

APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS DE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL A LA TECNOLOGÍA DE FUSIÓN NUCLEAR

A lo largo de los últimos años, la fusión nuclear ha cobrado cada vez más importancia dentro del panorama de la investigación de nuevas fuentes de energía. Actualmente existen varios conceptos mediante los que se pretende alcanzar la fusión nuclear con vistas a construir un reactor comercial capaz de generar energía limpia.

Una de las iniciativas más importantes en el desarrollo de la fusión nuclear es el reactor experimental ITER en construcción en Cadarache, Francia. Este reactor, basado en el confinamiento por campos magnéticos del plasma que genera la reacción de fusión presenta un reto tecnológico en un amplio abanico de disciplinas, entre ellas la refrigeración de complejos componentes bajo condiciones extremas tanto térmicas como de radiación.

IDOM ha participado desde hace años en el cálculo de dichos componentes mediante herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y ha desarrollado una metodología propia que permite la simulación de grandes estructuras y su análisis detallado desde el punto de vista de diseño, operativo y de seguridad. Estos estudios se han centrado en la refrigeración de la vasija de vacío que contiene la radiación emitida por el plasma y evacúa el calor que éste genera para la posterior generación de electricidad.

La tecnología desarrollada por IDOM para la tecnología de fusión también se ha aplicado con éxito a otras disciplinas dentro de la industria nuclear.

La propuesta es explicar, como introducción, ITER en el marco de los trabajos que se están realizando con CFD. Después una primera parte en la que se explicará en qué consisten los cálculos y para qué se aplican, y una segunda parte en la que extendemos esta tecnología a otros campos relacionados con la tecnología nuclear.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, la fusión nuclear ha cobrado cada vez más importancia dentro del panorama de la investigación de nuevas fuentes de energía. Actualmente existen varios conceptos mediante los que se pretende alcanzar la fusión nuclear con vistas a construir un reactor comercial capaz de generar energía limpia.

Una de las iniciativas más importantes en el desarrollo de la fusión nuclear es el reactor experimental ITER [1], en construcción en Cadarache, Francia. Este reactor está basado en el confinamiento por campos magnéticos de un plasma de isótopos de hidrógeno, medio en el que se producen las reacciones de fusión nuclear, y presenta un reto tecnológico en un amplio abanico de disciplinas, entre ellas la refrigeración de complejos componentes bajo condiciones extremas tanto térmicas como de radiación.

IDOM [2] participa desde hace años en el cálculo de varios componentes del reactor ITER mediante herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) y ha desarrollado una metodología propia que permite la simulación de grandes estructuras y su análisis detallado desde el punto de vista de diseño, operativo y de seguridad. Estos proyectos se han centrado en la refrigeración de la vasija de vacío (Vacuum Vessel) que blindará de la radiación emitida por el plasma además de evacuar el calor que ésta genera para la posterior producción de electricidad.

La vasija, que es un componente esencial y crítico perteneciente al sistema primario de transferencia de calor, está formada por una estructura seccionada toroidal de acero de doble pared refrigerada por agua en su interior. Nueve sectores conforman los 360 grados del toroide como se muestra en la Figura 1, albergan-



JORGE FRADERA FERNÁNDEZ

Nuclear Engineer, Ph.D.
SERVICIOS NUCLEARES – IDOM

APPLICATION OF COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS TOOLS (CFD) TO NUCLEAR FUSION TECHNOLOGY

There are currently some projects ongoing aimed at the construction of a commercial fusion reactor capable of operating in a controlled manner and generating clean energy, and one of the most important initiatives is the ITER Project in Cadarache (France). This reactor is based on the confinement of plasma through magnetic fields, being one of the most important technological challenges the cooling of complex components under extreme conditions of temperature and radiation.

This article aims to briefly show some aspects related to the calculation of such components using computational fluid dynamics tools (CFD), noting that these studies have been focused on the vacuum vessel that contains the radiation emitted by the plasma and the evacuation of the generated heat.



do también diferentes sistemas de diagnóstico, control y operación, además de soportar los módulos de la primera pared en contacto con la cavidad en la que se encuentra el plasma. La estructura toroidal, diseñada mayoritariamente en acero resistente a la radiación, mide siete metros de altura con un radio de seis metros, 8000 toneladas de peso y está actualmente en construcción.

TRABAJOS REALIZADOS

De los nueve sectores del toroide, IDOM se ha encargado del análisis termohidráulico de tres de ellos, dos irregulares (sectores #2 y #3) y un tercero regular (sector #5) que representa a siete de los sectores de la vasija. La Figura 2 muestra dos vistas de la geometría de un sector, en este caso del sector irregular #3. Se puede observar la gran cantidad de elementos que componen el sector y su singular configuración.

Se han llevado a cabo análisis mediante el código de dinámica de fluidos computacional (CFD) ANSYS® Fluent® [3] con la finalidad de asegurar que el funcionamiento del sistema de refrigeración cumpliera con los parámetros de diseño. Hay que destacar que la finalidad de los cálculos no era crear un modelo lo más ajustado a la realidad como lo podría ser un gemelo digital, sino que por lo contrario pretendió estudiar el comportamiento del sector aplicando parámetros conservadores. Con este fin se utilizó un código con certificación de calidad nuclear y se diseñaron las simulaciones para que los resultados tuviesen el margen necesario para que fueran conservadores y se pudiesen analizar desde el punto de vista de la seguridad.

El realismo de los cálculos CFD suele crear controversia y en ocasiones se habla de lo conservador que es un código. En realidad, el conservadurismo lo aplican los ingenieros o científicos que utilizan los códigos mediante buenas prácticas, lecciones aprendidas y una extensa experiencia en el uso de este tipo de códigos.

Los cálculos realizados estudiaron estados estacionarios representativos del reactor en operación, envoltentes de la fenomenología y estados transitorios correspondientes al sistema de pulsos bajo el que el reactor operará en el futuro. Debido a la configuración del reactor, las reacciones nucleares en el plasma se mantienen durante varios cientos

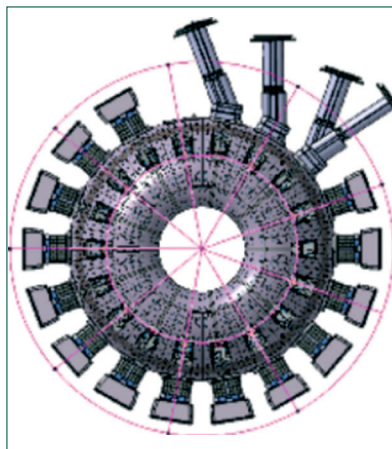


Figura 1. Vista cenital de la vasija de vacío de ITER.

de segundos seguidos de un periodo en el que no hay generación de potencia. Este ciclo se pretende repetir conformando el escenario de operación del reactor.

El principal desafío al que hubo que enfrentarse para la consecución de los cálculos fue la complejidad de los sectores, que contienen centenares de placas internas con la función de blindar la radiación neutrónica que emite el plasma. Esta complejidad, junto con la escala de los sectores y la inexistencia de simetrías que pudiesen simplificar su representación conllevó la creación de una metodología propia que fuera capaz de tratar un modelo de dichas características en un tiempo aceptable y con unos recursos computacionales ajustados que no necesitasen de super ordenadores.

La dinámica computacional de fluidos se puede resumir en cuatro pasos principales: la creación de una geometría representativa, su discretización o mallado, el cálculo mediante códigos (como el men-

cionado anteriormente) y el análisis de los datos.

El primer paso requiere un conocimiento en detalle del componente y su simplificación racional, es decir, la eliminación de detalles que no tengan un efecto sobre la fenomenología que se estudia. Para este fin se utilizaron programas de CAD especializados y un equipo que dividió el trabajo en subcomponentes ensamblables e intercambiables. Cabe destacar que el trabajo realizado se hizo también pensando en la capacidad de modificar el diseño a posteriori sin la necesidad de repetir tareas.

El mallado o discretización, que se basa la división de la geometría en pequeñas unidades de volumen o celdas, se realizó en paralelo gracias a la subdivisión de la geometría, permitiendo la consecución del modelo en un tiempo récord. La malla final alcanzó la cifra de 200 millones de celdas como se muestra en la Figura 3, una cantidad al límite de lo que un ordenador profesional potente es capaz de tratar. La malla se generó teniendo en cuenta los parámetros fluidodinámicos del sistema y aumentando la resolución en los puntos claves del sector, así como limitando la resolución en las zonas menos complejas. Cabe destacar que se discretizó tanto el acero del sector como la cavidad por la que fluye el agua de refrigeración.

Una vez ensamblados los diferentes componentes y generada la malla se importó en el código de CFD y se procedió a la configuración de la simulación. Los fenómenos que se simularon fueron la fluidodinámica del agua en el interior del sector, el calentamiento tanto del agua como del acero que conforma el sector y la transferencia de

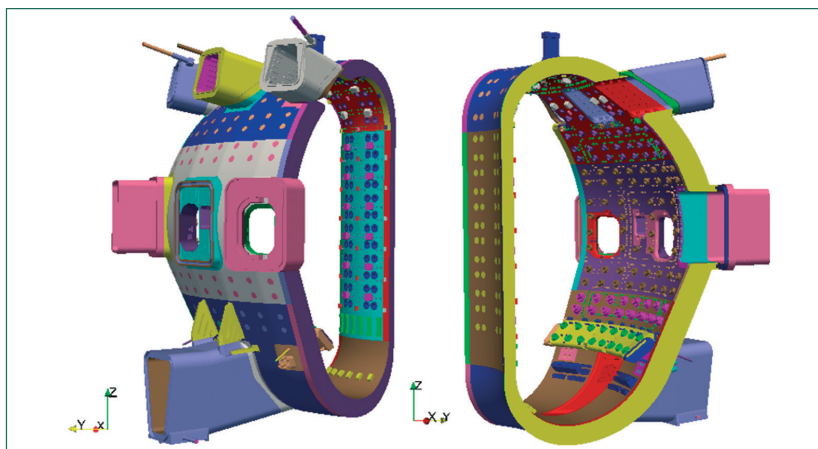


Figura 2. Geometría del sector irregular #2.

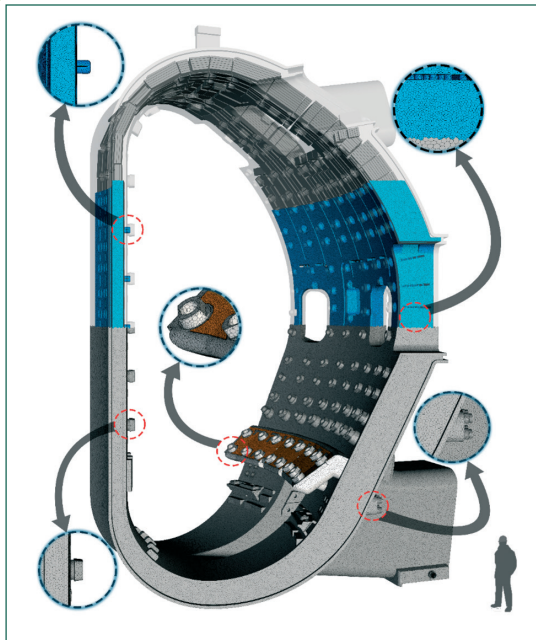


Figura 3. Discretización del sector #2. Se muestra la escala del modelo y el detalle de la malla.

calor entre ambos. Además, y debido a que el sistema de refrigeración opera a una presión elevada de 8 atmósferas, 100°C y con velocidades que van desde unos pocos milímetros por segundo hasta decenas de ellos, los efectos de turbulencia en el refrigerante debían tratarse con especial resolución.

Un caso especial fue la incorporación de la deposición de calor en la estructura del sector y el refrigerante. Este término se genera con códigos neutrónicos como MNCP [4] y es necesario crear una metodología especial para asegurarse de que los valores creados por estos códigos son mapeados en el código de CFD sin que se produzcan errores de interpolación que podrían afectar a máximos y mínimos. El mapeado de los datos se consiguió sin alteraciones y manteniendo el conservadurismo de los datos originales.

En el caso de las simulaciones en estado estacionario, es decir, aquellas que asumen que el reactor opera siempre de la misma forma sin cambios en el tiempo, se lanzaron en los servidores de cálculo durante varios meses hasta alcanzar la solución.

Los datos generados se trataron mediante herramientas capaces de representar tridimensionalmente los campos de velocidad, presión y temperatura obtenidos. En la Figura 4. Distribución del coeficiente de transferencia de calor en la interfase sólido fluido para el acero (izquier-

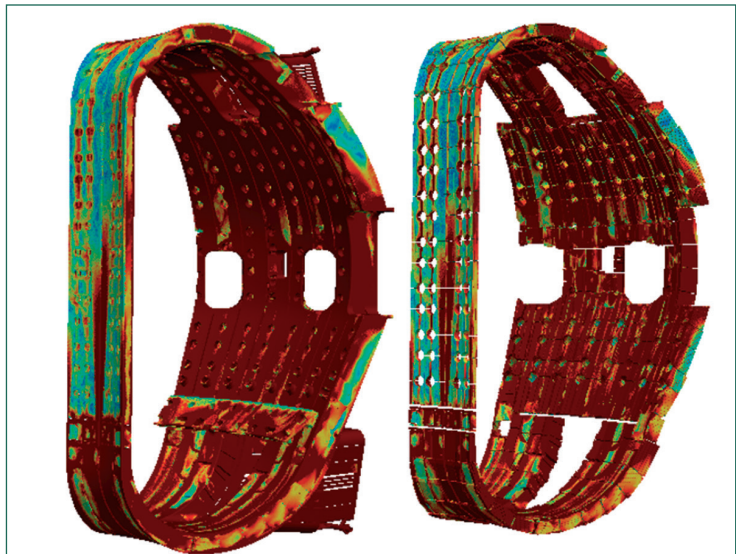


Figura 4. Distribución del coeficiente de transferencia de calor en la interfase sólido fluido para el acero (izquierda) y para las placas de blindaje (derecha).

da) y para las placas de blindaje (derecha). se muestra la distribución del coeficiente de transferencia de calor sobre toda la interfase sólido-fluido de un sector, así como sobre los centenares de placas internas que blindan de la radiación el exterior de la vasija. Este parámetro, que representa la capacidad de refrigeración de la estructura, es crucial para el análisis del comportamiento del sistema.

Gracias al gran detalle del modelo se pudo estudiar el efecto de los subcomponentes del sector y asegurar que su funcionamiento era no solo el diseñado, sino también que operaba dentro de los parámetros de seguridad establecidos. La Figura 5. Detalle del componente sobre el que se anclan los módulos que están en contacto con la cavidad del plasma. Campo de velocidad (*Large Integral Convolution*) a la izquierda y líneas de flujo en el interior del componente a la derecha. muestra el grado de de-

talle al que se llegó con las simulaciones mostrando la velocidad en uno de los componentes de la estructura clave para el anclaje de los módulos que están en contacto con la cavidad que alberga al plasma.

En el caso de la simulación en estado transitorio se tardó nueve meses en calcular un pulso completo del reactor y se generó una cantidad de datos cien veces superior a la de los casos estacionarios. Es decir que, sumado al reto de analizar un sistema complejo de 200 millones de celdas, se tuvo que crear un método para poder realizar dicho análisis para cada instante de tiempo simulado. Para este fin se programó una serie de automatismos que pudieron tratar los datos eficientemente y dentro del tiempo establecido por el proyecto.

Los resultados de la simulación transitoria permitieron ver la evolución del sector durante todo un pulso. Se pudo observar cómo el sector

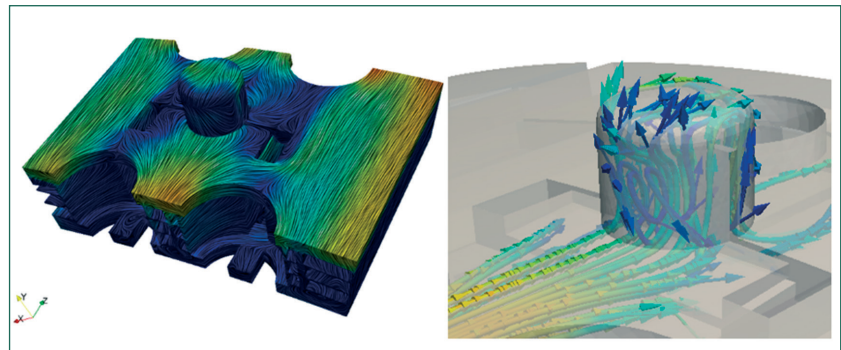


Figura 5. Detalle del componente sobre el que se anclan los módulos que están en contacto con la cavidad del plasma. Campo de velocidad (*Large Integral Convolution*) a la izquierda y líneas de flujo en el interior del componente a la derecha.

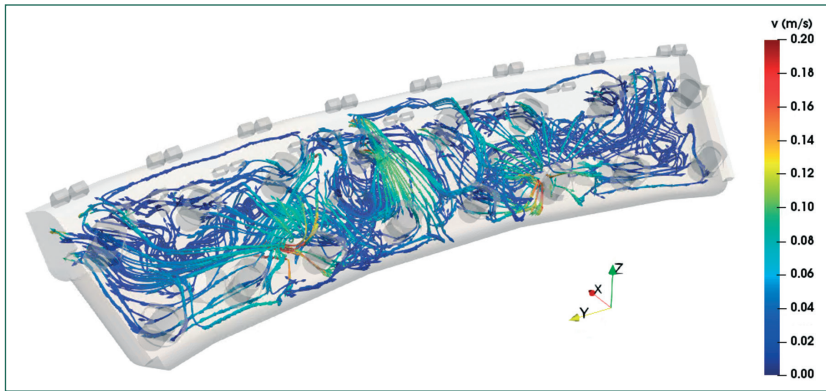


Figura 6. Líneas de flujo dentro de uno de los componentes del sector durante el pulso de potencia.

se calentaba poco a poco durante el pulso de potencia del reactor a medida que los neutrones emitidos por el plasma depositaban su energía sobre la estructura y el refrigerante. Los subcomponentes se pudieron analizar en busca de puntos con mayor temperatura o efectos dinámicos que afectasen al esquema de refrigeración como el que se muestra en la Figura 6. Una vez finalizado el pulso de potencia se pudo observar cómo la temperatura disminuía al estar el sector refrigerado por el agua de alimentación a menor temperatura.

CONCLUSIÓN

Las simulaciones realizadas permitieron tanto a F4E [5] como a ITER Orga-

nization [1] obtener una información esencial para la comprobación del diseño de la vasija de vacío y además estudiar su comportamiento estructural, tanto desde el punto de vista de la operación del reactor como desde el punto de vista de la seguridad.

Los retos tanto técnicos como de dirección a los que se enfrentó IDOM durante estos proyectos permitieron no solo colaborar con el proyecto ITER por una fuente de energía limpia, sino que también conllevaron el desarrollo una metodología innovadora que hizo uso de las últimas tecnologías y equipos disponibles capaz de tratar complejas estructuras con componentes de diversos tamaños en tiempos récord y con resultados de gran resolución.

Un aspecto relevante es que, más allá del proyecto ITER, la metodología desarrollada se puede aplicar al análisis de otros reactores o equipos dentro de la industria nuclear. El nivel de detalle al que se ha llegado permite estudios de grandes componentes o en instalaciones enteras asegurando la fiabilidad de los resultados y la adecuación a las normativas del sector nuclear. ■

- [1]. ORGANIZATION, ITER. ITER WEB SITE. [Online]. [cited 2019. Available from: <https://www.iter.org/>.
- [2]. IDOM. IDOM Nuclear Services. [Online]. [cited 2019. Available from: <https://www.idom.com/es/proyectos/servicios-nucleares-idom/>.
- [3]. ANSYS. ANSYS Fluent. [Online]. [cited 2019. Available from: <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>.
- [4]. Los Alamos NATIONAL LABORATORY. MNCPL. [Online]. [cited 2019. Available from: <https://mncpl.lanl.gov/>.
- [5]. FUSION FOR ENERGY. FUSION FOR ENERGY WEB SITE. [Online]. [cited 2019. Available from: <https://f4e.europa.eu/>.



27ª Conferencia Anual WiN Global

Madrid, 17-21 de junio de 2019

<https://twitter.com/winspain>

<https://www.facebook.com/WINGlobal>

<https://www.linkedin.com/in/win-spain-953883182/>

INSCRÍBETE en nuestra WEB y en las REDES SOCIALES

www.winglobalmadrid2019.org