

EMPLEO EN ENUSA DE HERRAMIENTAS DE CÁLCULO Y SIMULACIÓN PARA EL DESARROLLO DE NUEVOS PRODUCTOS Y SERVICIOS

El artículo presenta algunas de las herramientas de cálculo y simulación empleadas (y en desarrollo) actualmente en Enusa, ilustrando con ejemplos para qué se utilizan y los resultados conseguidos hasta el momento. El objetivo es simular de manera integrada, utilizando distintas herramientas (mecánica, termohidráulica, neutrónica, etc.), el comportamiento del combustible fresco y gastado y de los elementos que interactúan con él: entorno en el reactor, herramientas y contenedores.

Este esfuerzo sirve para mejorar y simplificar el desarrollo de cambios de diseño en el combustible, en su gestión en el reactor o en los procesos de fabricación.

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual la industria nuclear tiene la necesidad de innovar y realizar cambios para adaptarse a un mercado cada vez más competitivo, sin dejar de satisfacer las demandas de la sociedad en cuanto a seguridad y protección del medioambiente.

Están surgiendo retos tecnológicos en áreas como la gestión del combustible gastado y su almacenamiento fuera de las piscinas, o del diseño del combustible nuclear para aumentar su seguridad intrínseca, a los que es prioritario dar soluciones (almacenes temporales/definitivos, contenedores, dispositivos de reacondicionamiento, herramientas, nuevos materiales más resistentes para el combustible, etc.). Esto hace necesario mejorar las actuales capacidades de diseño y desarrollar otras nuevas para dar soluciones realistas en plazos limitados.

El sector nuclear es un área en la que en muchas ocasiones no se pueden reproducir experimentalmente las condiciones reales de trabajo y en la que muchos fenómenos son difíciles de observar directamente. En este contexto tan específico, la facilidad de uso de las nuevas herramientas de simulación y su gran flexibilidad y capacidad de adaptación, son una oportunidad de minimizar estas dificultades. Esto ha llevado a Enusa a apostar por la implantación de este tipo de herramientas en su proceso de diseño.

En Enusa el proceso definido para obtener la simulación del comportamiento del combustible consta de diferentes etapas, Figura 1. A continuación se describen ejemplos de aplicación de estas herramientas en cada una de ellas.

DEFINICIÓN DEL PRODUCTO: DISEÑO EN 3D

Enusa ha realizado un proceso de adaptación y migración del diseño clásico 2D al 3D. Ha implantado un programa de diseño 3D en su sistema que permite generar, de forma muy intuitiva, el modelo a partir del cual se crean los planos 2D necesarios para especificar dimensionalmente el producto. Esto presenta las siguientes ventajas:

- Flexibilidad: permite introducir cambios con facilidad, así como visualizar su impacto de forma inmediata.
- Facilitar la interpretación de la información: al visualizar el modelo la interpretación es más sencilla y se minimizan posibles errores.
- Exportación de modelos en 3D. Gracias al diseño 3D se reducen considerablemente los tiempos de análisis al eliminar o acortar las etapas de preprocesado o preparación de los modelos para introducir a los códigos. Esta información también se usa en fabricación e inspección, bien como entrada para centros de mecanizado o máquinas de inspección automática, bien en el propio diseño de equipos (simula-

IRENE DE NAVAS

Ingeniero de Desarrollo de Equipos en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero industrial por la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid.

LUIS FERNANDO ELÍAS

Ingeniero de combustible gastado en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero industrial por la ETSII de la Universidad de Valladolid.

RUBÉN MATÍAS

Ingeniero de tecnología de combustible en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero industrial por la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid.

CARLES MESADO

Ingeniero de tecnología nuclear en el Departamento de Desarrollo de Tecnología y Equipos.

ENUSA

Ingeniero químico por la Universitat Jaume I y doctor en Ingeniería y Producción Industrial por la Universitat Politècnica de València.

CALCULATION AND SIMULATION TOOLS USED IN ENUSA FOR THE DEVELOPMENT OF NEW PRODUCTS AND SERVICES

This paper presents some of the calculation and simulation tools that are currently in use (or under development) in ENUSA, by showing several applications and the results so far obtained with them. The objective is to simulate in an integrated way, through the use of different tools (mechanics, thermo-hydraulics, neutronics, etc.), the fresh and spent fuel assembly performance as well as the performance of those elements that interact with it: reactor environment, handling tools, canisters.

The endeavor made in this way will improve and simplifies the development of changes in the fuel assembly design and in its management in the reactor, as well as for example upgrades in the manufacturing processes.

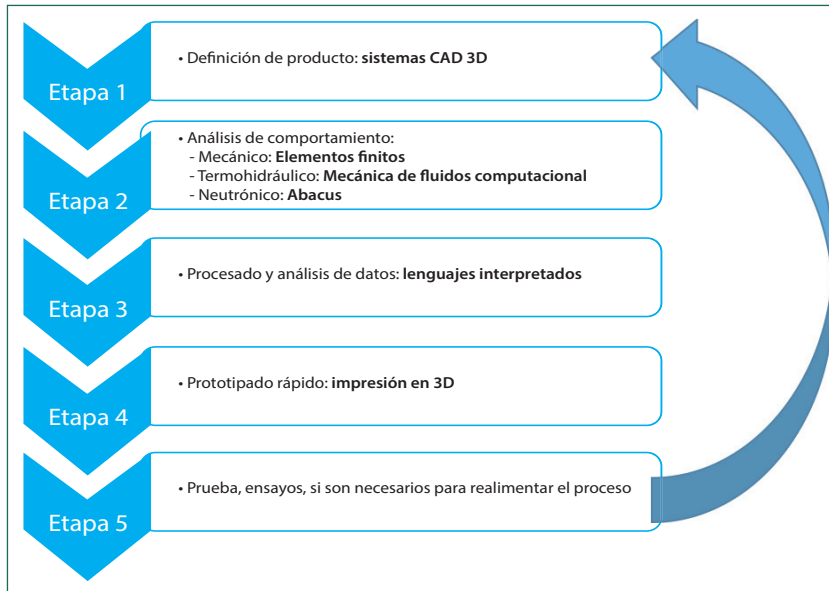


Figura 1. Etapas del análisis para conseguir la simulación completa del producto.

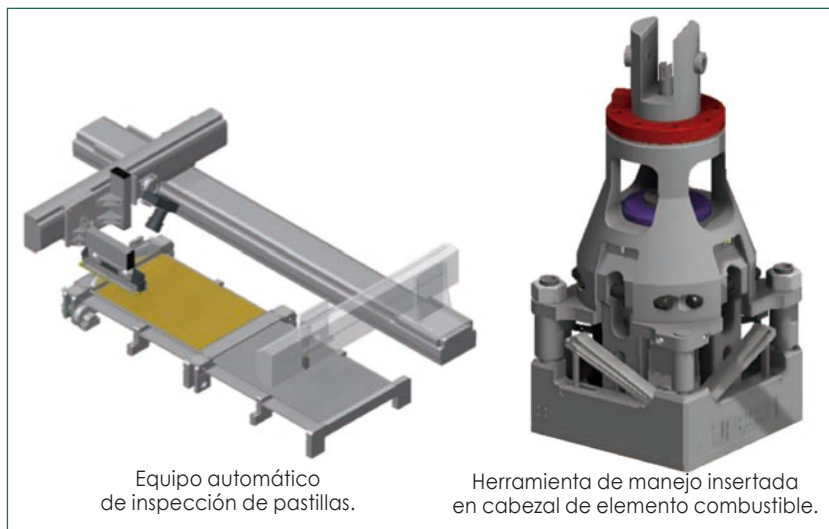


Figura 2. Ejemplos de modelos 3D.

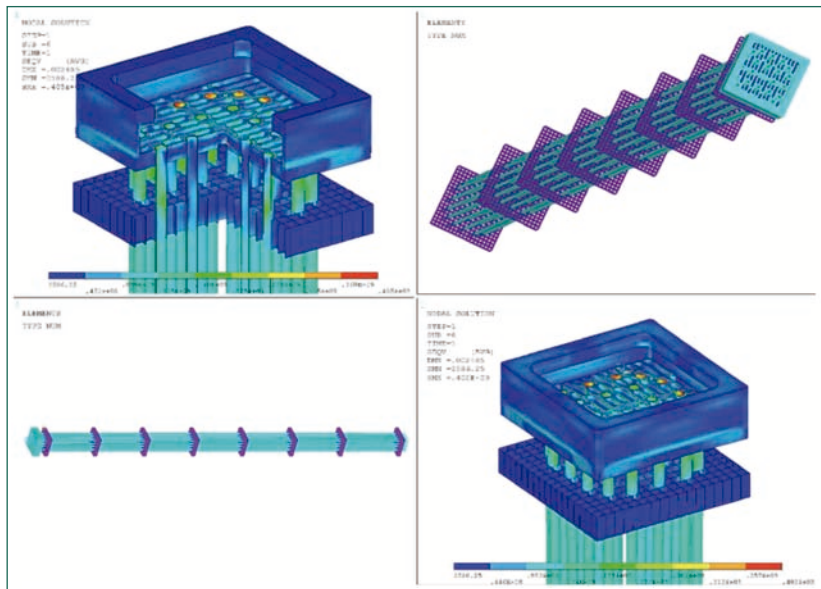


Figura 3. Estudio de factores de pico en manguitos de elemento combustible.

ción de desplazamiento de piezas, etc.).

- Impresión 3D de prototipos.

A día de hoy Enusa dispone de modelos 3D del combustible y sus componentes así como de cualquier elemento diseñado en los últimos años (herramientas de manipulación de combustible fresco e irradiado, equipos de fabricación, contenedores, etc). En la Figura 2 se observa una estación de trabajo de la fábrica y una herramienta de manejo insertada en un cabezal superior donde se comprueba la compatibilidad entre ambas piezas.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO

Análisis mecánicos

La modelización por elementos finitos es otra herramienta clave en el sector nuclear, que ha aprovechado el desarrollo de la mecánica de medios continuos, del software de cálculo y de las capacidades computacionales de las últimas décadas. Estos avances tienen una aplicación directa en campos como el diseño de combustible y su comportamiento, pero también en la segunda parte del ciclo del combustible, el combustible gastado. Esto engloba el estudio de este combustible gastado y su gestión, el de todos los componentes asociados a su transporte o almacenamiento (grúas, contenedores, racks, etc...), así como la forma en que interactúan.

Enusa tiene amplia experiencia en el desarrollo de elementos combustibles y en la modelización de sus componentes mediante elementos finitos y dispone de un amplio conocimiento del combustible nuclear en general, y en particular de los complejos fenómenos implicados en su rendimiento mecánico, así como de recursos técnicos capaces de explotar gran parte de las posibilidades que ofrecen estos códigos.

Los modelos de elementos finitos actuales incorporan la mayor parte de estas capacidades:

- Geometría basada en importación de modelos complejos de CAD.
- Análisis estructural: 2D o 3D, lineal o no lineal, estático o dinámico, comportamiento elástico, plástico, creep y fractura. Análisis de fenómenos de impacto (alta velocidad de deformación)



- Análisis térmico: estacionario o transitorio, comportamiento lineal o no lineal.
- Sistema acoplados término-estructural.
- Cálculos acoplados implícitos y explícitos.
- Acoplamiento de varias físicas (por ejemplo estructural y fluidos).

La principal aplicación de estos modelos de elementos finitos, en el caso del combustible y su ciclo, es la verificación del comportamiento mecánico e integridad durante la operación e hipotéticos accidentes o eventos. En la segunda parte del ciclo de combustible, se estudian condiciones de manejo, condiciones de transporte, análisis del comportamiento del elemento durante transporte y almacenamiento, verificación de la integridad de la barra bajo situaciones no convencionales que requieren estudios específicos, estudio de fenómenos de corrosión bajo tensión, soluciones de manejo y transporte de elementos con una problemática específica (por ejemplo, con daños estructurales, exfoliación, etc.). También se aplica para el diseño de componentes o herramientas necesarias en las piscinas de combustible gastado (cestas, útiles de manejo), etc.

La primera fase siempre es validar el modelo, ya sea comparando los resultados frente a los valores obtenidos en ensayos, ya sea comparándolo con resultados obtenidos de modelos analíticos sencillos. Se comprueba que bajo las mismas condiciones el modelo desarrollado es capaz de replicar los resultados.

A partir de ese punto, sería factible intentar predecir el comportamiento de una pieza en condiciones difíciles de reproducir en un ensayo o que requieren un elevado coste. Por ejemplo, conocer el comportamiento de la pieza a elevadas temperaturas, considerando un defecto en la misma, evaluar consecuencias de eventos dinámicos de impacto, etc.

El realizar un modelo, que reproduzca fielmente el comportamien-

to de un componente o conjunto, no es en absoluto sencillo dada la cantidad de variables que pueden intervenir en el cálculo (plasticidad, contactos, leyes de comportamien-

to de material, no linealidades geométricas y de material, velocidad de deformación, temperatura, etc.), y teniendo en cuenta que muchas de ellas están interrelacionadas entre sí.

Ahí es donde Enusa y su experiencia aportan un importante valor añadido.

La capacidad de personalización de los códigos usados, permite adaptar tanto el cálculo como la forma de implementar las respuestas a las preferencias de cada cliente, automatizando los procesos y mejorando la capacidad de respuesta. En este sentido se implementa con código tanto el chequeo respecto a diferentes normativas, como la generación de resultados, con listados adaptados a las necesidades de cada cliente y permitiendo que ante cambios en las condiciones de cálculo Enusa pueda responder en un tiempo reducido.

A continuación se presentan algunos ejemplos de análisis que utilizan las capacidades expuestas con anterioridad.

La Figura 3 muestra el modelo usado para la verificación de distribución de la carga entre las uniones cabezal superior/esqueleto, obteniéndose los factores de pico para cada posición. Este cálculo se ha realizado considerando el elemento combustible sometido a esfuerzos de compresión. El modelo está ajustado con resultados de ensayos. Una vez validado, permite analizar la variación del factor de pico en función de parámetros como, por ejemplo, la temperatura, presencia daños en la unión, etc.

En la Figura 4, se muestra un ejemplo de una estructura en la que se realizan cálculos con acoplamiento de la parte térmica y la estructural, se realizan análisis de fluencia térmica (creep) y también cálculos implícitos-explí-

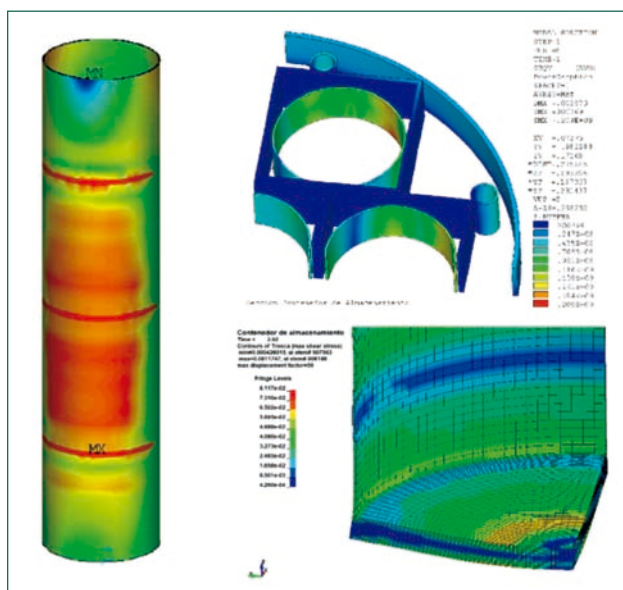


Figura 4. Estudio de contenedores de almacenamiento de combustible gastado.

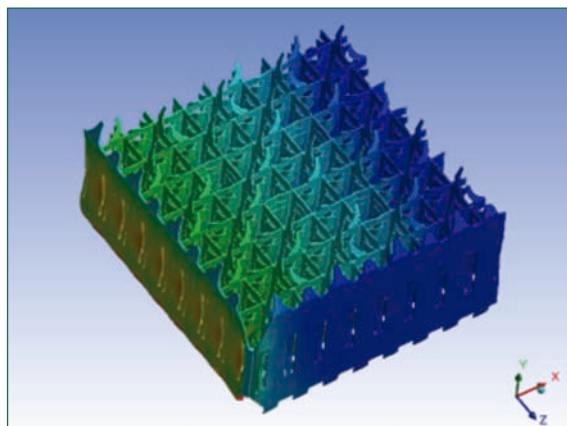


Figura 5. Deformación de banda exterior de una rejilla intermedia (un cuarto).

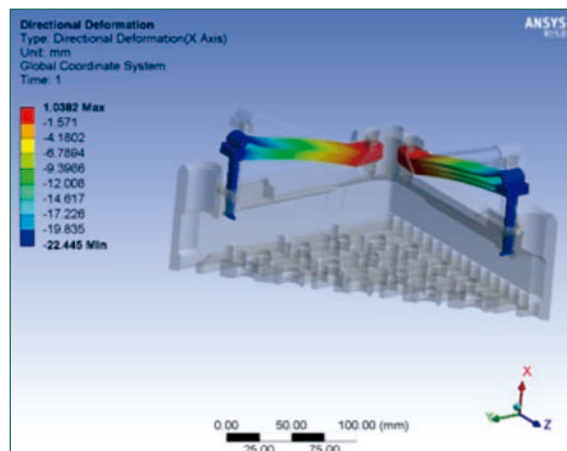


Figura 6. Evaluación de la deflexión del resorte del cabezal superior.



citios. Se trata de un contenedor de combustible gastado.

En las figuras siguientes se muestran diversos ejemplos: la verificación de la deformación admisible de la banda externa de una rejilla intermedia (Figura 5), la evaluación de la deflexión del resorte del cabezal superior (Figura 6), un análisis tensional de la interacción pastilla-vaina de combustible (Figura 7), así como un análisis tensional de un dispositivo Espiga (Figura 8).

Análisis termohidráulico

Las mejoras en las capacidades de cálculo también están permitiendo que los códigos de Mecánica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics, CFD*) se vayan incorporando como herramienta adicional para analizar el comportamiento termohidráulico del combustible en nuevos diseños y servicios. La principal ventaja de estos códigos es su capacidad para estudiar geometrías complejas y la obtención de unos resultados más precisos que otros códigos termohidráulicos. Esto ha llevado al interés de Enusa por incluir estas herramienta en sus metodologías y participar en varios proyectos de I+D, principalmente en colaboración con el grupo del profesor Gonzalo Jiménez en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la UPM y con otros socios tecnológicos.

Entre los proyectos desarrollados por Enusa que estudian el comportamiento del combustible durante operación se encuentran:

- Cálculo de las fuerzas laterales en las barras combustibles provocadas por el refrigerante considerando diferentes arqueamientos iniciales. Estas fuerzas se usan para predecir el patrón de arqueado del núcleo completo mediante códigos mecánicos.
- Análisis de la vibración de la barra ocasionada por el flujo axial turbulento del refrigerante para predecir el desgaste en la vaina por rozamiento con las rejillas (*grid-to-rod fretting, GTRF*), que ha sido uno de los principales mecanismos de

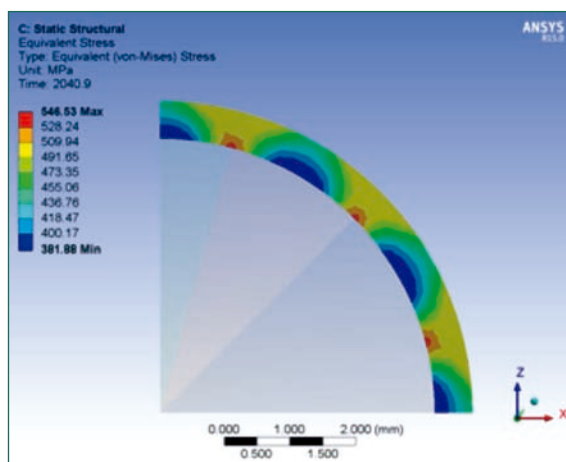


Figura 7. Análisis tensional debido a la interacción pastilla-vaina.

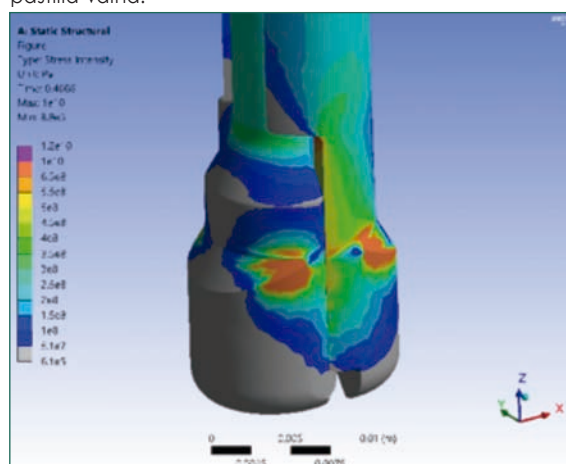


Figura 8. Evaluación tensional en dispositivo Espiga.

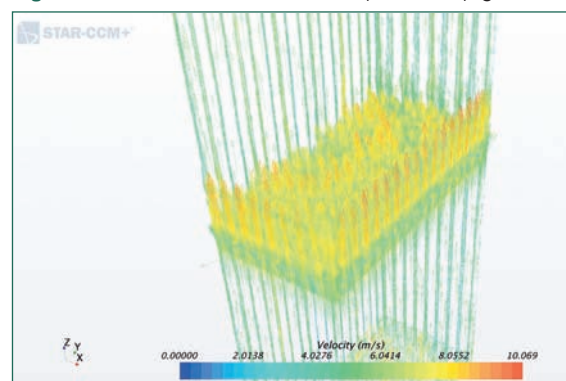


Figura 9. Campo de velocidades en una rejilla IFM. (Trabajo en colaboración con la ETSI Industriales (UPM)).

fallos de las barras combustibles en el pasado. En este proyecto se emplean modelos complejos de turbulencia *Large Eddy Simulation (LES)* capaces de predecir las fluctuaciones de presión causantes de la vibración (Figura 10). Los resultados obtenidos alimentan a un modelo de elementos finitos que obtiene las fuerzas en las zonas de contacto vaina-rejilla con las que se estima el desgaste producido.

También se está trabajando de forma alternativa en el desarrollo e implementación de algoritmos y modelos de simulación de fluidos y de vigas no lineales que permitan el estudio del GTRF empleando un acoplamiento fluido-estructura en las dos direcciones.

- Evaluación del riesgo de CILC (*Crud Induced Localized Corrosion*). El uso de códigos CFD en este proyecto está integrado en una metodología que emplea códigos termohidráulicos de subcanal para la obtención de las condiciones termohidráulicas de todo el núcleo y códigos de análisis químico para el cálculo del espesor de *crud*. Con el código CFD se alcanza la resolución necesaria para calcular coeficientes de transmisión de calor localizados en la superficie de las vainas, que es uno de los parámetros más determinantes para la evaluación del CILC.

También se han usado códigos CFD para simular el combustible en condiciones de almacenamiento.

- Simulación de la caída de un elemento combustible en la piscina de almacenamiento de combustible, uno de los accidentes base de diseño. El cálculo de la velocidad de impacto en función del ángulo de caída teniendo en cuenta la resistencia hidrodinámica permite una determinación más realista de la velocidad, entrada crítica para el cálculo estructural, eliminando el conservadurismo de cálculos en los que se consideraba caída libre del combustible.

- Cálculo de temperatura del combustible durante el almacenamiento en seco y transporte. Hasta ahora los cálculos relacionados con las temperaturas del combustible gastado se han centrado en cálculos de temperaturas máximas, de manera coherente con el límite indicado en la ISG-11 rev.3 para la vaina, 400 °C. Estos cálculos pueden ser muy penalizantes o incluso no conserva-

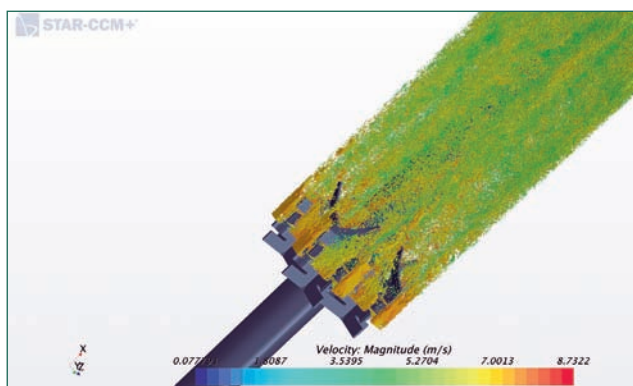


Figura 10. Turbulencia alrededor de la barra. (Trabajo en colaboración con la ETSI Industriales (UPM)).

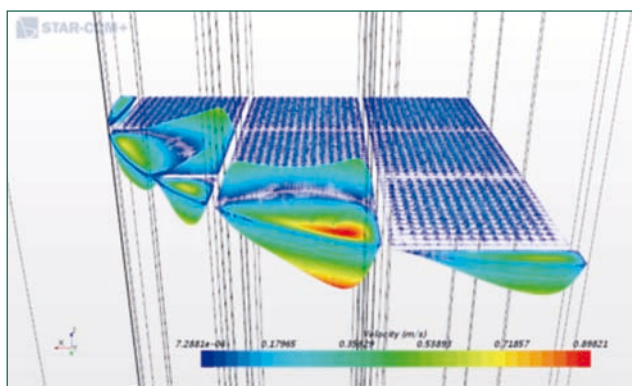


Figura 11. Campo de velocidades del helio en el interior del contenedor. (Trabajo en colaboración con la ETSI Industriales (UPM)).

dores en casos en los que la ductilidad del material es un factor relevante. En este proyecto se está simulando la geometría del contenedor para predecir la distribución de temperaturas de manera realista considerando la convección natural del helio en su interior.

Análisis neutrónico

Los cálculos de calor residual o de término fuente en los elementos combustibles gastados son de gran importancia para su almacenaje, tanto en la piscina de combustible gastado, en el diseño de los contenedores, en el ATI de las centrales o incluso en el futuro ATC.

En base a la creciente importancia de la segunda parte del ciclo, Enusa decidió desarrollar una aplicación que optimizara estos cálculos y los integrase con el resto de áreas. Los objetivos eran: 1) cálculo rápido del término fuente radiológico y térmico de cualquier elemento combustible del parque español, 2) reducción de oportunidad de cometer errores y facilidad de uso, y 3) compatibilidad con el resto de aplicaciones relacionadas con el combustible.

A partir de estas premisas se creó la herramienta Abacus. En la Figura 12 se muestra un esquema simplificado de la aplicación y sus principales características. La agilidad de cálculo de Abacus radica en dos características fundamentales: i) las librerías precompiladas que contienen los datos neutrónicos y, ii) la base de datos interna que recoge toda la información geométrica y de materiales. Usando la GUI de Abacus el usuario puede

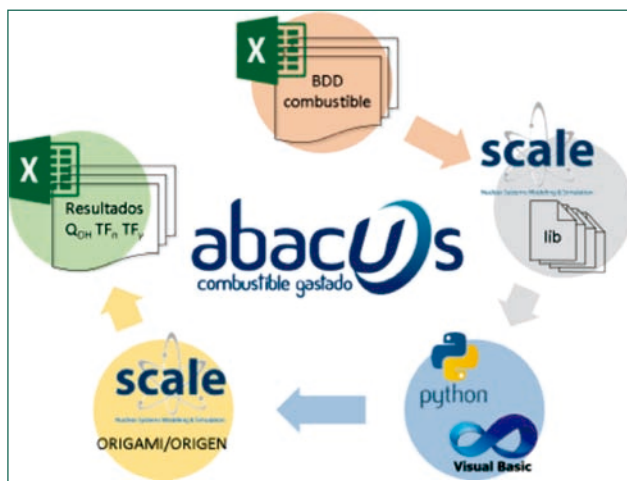


Figura 12. Resumen gráfico de la aplicación Abacus v1.0.

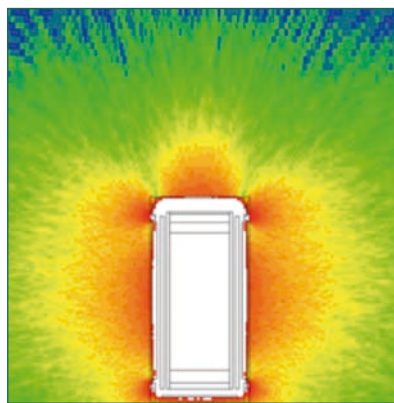


Figura 13. Mapa de dosis de un contenedor.

seleccionar la librería adecuada y cargar los datos correspondientes desde la base de datos interna, para así, simular tantos elementos combustibles como se desee, ahorrando tiempo y a la vez minimizando la posibilidad de error.

El trabajo continúa acoplando Abacus con el resto de herramientas. Por una parte con la base de datos de combustible gastado que ha desarrollado Enusa y que contiene información de cada uno de

los elementos combustibles gastados de las plantas nucleares españolas. Por otra parte, con un código que, usando técnicas CFD, obtiene la distribución de temperaturas del conjunto de elementos combustibles seleccionados para su carga en un contenedor.

PROCESADO Y ANÁLISIS DE DATOS

Con el aumento de la potencia de cálculo ha aumentado el volumen de datos que somos capaces de procesar por unidad de tiempo. En este contexto se ha decidido apostar por la automatización de procesos repetitivos y el desarrollo de aplicaciones que eviten la manipulación de un gran volumen de datos, posible fuente de error, y facilitan su tratamiento posterior. De esta manera, el ingeniero puede dedicar su tiempo a analizar el problema y proporcionar una solución mejorada.

En los últimos años, los cálculos neutrónicos han experimentado un gran auge, en gran parte debido a la gestión de residuos y al diseño de contenedores. Para cubrir las necesidades de esta área se han creado diversas aplicaciones de posprocesado o gestión de datos para, por ejemplo, gestionar resultados de códigos de quemado o la salida de códigos de blindaje y cálculo de tasas de dosis (ver Figura 13).

En cálculos que implican códigos termomecánicos o termohidráulicos se está trabajando en facilitar la creación de entradas y el postproceso de los resultados (Figura 14). Entre las aplicaciones termomecánicas, destacan las aplicaciones desarrolladas para evaluar el impacto de la flexibilidad de la operación de

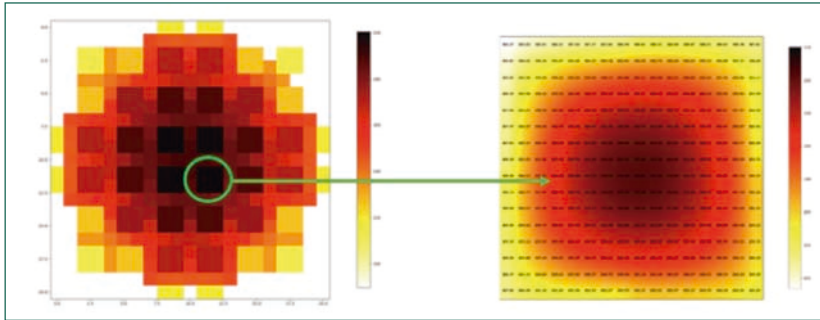


Figura 14. Distribución de temperaturas en un contenedor. (Trabajo en colaboración con la ETSI Industriales (UPM)).

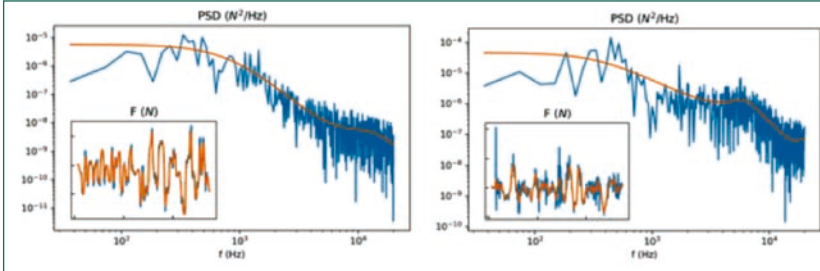


Figura 15. Fuerzas sobre la barra y Densidad de Potencia Espectral asociada. (Trabajo en colaboración con la ETSI Industriales (UPM)).

las plantas (*Extended Power Reduced Operation*, ERPO). Estas aplicaciones han contribuido al desarrollo y aplicación ágil de las metodologías de diseño y de la toma de decisiones.

También se están desarrollando aplicaciones para facilitar el análisis y uso de los datos obtenidos con el código CFD en las simulaciones antes comentadas: análisis espectral de las fluctuaciones de fuerzas para el proyecto de GTRF (Figura 15) y obtención de los coeficientes de transmisión de calor a partir de las temperaturas y flujos de calor en la superficie de las barras para el estudio de CILC.

PROTOTIPADO RÁPIDO: IMPRESORA 3D

Una vez simulado el comportamiento del producto a través de programas de cálculo y analizadas las salidas, proceso iterativo y dinámico que de forma continua realimenta el diseño 3D, se decide si es necesario hacer pruebas que verifiquen los resultados.

En este punto es cuando se vuelve al diseño 3D definitivo para, mediante prototipaje rápido, obtener una pieza real que pueda ensayarse. En Enusa se ha apostado por la

impresión 3D pero dado que aún no es una tecnología totalmente madura, el objetivo por el momento es conocerla y familiarizarnos con ella para identificar posibles aplicaciones en nuestro trabajo.

Actualmente disponemos de dos impresoras, cada una con un sistema diferente:

- **Fused Deposition Modeling (FDM):** usa rollos de hilo de material (plástico) para construir la pieza por solidificación de finos hilos del material según salen de la boquilla.

- **Stereolithography Apparatus (SLA):** emplea resinas fotopolimerizables junto con luz ultravioleta para curar material y así realizar objetos sólidos capa a capa.

Estas impresoras se están usando para imprimir maquetas de herramientas de manejo de combustible (Figura 16), piezas del combustible, etc. a pequeña escala con carácter formativo tanto interna como externamente, pero destacar que ya se han impreso piezas para comprobar el funcionamiento de diferentes geometrías para un mismo componente en equipos de fábrica y repuestos puntuales (Figura 17).

CONCLUSIONES

Es necesario aprovechar los últimos avances tecnológicos para responder a la necesidad actual de innovación en el sector nuclear. En este sentido Enusa ha realizado un gran esfuerzo en los últimos años para implantar herramientas informáticas comerciales y desarrollar otras específicas que integren toda la información de la que dispone sobre el combustible, o de cualquier producto que desarrolle relacionado con él, y simular su comportamiento de la forma más detallada posible con el objetivo de:

- Mejorar las soluciones proporcionadas en relación con el combustible, proporcionando además información más completa y fácilmente interpretable y manejable.
- Poder dar respuesta a nuevas necesidades del cliente final (gastado, nuevas prestaciones del combustible, gestión del núcleo, etc.), con tiempos de diseño y fabricación más reducidos y de nuevo mejorando la información disponible para el cliente final.■

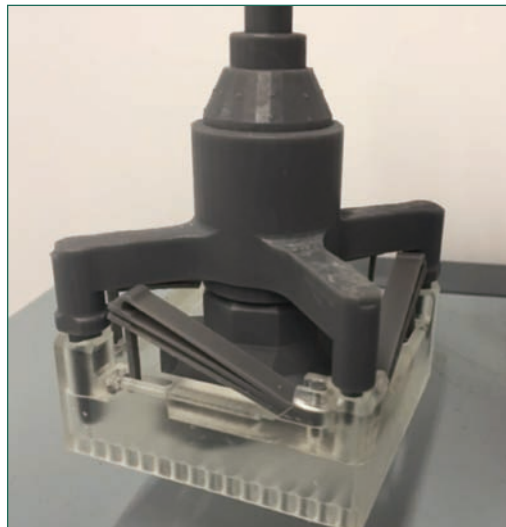


Figura 16. Modelo impreso en 3D de herramienta de manejo y cabezal de elemento combustible.

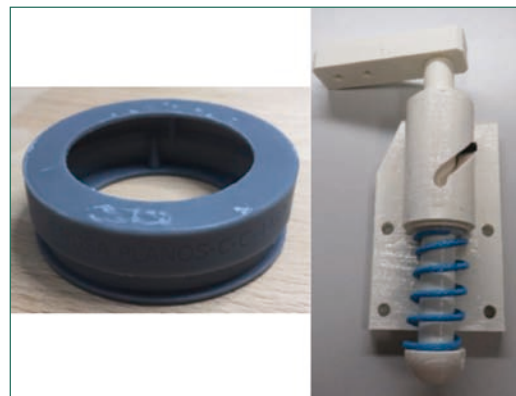


Figura 17. Ejemplos de pieza impresa en 3D para equipos de fabricación.