

Fusión nuclear: del proyecto ITER hacia el futuro

Nuclear fusion: from the ITER project into the future

Joaquín-Pedro Sánchez-Sanz
CIEMAT (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8783>

La fusión nuclear tiene todos los ingredientes que necesitaría una solución definitiva al problema de la energía: es segura, respetuosa con el medio ambiente, utiliza un combustible abundante y distribuido por todo el planeta y puede desarrollarse a gran escala, siendo capaz de satisfacer las necesidades presentes y futuras de la humanidad, incluyendo algunas que hoy día quedan en segundo plano, como la producción masiva de agua potable y alimentos o el reciclado a gran escala de materias primas. Sin embargo, estas ventajas se han visto ensombrecidas por la dificultad intrínseca del proceso: una reacción de fusión energéticamente rentable requiere mantener el combustible a temperaturas de cientos de millones de grados, problema en el que la comunidad científica lleva trabajando desde hace décadas.

Desde esta publicación se ha revisado en varias ocasiones el progreso de la fusión, que a día de hoy tiene como buque insignia el proyecto ITER, en construcción en el sur de Francia. ITER es el proyecto de referencia en la "fusión por confinamiento magnético", la vía de desarrollo que ha adoptado la Unión Europea en su "hoja de ruta" hacia la energía de fusión y que comprende dos grandes líneas de investigación: la línea *tokamak* a la que se adscribe ITER y la línea *stellarator*, orientada a más largo plazo. La otra gran rama de investigación, la fusión por láser o "confinamiento inercial" tiene sus principales desarrollos en Estados Unidos (proyecto NIF) y Francia (Laser Megajoule). En este artículo nos centraremos en el confinamiento magnético.

Tras una época de avances rápidos durante los años 1970-90, el progreso hacia una reacción de fusión con ganancia energética se ralentizó, esencialmente porque el siguiente paso implicaba la construcción de un dispositivo, ITER, con tecnología de imanes superconductores y de grandes dimensiones: diez veces mayor en volumen que JET, el mayor "tokamak"

existente hasta ahora. Un proyecto de este tipo requería una inversión sin precedentes, involucrando a muchos países (la UE al completo más EEUU, Japón, Rusia, India, China y Corea del Sur) y se necesitaron veintiún años para avanzar desde el acuerdo político inicial de Reagan y Gorbachov en 1985 hasta el acuerdo final de construcción a finales de 2006.

Parte de estos años se dedicaron a trabajos preparatorios. Se continuó el avance de la física del plasma (el fluido a esas altas temperaturas está en estado de "plasma") y se desarrollaron prototipos de los elementos que suponían un mayor desafío tecnológico: imanes superconductores, segmentos de la cámara de vacío, etc. También se llevó a cabo el diseño conceptual de muchos subsistemas, llegándose a tener un diseño casi completo de todos los componentes del proyecto.

Sin embargo, tras la firma del acuerdo en 2006, se vio que había que transformar un proyecto científico-tecnológico, que había abordado cada sistema por separado, en un proyecto global de ingeniería, integrado en unos edificios que tenían que seguir un estricto protocolo de seguridad nuclear. La radiotoxicidad de ITER, derivada de la existencia de tritio, es muchos órdenes de magnitud menor que la de una central

nuclear tradicional, pero la autoexigencia del proyecto de evitar, en el peor caso de accidente, una evacuación más allá del perímetro de la instalación, llevó a aplicar los más estrictos criterios de seguridad nuclear, incrementados tras el accidente de Fukushima en 2011. Todo ello produjo una fuerte revisión al alza de plazos y costes. Habría que añadir también los problemas derivados de trabajar con aportaciones en especie como principal vía de participación de los socios y los derivados de trabajar con culturas muy diferentes bajo un difuso marco colaborativo. El resultado fue un pobre avance del proyecto durante casi diez años, durante los cuales parte del esfuerzo se evaporó en planes irrealistas para intentar cumplir un calendario irrealizable.

En 2016, con la toma de posesión de B. Bigot, como nuevo Director General, se relanzó el proyecto con una aproximación más dinámica y realista. El progreso se ha hecho visible y la credibilidad del proyecto ha aumentado sensiblemente. De todas maneras los plazos son dilatados dada la envergadura y complejidad de ITER: aún faltan siete años para alcanzar al "primer plasma", hito que marcará la puesta en marcha del experimento, y la fase de producción de hasta 500 MW de potencia mediante la fusión de deuterio-



Fig. 1: Vista general de la sede del proyecto ITER a diciembre de 2017 (cortesía de ITER Organization)

tritio deberá esperar hasta 2035 tras una serie de experimentos preparatorios y un parada para instalar elementos adicionales necesarios para el trabajo a alta potencia.

ITER es un proyecto para resolver una necesidad fundamental de la humanidad a largo plazo, pero a corto plazo supone también un gran desarrollo tecnológico, con importantes oportunidades industriales. En este sentido podemos estar orgullosos del papel que está teniendo la industria española, que se sitúa en el tercer puesto a nivel europeo, tras la francesa y la italiana, por presupuesto adjudicado en los contratos para la construcción de ITER. Los contratos ganados, en un sistema de competencia abierta, abarcan desde la ingeniería civil y la participación en la construcción de los edificios a la construcción de los grandes imanes superconductores o el desarrollo de prototipos para la pared interna del reactor.

Cuando ITER funcione a pleno rendimiento tendrá una ganancia energética de $Q=10$, siendo Q el cociente entre la energía generada por la fusión y la energía que inyectamos al combustible para mantenerlo caliente. No hay que confundir este valor de Q con el rendimiento energético de una central eléctrica, en la que habría que contar con la energía necesaria para mantener activos

los imanes y todos los demás sistemas de planta así como la eficiencia de conversión de la energía térmica en eléctrica. Una futura central de fusión energéticamente rentable necesitaría una amplificación Q del orden de 50. Sin embargo el citado valor de $Q=10$ de ITER es fundamental porque es suficiente para comprobar si la energía generada por la fusión sirve para calentar el fluido y compensar las pérdidas que lo enfrían. En ITER esperamos que esto se confirme y podamos observar claramente que los núcleos de He generados en la reacción, que llevan el 20% de la energía, quedan confinados en el plasma y le transmiten la energía.

A lo largo de estos años ha habido incertidumbre sobre el calendario y el coste del proyecto, pero hay bastante confianza en que una vez que ITER se complete los objetivos científicos se alcanzarán. La mayor incertidumbre en este aspecto está asociada a las cargas térmicas en el llamado *divertor*, el componente situado en la parte inferior de ITER donde son conducidas las partículas que por difusión se van escapando de la zona confinada y que en estado estacionario suponen el 20% de la potencia generada en el reactor. Las placas del *divertor*, de wolframio en su parte externa, sufren cargas térmicas

de más de 10 MW/m² y existen dudas sobre su durabilidad. El riesgo para ITER no estaría en alcanzar el objetivo de los 500 MW de fusión sino en mantenerlos durante periodos de 500 segundos repetidamente a lo largo de toda una campaña de experimentos sin tener que parar para reparar el *divertor*.

Para mitigar este riesgo se trabaja en varios frentes. Por un lado el uso del wolframio como material de la pared del reactor se está experimentando en el Tokamak JET, se trata de algo relativamente novedoso ya que en los experimentos de menor tamaño, con menores cargas térmicas y durante

tiempos más cortos, no era necesario recurrir a este material. Los resultados muestran dificultades en la operación pero se llegan a alcanzar los valores necesarios de los diferentes parámetros y se espera que en ITER, con mayor tamaño y más energía en el plasma, las dificultades serán menores. Por otro lado, se juega con la geometría del componente para que las placas reciban la carga térmica oblicuamente y así extender la superficie sobre la que ésta se reparte, finalmente se han realizado pruebas exitosas en JET con inyección de neón y kriptón en el borde del plasma para que las partículas que escapan pierdan parte de su energía en forma de emisión de luz, que no causa problemas porque se difunde sobre una gran superficie, y lleguen más frías a la pared.

ITER consolidará lo que denominamos "*viabilidad científica*" de la fusión como fuente de energía pero aún habrá un camino que recorrer hasta que energía de fusión sea una alternativa real. El siguiente paso, que en la hoja de ruta europea denominamos "DEMO", deberá ser el prototipo de una central completa de producción de electricidad por fusión.

En primer lugar, DEMO ira equipado con un "*manto fértil*" (*breeding blanket*), que es el componente que cumple el triple papel de regenerar el tritio a partir de aleaciones o sales de litio, extraer la energía de los neutrones mediante el circuito primario de refrigeración para llevarla a las turbinas y apantallar los imanes superconductores y otros elementos sensibles del flujo de neutrones. Esta triple misión hace del manto fértil un componente de enorme complejidad y la I+D necesaria para su construcción lleva en marcha varias décadas. De hecho está previsto insertar en ITER una serie de módulos de prueba, denominados "*Test Blanket Modules*" (TBM) que servirían para probar diferentes tecnologías de material fértil, aleación eutéctica litio plomo o "pellets" de sales de litio, y de refrigerante, esencialmente agua o helio. Existen otras tecnologías, que no están maduras para su prueba en ITER pero podrían usarse en DEMO complementando los resultados obtenidos en el programa TBM con un programa de I+D específico, como la de refrigeración dual mediante el uso combinado de helio y litio-plomo circulante, que permitiría la operación del reactor a alta temperatura y mejoraría la eficiencia de los sistemas de conversión de potencia entre otras ventajas.

Mientras que en ITER nos concentraremos en obtener ganancia energética en el "sistema físico" del



Fig. 2: Prueba de resistencia de los anillos de precompresión que sujetarán radialmente los imanes superconductores en ITER. Los anillos, de fibra de vidrio, están siendo fabricados por Airbus-España, en Torrejón de Ardoz (Madrid). (Cortesía de ITER Organization)

plasma, en DEMO el objetivo será tener ganancia energética en la planta completa, incluyendo un ciclo térmico para generar electricidad y volcarla a la red. Las plantas comerciales de fusión tendrán una potencia eléctrica del orden de 1 GW, en el caso de DEMO el objetivo es más modesto: se plantea producir del orden de centenares de MW. Esta producción deberá mantenerse de manera continuada 24 horas al día siete días a la semana durante meses.

Otro rasgo que definirá a DEMO frente a ITER será el uso de materiales resistentes a los neutrones de 14 MeV generados en la reacción de fusión. Cuando un neutrón colisiona con el material genera una cascada de desplazamientos de átomos desde sus posiciones originales, en general éstos se vuelven a recolocar reconstruyendo la estructura pero pueden quedar pequeños defectos, que se acumulan con el tiempo de irradiación dando lugar a dislocaciones y debilitan el material. La medida de este daño es el "dpa" o desplazamiento por átomo. Un material sometido a 1 dpa es un material en el que en promedio todos sus átomos se han desplazado una vez de su posición original. En DEMO se espera llegar a dosis de 20 dpa en una primera fase y a más de 40 dpa en una segunda. El segundo efecto que se produce es que los neutrones de 14 MeV producen transmutaciones en el material, generando helio e hidrógeno que se acumula, produciendo hinchazón y pequeñas ampollas que afloran a la superficie; además se generan núcleos inestables, que hacen que el material estable se convierta en radiactivo. Esta activación da lugar a un residuo radiactivo al final de la vida del reactor que, sin ser comparable

a los de una central de fisión, es algo que hay que gestionar adecuadamente. Por otro lado, la activación es en sí misma un problema durante la operación de la planta, ya que impide el acceso de operarios al interior del reactor para reparaciones o mantenimiento. Esto lleva a la necesidad de diseñar y construir todo un conjunto de sistemas de mantenimiento remoto, capaz de realizar todas las operaciones en el interior del reactor sin intervención humana.

ITER, dados su potencia y ciclo de operación, no generará mucho daño o activación en el material y por esto se ha elegido para su construcción un acero relativamente convencional, bajo en cobalto y de baja permeabilidad magnética, sin embargo para DEMO y las posteriores plantas de fusión se plantea el uso de nuevos materiales, denominados de "baja activación", que reducirían significativamente el problema. La comunidad científica lleva también décadas trabajando en este campo y ya hay claros candidatos para su uso como materiales de los futuros reactores de fusión. A corto plazo contamos con aceros ferrítico-martensíticos (Eurofer en Europa, F82H en Japón) en los que se ha realizado una eliminación profunda de impurezas activables y una sustitución de los elementos aleantes tradicionales por otros químicamente equivalentes pero más estables frente a neutrones. A más largo plazo se cuenta con el vanadio o el carburo de silicio. Una de las ventajas del vanadio es su muy baja activación, que permitiría reciclar los residuos, para su uso restringido en un nuevo reactor, al cabo de menos de

50 años, mientras que el Eurofer requeriría al menos cien años de mantenimiento en un almacén antes de poder ser reutilizado.

El Eurofer se ha sometido a pruebas en reactores de fisión con resultados prometedores, pero, para simular completamente los efectos en un reactor de fusión, necesitamos irradiar con neutrones de mucha más energía, próxima a los 14MeV. No existen fuentes intensas de este tipo de neutrones y por ello se han desarrollado los proyectos IFMIF (*International Fusion Materials Irradiation Facility*) y su versión reducida IFMIF-DONES, (DONES: *DEMO Oriented Neutron Source*) que son fuentes de neutrones de 14 MeV con alta intensidad, basadas en aceleradores de deuterio que irradian un blanco de litio líquido circulante. IFMIF DONES está completamente diseñado y su construcción, para la que se ha propuesto un emplazamiento en Granada, podría comenzar en 2020, extendiéndose unos siete años.

Los resultados de ITER, junto con los de IFMIF-DONES y del programa de "Breeding Blankets" permitirían abordar la construcción de DEMO en la década de 2040, con el objetivo de generar electricidad por fusión en la red en la segunda parte de este siglo. Son periodos largos y proyectos muy costosos, pero el tamaño del problema que se pretende resolver es también enorme: el coste del gran proyecto ITER (aprox. 20.000 millones de euros), en el que participan países que albergan a más de la mitad de la población mundial, es equivalente al coste de tan solo un par de días de consumo de energía de la humanidad.



Fig. 3: El proyecto IFMIF DONES. Implantación artística en el entorno del parque de Escúzar, Granada. (Cortesía de CIEMAT)

PARA SABER MÁS

- G. McCracken, P.E. Stott, *Fusion, the Energy of the Universe*, Academic Press, Oxford 2005, 2ª ed. 2013
- T.J. Dolan, *Magnetic Fusion Technology*, Springer Verlag, London 2013
- J. Wesson, *Tokamaks*, 3ª ed. Clarendon Press, Oxford 2004
- J. Wesson, *The Science of JET*, disponible en <http://www.euro-fusionscipub.org/wp-content/uploads/2014/11/JETR99013.pdf>
- M. Wakatani, *Stellarator and Heliotron Devices*, Oxford University Press, Oxford 1998
- Yuhong Xu, *A general comparison between tokamak and stellarator plasmas*, *Matter and Radiation at Extremes Vol1*, Elsevier, 2016.
- Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468080X16300322>
- Eurofusion: www.euro-fusion.org
- ITER: www.iter.org
- Fusion for Energy: <http://www.fusionforenergy.europa.eu>