

SISTEMA ROBOTIZADO PARA INSPECCIÓN POR ULTRASONIDOS DE LOS *FIRST WALL PANELS* DE ITER



CARLOS SILVESTRE MARRODÁN
Jefe de proyecto
TECNATOM



M.ª CARMEN PÉREZ MELGUIZO
Responsable sistema mecánico
TECNATOM



JOSÉ AMADOR SILLERO MARÍN
Gerente de Tecnología
TECNATOM

INTRODUCCIÓN

El reactor experimental de fusión nuclear ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) es la máquina Tokamak más grande hasta ahora construida, multiplicando por 10 el volumen de plasma alcanzado anteriormente, convirtiéndose en el quinto proyecto más costoso de la historia, y es la demostración fundamental de la viabilidad de la fusión nuclear como fuente de energía ilimitada, segura y libre de emisiones y residuos. Entre las características del reactor destacamos:

- Peso de **23 000 toneladas**.
- Alcanzará temperaturas de **150 millones de grados**.
- Producirá **500 MW** de energía
- Formada por **5 componentes** (Figura 1):
 - (1) *magnets* (sistema generador de campos magnéticos que incluye las bobinas de campo toroidal y poloidal)
 - (2) *vacuum vessel* (contenedor hermético con forma de toroide de doble pared con 44 accesos a través de los puertos)
 - (3) *blanket* (escudo constituido por los *First Wall Panels* que protege la pared interna de la vasija)
 - (4) *divertor* (extractor de residuos de la reacción)
 - (5) *cryostat* (criostato que refrigera y garantiza las condiciones de vacío).

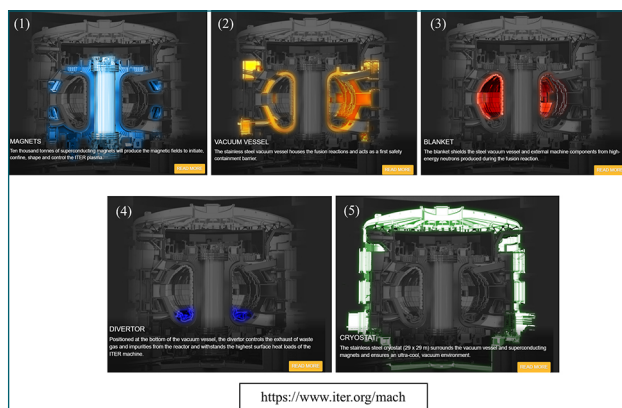


Figura 1. Posición de los diferentes componentes del reactor de fusión nuclear Tokamak.

Al tratarse de una instalación nuclear en la que participan diferentes organismos reguladores internacionales —unido a la complejidad del diseño y los requisitos de fabricación— ha sido necesario el **mayor esfuerzo técnico y organizativo** para poder completar con éxito las actividades encomendadas. En este marco, Tecnatom desempeña un papel fundamental en la inspección mediante Ensayos No Destructivos de varios componentes críticos durante su fabricación.

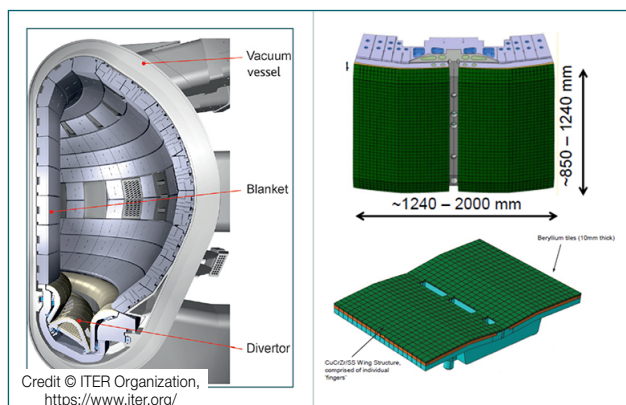


Figura 2. Posición de los FWP en el interior de la vasija de vacío, dimensiones generales y estructura principal.

Los *First Wall Panels* (FWP) son los componentes que recubren el interior de la vasija y que están en contacto directo con el plasma. Se fabrican mediante la unión de diversos materiales como son berilio, acero inoxidable y una aleación de cobre-cromo-zirconio, unidos en tres etapas mediante el proceso denominado HIP (*Hot Isostatic Pressing*) (Figura 2).

Dentro del proyecto general de fabricación de los FWP, en el alcance de la responsabilidad de Tecnatom están el desarrollo de las técnicas de inspección mediante ultrasonidos (UT), el diseño y suministro del sistema de inspección (en el cual se centrará este trabajo) y la inspección de los primeros FWP que se fabricarán. La arquitectura del sistema de inspección seleccionado consiste en una celda robotizada, con tecnología TAURUS 2.0 desarrollada por Tecnatom, empleando diferentes tanques de inmersión para la inspección por UT de los FWP en sus sucesivas etapas de fabricación (HIP1-HIP2-HIP3). La celda se ha diseñado para abarcar la fase completa de producción, y es aplicable a todos los modelos de FWP que pudiera desarrollar el contratista principal FBL (*Fusion Business Leadership*, consorcio formado por Empresarios Agrupados y Leading Metalmechanic Solutions).

DESARROLLO DEL PROYECTO

Entre los principales retos de este proyecto cabe destacar la variabilidad de las geometrías tanto de las diferentes áreas de cada panel como de los diversos modelos a inspeccionar, junto con el hecho de que su forma y tamaño cambian también en cada una de las tres fases de que consta el proceso de fabricación.

Todo ello requirió un detallado estudio geométrico para definir la técnica de inspección y las trayectorias a ejecutar por el robot, habiéndose diseñado una estrategia de inspección basada en el uso de diferentes palpadores de ultrasonidos que se han validado frente a una serie de bloques de demostración y maquetas representativas. Además, el elevado peso de los paneles y las necesidades de precisión en su posicionamiento han hecho necesario el diseño innovador de utillajes en los tanques de inspección que aportan gran versatilidad y repetibilidad de cara a su manipulación.

Los principales retos del proyecto desde el punto de vista ultrasónico son:

- Los distintos materiales que conforman el panel.
- Los diferentes espesores de cada material.
- Geometrías complejas.
- El tamaño crítico de defecto a detectar: representados por taladros de fondo plano (FBH) de pequeño diámetro.

El procedimiento de inspección y el sistema robotizado se validarán mediante la inspección de una preserie de tres paneles, tras lo cual se iniciará la fabricación de la primera serie de 27 paneles de dos modelos diferentes cuya inspección también llevará a cabo Tecnatom.

Durante el año 2021 se comenzó el desarrollo de las técnicas de inspección y los procedimientos, junto con el diseño, fabricación y montaje del sistema robotizado, el cual se ha integrado y puesto a punto en las instalaciones del cliente y validado en 2022.

Previamente a este contrato con FBL, Tecnatom ya había investigado sobre la inspección de los FWP en el proyecto *CDTI Fusion Technologies*¹, en cooperación con Leading Metalmechanic Solutions, S.L y HEDISA, S.A.U. (Figura 3).



Figura 3. Vista del prototipo a escala completa de FWP fabricado en anteriores etapas del proyecto.

Diseño del Sistema

Teniendo en cuenta por un lado los *inputs* del diseño de las técnicas de inspección realizado en el laboratorio empleando los bloques, como por otro, la geometría de los paneles finales de los FWP, se llevaron a cabo los diseños mecánicos de la celda de inspección (robot, *layout* o disposición de los elementos en el espacio, tanques de inmersión, módulos de inspección, stand de módulos para realizar el cambio automático de los mismos...), diseños eléctricos y de cableado, diseño del sistema de agua y diseño del sistema de control, con la tecnología TAURUS 2.0, propiedad de Tecnatom (Figura 4).

Para el diseño de las trayectorias de inspección, que permitieron a su vez comprobar alcances del robot y diseñar el posicionamiento de los paneles en los tanques de inmersión, así como el utillaje necesario de las piezas y los módulos de inspección por ultrasonidos, se emplearon el *software* de generación de trayectorias complejas GENTRAY 3, desarrollado por Tecnatom, y la aplicación industrial ROBO-move, que permite simular posibles colisiones y procesar las trayectorias a un lenguaje entendible por el robot.

¹*Fusion Technologies* (IDI-20151084): Tecnologías de fabricación avanzada en la industria de la ciencia. Aplicación en el campo de la fusión.

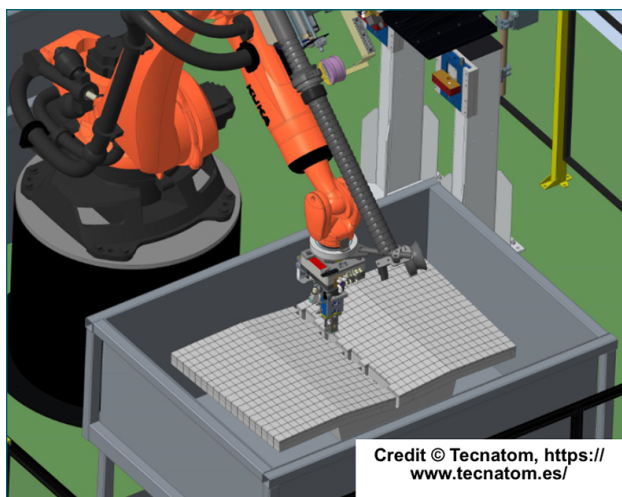


Figura 4. Detalle del posicionamiento de robot durante la inspección del panel en una de las fases HIP.

En GENTRAY 3 se introducen las geometrías de las piezas y los modelos 3D de los módulos de inspección en formato CAD (STEP) e, introduciendo los parámetros necesarios según el tipo de inspección, se generan automáticamente las líneas de la trayectoria que posteriormente seguirá el robot durante la inspección (Figura 5).

Tras varias iteraciones en los diseños de los módulos, se consiguieron cerrar unos modelos que eran los idóneos para realizar las inspecciones, garantizando el alcance a todas las posiciones necesarias y minimizando sus dimensiones y sus pesos para optimizar la dinámica del robot. Los módulos finales para emplear en el sistema serían entonces:

- Módulo Láser 2D (Figura 6): para adquirir nubes de puntos: para generar la geometría de la pieza, si fuera necesario, o para posicionar las piezas en la celda de inspección.
- Módulos de inspección para las distintas uniones a inspeccionar en cada proceso.

En la Tabla I se muestran otras características relevantes del sistema robotizado, seleccionadas a partir del desarrollo de

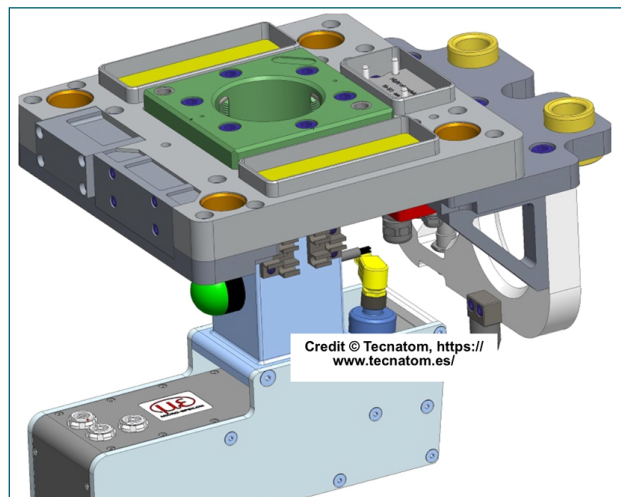


Figura 6. Módulo láser 2D.

las técnicas UT y ensayos de laboratorio, y mediante la simulación de las trayectorias de inspección para comprobar recubrimiento, alcance del robot, etc.

Suministros, Montaje, Integración y Puesta a Punto del Sistema

Tras realizar el montaje electromecánico de los componentes del equipo y la puesta a punto del sistema de control del robot, se llevó a cabo la puesta a punto funcional de los ultrasonidos. Se ajustaron las trayectorias iniciales de inspección y, junto con los parámetros óptimos identificados en el desarrollo de las técnicas UT, fue posible realizar la inspección de los bloques de calibración y validación, como fase previa a la inspección de los futuros paneles.

Validación

Durante los días 17 de abril y 20 de julio de 2022 se llevaron a cabo la validación interna del sistema (equivalente al habitual FAT: *Factory Acceptance Tests*), y del 26 al 28 de octubre la validación en las instalaciones del cliente

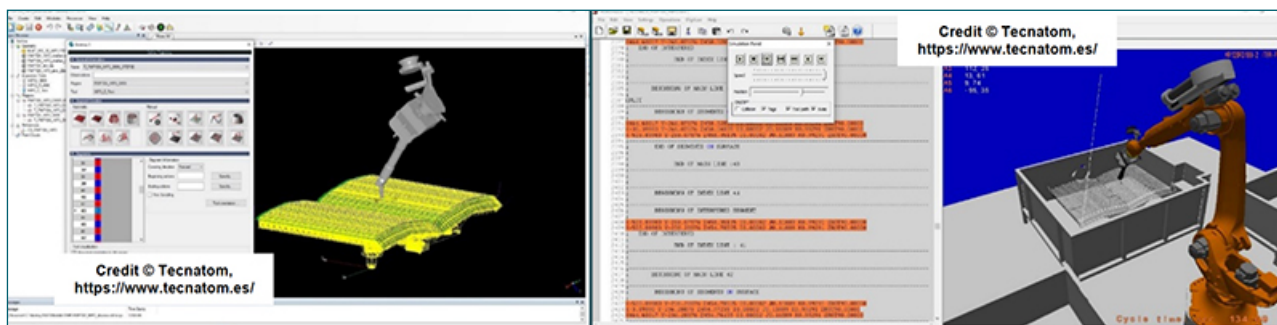


Figura 5. Diseño de trayectorias con GENTRAY 3 (izquierda) y ROBOMove (derecha).

Componente o característica del sistema	Descripción
Electrónica de ultrasonidos	FPR-8A, desarrollada por Tecnatom
Software de adquisición de ultrasonidos	InspectView, desarrollado por Tecnatom
Modelo de robot	KUKA, KR120 R3100-2F
Medio de acoplamiento	Agua, por inmersión total con las cubas
Técnica de ultrasonidos	Pulso-Eco, con haz recto
Tipo de señal	Onda completa
Velocidad del sonido teórica	5.750 m/s (SS), 1.480 m/s (water) 4.660 m/s (CuCrZr) and 13.070 m/s (Be).

Tabla I. Otras características importantes del sistema robotizado.

(SAT: *Site Acceptance Tests*). Ambos en presencia del cliente FBL y de F4E (organismo de la unión europea que gestiona la contribución de la UE al proyecto ITER). Estas pruebas se realizaron sobre un conjunto de bloques de calibración y maquetas representativas de las uniones con resultados muy satisfactorios, quedando el sistema listo para ser enviado a las instalaciones de FBL.

Adicionalmente, a lo largo del proyecto, se ha requerido una ampliación de alcance al incluir la inspección de nuevas uniones no previstas inicialmente. Todas estas actividades se realizan bajo el contrato N° F4E-OMF-900-03 que mantiene FBL con F4E, y que constituye uno entre varios de los contratos en los que participa Tecnatom para ITER, quedando demostrada nuestra buena reputación en el sector nuclear a escala mundial.

Próximas acciones en el proyecto

Una vez montado el sistema en las instalaciones del cliente de San Felices de Buelna (Cantabria) y realizada la puesta a punto del sistema, se procederá a su validación final mediante la inspección de los 3 FWP que componen la preserie durante el primer semestre de 2023.

JUSTIFICACIÓN DEL MODELO DE SISTEMA DE INSPECCIÓN SELECCIONADO

El gran nivel de desarrollo y versatilidad de la tecnología RABIT 2.0 permite el diseño y customización de celdas de inspección TAURUS 2.0 adaptadas a las necesidades del cliente (mayormente aeronáutico hasta ahora, contando Tecnatom con referencias de más de 40 sistemas robóticos entregados, desde el año 2012). De esta manera, utilizando los distintos desarrollos de base (electrónica UT, generación de trayectorias, control del robot, módulos UT, escáner láser, etc.), se diseñan sistemas basados en uno o dos robots, con elementos adicionales como *tracks* lineales, tanques de inmersión, yugos para inspección por transmisión, etc. Este tipo de sistemas proporciona una alta productividad en los procesos de fabricación, dadas las altas velocidades de inspección y a la repetitividad del proceso, dado que el robot en sí mismo y el utillaje se ha diseñado para conseguir esta gran repetitividad en el posicionamiento de los paneles en

los tanques y, consiguientemente, de las trayectorias de inspección. Además, asegura uniformidad en el acoplamiento y en la señal ultrasónica, obteniendo altas velocidades de inspección sin contacto. La celda de inspección (alcance del robot y tamaño de los tanques de inmersión) se han dimensionado para poder inspeccionar los tres modelos iniciales de FWP adjudicados a FBL y otros futuros.

CONCLUSIONES

En este artículo se presentan los trabajos realizados para el diseño, fabricación y puesta a punto del sistema robotizado para la inspección por ultrasonidos de los FWP (*First Wall Panels*) del ITER, así como la generación de procedimientos para realizar dichas inspecciones, basados primero en bloques y después en maquetas reales. Los resultados de estas inspecciones obtenidos con el sistema robotizado han permitido corroborar, una vez más, que los robots aportan precisión y repetitividad en los resultados, siendo una arquitectura de inspección automática óptima, donde los costes son bajos, el mantenimiento muy sencillo, y los ratios de productividad muy elevados. Con este y otros proyectos para ITER, cuyos inicios se remontan a 2010, Tecnatom se ha ganado el reconocimiento a la experiencia de sus expertos en técnicas de ultrasonidos (convencionales y *phased-array*) y a su esfuerzo continuado, durante muchos años, por satisfacer los requisitos técnicos, altamente exigentes, como son los del reactor ITER. Tras la cualificación de las técnicas UT, Tecnatom ha conseguido contratos de inspección durante la fase de fabricación de estos componentes, y de soporte al cliente ante *ITER Organization* (cliente final).

AGRADECIMIENTOS

El trabajo presentado en esta publicación ha sido financiado en parte por F4E (*Fusion for Energy*) en el marco del contrato F4E-OMF-900-03. Esta publicación refleja las opiniones solamente de los autores, *Fusion for Energy* no se hace responsable del uso que se pueda hacer de la información contenida en la misma. Los autores quieren agradecer a FBL (*Fusion Business Leadership*), formada por Empresarios Agrupados y Leading Metalmechanic Solutions, su contribución y participación en el proyecto, así como la cesión de algunas fotografías y dibujos incluidos en el presente trabajo. ■