

Iberdrola Ingeniería en el proyecto de fabricación de bobinas superconductoras del ITER

A. Felipe y A. Merino

El principal objetivo del proyecto internacional ITER es demostrar la viabilidad de generar electricidad mediante la tecnología de fusión. Durante la operación de ITER se pretende desarrollar los fundamentos técnicos necesarios para abordar el primer reactor comercial de generación de electricidad mediante fusión. Iberdrola Ingeniería y Construcción es el líder de un consorcio, junto con la empresa italiana ASG Superconductors y la empresa española Elytt Energy que tienen como misión la fabricación de uno de los componentes más importantes del reactor ITER: diez bobinas toroidales. El desarrollo de este proyecto implica el desarrollo de tecnologías avanzadas que suponen un reto tecnológico importante.

ITER is a large-scale project that aims to demonstrate that it is possible to produce commercial energy from fusion. During its operational lifetime, ITER will test key technologies necessary for the next step: the demonstration fusion power plant that will prove that it is possible to capture fusion energy for commercial use. IBERDROLA Ingeniería y Construcción is the leader of a Consortium with ASG Superconductors (Italy) and Elytt Energy (Spain) that is in charge of the manufacturing of one of the most relevant component: 10 Toroidal Field Coils. The development of this project presents significant technological challenges, where the main processes are the one related to high accuracy required during all manufacturing processes

INTRODUCCIÓN

El principal objetivo del ITER es demostrar la viabilidad de la energía de fusión como fuente de energía para la generación de electricidad de forma comercial. Su construcción ya ha sido iniciada en Cadarache, Francia, y en el plazo máximo de 10 años se pretende tener el primer plasma en operación. ITER será básicamente el banco de pruebas definitivo antes de iniciar la construcción de plantas de generación eléctrica basadas en la fusión.

El confinamiento del plasma es efectuado por potentes campos magnéticos (11.8 T), los cuales a su vez son generados por diversas bobinas. La más compleja de estas bobinas, por su geometría y características, son las denominadas *Toroidal Field Coils*, (Figura 1 y Figura 2). Existen un total de 18 bobinas toroidales en la máqui-

na ITER, de las cuales Europa, por medio de *Fusion for Energy* (F4E), es responsable de la fabricación de 10 de ellas, mientras que las nueve restantes deben ser fabricadas por Japón.

El proyecto de la fabricación de estas 10 bobinas europeas está siendo desarrollado, desde julio de 2010, por el consorcio formado por las empresas Iberdrola Ingeniería y Construcción (que actúa como líder del consorcio), Elytt Energy y ASG Superconductors.

La participación de Iberdrola Ingeniería y Construcción, como líder del consorcio que está desarrollando este proyecto, es el fruto de la estrategia iniciada hace años. El salto hacia la tecnología de fusión nuclear se debió fundamentalmente al objetivo de estar presente en toda tecnología de generación de electricidad, así como un claro enfoque hacia la adquisición de conocimientos y capacitación en



ANDRÉS FELIPE

es doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Autónoma de Madrid y Máster en Energía Nuclear. Durante los últimos seis años ha formado parte del Comité de Innovación de Iberdrola Ingeniería. Además, ha sido responsable de diversos proyectos de I+D relacionados con la tecnología de aceleradores y fusión, así como de las acciones técnicas-comerciales. Actualmente es el *Project Manager* "on site" de la Fabricación de Bobinas Toroidales.



ALEJANDRO MERINO

es ingeniero industrial por la Universidad Politécnica de Madrid. Director del Departamento de Ingeniería de Nuevas Centrales Nucleares de Iberdrola Ingeniería y Construcción y director de Proyecto de ITER – Fabricación de Bobinas Toroidales, habiendo sido el director del Proyecto de Modernización y Aumento de Potencia al 120% de la Central Nuclear de Laguna Verde".

las tecnologías más innovadoras y tecnológicamente avanzadas.

Iberdrola Ingeniería y Construcción efectuó sus primeros proyectos en el sector de la fusión desarrollando proyectos de ingeniería para los principales componentes del ITER, desarrollando en paralelo una estrategia de proyectos de innovación e I+D focalizados en la tecnología de fusión, que se complementaban con colaboraciones con centros de investigación tanto internacionales, destacado la colaboración con el CERN (colaboración para la puesta en marcha del acelerador LHC), como nacionales: el Ciemat.

El fruto de esta estrategia iniciada hace años ha sido consolidada con el contrato de fabricación de uno de los componentes más importantes del ITER: las bobinas toroidales, con una duración estimada de seis años y un presupuesto de 155 millones de euros.

ALCANCE Y FASES DEL PROYECTO

El objetivo último del proyecto es la construcción de 10 bobinas toroidales (de dimensiones aproximadas de 14 x 9 m y de un peso de 300 Ton cada una de ellas), denominados *Winding Pack* (WP) para lo cual se ha estimado una duración total de casi seis años. Los WP tienen forma de D y están compuestas a su vez por siete de los denominados *Double Pancake* (DP) (Figura 2). Cada uno de estos *Double Pancake* está formado por la estructura soporte *Radial Plate* (RP) sobre la que se debe alojar el material superconductor Nb_3Sn . Los siete DP apilados forman el denominado *Winding Pack*. Tanto el RP como el material superconductor no son alcance del presente proyecto, si bien se deben desarrollar métodos de aceptación de estos componentes, los cuales serán suministrados por F4E. El proyecto se subdivide en tres fases principales:

- **Fase 1:** la primera fase de proyecto consta de las siguientes actividades:
 - a) Desarrollo de *mock-ups*, ensayos y procesos de cualificación de los principales procesos de fabricación,
 - b) diseño y fabricación de lo útiles a ser empleados durante la fabricación seriada de los WP,
 - c) adaptación del *site* a las necesidades de fabricación, y
 - d) fabricación de un DP completo (denominado *Double Pancake Prototype*), con lo que se deben poner a punto todos los útiles y procesos de fabricación que han sido

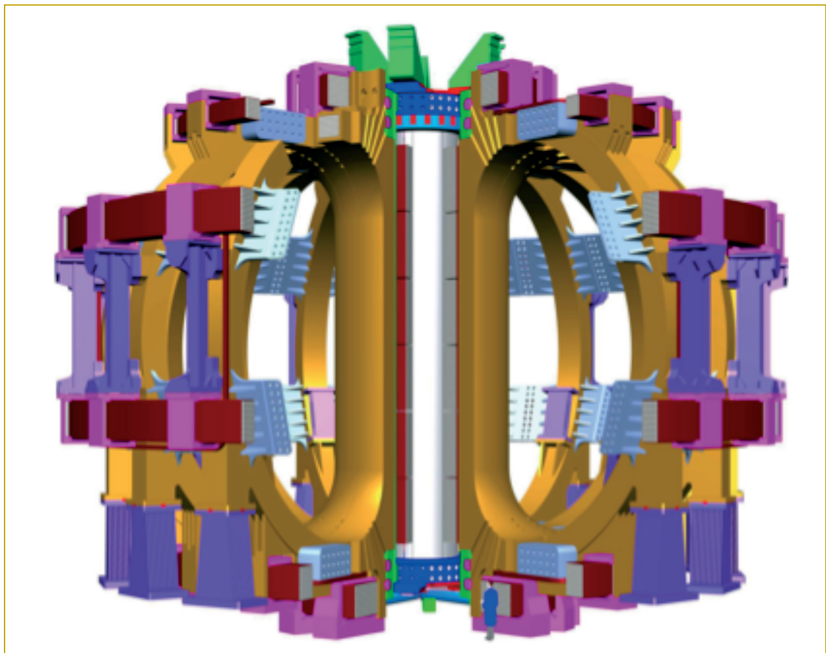


Figura 1: Bobinas Toroidales en ITER.

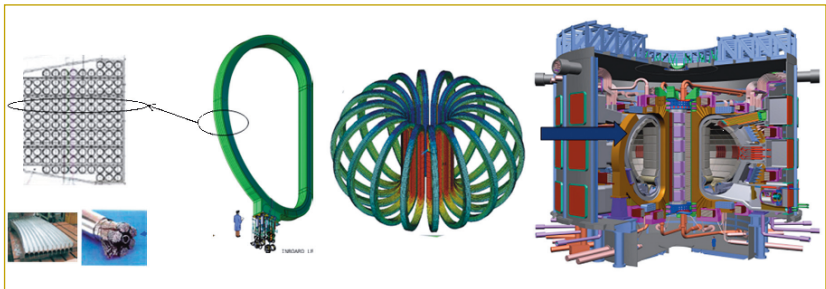


Figura 2: Winding Pack, Double Pancake, RP y conductor.

diseñados y construidos durante toda la Fase 1. La fabricación del *Double Pancake Prototype* constituye la aceptación y cualificación de todos los procesos y útiles de fabricación que han sido diseñados en el marco del proyecto.

- **Fase 2:** fabricación de un WP completo.
- **Fase 3:** fabricación de los restantes nueve WP.

ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO

Para la ejecución del proyecto se ha establecido un consorcio formado por empresas que juntas posean todas las capacidades necesarias para la ejecución de un proyecto de estas características. Por una parte, se requería de una empresa con experiencia en la gestión de suministro de grandes componentes así y en el *management* de proyectos internacionales, así como de las empresas con la capacidad tecnológica necesaria para la ejecución del proyecto, junto con experiencia en la ejecución de un proyecto de características análogas.

A modo de resumen, Iberdrola Ingeniería y Construcción aporta toda las capacidades de gestión de proyecto, de forma que se asegure la ejecución del proyecto en plazo, tiempo y calidad requerida. ASG y Elytt aportan su capacidad tecnológica, dado su larga experiencia en la fabricación de imanes superconductores, aportando ASG su experiencia previa en la fabricación del mismo tipo de bobina a escala 1:3. El sitio de fabricación lo aporta ASG, en Génova (Italia), por lo que se están adaptando sus sedes para las necesidades especiales de la fabricación de estos componentes, básicamente en dimensiones y salas limpias.

La participación de Iberdrola Ingeniería y Construcción en el proyecto se fundamenta en dos objetivos principales: a) dirección y gestión del proyecto y b) soporte en las actividades de ingeniería:

- Para la ejecución de las actividades de dirección y gestión del proyecto se ha establecido un grupo de proyecto desplazado a Génova, donde

serán fabricadas las bobinas. Dentro de este marco se encuadra fundamentalmente:

a) coordinación global del proyecto, tanto interna del proyecto como con el cliente, para lo que se aporta el *Project Manager* del

proyecto, así como las figuras responsables de *Documentation and Project Coordination* y gestión de riesgos del proyecto *Risk Management*,

b) gestión de toda la planificación del proyecto, siendo responsables

de la figura responsable de *Planning and Control*,

c) definición de los criterios de calidad que deben ser implementados en el proyecto, así como asegurar su implementación durante la ejecución del proyecto, aportando la figura responsable de *Quality Assurance*.

- El soporte de actividades de ingeniería, para lo que se ha establecido un grupo de trabajo de ingeniería que soporta las necesidades de ingeniería el proyecto. Este grupo de trabajo se ubica fundamentalmente en las oficinas centrales de Madrid, aportando su experiencia previa en los proyectos de ingeniería de centrales nucleares como en otros proyectos relacionados con el ITER.

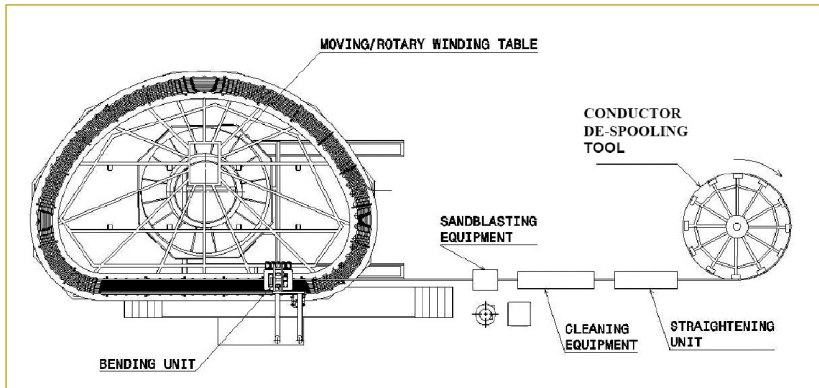


Figura 3: Winding Line.

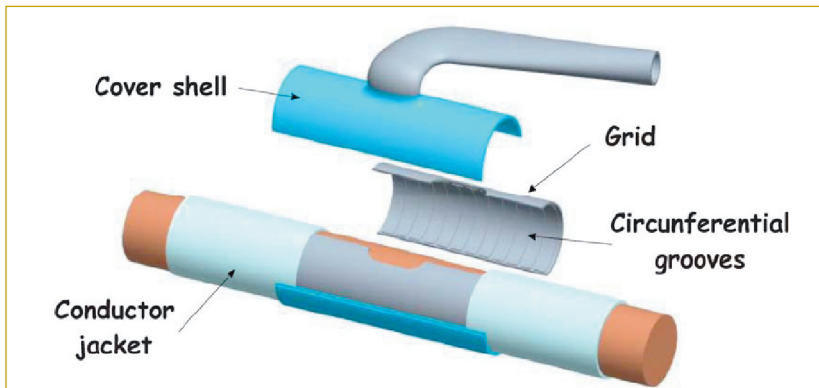


Figura 4: He-Inlet.

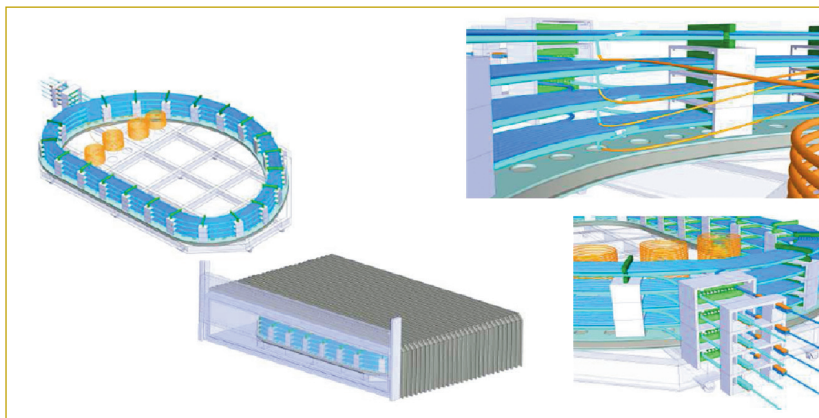


Figura 5: Tratamiento térmico del material conductor.



Figura 6: Proceso de inserción del RP en el conductor.

PRINCIPALES PROCESOS DURANTE LA FABRICACIÓN

A continuación se describen cuales son los principales procesos de fabricación que deben efectuarse hasta completar el WP:

- El material superconductor, que es suministrado en bobinas de aproximadamente 4 X 4 m, debe ser acomodado en la forma de D que tienen las bobinas toroidales. Es el denominado proceso de *winding*, el cual debe efectuarse de un único tramo de material conductor, tanto para la cara superior como inferior. Durante este proceso, la cabeza que efectúa el bobinado se mantiene fija mientras que la mesa sobre la que se sitúa la D efectúa movimiento rotatorio y giratorio (Figura 3). Las tolerancias admitidas durante este proceso se sitúan en torno a 0,1 mm. El total de cable de cada uno de los RP se sitúa entre 760 y 414 m, dependiendo de si es un RP del tipo *side* o *regular*, por lo que la longitud total de cable a ser empleado será de cerca de 47 km.
- Colocación de las uniones eléctricas en los terminales del conductor.
- Ubicación de las uniones para la refrigeración con helio del material conductor, que son los denominados He-Inlet, los cuales se instalan

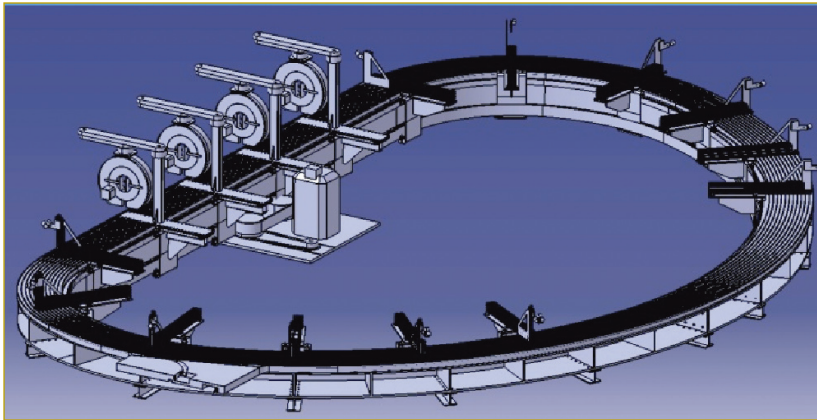


Figura 7: Estación del aislamiento del conductor.

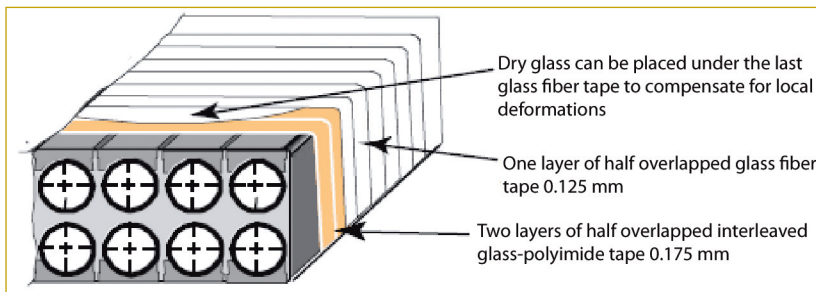


Figura 9: Ground Insulation.

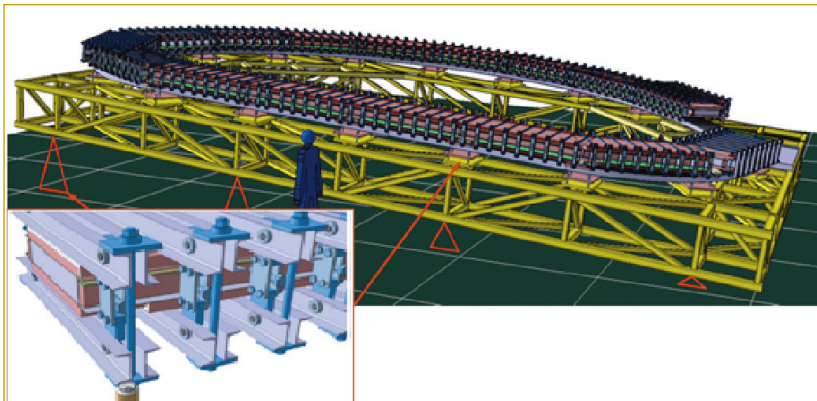


Figura 10: Proceso de impregnación.

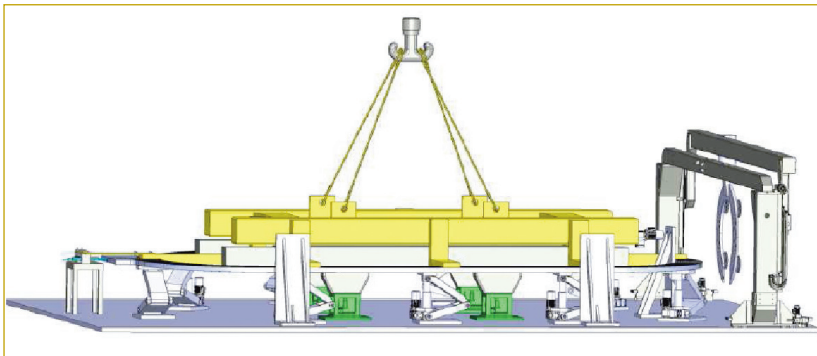


Figura 11: Stacking y Ground Insulation.

en la zona de transición (de cara superior a cara inferior) (Figura 4).

- Tratamiento térmico del material conductor, necesario para que el material adquiriera las propiedades

superconductoras. El tratamiento térmico, a desarrollar en un horno de gas inerte de argón, alcanza temperaturas de hasta 650 °C y dura aproximadamente un mes.

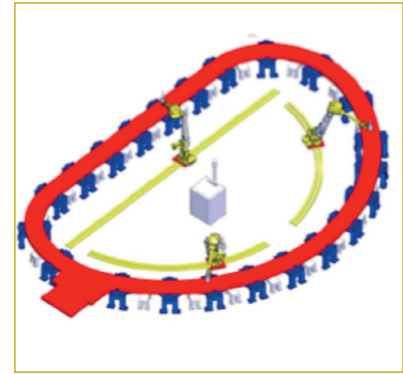


Figura 8: Estación de trabajo de cover laser welding.

Las dimensiones del horno son de aproximadamente 22 x 16 x 8 m (Figura 5). Las rampas de temperatura deben estar controladas y no superar los gradientes térmicos de 5 °C. Cabe destacar que este es uno de los procesos más complejos del proyecto, ya que durante el proceso de tratamiento térmico el material sufrirá elongaciones y deformaciones que deben ser analizadas y previstas durante la fase de ensayos preliminares. Además, se recibirá material conductor de cinco suministradores diferentes, teniendo cada uno de ellos un comportamiento distinto, el cual deberá ser analizado durante la fase previa de ensayos.

- Inserción del superconductor en el RP. Una vez que el material superconductor ha sido tratado térmicamente ya puede ser alojado en el RP. Esta operación es especialmente delicada ya que el material superconductor una vez tratado térmicamente es más frágil que en su condición inicial, y toda tensión o fuerza que se aplique sobre el mismo debe ser minimizado (máximo esfuerzo que se puede aplicar sobre el conductor no puede superar el 0,1 %). Las tolerancias que se requieren para este proceso son inferiores a un milímetro. En esta operación se requiere del movimiento combinado de oscilación del RP así como de la mesa soporte giratoria del material conductor (Figura 6).
- Aislamiento del conductor, proceso durante el cual al material conductor se le aplica una serie de capas de cinta de *quench detection tape* y de fibra de vidrio. Para desarrollar este proceso es necesario diseñar un sistema que levante el conductor del RP, pa-

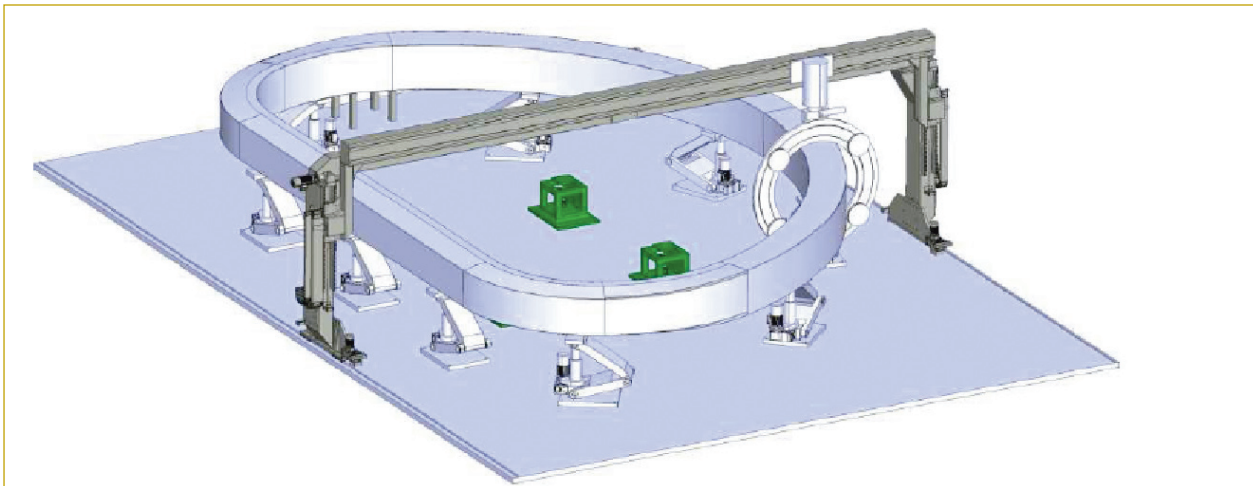


Figura 12: WP Ground Insulation.

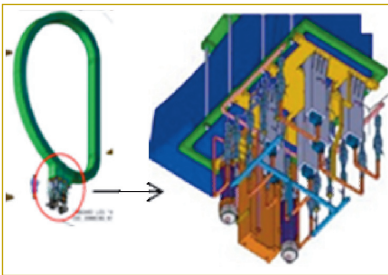


Figura 13: Terminaciones.

ra poder encintar el conductor mediante unas cabezas encintadoras y posteriormente alojar el conductor en su posición inicial (Figura 7). El sistema combina el movimiento de las cabezas tractoras de las cabezas encintadoras con el levantamiento del cable, encintado y posterior alojamiento de nuevo en el RP.

- Soldadura laser de las tapas (*covers*) de los RP. Para efectuar este proceso es necesario diseñar una estación de trabajo que constará de tres cabezas de soldadura láser, que a su vez se desplazarán sobre sus carriles para finalmente tener hasta cinco posiciones de soldadura (Figura 8). Para poder efectuar el proceso de soldadura de todos los *covers* será necesario hacer las soldaduras alternando posiciones, de forma que se ha estimado que será volteado el RP hasta en seis ocasiones. Esto es necesario para minimizar las deformaciones que se puedan introducir en el RP durante la soldadura de los *covers*.
- El siguiente paso a efectuar es el denominado *Ground Insulation*, mediante el cual se aplica un nuevo proceso de encintado sobre el DP, si bien en este caso será efec-

tuado de forma cuasi manual (Figura 9).

- Una vez efectuado el *ground insulation*, debe ser efectuado el proceso de impregnación en vacío usando para ello resinas que han sido cualificadas por ITER. La cámara de vacío en la que se aplica el proceso de impregnación será alojada sobre un soporte que será inclinado para permitir el flujo de las resinas por todo el conductor. La optimización del proceso de impregnación será objeto de ensayos específicos (Figura 10).
- Una vez finalizada el proceso de impregnación, los DP pueden ser apilados (hasta un total de siete), mediante el proceso denominado como *stacking*. A destacar que no todos los DP son iguales, hay cinco del denominado tipo *regular DP*, mientras que los dos DP que se ponen en los extremos son los denominados tipo *side*. Entre los DP la única separación existente son unas finas láminas de teflón. Esta operación requiere de movimientos de precisión, ya que el máximo error permitido en la alineación entre los DP se sitúa en el margen de milímetros. En la Figura 11 se puede una imagen conceptual de lo que sería esta estación de trabajo.
- La operación final a desarrollar es la de efectuar el último *Ground Insulation* sobre los siete DP apilados, si bien previamente se deben realizar las operaciones de uniones de todos los terminales. Para el proceso de *WP ground insulation* se debe diseñar una estación de trabajo con una gran cabeza encintadora automática (es necesario

aplicar un total de 13 capas de cinta de fibra de vidrio de forma automática) que combine sus movimientos con los pedestales retráctiles (Figura 12) de forma que la cabeza encintadora pueda recorrer todo el DP.

- Como proceso final, se deben completar las terminaciones (Figura 13), así como el proceso final de impregnación de todo el WP.

RESUMEN Y CONCLUSIONES

Siendo el ITER uno de los mayores retos tecnológicos de la actualidad, la fabricación de las bobinas toroidales supone una complejidad añadida, ya que es uno de lo más complejos componentes del ITER. La ejecución de este proyecto está resultando, como era esperado, un reto tecnológico que sin embargo está siendo superado sin encontrar hasta el momento problemas tecnológicos irresolubles. Esto es posible gracias a la colaboración entre las empresas del consorcio, así como con el cliente (F4E), buscando en todo momento la solución óptima al problema.

La participación de Iberdrola Ingeniería y Construcción en este proyecto se basa en su experiencia en la gestión de grandes proyectos internacionales, aportando además los conocimientos de ingeniería dadas las sinergias entre la tecnología de fisión con la de fusión. La participación en este proyecto afianzará a Iberdrola como conocedor de una de las tecnologías más avanzadas en la generación de electricidad, confirmando su tendencia por la búsqueda de las tecnologías más innovadoras. ■