria nuclear.
- **Las aplicaciones para el estudio del comportamiento de flujos en aplicaciones nucleares en operación normal.** Este tipo de estudios está permitiendo analizar, por ejemplo, la estratificación del agua en rama caliente en la tobera de salida del núcleo con objeto de optimizar la medida de los termopares o el efecto de la conexión con la línea del presionador (figura 3). Otros ejemplos son optimización de torres

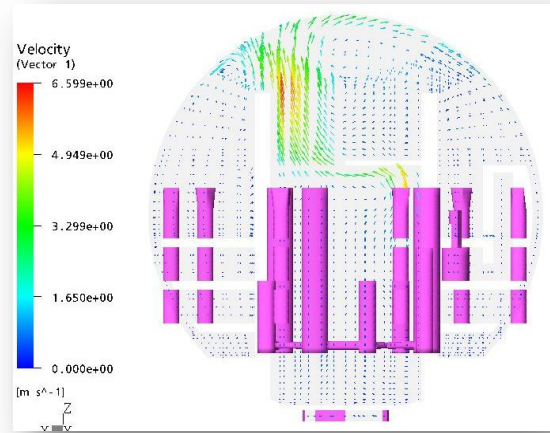
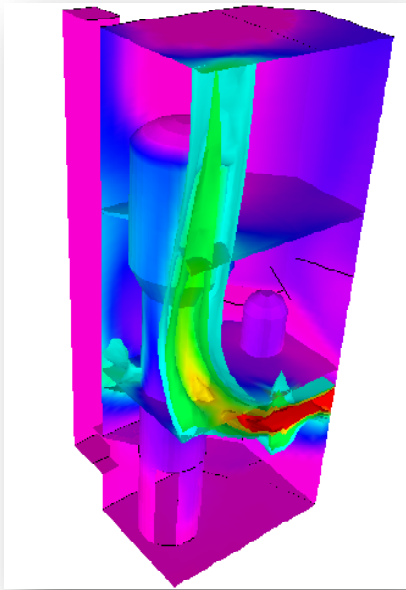


Figura 2.- Distribución de hidrógeno en la contención de centrales nucleares durante un accidente severo. En la figura de la izquierda se muestran iso-superficies de concentración de hidrógeno, se puede observar la evolución de un pluma de hidrógeno en el recinto del generador de vapor de un reactor PWR durante un SBO con fallo de sellos. En la figura de la derecha se muestra el campo de vectores de velocidad en un corte transversal de una contención PWR, se observa la evolución del fluido desde el recinto del tanque de alivio del presionador (situado en una cota intermedia de la contención), en fucsia se muestran los elementos del sistema de refrigerante del reactor. El código CFD original se completó con un modelo de condensación de vapor de agua en paredes [ref. 3].

de refrigeración, escape de turbinas de vapor, dispersión de efluentes en la atmósfera o medio acuático, optimización de piscinas de combustible gastado, diseño de contenedores en seco.

- **Las aplicaciones al diseño de nuevos sistemas de fisión/ fusión**, abarcaría realmente todos los campos comentados antes (accidentes, diseño de combustible, diseño de circuitos); la dife-

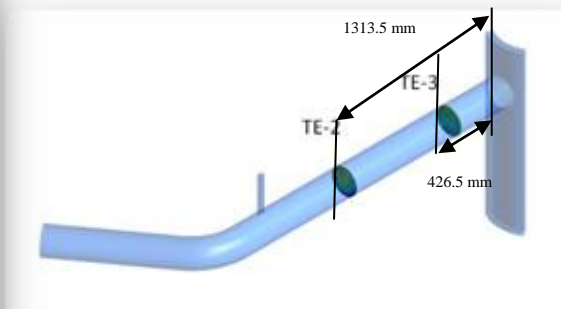
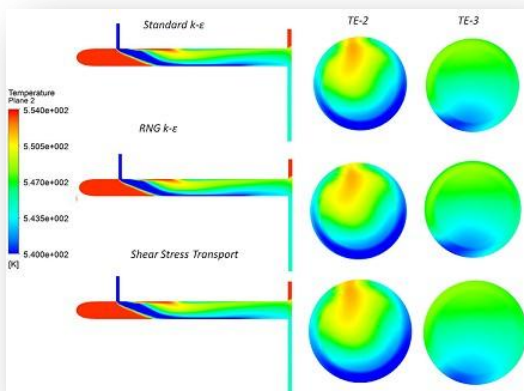


Figura 3.- Distribución de temperaturas en una estratificación térmica en rama fría (izquierda) y situación de los planos de corte en dicha rama (derecha). Se muestran resultados de tres modelos de viscosidad turbulenta RANS. La malla está formada por poco más de 1100000 elementos [ref. 4].

rencia fundamental con los casos anteriores es que permite que los conceptos de las distintas partes de los reactores, ya sea en operación nominal o de experimentos de apoyo, se prediseñen ya utilizando códigos CFD, lo que permite una posible reducción de costes experimentales y una optimización más rápida de los diseños.

- En sistemas de fisión de Generación IV se trata de identificar recirculaciones del refrigerante de metal líquido (sodio, plomo-bismuto, plomo) en operación normal, capaces de provocar puntos calientes en paredes de la vasija o internos. También se identifican gradientes de temperatura inaceptables por causar fatiga térmica. Otras aplicaciones analizan la dispersión y arrastre de burbujas o de fragmentos de combustible en caso de accidentes.
- En tecnología de fusión existen grandes retos que actualmente están siendo estudiados mediante herramientas CFD. Algunos de éstos son: (1) el comportamiento del plasma en el reactor de fusión, un punto clave para la viabilidad de esta tecnología, (2) el estudio del efecto del campo magnético sobre el flujo de metal líquido en las envolturas regeneradoras, necesario para la extracción de potencia y el control del tritio, (3) la cuantificación de las tensiones mecánicas y térmicas sobre los componentes, (4) el comportamiento de las bobinas encargadas de la contención del plasma. En la

figura 4 se muestra un ejemplo de los estudios llevados a cabo para la caracterización del flujo de metal líquido en una envoltura regeneradora de tritio.

El problema principal de todos estos retos tecnológicos es la falta de datos experimentales, como consecuencia de las difícilmente reproducibles condiciones de trabajo, como por ejemplo las de un reactor de fusión en un laboratorio. Ello hace más interesante todavía el uso de herramientas CFD.

ALCANCE ACTUAL Y LIMITACIONES DE LOS CFD

Para aplicaciones en la industria nuclear los códigos CFD pueden considerarse como una opción madura en fluidos monofásicos, ya sea en fase gas o líquida. La inclusión de modelos de turbulencia de modelos RANS (ver apéndice) de dos ecuaciones está muy extendida. El uso de aproximaciones LES ya no es prohibitivo, y los modelos híbridos que combinan RANS y LES están ofreciendo soluciones muy prometedoras con costes computacionales moderados. Es fácil encontrar publicaciones con simulaciones que incluyan además modelos de radiación, combustión, propiedades de materiales y fluidos complejos o transferencia de calor conjugada, con muy buenos resultados. En cuanto al tamaño de las regiones que pueden ser tratadas, existen modelos que consideran ya todo el primario de un PWR o vasijas completas tipo piscina de Generación IV. No obstante, en el caso de que se estudien transitorios largos en geometrías grandes lo aconsejable

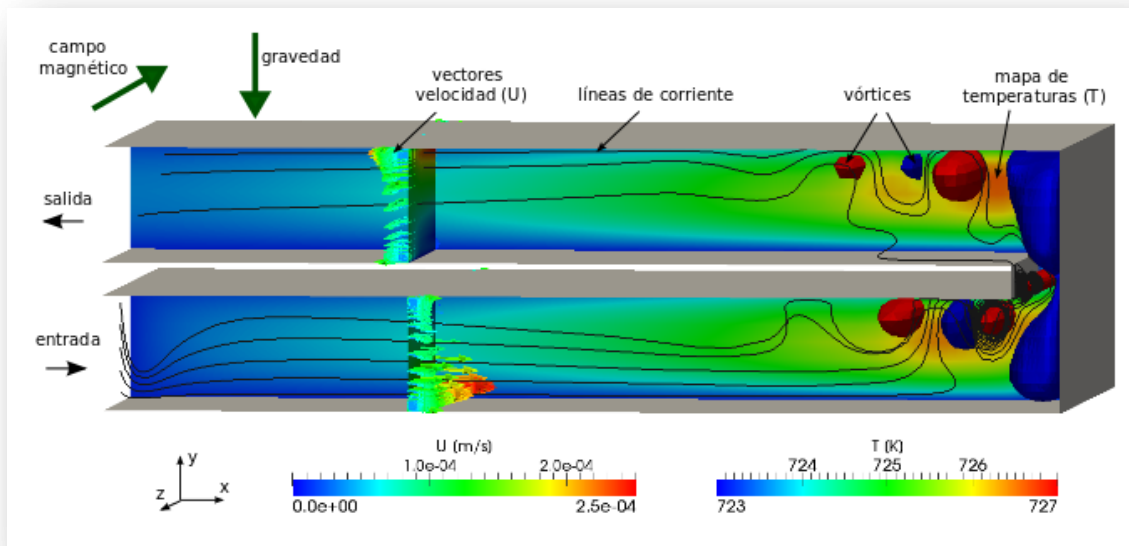


Figura 4.- Circulación de metal líquido en un canal horizontal en forma de U, típico de las envolturas regeneradoras de tritio en un reactor de fusión. El metal líquido entra por la parte inferior (izquierda) y, a medida que se acerca al plasma, desarrolla una potencia térmica debido a reacciones nucleares en el propio fluido; después, sale por el canal superior. En la figura se muestra el mapa de temperaturas en un plano central del canal en U. Se observa como el fluido se calienta cerca del plasma, zona derecha de la figura. Puesto que las paredes están refrigeradas, las diferencias de temperatura en el fluido generan fuerzas de flotación importantes que provocan la presencia de vórtices; los vórtices dextrógiros están en azul, los levógiros en rojo. El efecto del campo magnético sobre corrientes eléctricas inducidas en el líquido añade una fuerza que minimiza la formación de estos vórtices y los alarga en la dirección del campo magnético. El modelo emplea cerca de 800000 celdas computacionales [ref. 5].

es aún utilizarlos en combinación con otros códigos más simplificados.

En cambio, cuando se trata de contemplar flujo bifásico, los códigos CFD siguen ofreciendo dificultades. Algunos planteamientos de flujo disperso de vapor o gas en fase continua de líquido han dado buenos resultados, si bien las fracciones de huecos eran bajas. En general, problemas con mayores fracciones de huecos continúan siendo un problema serio para los códigos CFD.

Otra de las aproximaciones frecuentes en la actualidad es el acoplamiento de códigos CFD con otros específicos del ámbito nuclear, como por ejemplo ANSYS-CFX/PARCS, NEPTUNE/DYN3D,

STAR-CD/MCNP o DeCart. Con ello se puede abordar muy en detalle el estudio del núcleo del reactor y el modelado a nivel de barra de combustible.

El efecto usuario sigue siendo importante en estos códigos. Con objeto de paliar el problema se han hecho esfuerzos por establecer estándares adecuados en el uso de los códigos, y diversas instituciones han desarrollado "Best Practice Guidelines" que representan una guía adecuada para el uso correcto de los códigos CFD [ref. 6]. Ejemplos de estas guías son las de ERCOFTAC (2000) para el ámbito industrial en general, el proyecto ECORA (2001) de la Unión Europea para validación de códigos CFD en aplicaciones de seguridad nuclear y las de la NEA/CSNI (2007) para

aplicaciones también en seguridad nuclear.

Estas iniciativas también tratan de cubrir otro aspecto de interés relacionado con la validación experimental frente a numerosos experimentos clásicos pero no específicos para códigos CFD. El elevado grado de resolución local que se obtiene a veces no se puede contrastar fácilmente con los experimentos clásicos, lo cual puede forzar al usuario a recurrir a la intuición o a efectos indirectos que añaden incertidumbre a la interpretación de resultados. Los cálculos cruzados entre participantes contribuyen a solucionar el problema, a la vez que proporcionan pautas de aplicación.

Pero el uso de los códigos CFD en la industria nuclear es un hecho consumado, ya no sólo por los abundantes artículos publicados en los últimos años o por la aparición, cada vez con mayor frecuencia, de sesiones monográficas en congresos como NURETH o ICONNE, sino que organismos como la NEA han organizado grupos de expertos (*Computational Fluid Dynamics in Nuclear Reactor Safety*) para seguir y estudiar este tipo de herramientas, mantener las guías de buenas prácticas, y realizar una validación comparativa (benchmarking) para códigos CFD y congresos como el CFD4NRS, del ya se han celebrado 4 ediciones.

APÉNDICE: MODELOS DE TURBULENCIA

La opción práctica en el análisis del problema de fluidos es plantear un número de nodos razonable o abordable por nuestra red computacio-

nal. Sin embargo, la consecuencia directa es que los nodos tienen un tamaño excesivo para capturar la pequeña escala de la turbulencia, de manera que hacen falta modelos específicos que capturen sus efectos. Existen dos grandes grupos de modelos de turbulencia, aunque también existen combinaciones de ambos:

- 1) Modelos RANS ('Reynolds-Averaged Navier Stokes'): las variables se consideran suma de un valor promediado más un término que supone una fluctuación temporal. Esta descomposición se introduce en la ecuación de NS (1) y el nuevo término fluctuante da lugar a ecuaciones diferenciales adicionales de nuevas variables relacionadas con la turbulencia (parte fluctuante). Además, las herramientas se simplifican al desprestigiar los términos con producto cruzado de velocidades. Dentro de esta gama de modelos se encuentran los clásicos modelos RANS de 2 ecuaciones como el k-epsilon o k-omega. Los modelos RANS se utilizan generalmente en la industria nuclear en situaciones donde no hay remolinos, jets o variaciones bruscas de la dirección de la cantidad de movimiento.
- 2) Modelos LES ('Large Eddy Simulation'): se realiza un filtrado de las contribuciones a la ecuación de NS (1) que la malla no puede captar, es decir, las contribuciones de los torbellinos más pequeños. La ecuación que queda así planteada captura los torbellinos de gran escala. Sin embargo, los de pequeña escala también afectan el resultado, de manera

que sus efectos se tienen en cuenta añadiendo un nuevo término en la ecuación. El modelo clásico de LES es el de Smagorinsky.

REFERENCIAS

- [1] C. Peña-Monferrer, S. Chiva, J. L. Muñoz-Cobo, "Participation in the NEA/OECD MATiS-H Benchmark Exercise. Study of Spacer Grids in a Rod Bundle", 38 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española, Revista de la Sociedad Nuclear Española, Cáceres (Spain). 17-19 octubre 2012.
- [2] E. Gallego, E. Migoya, J.M. Martín-Valdepeñas, A. Crespo, J. García, A. Venetsanos, E. Papanikolaou, S. Kumar, E. Studer, Y. Dagba, T. Jordan, W. Jahn, S. Hoiset, D. Makarov, J. Piechna, "An intercomparison exercise on the capabilities of CFD models to predict distribution and mixing of H₂ in a closed vessel", International Journal of Hydrogen Energy 32 (2007).
- [3] J.M. Martín-Valdepeñas, M.A. Jiménez, F. Martín-Fuertes, J.A. Fernández, "Improvements in a CFD Code for Analysis of Hydrogen Behaviour within Containments". Nuclear Engineering and Design, 237 (2007).
- [4] M. Martínez, R. Miró, T. Barra-china, S. Chiva, G. Verdú. "Turbulence modelling of a thermal stratification CFD model". International Journal of Complex Systems in Science, vol. 2(1), (2012).
- [5] E. Mas de les Valls, L. Batet, V. de Medina, J. Fradera, L.A. Sedano. "Modelling of integrated effect of volumetric heating and magnetic field on tritium transport in a U-bend flow as applied to HCLL blanket concept". Fusion Engineering and Design 86 (2011).
- [6] OECD, "Best Practice Guidelines for the use of CFD in Nuclear Reactor Safety Applications". NEA/CSNI/R(2007)5.