

Desarrollo de modelos y herramientas de computación para análisis termo-fluidodinámico en tecnología de fusión

Ll. Batet, E. Mas de les Valls, J. Fradera y F. Reventós

El artículo describe las actividades del Grupo de Estudios Termohidráulicos de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en el campo de la tecnología de fusión nuclear. Las actividades se iniciaron en 2006 y en un principio estuvieron enfocadas a la magneto-hidrodinámica (MHD) de metales líquidos. En 2008 se empezó a estudiar el modelado del transporte de tritio. Gracias a la participación en el proyecto Tecno_FUS el grupo ha logrado consolidar estas líneas de actividad y producir, hasta la fecha, dos tesis doctorales, una en MHD de metales líquidos y otra sobre el modelado de los mecanismos de transporte de tritio.

DEVELOPMENT OF MODELS AND COMPUTATIONAL TOOLS FOR THERMO-FLUID-DYNAMIC ANALYSIS IN FUSION TECHNOLOGY
The article describes the activities of the Thermal-Hydraulics Studies Group at the Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) in fusion technology. Activities started in 2006 and at the beginning were focused on magneto-hydrodynamics (MHD) of liquid metals. The study of the tritium transport modeling started in 2008. Thanks to the participation in the project TECNO_FUS, the group has consolidated these activity lines and has produced two doctoral thesis to this date, one in MHD of liquid metals and the second one on the modeling of the tritium transport mechanisms.

Uno de los componentes de mayor complejidad funcional desarrollados hasta la fecha por la tecnología energética es la envoltura regeneradora de un reactor de fusión nuclear. Sobre el diseño de una envoltura regeneradora recaen unas exigencias funcionales esenciales:

1. Blindaje de las bobinas superconductoras que garanticen el confinamiento del plasma frente a la radiación neutrónica procedente del mismo plasma.
2. Extracción eficiente de la potencia depositada por la radiación procedente del plasma en la primera pared y en la envoltura (potencia que será finalmente convertida en electricidad).
3. Generación de tritio a partir de litio.

Esta última función está en el origen del nombre del componente (*Breeding Blanket*, en inglés) y es crucial para la viabilidad de la fusión nuclear

como fuente de energía. La reacción deuterio-tritio es la única alcanzable actualmente en un reactor de fusión. Así, la viabilidad de esta tecnología como fuente de energía requiere de la autosuficiencia en tritio de las futuras plantas de fusión nuclear.

La posibilidad de autosuficiencia está aún pendiente de demostración y depende no solamente de que las envolturas regeneradoras puedan conseguir ratios de reproducción de tritio elevados (sensiblemente mayores que la unidad), sino de que los sistemas de procesamiento y recuperación de tritio sean suficientemente rápidos para no requerir un inventario de tritio en el sistema demasiado grande. A la espera de las pruebas que se hagan en el experimento ITER, el principio de autosuficiencia solo es demostrable actualmente mediante el uso de herramientas de simulación validadas y cualificadas.

Por otra parte, la protección radiológica exige que las emisiones de tritio



LLUÍS BATET

es profesor de la UPC, Departamento de Física e Ingeniería Nuclear. Coordina la investigación relacionada con tecnología de fusión dentro del Grupo de Estudios Termohidráulicos (GET).



ELISABET MAS DE LES VALLS

es investigadora del GET y profesora ayudante en el Dto. de Maq. y Mot. Térmicos. Tesis doctoral sobre MHD de las envolturas regeneradoras de tritio de reactores de fusión.



JORDI FRADERA

es investigador del GET hasta enero de 2011, con un contrato financiado por el programa Tecno_FUS (Consolider-Ingenio). Ha realizado una tesis doctoral sobre el modelado del transporte de tritio.



FRANCESC REVENTÓS

es profesor de la UPC, Departamento de Física e Ingeniería Nuclear. Coordina el Grupo de Estudios Termohidráulicos. Tiene una larga experiencia como analista termohidráulico en el sector nuclear.

al ambiente sean varios órdenes de magnitud inferiores a la cantidad de tritio generada en las envolturas (del orden de 500 g diarios en una planta de unos 3.000 MW térmicos). Los inventarios de tritio deben establecerse pues con una precisión muy elevada y se debe contar con herramientas de cálculo de gran calidad para diseñar los sistemas de extracción de tritio.

El Grupo de Estudios Termohidráulicos (GET) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) trabaja desde finales del año 2006, en estrecha colaboración con el Ciemat (entidad responsable del Programa Nacional de Fusión), en el desarrollo de herramientas de computación adecuadas para la simulación fluidodinámica de la envoltura regeneradora de un reactor de fusión por confinamiento magnético. El objetivo de esta línea de investigación es alcanzar las capacidades computacionales necesarias para el análisis Magneto-Hidrodinámico (MHD) de un metal líquido bajo un fuerte campo magnético y una carga térmica elevada y de los fenómenos de transporte de solutos asociados a su función regeneradora de tritio.

GET - TECHNOLOGY FOR FUSION (T4F)

El Grupo de Estudios Termohidráulicos de la UPC forma parte del Grupo de Investigación en Estudios Energéticos y de las Radiaciones (GREENER), del cual forman parte investigadores del Instituto de Técnicas Energéticas y profesores del Departamento de Física e Ingeniería Nuclear y otros departamentos.

GET tiene una larga experiencia de colaboración de más de 20 años con las plantas de Ascó y Vandellòs II, proporcionando apoyo a operación e ingeniería mediante análisis termohidráulicos efectuados con el código Relap5. El grupo ha participado en diversos ejercicios internacionales de intercomparación de resultados. Recientemente está colaborando con el Consejo de Seguridad Nuclear en dos de dichos ejercicios, UAM y Premium, relacionados con la determinación de las incertidumbres en los resultados proporcionados por los códigos de cálculo.

Technology for Fusion es la denominación que se ha adoptado para hacer referencia a las actividades de GET relacionadas con tecnología de fu-

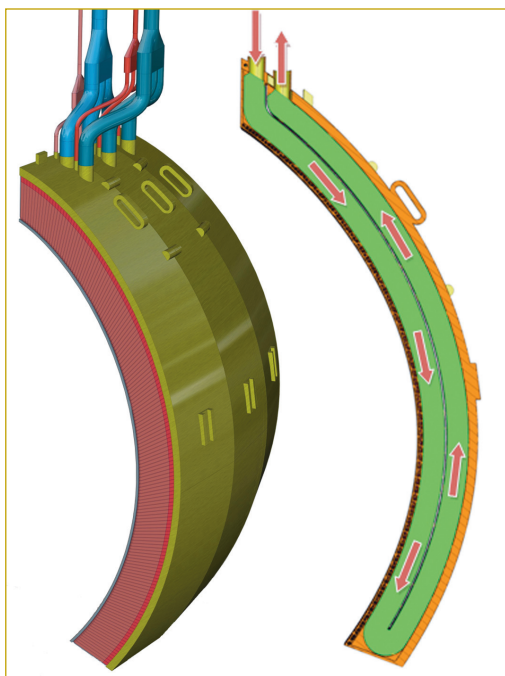


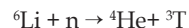
Figura 1: Tres módulos externos de DRM (izquierda) y diagrama de la disposición de los canales, según la propuesta de Tecno_FUS (Juanas y Fernández, 2009).

sión. Dichas actividades empezaron, como se ha comentado, en 2006, y en un principio estuvieron enfocadas a la MHD de metales líquidos. Posteriormente, en 2008, se empezó a estudiar el modelado del transporte de tritio. Con la participación, junto con numerosos grupos de investigación españoles, en el proyecto

Tecno_FUS (financiado por el programa Consolider-Ingenio 2010 en la convocatoria de 2008) y su participación junto al Ciemat y otras entidades en *Grants* y *Ofertas de Fusion for Energy* dentro del proyecto *Test Blanket Modules (TBM)*, el grupo está consolidando estas líneas de actividad.

ENVOLTURAS REGENERADORAS

En una envoltura regeneradora el tritio se produce básicamente a partir de la reacción



Actualmente, entre los posibles diseños de estos componentes, el objeto de estudio de GET son aquellos que utilizan metal líquido (típicamente una aleación eutéctica de plomo y litio). La ventaja de utilizar plomo-litio es que el plomo puede proporcionar la multiplicación de neutrones necesaria

para conseguir un ratio de reproducción de tritio suficiente (del orden de 1.15) sin necesidad de utilizar berilio.

Estos diseños pueden clasificarse de acuerdo con las funciones que desempeña el metal líquido:

- Refrigeración separada: el metal líquido se utiliza únicamente como material reproductor de tritio y la extracción de potencia térmica se consigue mediante otro fluido (típicamente helio).
- Auto-refrigeración: el metal líquido circula a alta velocidad y cumple la

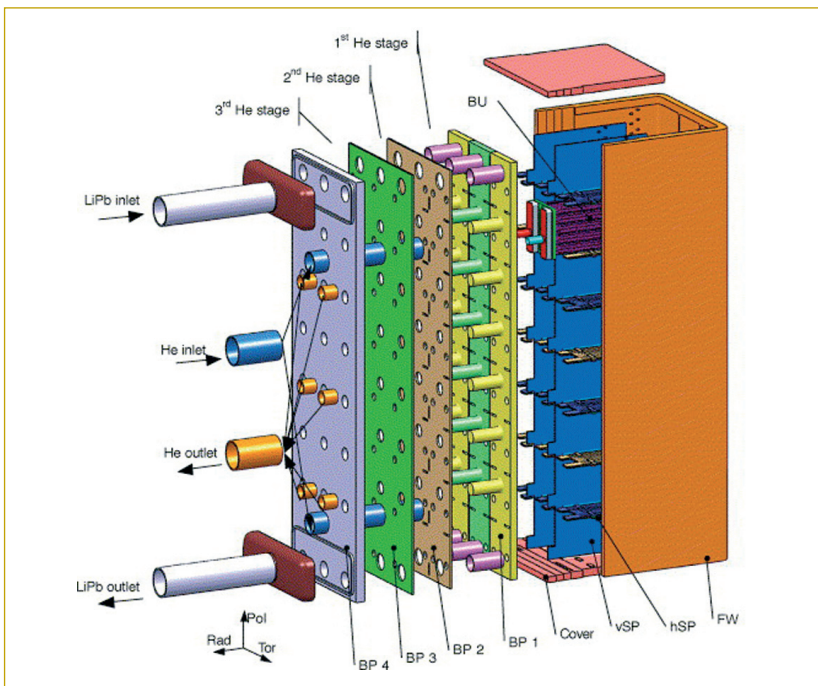


Figura 2. Esquema del diseño de TBM HCLL (Rampal et al. 2005).

doble función reproductora y refrigeradora

- Doble-refrigerante: existe un refrigerante primario (típicamente helio) responsable de la extracción de potencia de la primera pared y de la estructura, pero la zona de reproducción de tritio es auto-refrigerada.

La fracción de la potencia térmica extraída por el metal líquido en la envoltura regeneradora aporta información valiosa sobre las características del flujo. Por ejemplo, si el metal líquido no extrae potencia térmica, su velocidad será bastante baja y las fuerzas de flotación dominarán sobre las de inercia.

El diseño propuesto para DEMO por el Programa de Tecnología de Fusión español Tecno_FUS (Consolider-Ingenio), llamado Doble Refrigerante Modular (DRM), constituye un ejemplo del tercer tipo de diseños. Según la propuesta de segmentación del reactor (Juanas y Fernández, 2009), éste está dividido en doce segmentos, cada uno de los cuales está formado por dos módulos internos y tres externos (Figura 1). El metal líquido recorre longitudinalmente (en la dirección poloidal) cada uno de los módulos. Se prevé que cada módulo tenga cuatro canales, dos frontales y dos traseros, conectados en la parte inferior. El metal líquido bajaría por los canales frontales y retornaría por los traseros. La longitud del módulo es de unos nueve metros, de manera que cubre casi toda la pared del reactor. El interior de los canales debe estar recubierto por las llamadas Inserciones de canal, de material aislante, que deben reducir las pérdidas de carga magnetohidrodinámicas que se producirían debido a la alta velocidad del fluido si las paredes fueran conductoras.

Como ejemplo del primer tipo de diseños puede citarse el *Helium-Cooled Lithium Lead* (HCLL), uno de los dos desarrollos de la Unión Europea para su prueba en ITER (Figura 2). En este diseño la aleación eutéctica de plomo y litio circula muy lentamente (con velocidades del orden de 1 mm/s o menores) en el interior de una serie de canales horizontales separados por placas refrigeradas mediante un flujo de helio presurizado. El metal líquido fluye perpendicular al campo magnético toroidal, mostrando un comportamiento complejo debido a las fuerzas de flotación y experimentando una caída de presión causada por las fuerzas de Lorentz. Para más detalles véase Rampal et al. (2005) y Salavy et al. (2008).

Una de las misiones de ITER es probar Módulos de Ensayo de Envol-

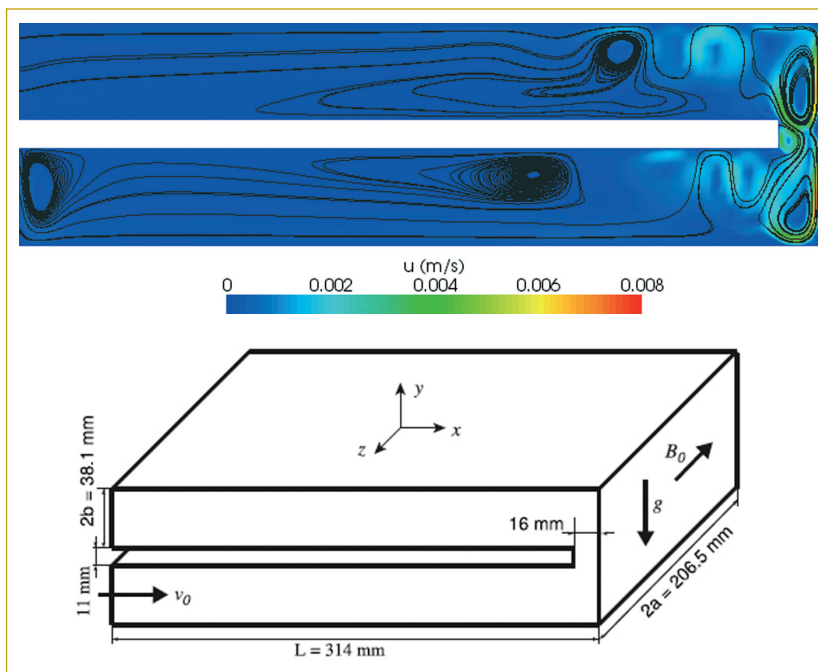


Figura 3. Geometría del modelo simplificado de canal y mapa de velocidades en el plano medio, para una velocidad de entrada al canal de 0,1 mm/s, $Ha = 1740$ (número de Hartmann) y $Gr = 5,2 \cdot 10^9$ (número de Grashof), para paredes perfectamente conductoras. Se aprecia la aparición de vórtices debidos a las fuerzas de flotación (Mas de les Valls, 2011).

tura Regeneradora (*Test Blanket Modules*, TBM). Los TBM se corresponden con prototipos escalados de los diferentes diseños en desarrollo en los respectivos Programas Tecnológicos de los Socios de ITER. El experimento ITER representa una oportunidad única para probar esta tecnología clave para los futuros reactores de fusión bajo condiciones parecidas a las de operación, con flujos neutrónicos y cargas térmicas relevantes.

Un TBM es un componente nuclear *primero-en-su-tipo* que implica un avanzado desarrollo tecnológico que incluye: materiales estructurales y funcionales (regeneradores de tritio y multiplicadores neutrónicos); tecnologías de fabricación; tecnologías clave para el control y la recuperación de tritio (barreras de permeación y tecnologías de extracción de tritio); sistemas auxiliares (por ejemplo el sistema de purificación de He tritiado); integración del componente en el reactor y manipulación integral remota; y técnicas de análisis de diseño en la perspectiva de licenciamiento del componente nuclear (por ejemplo, análisis predictivos de transporte de tritio en los componentes y sistemas). Es en el ámbito de las técnicas de análisis donde GET ha encontrado oportunidad de contribuir al programa de fusión.

Los TBM representan una fracción muy sustancial (aproximadamente una quinta parte) de la contribución

total europea a ITER. El desarrollo de herramientas de simulación MHD y de los fenómenos de transporte másico y térmico acoplados, forman parte de la participación española a dicha contribución.

MAGNETO-HIDRODINÁMICA (MHD)

El flujo en los canales de una envoltura regeneradora puede ser muy complejo, especialmente en aquellos diseños, como el HCLL, en los cuales la flotación tiene un papel relevante. La comprensión de la naturaleza del flujo, incluyendo las inestabilidades que podrían aparecer y el conocimiento exacto de los perfiles de velocidad son de gran interés para la optimización del diseño en lo que respecta al control del tritio y a la transferencia térmica.

En este sentido, en el marco de una tesis doctoral llevada a cabo en la UPC (Mas de les Valls, 2011), se ha implementado un código de simulación acoplada termo-MHD en OpenFOAM, una herramienta CFD de código libre. El código resultante puede considerarse como una herramienta predictiva preliminar para el diseño de los canales de metal líquido de las envolturas regeneradoras.

La herramienta desarrollada permite cálculo transitorio tridimensional con acoplamiento térmico-MHD y permite tratar diversas capas de materiales. Se han estudiado diferentes modelos

MHD, con los que se ha conseguido buenos resultados. El acoplamiento térmico se ha modelado mediante la hipótesis de Boussinesq. Se ha implementado una función de pared lineal para las capas límite de Hartmann, cosa que reduce sustancialmente el tiempo de cálculo de las simulaciones. La herramienta también permite acoplar térmica y eléctricamente el metal líquido y las paredes, mediante el acoplamiento implícito de las mallas de ambos materiales a lo largo de todo el proceso de desarrollo se han realizado las correspondientes validaciones, con resultados satisfactorios.

Los códigos desarrollados se han aplicado al estudio del efecto integrado del calentamiento volumétrico y el campo magnético en el transporte de tritio en un canal en U, como los que se encuentran en el diseño de envoltura regeneradora HCLL (Figura 3). También se han analizado las inestabilidades MHD que aparecen en canales horizontales como los del diseño HCLL.

También se ha efectuado un análisis térmico del diseño DRM, que se está definiendo en el programa *Tecno_FUS* ya mencionado. La velocidad del metal líquido en el interior de los canales del DRM es relativamente elevada (del orden de decenas de centímetros por segundo). Así pues, la inercia predomina frente a la flotación. El flujo se espera que sea bidimensional excepto en las capas límite de Hartmann, y no se espera la presencia de vórtices. Ello ha permitido usar un código térmico-MHD alternativo, implementado para la ocasión, que está basado en el modelo MHD 2D de Sommeria y Moreau (1982) y que utiliza el modelo RANS de 0-ecuaciones de Smolentsev y Moreau (2006) para la turbulencia Q2D. La Figura 4 muestra algunos resultados.

Los casos de aplicación no solo han demostrado la capacidad del código para simular canales de metal líquido en envolturas regeneradoras; también han sido una herramienta valiosa para comprender la naturaleza del flujo en el interior de estos canales.

FENÓMENOS DE TRANSPORTE DE TRITIO

En las reacciones nucleares que ocurren en el seno del material reproductor se produce tritio y helio, con una relación mol a mol. Las altas tasas de producción de tritio necesarias para la autosuficiencia en combustible están ligadas a una elevada generación de helio-4, que puede llegar a tener un efecto muy significativo sobre el diseño y

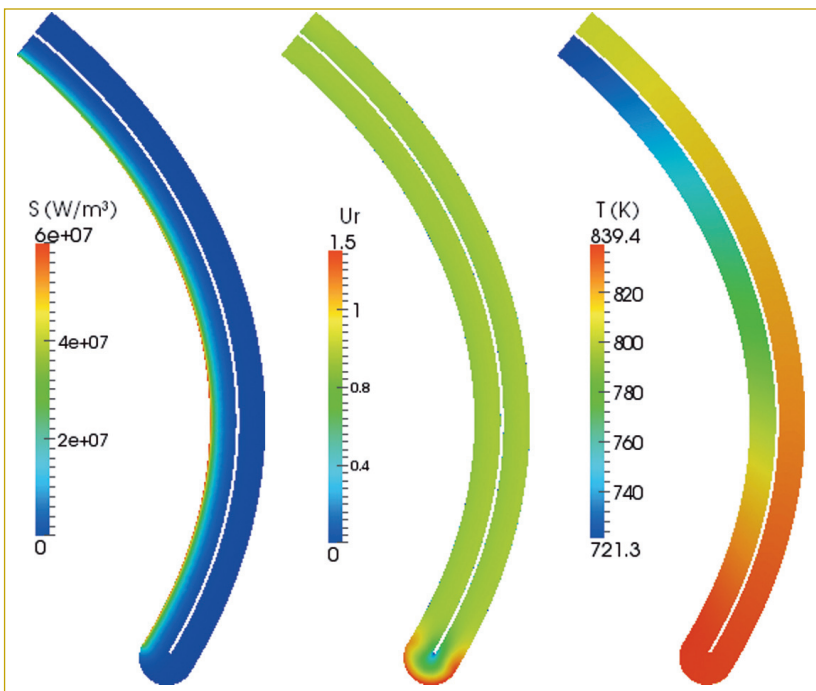


Figura 4: De izquierda a derecha: carga térmica, mapa de velocidades relativas y mapa de temperaturas, para una velocidad de entrada de 0,4 m/s (Mas de les Valls, 2011).

operación del sistema regenerador. La baja solubilidad del helio en el metal líquido, junto con concentraciones localmente altas, favorecen las condiciones necesarias para la nucleación de burbujas de helio. Por ejemplo, la tasa de producción de tritio puede llegar a ser del orden de 0,1-0,2 mol/(m³ día) para un reactor de 3.000 MW térmicos; para comparar, la solubilidad del helio para el eutéctico plomo-litio se estima que es del orden de $2.0 \cdot 10^4$ (mol/m³)/bar (Sedano, 2007).

El transporte de tritio dentro del material reproductor, y su permeación a través de los materiales estructurales, está influido por una serie de complejos fenómenos a los que hay que añadir la posibilidad de la existencia de una fase gaseosa de helio embebida en el metal líquido.

La existencia de un gran número de burbujas de pequeño tamaño en suspensión en el metal líquido puede actuar como un sumidero de tritio, reduciendo la cantidad de tritio permeada a través del material estructural de la envoltura regeneradora. Asimismo, teniendo en cuenta que la nucleación heterogénea (sobre impurezas superficiales en el material estructural) se producirá a concentraciones mucho menores que la nucleación homogénea en el seno del fluido, no debe descartarse la formación de finas láminas de helio actuando como barreras de permeación entre el plomo-litio y las paredes de la envoltura regeneradora.

Dentro de las líneas de trabajo de GET, y como parte de otra tesis doctoral (Fradera, 2011) se ha desarrollado un modelo basado en la teoría clásica de nucleación, que se ha adaptado e implementado con la finalidad de obtener una herramienta de cálculo capaz de simular sistemas HCLL y detectar parámetros clave de los mismos. Dicha herramienta incorpora un modelo de crecimiento de burbujas y está implementada, como los modelos MHD, en OpenFOAM. El código resultante permite simular el transporte de tritio y helio disueltos así como la nucleación y transporte de burbujas en geometrías complejas.

El modelo de transporte de tritio en el metal líquido y en el material estructural que conforma la envoltura se ha adaptado para su implementación en OpenFOAM. Este modelo de transporte incluye la absorción de tritio en las burbujas de helio, la adsorción de tritio en el material estructural, el transporte en el interior del material estructural y la desorción de tritio hacia los canales de refrigeración donde circula helio a presión. También permite simular el transporte de tritio a través de láminas de gas entre el metal líquido y el material estructural.

El transporte de tritio y helio disueltos se ha modelado como el transporte de escalares pasivos (es decir, sin tener efecto en el flujo del fluido). El transporte de burbujas en el metal líquido se ha modelado, en primera

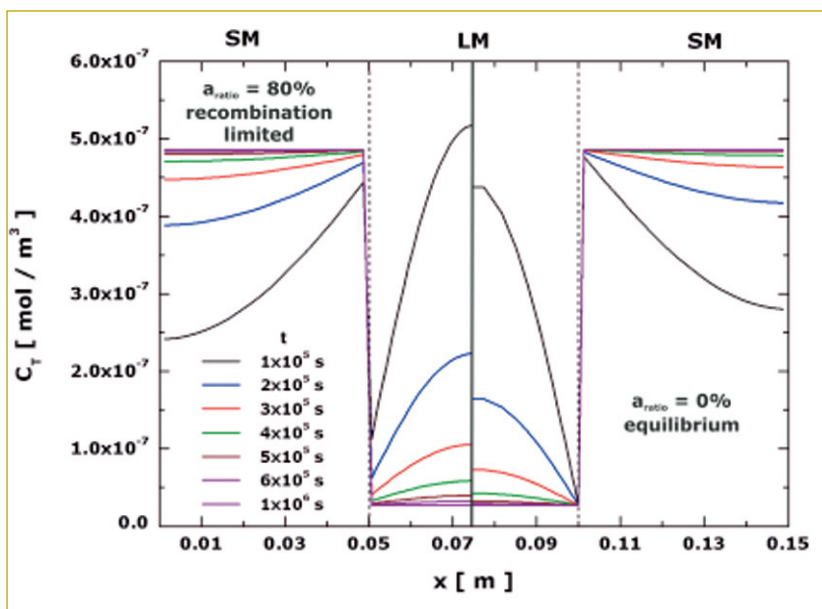


Figura 5: Evolución de los perfiles de concentración de tritio para dos fracciones distintas de cobertura de la superficie del canal por burbujas de helio. Los materiales son plomo-litio y eurofer. La condición de contorno exterior es de flujo cero (Fradera, 2011).

aproximación, también como escalar pasivo, asumiendo inicialmente que las burbujas no tienen ningún efecto sobre la hidrodinámica del sistema. Se han implementado tres métodos para el transporte de burbujas: la aproximación al radio medio, el método de las clases y el método de los momentos. Todos los modelos han sido adaptados para tener en cuenta el fenómeno de nucleación y el transporte de tritio.

El código se ha verificado, probado y validado en todos los casos posibles. El código resultante ha producido información de gran valor para el diseño y operación de las envolturas regeneradoras y se prevé que sea una herramienta clave para la demostración del principio de autosuficiencia en la generación de tritio.

La aplicación del código a una envoltura regeneradora como la HCLL muestra que la nucleación de helio en el metal líquido se puede dar bajo condiciones de operación con un impacto significativo sobre la permeación de tritio, que se ve reducida considerablemente. En la Figura 5 se compara, para un canal de 4 cm de ancho (como los de un HCLL) rodeado de 5 cm de material estructural por ambos lados, la evolución temporal de la concentración de tritio en el caso de que un 80% de la superficie del canal esté cubierta por burbujas de helio con la que se tendría en ausencia de dichas burbujas.

Otro caso de aplicación del código ha sido el estudio del transporte de tritio para el caso del permeador contra vacío desarrollado por el Ciemat en el marco del programa Tecno_FUS.

Los resultados muestran los perfiles de concentración en este tipo de permeadores y aportan una valiosa información para su diseño y operación. La herramienta ha resultado ser de gran utilidad para la estimación de la eficiencia en este tipo de dispositivos.

SISTEMAS DE CONVERSIÓN DE POTENCIA

Una nueva línea en tecnología de fusión que está tomando auge en GET es el estudio de posibles sistemas de extracción de potencia térmica y conversión a electricidad.

Mediante el uso del código de sistema Relap5-3D, desarrollado por el Idaho National Laboratory, se están empezando a analizar algunos posibles diseños de lazo. El código permite simular diversos fluidos, entre ellos el helio y el CO₂ supercrítico, ambos considerados como posibles fluidos de trabajo en tecnología de fusión. Se está haciendo pruebas con las diferentes opciones que permite el código para simular turbinas y compresores. El objetivo es poder disponer de una herramienta que sea capaz de realizar estudios de seguridad relacionados con la termohidráulica de una central de fusión. Por otro lado, también se espera desarrollar capacidades que permitan ayudar al diseño y dimensionado de los sistemas de extracción de potencia.

CAMINO POR DELANTE

Con dos tesis doctorales realizadas por el grupo y recientemente concluidas, se abre ahora un período de re-

formulación de objetivos y de consolidación de las líneas existentes. Las aportaciones hechas en la MHD de metales líquidos han sido muy valiosas y es importante mantener abierta esta línea de investigación y desarrollo, siendo nuestro grupo uno de los pocos que en nuestro país trabajan sobre el tema.

Por lo que respecta al transporte de tritio, la implementación de modelos de nucleación y transporte de burbujas de helio y su influencia en la permeación y en el control del tritio han representado una novedad. La tarea pendiente ahora es acoplar todos estos modelos con los MHD.

REFERENCIAS

- J. Fradera. Development and numerical implementation of tritium and helium transport models in liquid metal breeders for nuclear fusion technology applications. PhD dissertation. UPC. 2011
- J. Juanas e I. Fernández. Diseño de componentes internos y externos del Programa Consolider Tecno_FUS. Informe Técnico. Asociación Euratom-CIEMAT. Ref: CSD2008-079. 2009
- E. Mas de les Valls. Development of a simulation tool for MHD flows under nuclear fusion conditions. PhD dissertation. UPC. 2011
- G. Rampal, A. Li Puma, Y. Poitevin, E. Rigal, J. Szczepanski, and C. Boudot. HCLL TBM for ITER-design studies. Fusion Engineering and Design, 75:917-922, 2005.
- J. F Salavy, G. Aiello, O. David, F. Gabriel, et al. The HCLL Test Blanket Module system: Present reference design, system integration in ITER and R&D needs. Fusion Engineering and Design, 83(7-9):1157-1162, 2008.
- L.A. Sedano. Helium Bubble Cavitation Phenomena in Pb-15.7Li and Potential Impact on Tritium Transport Behaviour in HCLL Breeding Channels. Informes Técnicos Ciemat, 1111. CIEMAT. 2007,
- S. Smolentsev y R. Moreau. Modeling quasi-two-dimensional turbulence in MHD duct flows. Proceedings of the Summer Program, CTR, Stanford University, pp. 419-430. 2006
- J. Sommeria y R. Moreau. Why, how and when MHD turbulence becomes two-dimensional. Journal of Fluid Mechanics 118, 507.1982. ■