

ITER y la energía de fusión

Perfil: Joaquín Sánchez



Doctor en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid en 1986, año en el que se incorpora al CIEMAT como experto en diagnosis de plasmas.

Tras dos años en el Instituto Max Planck IPP de Garching (Alemania), pasa a ser responsable de los sistemas de diagnóstico en los sucesivos dispositivos de fusión por confinamiento magnético del CIEMAT: TJ-I, TJ-IU y finalmente TJ-II. Desde junio de 2004 es director del Laboratorio Nacional de Fusión (CIEMAT).

Ha colaborado con el instituto Max Planck IPP (Alemania), Oak Ridge National Laboratory (EEUU), Universidad de Princeton (EE UU), National Institute for Fusion Science (Japón) y Massachusetts Institute of Technology (EE UU). Entre 2000 y 2003 fue responsable, *Task Force Leader*, de la explotación científica de los sistemas de diagnóstico en el experimento JET, perteneciente a la Unión Europea y situado en Culham (Reino Unido). Actualmente, es Investigador coordinador del proyecto Consolider Tecnología de Fusión y preside la Plataforma Tecnológica de Fusión, organización orientada a fomentar la participación de la industria española en el proyecto de fusión ITER.

Es delegado español en el Consejo de Gobierno de la Empresa Común del ITER Fusion for Energy de Barcelona, vicepresidente del Comité Consultivo de Energía de Fusión de EURATOM y presidente del Group of Chairpersons del programa de Fusión Europeo.

La energía de fusión puede desempeñar un papel muy importante en la segunda mitad del siglo como fuente de energía masiva. Entre sus ventajas destacan que es respetuosa con el medio ambiente, su materia prima es abundante y se encuentra distribuida por todo el planeta. ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, en español Reactor Termonuclear Experimental Internacional) es la herramienta para lograr esta fuente de energía.

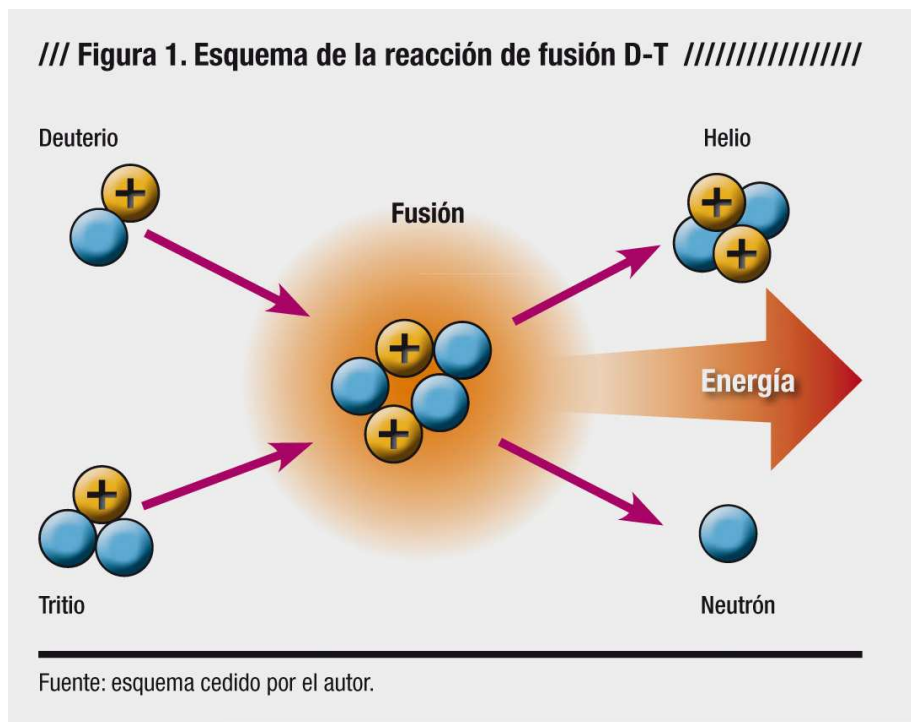
La fusión como fuente de energía

La humanidad consume a día de hoy energía a un ritmo aproximado de 10 teravatios (TW), el equivalente a 10.000 grandes plantas nucleares. La cifra es en sí misma escalofriante, pero comienza a ser preocupante si nos fijamos en algunos detalles adicionales. En primer lugar, una gran parte de la generación de energía aún proviene de la quema masiva de combustibles fósiles, entre ellos el petróleo a razón de casi 90 millones de barriles diarios, con todos los problemas que ello conlleva. En segundo lugar, el consumo dista de ser uniforme, siendo

mucho mayor en el mundo desarrollado, lo que nos permite imaginar que los 10 TW se incrementarán significativamente a medida que en las próximas décadas los países en vías de desarrollo mejoren su nivel de vida y por tanto su demanda de energía.

Frente a este gran problema, la tecnología ofrece un abanico de potenciales soluciones y entre ellas se sitúa la energía de fusión, que puede desempeñar un papel muy importante en la segunda mitad del siglo como fuente de energía masiva, respetuosa con el medio ambiente y basada en una materia prima abundante y distribuida por todo el planeta.

La fusión es la reacción por la que núcleos, generalmente pequeños, se unen para dar lugar a núcleos algo mayores con una pérdida de masa en el proceso, masa que según la expresión de Einstein ($E=mc^2$) se transforma en energía cinética de las partículas y núcleos resultantes.



El Sol obtiene su energía mediante una serie de reacciones que se inician con la fusión de dos núcleos de hidrógeno para generar deuterio. Esta reacción se produce gracias a la altísima fuerza gravitatoria existente en el centro de la estrella, que comprime el hidrógeno hasta alcanzar densidades de 1032 protones por metro cúbico a temperaturas de 1,5 keV (16 millones de grados Kelvin). En ausencia de esta altísima fuerza gravitatoria, la reacción entre dos protones es inalcanzable a la luz de nuestras capacidades actuales, por ello el objetivo de la investigación en la fusión como fuente de energía se dirige a otra reacción con una sección eficaz mucho mayor: la fusión de un núcleo de deuterio con uno de tritio (reacción D-T) que da lugar a un núcleo de helio y un neutrón, que nacen con una energía conjunta de 17,5 MeV (Figura 1).

*Con un consumo per cápita como el actual, la humanidad podría
obtener toda la energía que necesita gastando un gramo de litio
por persona al año*

La materia prima de la reacción D-T es muy copiosa en la naturaleza y además está distribuida por todas las regiones. El agua normal contiene 33 miligramos de deuterio por litro y el tritio se genera a partir de otro elemento muy abundante: el litio que, entre otras posibilidades, podemos extraer de la sal marina. Una gran ventaja es que las cantidades necesarias son muy modestas, por lo que la posible repercusión del precio del litio en el precio final de la energía sería muy pequeña. Con un consumo per cápita como el actual, la humanidad podría obtener toda la energía que necesita gastando un gramo de litio por persona al año. Por otro lado, el producto de la reacción, el helio, es uno de los elementos más inocuos que existen (se utiliza entre otras cosas para rellenar los globos que compramos a nuestros niños), no crea efecto invernadero, no se acumula en la atmósfera y en cualquier caso generaría gases del orden de seis mil toneladas anuales, cantidad muy modesta si la comparamos con las 10^{10} toneladas anuales de CO_2 que se emiten actualmente a la atmósfera.

Hasta ahora hemos hecho una presentación centrada en las grandes ventajas de esta fuente de energía, ¿donde están las dificultades? La mayor dificultad es la consecución de la reacción en sí misma. Para que los dos núcleos se fusionen han de acercarse, superando la repulsión electrostática, a distancias lo suficientemente bajas como para que la atracción por las fuerzas nucleares entre en juego. Una forma de conseguirlo es hacerlos chocar entre sí a gran velocidad, la que resultaría de acelerar el deuterio y el tritio a unos 20.000 voltios. Conseguir estas velocidades no es un problema, de hecho se aceleran partículas a energías millones de veces mayores, pero sí es un problema el rendimiento energético del proceso. Si aceleramos unos núcleos contra otros, el carácter coulombiano de la repulsión electrostática hace que la probabilidad de colisión "frontal" sea muy pequeña y la mayor parte de las partículas se cruzan evitándose mutuamente y sin producir reacciones de fusión.

La única manera de alcanzar una tasa de reacciones que haga el proceso energéticamente rentable es mantener el gas de deuterio-tritio confinado, de manera que los núcleos estén continuamente colisionando mientras mantienen esa energía promedio de 20 keV. El problema toma su verdadera dimensión cuando nos planteamos en qué recipiente mantendríamos este gas en agitación térmica, ya que 20 keV por partícula suponen una temperatura de 220 millones de grados.

Curiosamente, este serio problema es también la fuente de una de las grandes ventajas de la fusión nuclear: es intrínsecamente segura, ya que, tan pronto como las condiciones óptimas de funcionamiento se degradan por el fallo de algún sistema, el reactor se vuelve incapaz de mantener esas altísimas temperaturas y la reacción se extingue por sí misma sin dejar prácticamente calor residual.

Históricamente se han desarrollado dos tipos de “recipientes” para abordar el problema. La primera posibilidad es simplemente calentar el gas repentinamente, en unos pocos nanosegundos, para que antes de que le dé tiempo a expandirse libremente se produzca la reacción. En este principio se basa el método de “confinamiento inercial” cuyo principal exponente es el experimento NIF de Livermore (EEUU) que ha arrancado recientemente. La segunda posibilidad utiliza el hecho de que el gas a tan altas temperaturas, en estado de “plasma”, está compuesto de partículas cargadas y por tanto susceptibles de ser atrapadas por un campo magnético. Esta aproximación de “confinamiento magnético” ha sido la apuesta principal del Programa Europeo de Fusión y constituye la base del experimento ITER.

Confinamiento magnético: el proyecto ITER

El campo magnético no puede ceder ni quitar energía a las partículas cargadas pero puede curvar su trayectoria, de manera que esta acaba siendo una hélice arrollada en torno a la línea de campo. Para partículas con energías de 10 keV y campos del orden de varios tesla, el radio de estas hélices es de pocos centímetros para los iones y milímetros para los electrones. Si ahora hacemos que la línea de campo se cierre sobre sí misma, en una geometría “toroidal”, conseguimos mantener las partículas atrapadas.

El “tokamak”, palabra procedente del ruso *toroidalnaya kamera ee magnitnaya katushka* (cámara toroidal y bobina magnética), es una trampa magnética en forma toroidal que realiza precisamente esa tarea. Pero, aunque el campo magnético retarda el escape de energía en el tokamak, no lo elimina completamente porque las colisiones entre las partículas dan lugar a una inevitable difusión.

La fusión nuclear es intrínsecamente segura, ya que, tan pronto

como las condiciones óptimas de funcionamiento se degradan por

el fallo de algún sistema, el reactor se vuelve incapaz de mantener

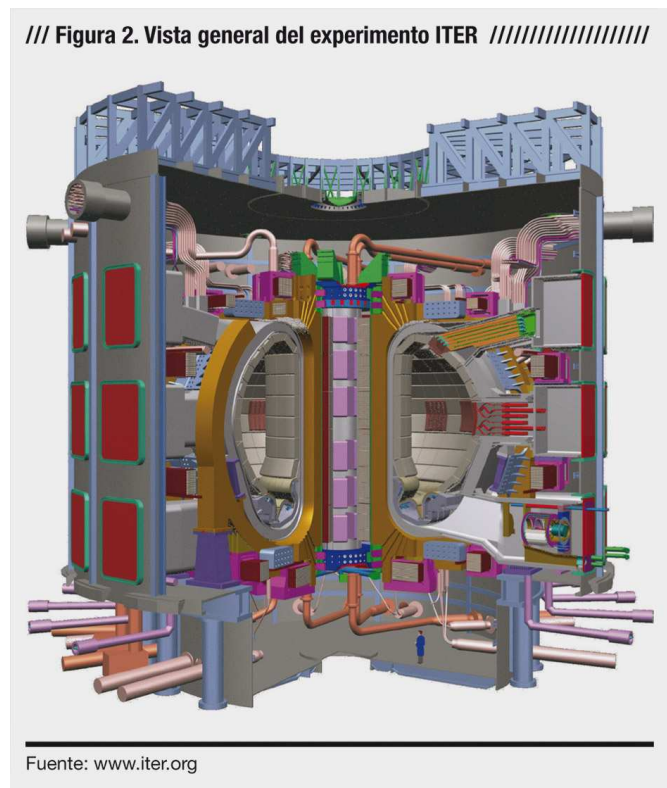
esas altísimas temperaturas y la reacción se extingue por sí misma

sin dejar prácticamente calor residual

Por ello hay que recurrir a un segundo parámetro para mantener la energía: el tamaño. Los tokamaks más eficientes son los más grandes. Por ejemplo, el tokamak más grande del mundo, el JET, perteneciente a la Unión Europea y situado en Oxford, que ha llegado a producir potencias de fusión de hasta 16 MW, puede contener 80 m³ de plasma, tiene una altura de unos 12 metros en su conjunto y un diámetro similar. El siguiente paso en el desarrollo de la fusión sería el gran experimento ITER que tendrá 1000 m³ de plasma y, de acuerdo con las leyes de escala obtenidas del conjunto de todos los experimentos previos, deberá alcanzar ganancias energéticas de entre 5 y 10 veces, demostrando lo que llamaríamos la “viabilidad científica” de la fusión como fuente de energía.

ITER es un gran tokamak, en cuya construcción participan países que albergan a más de la mitad de la población de la Tierra: China, Corea, EEUU, India, Japón, Rusia y Europa, que participa como un solo socio. El experimento se sitúa en Cadarache, en el sur de Francia. Se trata de una máquina de grandes proporciones basada en bobinas superconductoras y, para dar una idea de su complejidad, baste recalcar que en un espacio de menos de dos metros tendremos temperaturas de cien millones de grados en el plasma y temperaturas cercanas al cero absoluto en las bobinas superconductoras, que trabajan a 1,4 K. Otro ejemplo ilustrativo es la complejidad del sistema de diseño asistido por ordenador (CAD) que tiene que manejar 10 millones de piezas diferentes, diez veces más que las necesarias en el avión Airbus 380 (Figura 2).

La construcción de este gran proyecto comenzó en 2008 y se espera que los experimentos se inicien en 2019.



Los problemas tecnológicos

Al principio de este artículo hemos explicado que el tritio, necesario para la reacción D-T, lo obtenemos en el propio reactor a partir del litio. Este trabajo lo realizará un sistema que rodea al plasma, denominado *breeding blanket* "manto fértil", que será el encargado además de extraer la energía de los neutrones y de evitar que estos lleguen a alcanzar las bobinas superconductoras. El reactor comienza su operación inicial con una pequeña carga de tritio de

origen externo y a medida que se producen reacciones de fusión, cada tritio fusionado da lugar a un neutrón. El neutrón colisiona con el material del manto, dando lugar a varios neutrones nuevos, de menor energía. Estos neutrones secundarios serán los que colisionen con el litio para generar de nuevo tritio. Esta multiplicación neutrónica intermedia que realizamos es imprescindible para mantener una tasa suficiente de renovación del tritio, levemente por encima del 100%.

ITER no tendrá un manto fértil completo pero llevará a cabo un programa de pruebas de los diversos conceptos desarrollados con pequeñas secciones de manto fértil ($2 \times 1 \text{ m}^2$), que se acoplarán en los puertos de acceso al plasma.

El otro gran desafío para la fusión, una vez resuelto el problema del confinamiento del plasma, lo constituyen los materiales.

Nuestro primer problema con los materiales lo ocasionan las partículas cargadas que escapan del plasma y llegan a las paredes del reactor. Como hemos explicado más arriba, el campo magnético retarda su salida al exterior pero no la impide: al final la pared del reactor acaba recibiendo un intenso flujo de partículas cargadas con energías típicas de 50 eV. El problema con este flujo de partículas es que su deposición está normalmente concentrada en zonas específicas de la máquina, llegando a generar cargas térmicas locales de 20 MW/m^2 capaces de evaporar prácticamente cualquier material conocido. Esto será un problema menor para ITER, que tiene prevista la sustitución periódica de los componentes afectados, pero puede ser una seria limitación para un reactor comercial. Los materiales que se consideran para este cometido son los compuestos de fibra de carbono o el wolframio, en ambos casos refrigerados por helio, y como solución a largo plazo las paredes basadas en metal líquido, fundamentalmente litio.

ITER es un gran tokamak, en cuya construcción participan países

que albergan a más de la mitad de la población de la Tierra: China,

Corea, EEUU, India, Japón, Rusia y Europa, que participa como

un solo socio

Por su parte, los neutrones que se generan en la reacción D-T, que llevan el 80% de la energía, no suponen un problema de carga térmica, ya que se distribuyen de manera isótropa y se absorben uniformemente en todo el volumen del manto fértil. Sin embargo, causan otro tipo de daños en los materiales estructurales que rodean al reactor: se forman burbujas intersticiales de helio e hidrógeno y se producen desplazamientos de átomos en la red cristalina del material. Todos estos efectos fragilizan el material y deterioran sus propiedades estructurales. El problema casi no se manifestará en ITER ya que la tasa acumulada de neutrones será pequeña, pero en un reactor comercial cada átomo del material estructural sufrirá en promedio 20-30 desplazamientos (dps) por año de operación.

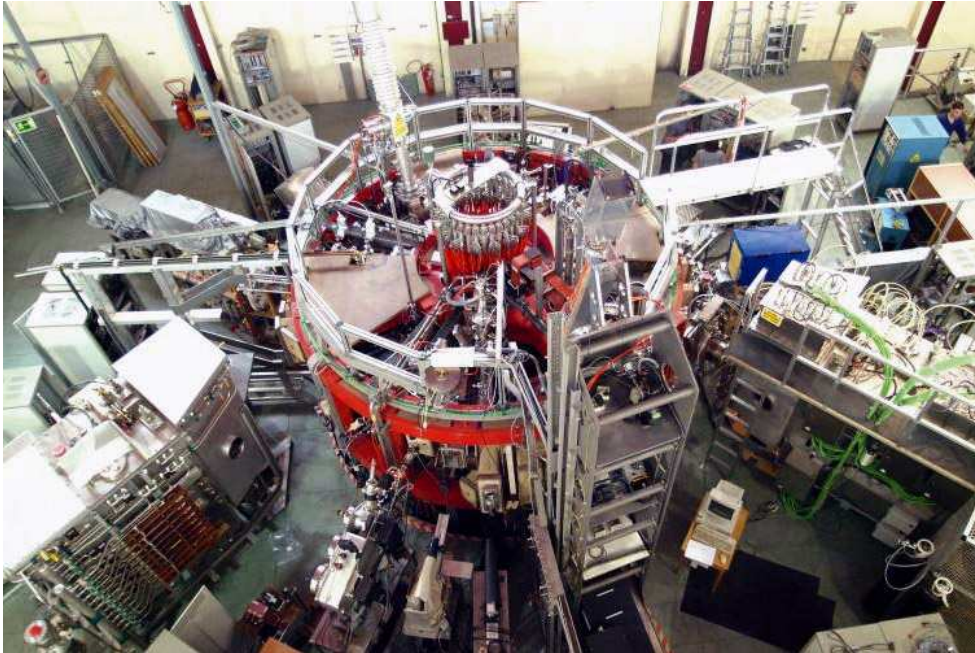
Por otra parte, las colisiones de estos neutrones tan energéticos con el material generan isótopos radiactivos que originalmente no estaban presentes. Ello da lugar a que estos materiales, al final de la vida del reactor, se conviertan en un residuo, que no es de alta actividad pero que no puede ser desechado en vertederos convencionales ni reciclado. Actualmente se realizan estudios, con resultados esperanzadores, sobre los denominados “materiales de baja activación”, entre ellos tenemos algunos tipos de acero y los materiales compuestos de carburo de silicio. Estos materiales aún generarían residuos pero su actividad tendría un periodo menor de cien años, tras los cuales se podrían reutilizar, de esta manera la fusión no generaría hipotecas medioambientales para generaciones futuras.

Los proyectos IFMIF y DEMO

ITER será un gran paso, pero es inevitable preguntarse por los pasos que habrá que dar después de ITER, o en paralelo, para llegar a los reactores comerciales de fusión. Aparte de un programa en paralelo de Física y tecnología en los campos ya discutidos, se plantea la construcción de otro gran experimento: IFMIF (Internacional Fusion Materials Irradiation Facility), que sería una fuente intensa de neutrones de 14 MeV necesaria para realizar pruebas de materiales de baja activación.

Con los resultados de ITER, IFMIF y los programas de Física y tecnología, se abordará, en torno a 2030, la construcción del siguiente gran experimento de fusión, al que a día de hoy se da el nombre genérico de “DEMO” (de *demonstration reactor*). Las diferencias principales con ITER serían: operación continua, 24 horas al día 7 días a la semana, diseño que permita minimizar los tiempos de parada para mantenimiento, materiales de baja activación y autosuficiencia en tritio (manto fértil). Finalmente, DEMO, que comenzaría su operación en los años 2040, tendría un sistema de extracción de energía que alimentaría una central eléctrica conectada a la red.

Dada la proximidad de DEMO a la fase comercial, no es descartable que, aún siendo su coste incluso superior al de ITER, existan varios DEMO en paralelo, promovidos por grupos de países o países en solitario. No debemos perder de vista que el mercado de la energía es del orden de varios billones (10¹²) de euros anuales, centenares de veces el coste completo del proyecto ITER.



El stellarator español TJ-II, situado en el CIEMAT. Fuente: CIEMAT

El papel de España en el programa de fusión

España participa, a través del CIEMAT, en el programa europeo de fusión desde los años 80 y lo hace en sus dos vertientes: los sistemas de confinamiento, con el tokamak TJ-I (1983-93) y el “stellarator” TJ-IU (1993-97), por un lado, y los materiales bajo irradiación, por otro. En 1998 entra en servicio el dispositivo TJ-II, la gran apuesta española en el campo de la fusión. TJ-II es un “stellarator”, un sistema de confinamiento de geometría toroidal pero con una filosofía de diseño diferente a la de los “tokamak”. Pese a presentar una mayor complejidad y un mayor coste de construcción que un tokamak de tamaño equivalente, los stellarators ofrecen la posibilidad de operar en estado estacionario (el tokamak es intrínsecamente pulsado) y una mayor estabilidad, lo que hace de esta configuración un candidato ideal para su uso en los futuros reactores comerciales. Existen stellarators en operación en España (1), Japón (2), Rusia (1), EEUU (1), Australia (1) y Alemania (1). Este último país está construyendo el dispositivo superconductor W7X que comenzará su operación en 2014 y será el mayor del mundo.

Con el comienzo de la construcción de ITER, el programa español se ha ido readaptando para participar y tener un mayor papel en los desarrollos de tecnología de fusión. Como resultado, España participa, a través de consorcios internacionales, en numerosos subsistemas del proyecto ITER (instrumentación y medida, módulos de manto fértil, mantenimiento remoto, sistema de control...) y del proyecto IFMIF. Otros elementos importantes en el programa español han sido el lanzamiento de la ICTS “Technofusion”, orientada al desarrollo de materiales, aplicaciones de metales líquidos y sistemas de mantenimiento remoto, o el proyecto Consolider “Tecnología de Fusión”, encaminado al desarrollo de la tecnología del manto fértil.

Un resultado importante de la existencia de un sólido programa español de fusión fue la capacidad para competir a nivel europeo por la sede del proyecto ITER. La calidad de la candidatura de Vandellós como posible emplazamiento permitió pasar con éxito todos los exámenes técnicos. Al final, el acuerdo político de finales de 2003 dio el emplazamiento a Cadarache, pero España consiguió la sede de la oficina técnica de adjudicación y seguimiento de contratos, situada en Barcelona, que cuenta con trescientas personas y manejará un presupuesto cercano a los 6.000 millones de euros durante la construcción de ITER.

Finalmente, es obligado destacar el excelente papel que la industria española está teniendo en la construcción de ITER. Nuestro país es el segundo, tras Francia, en número de ofertas presentadas a las licitaciones y el tercero, tras Italia y Francia, en presupuesto total adjudicado. El dato es aún más relevante si tenemos en cuenta que uno de los contratos en manos de empresas españolas es el de la construcción de las grandes bobinas superconductoras de campo toroidal, verdadero "corazón tecnológico" del proyecto, adjudicado a un consorcio hispano-italiano, liderado por Iberdrola Ingeniería.