

Ciencia y Tecnología de Fusión en el Ciemat

J. Sánchez

España ocupa en el desarrollo de la fusión un lugar de privilegio gracias a la presencia de la agencia Fusion for Energy y a la importante participación industrial española en el proyecto ITER. Este artículo presenta brevemente el papel que el Ciemat ha tenido en el proceso que nos ha llevado a esta posición y analiza el papel científico y tecnológico que el Ciemat está jugando en el programa de de cara a su fase presente y a fases futuras.

FUSION SCIENCE AND TECHNOLOGY AT CIEMAT

The presence of the agency Fusion for Energy and the significant participation of Spanish industry in the ITER project bring Spain to a relevant position in the development of fusion. This article reviews briefly the role of Ciemat in the process leading to this situation and analyzes the scientific and technological role of Ciemat in the present and future phases of the fusion programme.



JOAQUÍN SÁNCHEZ

es director del Laboratorio Nacional de Fusión, Ciemat y presidente del Comité Asesor Científico-Técnico (STAC) del proyecto ITER

INTRODUCCIÓN: LA FUSIÓN EN ESPAÑA Y EL CIEMAT

Si la fusión se ve como una de las grandes opciones que tiene la humanidad para obtener en el futuro energía de manera inagotable, segura y respetuosa con el medioambiente, en España es además una fuente de desarrollo de ciencia y tecnología que ha llevado ya a importantes retornos económicos. Entre estos retornos cabe destacar el establecimiento en Barcelona de la agencia *Fusion for Energy*, gestora de las aportaciones europeas al proyecto ITER, o los contratos de construcción de ITER obtenidos por industrias españolas que sitúan a nuestro país en tercer lugar, tras Italia y Francia, en el montante de los contratos adjudicados.

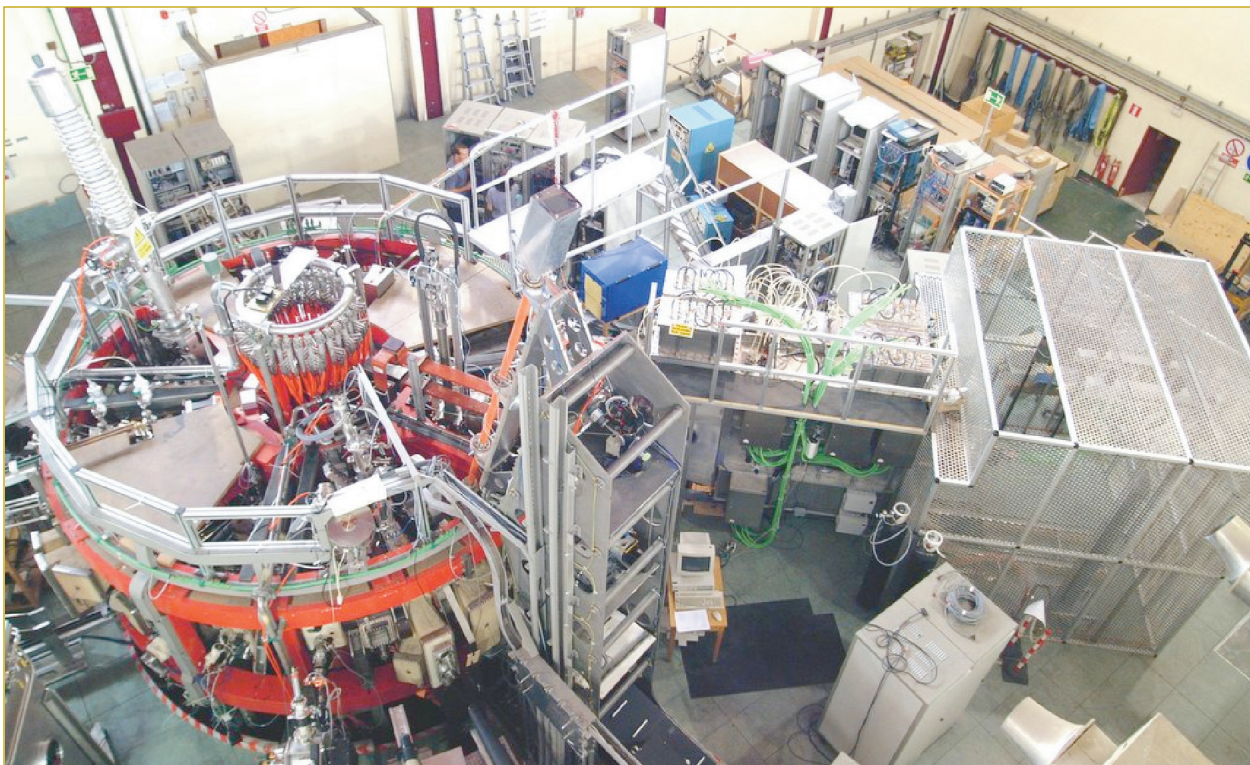
A esta posición privilegiada y sin paralelo en otras disciplinas científico-tecnológicas hemos llegado gracias a la valentía y capacitación de nuestra industria, al apoyo de las instituciones a lo largo de los últimos diez años y a la labor de desarrollo llevada a cabo por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).

La investigación en fusión por confinamiento magnético comienza

en España en la antigua Junta de Energía Nuclear (JEN), organismo precursor del actual Ciemat, a principios de los años 80 con el "Tokamak TJ-I" y las primeras actividades en materiales para fusión. En 1986, con la entrada de España en la Comunidad Europea, el Ciemat decidió entrar a formar parte del programa Europeo de Fusión, en el marco de Euratom. En este momento hubo que tomar una decisión difícil: dedicar nuestros recursos a formar equipos de científicos que realizasen experimentos en otros dispositivos europeos o embarcarnos en la difícil tarea de construir un experimento propio de envergadura relevante. Finalmente se decidió abordar la construcción del "stellarator TJ-II" un experimento de fusión de tamaño y complejidad similar a los existentes en laboratorios consolidados en el entorno europeo, con una inversión de 32 millones de euros que contó con un 45% de subvención por parte de Euratom, independiente de fondos estructurales o de cohesión, que se obtuvo tras haber sido valorado el proyecto como actividad preferencial desde el punto de vista estrictamente científico.

El TJ-II tuvo una fase de diseño de tres años (1987-90) y su construcción y puesta en marcha se extendió hasta 1997, año en que se obtuvieron los primeros "plasmas" a alta temperatura. En la construcción hubo una importante presencia de la industria española, que obtuvo contratos por el 60% del presupuesto global. Estos contratos los ganaron empresas que en su mayor parte trabajaban por primera vez en el ámbito de la fusión y su actividad en TJ-II les dio la oportunidad de cualificarse y salir a competir a Europa. Los resultados no fueron inmediatos, pero a partir del año 2000 se produjo un despegue en los contratos obtenidos llevando a nuestra industria a situarse en el grupo de cabeza a nivel europeo durante la fase de preparación de la construcción de ITER, posición que se está manteniendo ahora en la fase de construcción con la incorporación de nuevas empresas.

El interés de la industria española en ITER no es ajeno la visibilidad mediática que le dio al proyecto el hecho de que España fuera país candidato a acoger la sede del experimento. En 2001 España presentó la candidatura de Vandellós y el Ciemat, que contaba ya con un importante equipo de



Vista general del experimento TJ-II, Ciemat.

expertos reconocidos en el campo de la fusión, coordinó la propuesta técnica. Esta fue calificada como excelente por todos los organismos internacionales que intervinieron en la decisión, incluido el panel presidido por David King, establecido por la Comisión Europea para valorar las propuestas de Vandellós y Cadarache (Francia), que concluyó sin poder inclinar la balanza por una u otra opción. Al final la decisión política favoreció a Francia, pero la calidad de la propuesta española no pudo ser ignorada y nuestro país recibió la sede de la agencia *Fusion for Energy*, que supone un importante retorno económico. *Fusion for Energy* funciona desde 2005 en Barcelona, emplea a 250 personas, cuenta con un presupuesto anual de funcionamiento de 35 millones de euros y tiene un presupuesto de inversiones cercano a los 6.000 millones de euros para el periodo de construcción de ITER (2010-2019).

AVANCES FUNDAMENTALES EN FÍSICA DEL PLASMA: EL EXPERIMENTO TJ-II

El dispositivo TJ-II fue un movilizador tecnológico e indirectamente contribuyó a traer *Fusion for Energy* a nuestro país, pero no hay que dejar de lado su importante función científica.

TJ-II no pertenece a la línea del *Tokamak* en la que se encuadra ITER y muchos de los experimentos actualmente en funcionamiento en el mundo, su configuración, denominada *Stellarator* es una opción de “segunda generación”, más compleja desde el punto de vista de la física y la ingeniería que el *Tokamak* pero más estable en su operación y potencialmente más eficiente. Podríamos decir que el *Tokamak* es la opción ideal para un prototipo, como ITER, que nos lleve lo antes posible a obtener la fusión controlada mientras que el *Stellarator* es la mejor opción para la construcción masiva de reactores ya que en este caso el beneficio de su estabilidad de operación supera con mucho el coste, repartido en un gran número de unidades, de su diseño más complejo. Actualmente existen *Stellarators* en España, Japón, EEUU, Alemania, Rusia y Australia.

El programa científico de TJ-II ha estado fuertemente basado en la física propia del *Stellarator*, pero no ha dejado de lado aspectos de aplicación más general, relevantes para la línea mayoritaria del *Tokamak*. En particular cabe destacar los desarrollos de sistemas de instrumentación, control y calentamiento del plasma, los desarrollos en tratamientos de la pared del reactor basados en recubrimientos con litio,

o los estudios de transporte de energía y partículas.

Si en el futuro los éxitos de ITER llevan al comité Nobel a fijarse en la fusión, muy probablemente habrá una mención al descubrimiento del “H-mode”. En 1982, el *Tokamak* alemán ASDEX descubrió un modo de operación de alto confinamiento, denominado “H-mode” en el que el plasma se autoorganiza, pasando de un régimen muy turbulento a uno mucho más laminar y mejora significativamente su capacidad para retener la energía. El mecanismo que hace pasar del modo normal (L-mode) al H-mode, transición que experimentalmente ocurre cuando se aumenta gradualmente la energía contenida en el plasma, sigue siendo una incógnita. Conocer este fenómeno y predecir las condiciones en las que se alcanzará la transición en un reactor, sin ir más lejos, en ITER, es vital de cara a su capacidad de alcanzar la ignición, de ahí que se hayan dedicado importantes esfuerzos a estudiar y modelar el fenómeno.

Se da por establecido que la turbulencia en el H-mode disminuye por la presencia de un campo eléctrico. El campo hace rotar al plasma con cizalladura (unas capas rotan más deprisa que otras) y esto rompe los vórtices turbulentos haciendo al plasma más laminar. Sin embargo,

el punto crucial: ¿cómo se genera espontáneamente la transición? sigue sin respuesta. Aquí se van consolidando las teorías, desarrolladas por el investigador P. Diamond de la Universidad de San Diego, que explican que es la propia turbulencia la que alimenta al campo eléctrico que a su vez acabará con ella, en un comportamiento similar al del binomio depredador-presa: cuando hay muchas presas el depredador aumenta rápidamente su población hasta que agota la población de presas y su propia población decae, seguidamente las presas empiezan a multiplicarse porque quedan pocos depredadores y se repite el ciclo.

El experimento TJ-II, que durante años tuvo vedado el acceso al H-mode debido a su peculiar diseño, mas optimizado para la flexibilidad y estabilidad de la configuración que para alcanzar altas densidades de energía, consiguió producir la transición en 2007 gracias al uso de paredes recubiertas de litio. A partir de ese momento se inició una línea de estudio para el fenómeno de la transición al H-mode, para ello se aprovecho la ventaja de disponer de algunas herramientas singulares de TJ-II, como la sonda de iones pesados o el sistema de reflectometría Doppler, y también se aprovecho una cualidad específica de la configuración: la transición al H-mode se realiza en TJ-II a cámara lenta con respecto a otros dispositivos. Estas circunstancias permitieron en 2010 observar, por primera vez en un experimento de fusión, comportamientos depredador-presa entre el campo eléctrico y la turbulencia, lo que supone una confirmación de las teorías de Diamond, y un paso importante en la resolución de uno de los enigmas más antiguos y más acuciantes del programa de fusión. Estos resultados están en vías de validación en otros experimentos, algo que no es sencillo porque se requieren años para desarrollar las técnicas de medida, y por otra parte TJ-II va a acometer experimentos adicionales con una segunda sonda de iones pesados y sistemas adicionales de reflectometría, actualmente en construcción.

Estos trabajos y nuevos esfuerzos en el área de la utilización de litio como primera pared en contacto con el plasma supondrán el núcleo principal de la actividad de TJ-II, que en un futuro debería dar paso a un experimento renovado, basado en configuraciones *Stellarator* relevantes para el reactor: confinamiento de

partículas de alta energía, imanes modulares de complejidad reducida y espacio entre plasma y pared suficiente para alojar el manto fértil regenerador de tritio.

NUEVA ETAPA EN EL PROGRAMA: TECNOLOGÍA

Con el lanzamiento de la construcción del ITER se abre también una nueva fase en el programa de fusión. El ITER nos demostrará la viabilidad científica de la fusión produciendo diez veces más energía que la que se inyecta al plasma (no de la que gasta la planta). Sin embargo un reactor de producción necesitará resolver aun importantes problemas de física y tecnología. Si nos centramos en los más tecnológicos tendríamos tres aspectos fundamentales:

- Autosuficiencia en Tritio: el ITER no tendrá un manto fértil regenerador, sino que obtendrá todo el tritio que consuma de una fuente externa. Este componente necesita ser desarrollado y probado para su posterior instalación en el primer reactor de demostración DEMO.
- Materiales: los materiales presentan dos problemas fundamentales en un reactor de fusión. Por un lado aquellos que se encuentran en la primera pared deben soportar cargas térmicas del orden de 10MW/m². Por otro lado, los neutrones de 14 MeV, si bien no son un problema en cuanto a su deposición de energía ya que ésta se distribuye en volumen de manera isótropa, producen daños y activación en el materiales estructural del reactor. ITER utilizará materiales de primera pared que deberán sustituirse frecuentemente y cuando se cierre dejará una cantidad importante de material activado que constituirá un residuo. Esto es algo que deberá ser evitado en un reactor de demostración.
- Operación 7x24 horas durante meses, con ganancia neta de energía a nivel de planta y con periodos de mantenimiento aceptables.

Para tomar posiciones de cara a esta línea tecnológica del programa, que además será la más sujeta a patentes y reservas de propiedad industrial, el Ciemat inició en 2006 un programa de tecnología de fusión en varios frentes.

Por un lado, actividades para el desarrollo de sistemas de manto fértil, regeneradores de tritio, que

en la vertiente más académica dieron lugar al proyecto Consolider "Tecnología de Fusión" en el que bajo la coordinación del Ciemat colaboran otras ocho universidades y centros de investigación. En la vertiente más industrial Ciemat participa junto con algunas industrias españolas en el *Test Blanket Module Consortium* en el que se integran laboratorios de Francia, Alemania, Italia, República Checa y Hungría, orientado al desarrollo de una serie de módulos de manto fértil que se probaran en ITER. Otra iniciativa nacional en este sentido fue un proyecto Innpronta, integrado por una decena de empresas junto con centros de investigación y universidades, presentado en 2011 que pese a obtener una excelente valoración finalmente no quedó entre los financiados.

Por otro lado, la propuesta de la Instalación Científico Tecnológica Singular "Technofusion", aprobada por la conferencia de presidentes de 2007 y que se construiría cofinanciada por el Gobierno central y la Comunidad de Madrid. *Technofusion* es un complejo de instalaciones que abordaría el problema de los materiales en sus dos vertientes, bajo carga térmica y bajo irradiación, con herramientas experimentales, sistemas de producción y sistemas de modelado; así como el problema del mantenimiento remoto en un reactor de fusión.

También en esta línea tecnológica se inscribe la participación española, coordinada por el Ciemat, en dos proyectos que desarrollan conjuntamente Europa y Japón: el *Tokamak* superconductor JT60, al que España contribuye con el diseño y construcción del criostato, y la fase de ingeniería y prototipos de la instalación IFMIF. Para este experimento, orientado a las pruebas de materiales estructurales para reactores de fusión, España desarrollará parte de la ingeniería de la planta, contribuirá al diseño de la celda de irradiación y construirá una serie de prototipos, entre ellos una fuente de radiofrecuencia de 1 MW a 175 MHz, que constituirá el primer desarrollo español en sistemas de RF para aceleradores de partículas.

Finalmente cabe destacar la naciente actividad llevada a cabo en Barcelona por el IREC en colaboración con el Ciemat, en un intento a medio plazo de capitalizar desde el punto de vista científico-técnico la presencia de la agencia *Fusion for Energy*. ■