

Contribución de Iberdrola Ingeniería y Construcción en proyectos de ingeniería para el proyecto ITER

I. Hermana, G. Martínez de Miguel y J. Polo

El proyecto ITER (*the way*) es uno de los principales proyectos de colaboración internacional. Su objetivo es demostrar la viabilidad de la Fusión por confinamiento magnético como fuente de energía inagotable, segura y limpia. El desafío tecnológico es enorme en las áreas de materiales, superconducción, confinamiento, estructural, fabricación, robótica, criogenia,... Iberdrola ha colaborado desde hace más de cinco años en el desarrollo de las actividades de Ingeniería. Las áreas de colaboración han incluido ingeniería eléctrica, de control, de protección radiológica, de seguridad nuclear y mecánica. Los sistemas y componentes analizados cubren la red de distribución eléctrica, los sistemas de control, la vacuum vessel, los materiales internos de la vacuum vessel. Esto ha permitido a Iberdrola Ingeniería desarrollar capacidades punteras aplicables a otros proyectos, conseguir una imagen de empresa tecnológica en Europa y situarse en primera línea para los desarrollos de fusión próximos, con vistas al reactor DEMO y siguientes reactores comerciales.

IBERDROLA ENGINEERING CONTRIBUTION TO ENGINEERING PROJECTS FOR ITER

ITER (the way) is one of the main international collaboration projects. Its objective is demonstrating the viability of the Magnetic Confinement Fusion as a source of energy with endless resources, secure and clean. The technological challenge is huge in several areas: materials, superconductivity, confinement, structural, manufacturing, robotics, cryogen... Iberdrola has contributed since more than five years with different engineering activities. The areas covered include electrical, control, radiological protection, nuclear safety and mechanical engineering. The systems and components analyzed cover the electrical grid distribution, the control systems, the vacuum vessel, and the in-vessel materials. This has allowed Iberdrola to develop high tech capacities applicable to other projects, to gain the image of a technological company in Europe and places in first line for future fusion developments, with the objective of DEMO and following commercial reactors.

INTRODUCCIÓN

El Proyecto ITER (*the way*, como debe ser llamado ahora) es uno de los mayores proyectos científicos internacionales, solo comparable a la Estación Espacial Internacional. Siete entidades contribuyen al desarrollo del proyecto: Estados Unidos, Corea del Sur, China, Japón, Rusia, India y Europa.

Su objetivo es demostrar la viabilidad tecnológica de la fusión nuclear por confinamiento magnético como medio de producción de energía aprovechable por el hombre. Tras el éxito del proyecto se desarrollará otro evolucionado que ya será el arquetipo de reactor comercial para la generación de electricidad (este segundo proyecto se denominará DEMO).

El éxito de estos proyectos llevaría a disponer de una fuente de energía

inagotable (pues autogeneraría el tritio necesario para su funcionamiento), limpia (pues no genera residuos como resultado de su reacción, tan solo materiales activados, no de larga vida, a considerar durante el proceso de desmantelamiento) y segura (el proceso es intrínsecamente seguro pues cualquier desviación lleva a apagar el reactor, no siendo posible accidentes de liberación masiva de materiales radiactivos).

El enorme valor del objetivo viene contrapuesto por el tremendo esfuerzo técnico requerido para desarrollarlo. Es necesario generar enormes avances en las áreas de materiales, simulación, robótica, procesos nucleares, mecánica de precisión, control, superconductores, ...

Iberdrola Ingeniería y Construcción (IIC, en adelante) ha considerado des-



IGNACIO HERMANA MENDIOROZ

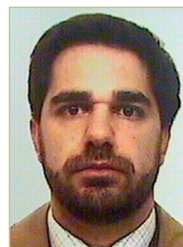
es ingeniero industrial por la UPM, especialidad Técnicas Energéticas. Toda su carrera en Iberdrola Ingeniería. Ha sido ingeniero de Seguridad Nuclear, responsable de las áreas eléctricas y de I&C y responsable de ingeniería del departamento de Nuevas Centrales. Actualmente es director de Proyecto, estando centrado en UK y en Fusión.



GUSTAVO MARTÍNEZ DE MIGUEL

es ingeniero de Minas por la UPM. Desarrolla su carrera en el área eléctrica, primero como ingeniero de proyectos y después como director de proyectos en Cobra. A continuación trabajó en Isolux y Cymi como director de proyectos eléctricos.

En la actualidad trabaja en Iberdrola Ingeniería como ingeniero senior y director de proyectos en el área de Fusión.



JOAQUÍN POLO

es ingeniero industrial, especialidad Mecánica por la UPM y la Escuela Central de París. Trabaja en la División de Generación Nuclear de Iberdrola Ingeniería desde 2007. Ha trabajado en el diseño, fabricación y montaje de equipos a presión para la isla nuclear del reactor EPR de Flamanville 3.

Actualmente trabaja dentro de los contratos marco de soporte de ingeniería para F4E.

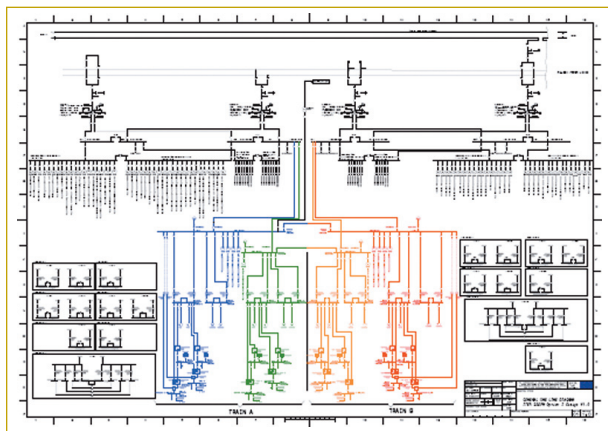


Figura 1: Diagrama unifilar del sistema SSEPN de la instalación ITER.

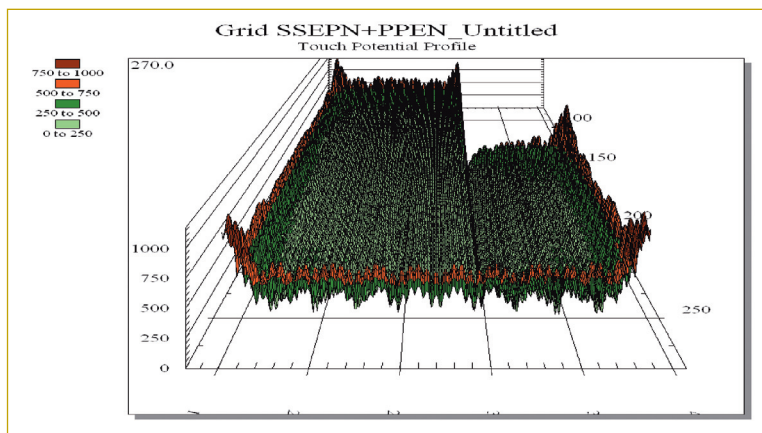


Figura 2: Modelo de la red de tierras de ITER.

de hace años como estratégica la participación en este proyecto para mantenerse en punta de lanza de los análisis de ingeniería y para adquirir capacidades que le permitirán participar en el desarrollo de productos de generación en el largo plazo. En este artículo se describirán sus contribuciones más significativas en las áreas de ingeniería.

Fruto en parte del buen hacer de estos proyectos, a finales de 2010 IIC fue adjudicataria dentro de un consorcio internacional para el suministro de 9+1 *winding packages* de las bobinas toroidales, lo que constituirá toda la aportación europea a estos componentes, en lo que ha supuesto una de las principales adjudicaciones de componentes clave hasta ahora. Dado que este proyecto tiene entidad suficiente para ser objeto de uno o varios artículos, no se va a abordar durante el presente su desarrollo.

INGENIERÍA ELÉCTRICA

Entre los años 2006 y 2009 Iberdrola Ingeniería realizó tareas para EFDA (*European Fusion development Agreement*, entidad predecesora de *Fusion for Energy* (F4E), que es la actual agencia de contratación europea para coordinar toda su aportación al proyecto) relacionadas con el diseño conceptual o básico de la infraestructura eléctrica de ITER.

Una parte fundamental de los trabajos estuvieron relacionados con el diseño del sistema estacionario (no pulsado) eléctrico de ITER. El SSEPN (*Steady State Electrical Power Network*) (Figura 1) alimenta a todos los consumidores convencionales de la central (esto es, todo excepto las bobinas superconductoras, que se alimentan de corriente continua). Iberdrola realizó un modelo detallado del sistema eléctrico de distribución de potencia, incluyendo los análisis de las corrientes de cortocircuito, los transitorios de tensión e intensidad por el arranque de grandes

equipos y estudios de estabilidad de la red, que sirvió, entre otras cosas, para determinar los niveles de tensión más apropiados de la instalación. También se realizó una base de datos de cargas eléctricas incluyendo planos soporte. Se desarrollaron estudios de detalle de las penetraciones eléctricas a los edificios *Tokamak*.

Otra gran tarea estuvo relacionada con el diseño y la realización de especificaciones técnicas de compra de la red de tierras del emplazamiento, necesarias para la fase temprana de construcción de la instalación (Figura 2).

La evolución esperada de la red de tierras es la siguiente: primero se desarrollará una red requerida durante la fase inicial de la construcción, cuando el emplazamiento será alimentado por una línea de 15kV desde las vecinas instalaciones de la CEA y sin ningún trabajo empezado en la subestación de 400kV. A continuación se desarrollará la construcción de la subestación de 400kV, estando la instalación todavía alimentada desde la CEA. Seguidamente se desarrollará la Fase 3, donde algunos edificios se alimentarán desde el sistema SSEPN, que recibirá energía desde la nueva línea de 400kV, mientras que otros edificios seguirán alimentados desde 15kV. Al final, la línea de 15kV permanecerá solamente como una línea de respaldo para componentes significativos para la seguridad.

Por último, se realizaron tareas de apoyo para la elaboración del Documento Final de Diseño (*Final Design Document*), el sistema de control de interfaces y la actualización del *Design Description Document* (DDD) para el SSEPN.

PROTECCIÓN RADIOLÓGICA. INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

Las actuaciones de IIC relacionadas con esta disciplina han tenido dos ámbitos: por un lado el diseño de la arquitectura del *Radiological Environmental Monitoring System* (REMS) y

por otro la definición de funcionalidad y análisis de fiabilidad de *Central Interlocks System* (CIS).

Durante los años 2010 y 2011, IIC desarrolló dentro de Lote 1 del *Framework* de Ingeniería sobre seguridad nuclear las siguientes actividades:

- Selección de tecnologías disponibles y convenientes para el sistema REM.
- Definición y descripción de la solución más conveniente (arquitectura de control).
- Identificación de los equipos no disponibles en el mercado de acuerdo a las necesidades definidas por ITER.
- Definiciones de las cargas eléctricas, mecánicas y de calor generadas por los equipos del sistema por habitáculo.

En el año 2011, IIC resultó adjudicataria de un nuevo contrato cuyo objeto era realizar análisis de fiabilidad y disponibilidad, software necesario, ingeniería de instalación y puesta en marcha del *Central Interlocks System* (CIS).

El CIS forma, junto con el sistema Codac y el sistema CSS (*Central Safety System*), los sistemas centrales de control de ITER I&C. El CIS es responsable de implantar las funciones de protección centrales a través de los sistemas de interfase (*Plant Interlock Systems*, PIS) y, si es necesario, dispone de ciertos actuadores propios. También proporciona acceso a los sistemas locales de datos de interfase de cada uno de los sistemas de interfase de planta.

El sistema de control de interfaces (*Interlock Control System*, ICS) se encarga de la supervisión y el control de todos los componentes ITER involucrados en la protección del *tokamak* y sus sistemas auxiliares. Está constituido por el CIS, el PIS y sus redes de control. El ICS asegura que ningún fallo de los controles de la parte convencional del ITER puede llevar a un daño serio de la integridad o la disponibilidad de la máquina. En general, los sistemas de interfase actúan como

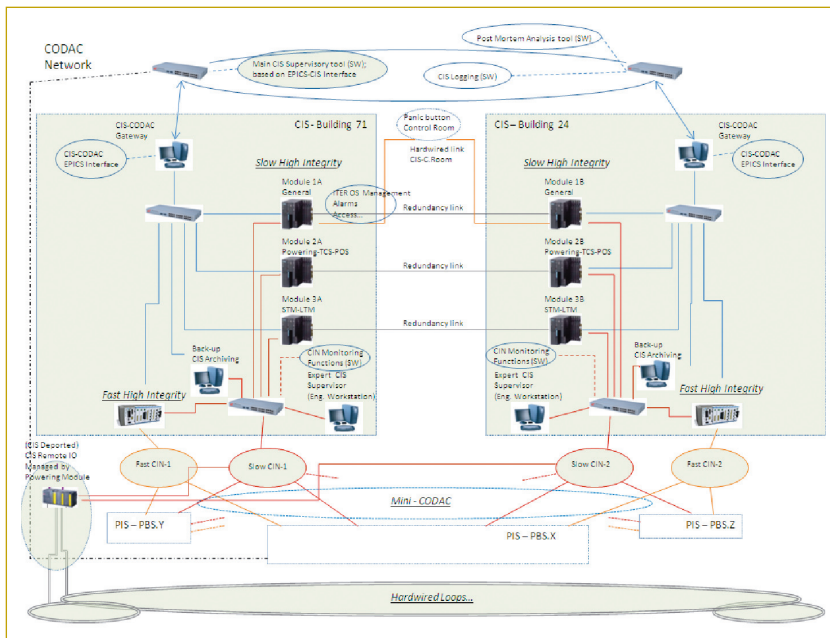


Figura 3: Arquitectura preliminar del sistema CIS.

las salvaguardias de los sistemas de instrumentación y control, del Codac y del sistema de control del plasma.

Las actividades que IIC está desarrollando se realizan en paralelo con el diseño preliminar del CIS. Consisten en desarrollar un análisis de fiabilidad de los sistemas y funciones para maximizar la prevención del daño evitando operar de forma no fiable y tratando de alcanzar los objetivos de disponibilidad, siempre dentro de las tareas de protección de la inversión ITER.

El trabajo que se está desarrollando incluye los siguientes aspectos:

- Análisis del diseño actual del CIS, incluyendo:
 - Análisis de fiabilidad y disponibilidad.
 - Estudio de la mantenibilidad y la inspeccionabilidad del sistema.
 - Dimensionamiento del sistema y estimación de los costes.
 - Propuestas de mejora desde los

puntos de vista de análisis de dependencias y presupuestario.

- Herramienta software para el análisis global y la gestión de la fiabilidad/disponibilidad del CIS durante las fases de diseño e implantación.
- Propuesta para la instalación y la puesta en marcha del sistema.

INGENIERÍA DE SEGURIDAD

IIC ha desarrollado también actividades de ingeniería de seguridad. Por ejemplo, en el año 2010 desarrolló a partir de documentos previos un *Preliminary Safety Report del HCLL and HCPB TBM* (los experimentos europeos de *Test Blanket Modules* cuyo objetivo es generar tritio que permita el auto sostenimiento de la fusión) destinado a ser presentado a la autoridad nuclear francesa ANB dentro del proceso de licenciamiento del reactor.

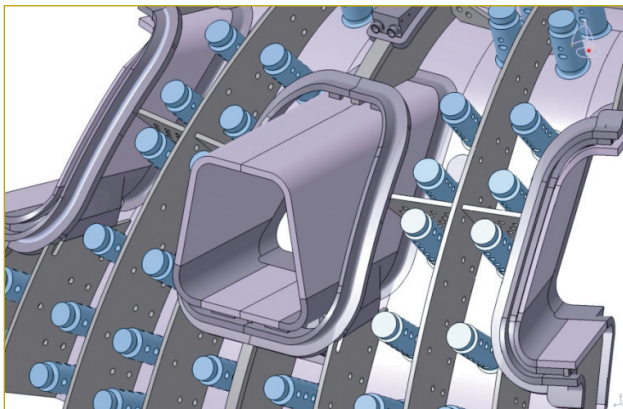


Figura 4. Modelo CATIA de la Vacuum Vessel.

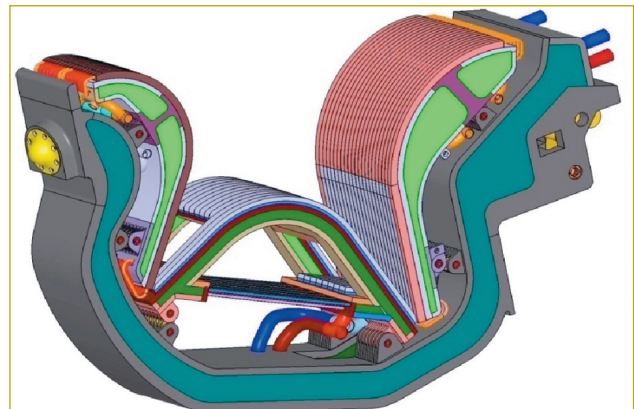


Figura 5. Modelo CATIA del Divertor.

ANÁLISIS DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN

Entre los años 2006 y 2009, IIC desarrolló análisis de los procesos de fabricación de la *Vacuum Vessel (VV)*, dentro de contratos de suministro de servicios para EFDA.

Por ejemplo, se desarrollaron secuencias de fabricación detalladas, diseño conceptual de herramientas necesarias, y un primer análisis de planificación de actividades y costes asociados a la fabricación de la vasija, incluyendo los *Port Suths* y los *Shielding Plates*, y teniendo en cuenta la evolución del proyecto en términos de reparto entre los distintos socios.

También se desarrollaron documentos necesarios para la emisión de la especificación técnica de la petición de oferta de suministro de la VV.

Además se desarrollaron trabajos de análisis para la integración de los dispositivos de diagnóstico en la VV, realizando un análisis de las herramientas de manipulación remota necesarias. Para ello se desarrollaron tanto modelos de elementos finitos, como modelos Catia (Figura 4) con el nivel necesario para ser incluidos en el paquete de documentación de compra.

ACTIVIDADES DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA VACUUM VESSEL

Dentro del contrato anterior se desarrollaron distintas actividades de ingeniería mecánica y de diseño de componentes.

Por ejemplo, se analizaron los canales de refrigeración por agua del Divertor y se propusieron diversas mejoras de diseño y mejoras del proceso de construcción con vistas a hacerla más eficientemente (Figura 5).

También se realizaron análisis de estrés del sistema de bobinas y un diseño detallado de bobinas P1/P6 usando superconductor Nb₃Sn.

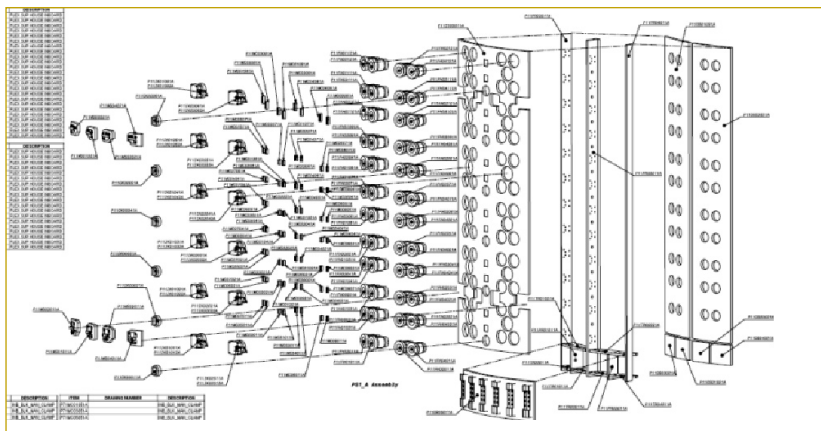


Figura 6: Despiece del Segmento 1 del sector regular de la VV.

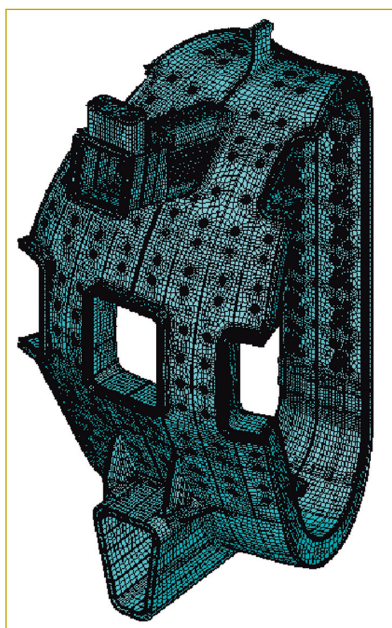


Figura 7: Modelo sólido detallado del sector (40°) de la VV.

Asimismo, se analizaron diversos cambios de diseño en las *Blankets* y el Divertor y se comprobó su impacto en el coste y la planificación de fabricación.

En el año 2009, IIC junto con sus socios NATEC (*Numerical Analysis technologies*) y Elytt Energy ganaron un *Framework* de ingeniería destinado a apoyar a F4E en el diseño y posterior fabricación de la VV de ITER. Dentro de este *Framework*, todavía activo, se están desarrollando análisis destinados a garantizar el comportamiento de la VV ante las solicitudes a las que estará sometida durante la operación de ITER.

Durante el año 2010, IIC con el apoyo de Ct3 Ingeniería desarrolló una tarea de optimización de los modelos Catia de la VV que permitieron la generación de dibujos detallados del despiece de la VV necesarios para la fabricación de los sectores (Figura 6).

Entre los años 2010 y 2011, IIC junto con sus socios Natec y Elytt ha estado desarrollando diversos estudios re-

lacionados con el análisis tensional y con las consiguientes optimizaciones de diseño de la VV (Figura 7). Para ello se desarrollaron modelos sólidos detallados de elementos finitos de los sectores de la VV. El consorcio ha estado revisando y aplicando distintas actualizaciones de la especificación de cargas (*Load specification* de ITER: presión, gravedad, sismo, electromagnéticas,...) aplicables, y analizando el comportamiento mecánico de la VV ante las distintas combinaciones de cargas asumidas, de acuerdo con el código francés aplicable para reactores rápidos, RCC-MR (*Règles de Conception et Construction de Matériels Mécaniques*) aplicable a la vasija de ITER.

Una vez obtenido un modelo de elementos finitos sólido que permite analizar el comportamiento de los sectores se han estudiado distintas alternativas que buscaban optimizar el diseño para hacerlo bien más resistente, o bien más sencillamente inspeccionable o simplificando su fabricación: Roscado de los *In-Wall Shielding Blocks* a las costillas, optimización del diseño en dos mitades roscadas de los *Housings*, análisis de las distorsiones provocadas por las soldaduras en la unión de los sectores, análisis del *Triangular Support* (Figura

8), análisis de los soportes de las bobinas superconductoras, optimización de las costillas de refuerzo poloidales y toroidales, análisis de los soportes de los puertos, optimización de los soportes del divertor, análisis de las distorsiones provocadas por el *baking*.

Otro de los análisis más significativos que la empresa ha estado desarrollando con sus socios Natec y Elytt ha sido el análisis de la fatiga a la que los distintos elementos de la *vacuum vessel* se va a ver sometido durante su operación. Debido al carácter cíclico de la operación del reactor, y debido también a los enormes transitorios electromagnéticos a los que se va a ver sometida en el proceso de arranque y parada de las bobinas toroidales y poloidales, todo ello aumentado por la compleja geometría y su desconocido tamaño, el análisis de la fatiga a la que se verán sometidos los materiales durante la vida de operación de la instalación se convierte en un aspecto muy relevante.

Actualmente el consorcio está realizando el análisis del comportamiento de toda la VV (modelo resultante de unir los nueve sectores de 40° hasta obtener un único modelo de 360°) frente a las solicitudes sísmicas y electromagnéticas definidas en el análisis de licencia, incluyendo todas las cargas de los distintos componentes que forman la vasija: *in-wall shielding blocks*, *Blanket Modules*, *Divertor*, *port plugs*, etc. (Figura 9).

ACTIVIDADES DE INGENIERÍA MECÁNICA EN LOS *FIRST WALL PANELS*

Los *First Wall Panels* son los primeros componentes que encaran el plasma, estando por tanto sometidos a muy altas solicitudes térmicas (ITER alcanzará temperaturas del orden de 10⁹ °C) y de radiación (ITER sufrirá el impacto de 4.10²⁴ n/m²). Los materiales y su geometría son por tanto muy particulares, requiriéndose un panel compuesto por tres capas, la primera de berilio para encaran

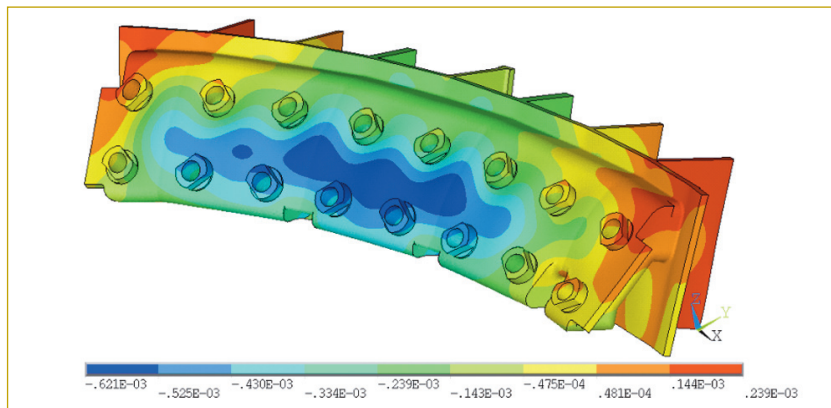


Figura 8: Análisis de desplazamientos del Triangular Support durante la prueba de presión.

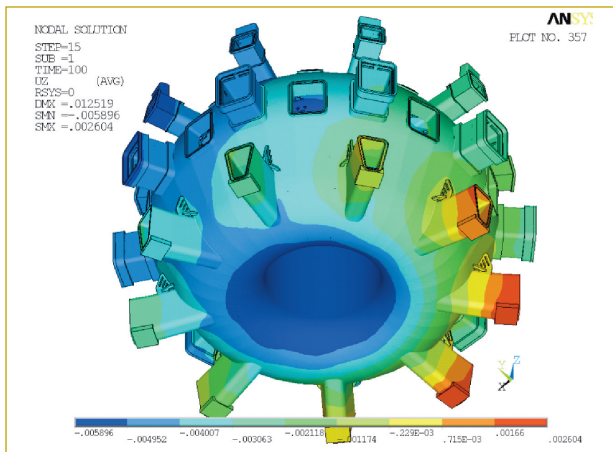


Figura 9. Desplazamientos verticales en uno de los modos de vibración calculados para el modelo de 360°.

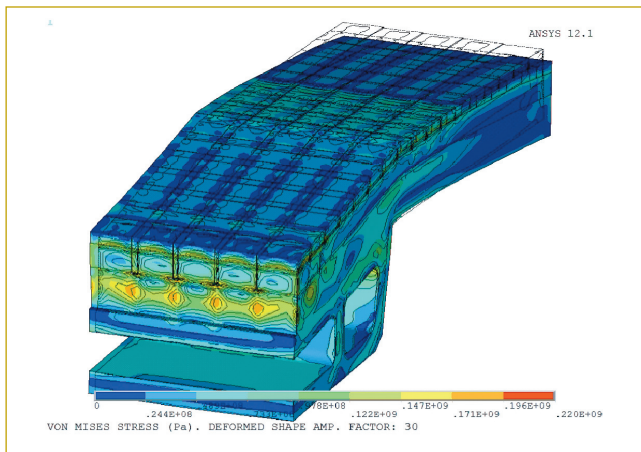


Figura 10. Análisis de stress de los fingers del FW.

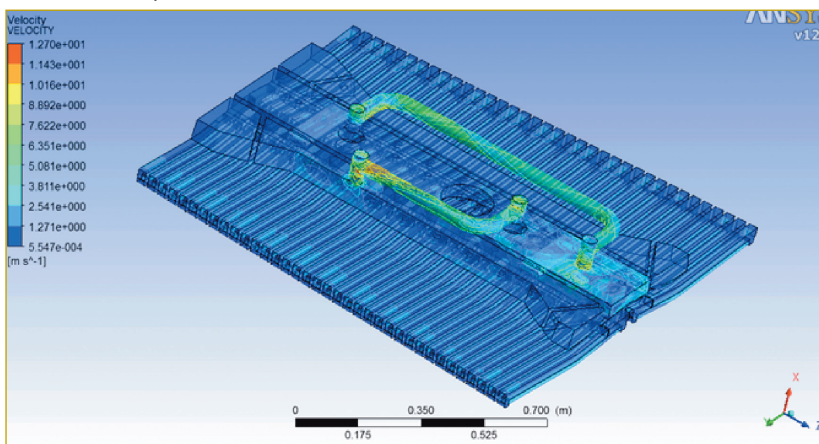


Figura 11: Velocidad del refrigerante del FW.

el plasma (gracias a sus propiedades de resistencia a radiación y bajo nivel de generación de impurezas), una segunda capa de una aleación de cobre y una tercera de acero, todo ello surcado por un intrincado circuito refrigerante por donde circulará agua para extraer el calor generado en la reacción (Figura 10).

Entre los años 2006 y 2009, IIC desarrolló análisis de procesos de soldadura para la reparación de la unión de las capas de berilio con la aleación de cobre. Para ello se desarrolló el diseño conceptual de herramientas de soldadura por fricción, y una primera definición conceptual de pruebas para validar el diseño y ser incluidas, en una etapa posterior, en las especificaciones a ser incluidas en el paquete de compra de estas herramientas. También se desarrollaron investigaciones sobre la viabilidad de la realización de ensayos no destructivos (NDE) por ultrasonidos.

También entre los años 2006 y 2009 se realizaron estudios de los procesos de fabricación de los FW, incluyendo costes asociados y una posible planificación de actividades.

Ya en este año 2011, y a través de otro contrato marco de ingeniería, este

generalizado a cualquier análisis mecánico, y dentro de un consorcio con Elytt y contando con el apoyo fundamental de Natec, IIC ha estado desarrollando análisis de ingeniería para seis modelos de *First Wall Panel*. Los estudios realizados han incluido análisis de las tensiones a las que están sometidos los elementos, además de estudios hidráulicos del circuito de refrigeración (Figura 11).

El trabajo ha servido para soportar la revisión de diseño preliminar (*Preliminar Design Review*, PDR) realizada en el mes de noviembre de 2011, en Cadarache. Se han desarrollado modelos de elementos finitos 3D con los que se han analizado el comportamiento termohidráulico de los componentes durante la operación del reactor. Dado que el plasma estará activo durante ciclos de 400s, se han analizado ciclos consecutivos hasta conseguir la estabilidad del proceso tanto termodinámica como hidráulicamente para determinar el comportamiento en el largo plazo. A partir de los resultados de estos análisis es posible optimizar el diseño de los FW desde los puntos de vista operacionales y estructurales, siendo una base fundamental para conseguir un diseño eficiente y fabricable.

CONCLUSIONES

Durante los últimos seis años Iberdrola Ingeniería ha estado trabajando en el proyecto ITER en áreas de ingeniería puntera. Esto ha permitido que el proyecto ITER se beneficiara de la experiencia de una empresa centenaria y del esfuerzo de una gran cantidad de personas entusiastas, a la vez que en nuestra empresa se adquirieran técnicas modernas y conocimientos de fusión que seguro serán un vector de desarrollo en el inmediato futuro.

En este artículo se han descrito varias de las más significativas actividades de ingeniería realizadas por IIC para ITER, sin describir el hasta ahora principal proyecto del que es responsable IIC que es el suministro de las bobinas toroidales.

Por último, es necesario destacar que los autores de este artículo no hubieran podido hacerlo sin el amplio y altamente cualificado equipo de ingenieros que ha estado participando en estas actividades durante los últimos años. Unos profesionales que han puesto más ilusión y entusiasmo que el que sería exigible precisamente porque el proyecto lo merece. Así pues, no podemos acabar el artículo sin al menos reconocer el trabajo de José Ignacio Díaz Prada, Juan José González Solórzano, Álvaro Herranz, Juan Manuel Juanes, Ángel Bayón, Andrés Felipe, Jorge Sampedro, Joaquín Polo, Daniel García Gómez, Álvaro Marqueta, Carlos Fernández Robles, Gustavo Martínez, Stoimir Stoev, Álvaro Cardiel, Beatriz Lamela, César Serrano, Antonio García Rodríguez, Javier García Cid, Pilar Cuadros, José Antonio Suárez, Ismael, Luis, Pedro, y seguro que alguno más que lamentablemente nos habremos dejado en el tintero y que, dentro de la organización de nuestra empresa, han trabajado durante los últimos años para ayudar a avanzar a este ilusionante proyecto y al mismo tiempo crear empresa y agrandar nuestro futuro. ■