

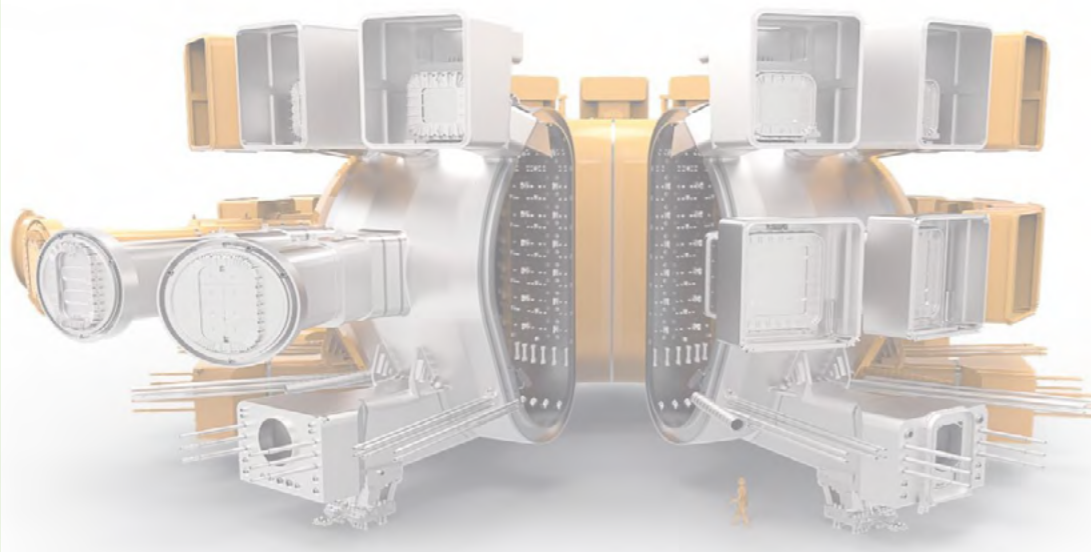
Fusión nuclear, una energía de futuro

A diferencia de la energía de fisión, que implica fracturar átomos muy pesados para liberar energía, y que es la reacción que se produce en las centrales nucleares que actualmente funcionan en el mundo, **la fusión nuclear libera energía como resultado de la unión de dos átomos ligeros.**

El combustible para los reactores de fusión consiste en dos isótopos del gas hidrógeno: deuterio y tritio. De esta forma, una central nuclear de fusión utilizará un combustible disponible en cantidades casi ilimitadas y no producirá gases de efecto invernadero ni residuos radiactivos de larga vida.



La energía de fusión podría proporcionar un suministro de electricidad en base de modo continuo, sostenible y a gran escala



El objetivo que se persigue en la actualidad con los reactores de investigación de fusión nuclear como el proyecto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), sobre el que se tratará más adelante, es **utilizar la fusión nuclear como fuente de energía en la Tierra, del mismo modo que se genera en el Sol o en las estrellas.** En el interior del Sol, los átomos de hidrógeno colisionan entre sí, se fusionan a temperaturas altísimas -cerca de 15 millones de grados centí-

grados- y están sometidos a enormes presiones gravitatorias: cada segundo se fusionan 600 millones de toneladas de hidrógeno formando helio.

Sin embargo, en la Tierra la fusión se producirá a una escala mucho más modesta, por lo que **las temperaturas necesarias en el reactor de fusión deberán ser muy superiores -del orden de 100 millones de grados centígrados-** para disponer de una fuente de energía técnicamente viable.

Requisitos tecnológicos

El aprovechamiento de la energía de fusión pasa por el desarrollo de sistemas tecnológicos que cumplan dos requisitos fundamentales:

- **Calentar hasta temperaturas de millones de grados**, para conseguir un plasma o gas sobrecalentado en el que los electrones salgan de sus órbitas y donde los núcleos puedan

ser controlados para su fusión en otros más pesados.

- **Confinar para mantener la materia**, en estado de plasma o gas ionizado, encerrada en la cavidad del reactor el tiempo suficiente para que pueda reaccionar.

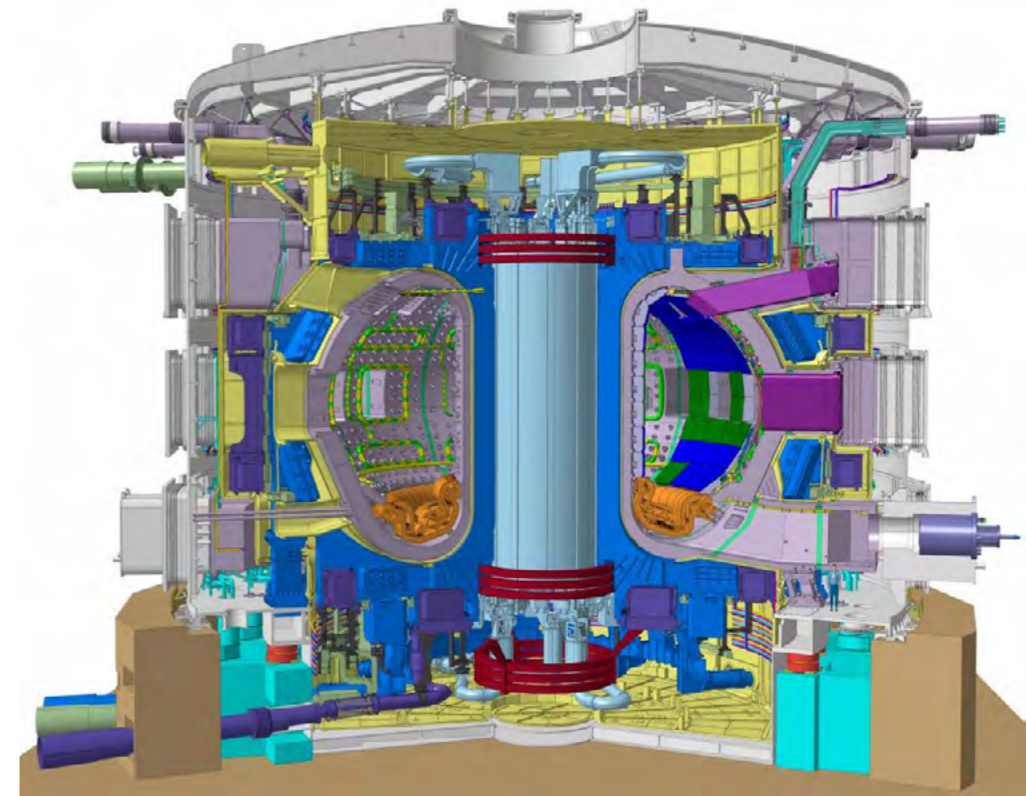
Calentar a temperaturas de millones de grados y confinar la materia son dos de los requisitos tecnológicos para alcanzar la fusión nuclear

Principales líneas de desarrollo

Existen dos líneas principales para el desarrollo de la tecnología de fusión:

- **Fusión por confinamiento magnético.** Las partículas eléctricamente cargadas del plasma son atrapadas en un espacio limitado por un campo magnético al describir trayectorias helicoidales determinadas por las líneas de fuerza de ese campo. El dispositivo más desarrollado tiene forma toroidal y se denomina Tokamak, que **es la tecnología utilizada en el proyecto ITER.**

- **Fusión por confinamiento inercial.** Consiste en crear un medio tan denso que las partículas no tengan prácticamente ninguna posibilidad de escapar sin reaccionar entre sí. Súbitamente impactada por poderosos haces luminosos creados por láser, una pequeña esfera de un compuesto sólido de deuterio y tritio implosiona bajo los efectos de la onda de choque. De esta forma, se hace cientos de veces más densa que en su estado sólido normal y explota bajo los efectos de la reacción de fusión.



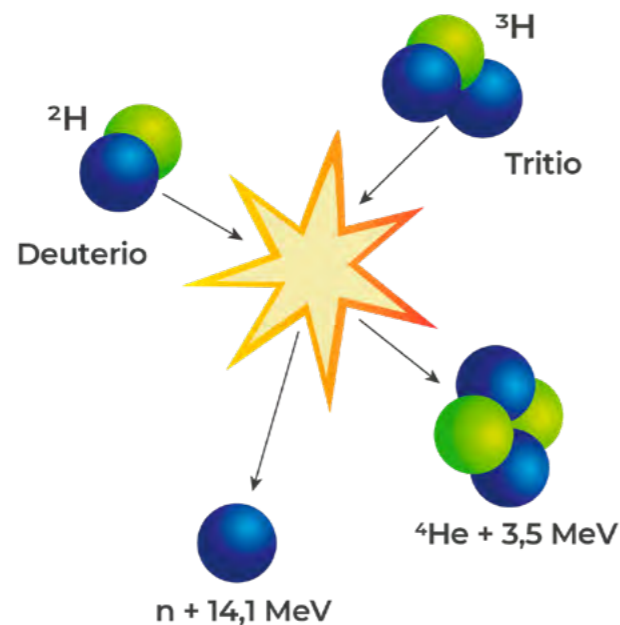
Fuente: ITER

Consideraciones técnicas

Las diferentes reacciones posibles para llevar a cabo la fusión nuclear requieren distintos valores de temperatura y densidad para alcanzar una eficiencia óptima. Los estudios actuales se concentran principalmente en la reacción de dos isótopos del hidrógeno -el deuterio y el tritio-, ya que es una de las más fáciles de conseguir y sus componentes más sencillos de obtener: el deuterio directamente del agua y el tritio dentro del mismo reactor por bombardeo neutrónico de una capa de litio, que también es muy

abundante en la naturaleza. Incluso para la citada reacción, las temperaturas requeridas son enormes, ya que superan los 100 millones de grados centígrados.

La fusión con deuterio y tritio consiste en fusionar sus núcleos -en un proceso similar al que ocurre en el interior del Sol- para producir una partícula alfa, núcleo de helio (He^4) consistente en dos neutrones y dos protones, como se muestra en la figura:



$$E = m \cdot c^2$$

Aplicando la ecuación de Einstein ($E = m \cdot c^2$) a la diferencia de masas, se muestra la gran cantidad de energía potencialmente disponible por reacción (17,6 MeV), aunque haya que restarle la energía necesaria para que se pueda autosostener la fusión nuclear. La diferencia neta es aún grande y uno de los principales atractivos de la fusión.

Los dos núcleos ligeros del proceso de fusión se encuentran cargados positivamente y se repelen. Para superar esta fuerza de repulsión, y que la fuerza nuclear -siempre de atracción y de corto alcance- pueda actuar, los núcleos deben moverse a velocidades suficientemente al-

tas, lo cual implica una temperatura muy elevada.

A muy altas temperaturas la materia se encuentra en un estado que se denomina plasma, en el que los electrones dejan de estar ligados a los núcleos atómicos. Además, para que se produzca un número suficiente de reacciones de fusión debe haber un gran número -es decir, una alta densidad- de núcleos atómicos y han de permanecer en esta situación durante un tiempo suficientemente largo como para que las reacciones entre ellos tengan lugar. En estas condiciones se dice que existe "confinamiento" del plasma.

Ventajas y retos

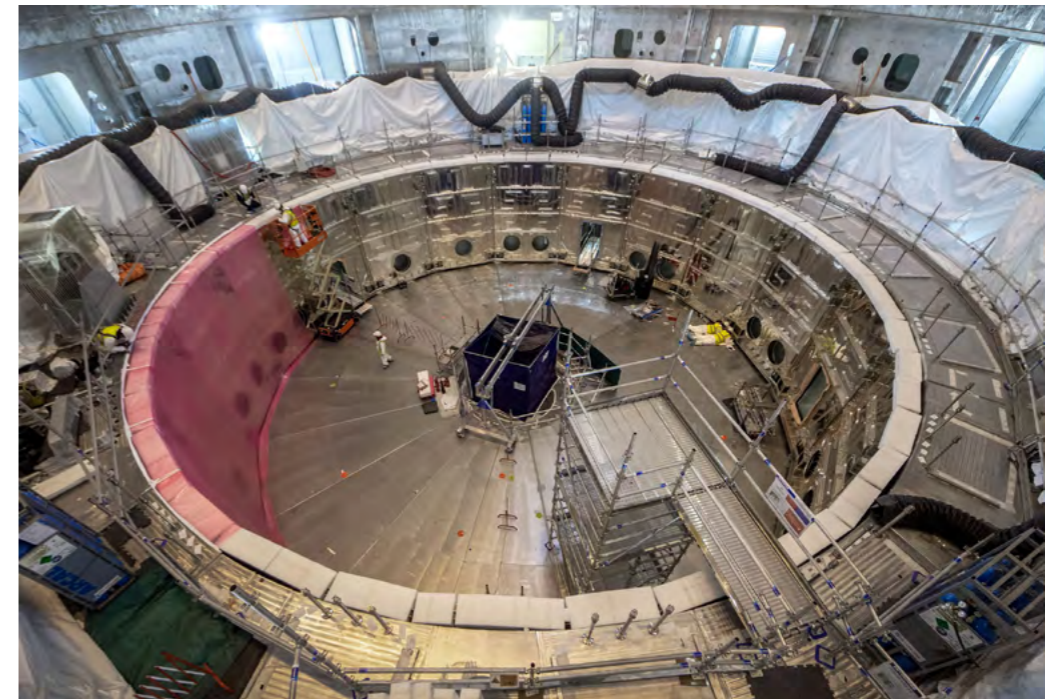
La fusión nuclear podrá llegar a ser un recurso energético a gran escala en la segunda mitad de este siglo y cuenta con grandes ventajas respecto a otras fuentes de energía:

- **Seguridad.** Como la reacción de fusión no es una reacción en cadena, no es posible que se pierda el control de la misma. En cualquier momento se puede parar la reacción, cerrando sencillamente el suministro de combustible.
- **Combustible barato y abundante.** El combustible está repartido geográficamente de forma uniforme y hay suficiente en el agua de los lagos y océanos para millones de años en base al consumo actual de energía.
- **Energía limpia.** Los gases resultantes de la fusión no contribuyen al efecto invernadero. La radiactividad de la estructura del reactor, producida por los neutrones emitidos en las reacciones de fusión, puede ser minimizada escogiendo cuidadosamente materiales de baja activación. Por tanto, no es preciso alma-

cenar los elementos del reactor más de cincuenta años.

La fusión también presenta algunos retos:

- **Largo tiempo hasta que esté comercialmente disponible.** El proyecto de más envergadura, el reactor experimental de fusión ITER, pretende demostrar que es posible una reacción de fusión a gran escala y autosostenida. Una vez tenga éxito, habrá que construir un reactor de demostración para producir electricidad, lo que supone un horizonte de finales de este siglo. Quizá, este plazo se podría acortar si el proyecto SPARC (*Scalable Processor ARChitecture*) –sobre el que se tratará más adelante– tuviese éxito.
- **Costes elevados.** Los altos costes hacen a la fusión inabordable para la iniciativa privada. Hoy por hoy, su desarrollo tiene lugar a escala de acuerdos de los gobiernos de varias naciones. Esta dificultad se podría aminorar si se materializaran los avances en superconductores a alta temperatura.



Fuente: ITER

El primer reactor de demostración para producir electricidad por fusión podría llegar a finales de este siglo



EL PROYECTO ITER

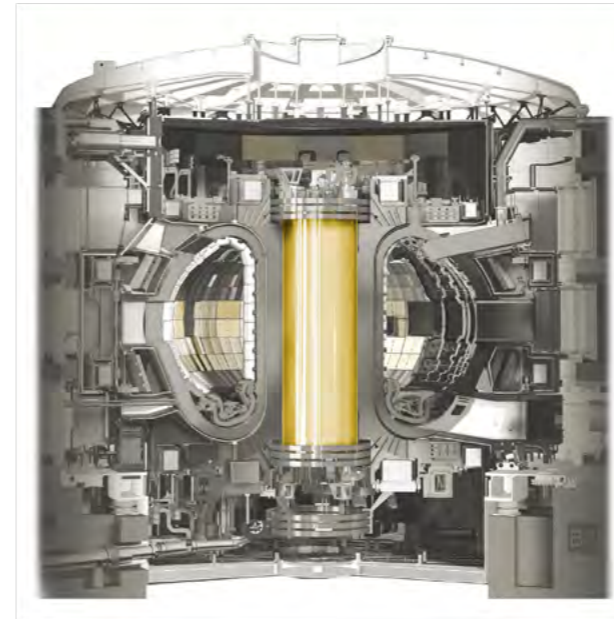
El objetivo del reactor experimental de fusión nuclear ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) es determinar la viabilidad tecnológica y económica de la fusión nuclear por confinamiento magnético como fuente de energía a gran escala y sin emisiones de CO₂, aunque todavía sin producir electricidad.

El ITER será la primera instalación de fusión capaz de producir energía neta y mantener el proceso de fusión durante largos periodos de tiempo, así como de probar los materiales y tecnología necesarios, representando una fase previa a la construcción de una instalación de demostración comercial.

El ITER pretende determinar la viabilidad tecnológica y económica de la fusión nuclear por confinamiento magnético como fuente de energía a gran escala y sin emisiones de CO₂

ITER: La energía del futuro

ITER es un reactor experimental de fusión cuyo objetivo es determinar la viabilidad tecnológica y económica de la fusión nuclear por confinamiento magnético para la generación eléctrica.



Ubicación



Participantes



Unión Europea
India
Japón
Rusia
Estados Unidos
Corea del Sur
China

Datos

100.000 km
de hilos superconductores

23.000 ton
de peso total del reactor
cuando esté finalizado

830 m³
de volumen de
plasma del Tokamak

150 millones °C
de temperatura de plasma

60 m altura
del edificio principal

5.000 personas
trabajando en su
construcción

500 MW como meta
de potencia energética

42 ha de terreno

Sources: ITER and Foro Nuclear

El ITER se está construyendo en el sur de Francia en el emplazamiento de Cadarache y es una colaboración de 35 países integrados en los siete miembros principales: China, Unión Europea (a través de Euratom), India, Japón, Corea del Sur,

Rusia y Estados Unidos. El comienzo de las pruebas del reactor –una vez completada su construcción en 2024–, así como el primer plasma, se realizarán en 2025. Ésta será la fase previa a la operación, cuya duración prevista es de 20 años.



Fuente: ITER

El proyecto de fusión ITER que se construye en Francia cuenta con la participación de 35 países, entre los que se encuentra España a través de la Unión Europea

Tras la firma del Acuerdo para su desarrollo en 2006, los países participantes en el proyecto se comprometieron a compartir el coste de la construcción, operación y desmantelamiento, así como los resultados experimentales y cualquier propiedad intelectual generada.

El coste total de la construcción se estima actualmente en unos 23.500 millones de euros. La Unión Europea aporta el 45,6% (más de 10.700 millones de euros) a través de fondos comunitarios gestionados por la Agencia Europea de Fusión (Fusion for Energy), cuya sede está en Barcelona. De esta cantidad, aproximadamente el 20% es aportación directa de Francia como país anfitrión. El 90% de las contribuciones se realizan en especie. Los otros seis miembros del proyecto contribuyen por igual al resto del presupuesto.



Fuente: ITER

El equipo principal es un reactor con forma de Tokamak, en cuyo interior la energía de fusión se absorbe como calor en las paredes de la vasija. Este calor se utilizará para producir vapor y con éste electricidad en turboalternadores.

El corazón del Tokamak es su cámara de vacío -con forma toroidal- en la que, bajo la influencia de temperaturas y presiones extremas, el deuterio y el tritio se ionizan totalmente separándose los electrones de los núcleos, con lo que se abre la posibilidad de la fusión nuclear en el plas-

ma así producido. Las partículas con carga eléctrica del plasma se acomodan a la forma del poderoso campo magnético creado por las bobinas situadas alrededor de la vasija que se mantienen a temperaturas criogénicas -próximas al cero absoluto (- 273 °C)- y así permanecen confinadas sin tocar las paredes de la vasija, que no podrían resistir su elevada temperatura. Cabe destacar la implicación de la industria nuclear española en este proyecto de fusión, con la exportación de productos, tecnología y servicios que se aplican e instalan en este proyecto.

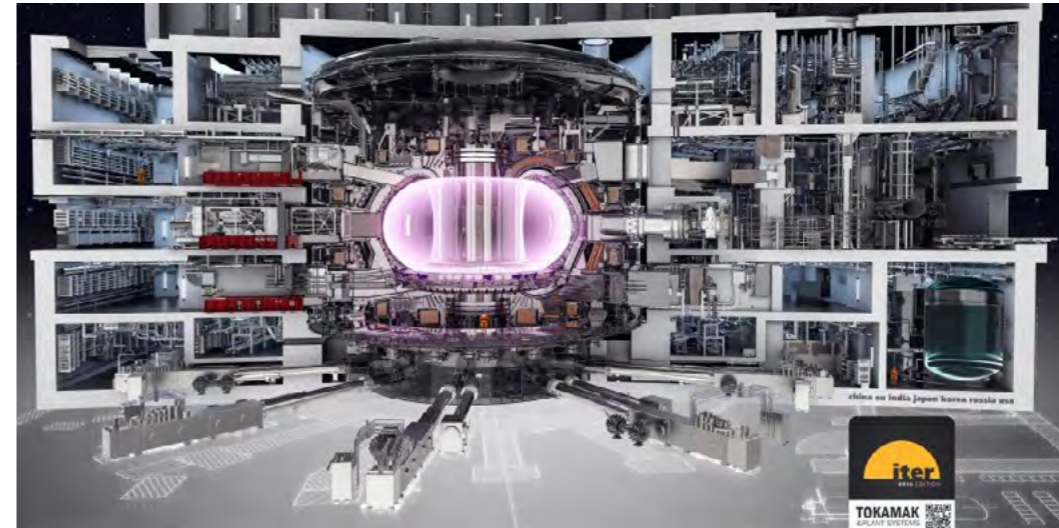
La industria nuclear española participa en el proyecto ITER exportando productos, tecnología y servicios para alcanzar la fusión nuclear

Principales características del ITER

La cantidad de energía que puede producir un Tokamak es el resultado directo del número de reacciones de fusión que se producen en su núcleo. Cuanto más grande es la vasija en la que se contiene, mayor es el volumen del plasma y, por lo tanto, mayor será el potencial de la energía de fusión.

El Tokamak del ITER tiene un volumen de plasma diez veces superior al dispositivo en funcionamiento más grande actualmente. Será una herramienta experimental única capaz de:

- Desarrollar una potencia de 500 MW con una aportación de 50 MW, es decir **alcanzar una ganancia energética de diez.**



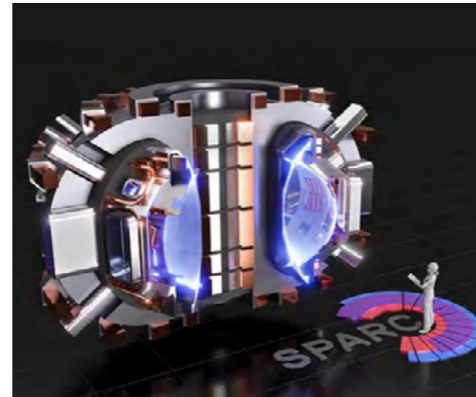
Reactor con forma de Tokamak
Fuente: ITER

- Demostrar la operación integrada de tecnologías para una central de fusión, pudiéndose probar aspectos tales como calentamiento, control, diagnóstico, criogenia y mantenimiento remoto.
- Conseguir plasma de deuterio y tritio en el que la reacción se prolongue mediante calentamiento interno.
- Realizar pruebas para la producción de tritio en la vasija de vacío mediante el bombardeo neutrónico de litio, muy abundante en la naturaleza.
- Demostrar la seguridad de las características de un dispositivo de fusión. El primer paso se dio con la obtención de la licencia como operador nuclear en Francia, tras un riguroso examen de sus procedimientos de seguridad.

EL PROYECTO SPARC

El centro Plasma Science & Fusion Center del Massachusetts Institute of Technology (MIT) de Estados Unidos, en colaboración con la compañía privada Commonwealth Fusion Systems, está desarrollando un diseño conceptual para una **máquina de fusión experimental compacta -el Scalable Processor ARCHitecture (SPARC)-** con ganancia energética superior a dos, es decir, que produciría de 50 a 100 MW con una aportación del 50% de la citada potencia.

El interés del SPARC, que tendrá el tamaño de una máquina de fusión de tamaño medio, reside en sus campos magnéticos de elevada intensidad con una nueva tecnología, que haría innecesarios los enormes imanes de bobinas superconductoras a temperaturas criogénicas del ITER. Como comparación, los imanes del ITER deben mantener una temperatura de unos 4 °K -aproximadamente 269 °C bajo cero-, mientras que los del SPARC funcionarían a unos 90 °K, aún una temperatura muy baja pero más fácil de gestionar.



Diseño conceptual del proyecto SPARC
Fuente: PSFC-MIT

La primera etapa para lograrlo es completar el desarrollo de nuevos imanes superconductores de alto flujo y alta temperatura. La siguiente es la construcción de un modelo con campo toroidal de 1,65 m de radio mayor y 0,5 m de radio menor capaz de producir un campo de 12 teslas. Como referencia, el campo magnético terrestre oscila entre 25 y 65 microteslas.

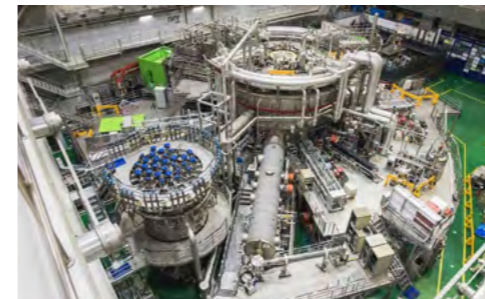
Como consecuencia de lo anterior, **la máquina SPARC sería de menor tamaño que el ITER, lo que podría permitir que entrase en servicio hacia 2025 y con un coste considerablemente menor.**

OTROS PROYECTOS

El hito anterior de energía de fusión por confinamiento magnético en Europa se remonta al Tokamak JET (Joint European Torus) del Reino Unido que en 1997 produjo 16 MW de energía de fusión. Desde entonces, se han producido importantes desarrollos. Entre ellos se encuentran los soles artificiales de Corea del Sur y de China.

El primero, KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research) es fruto de la colaboración entre el Instituto Coreano de

Energía de Fusión y la Universidad de Seúl y ha permitido ampliar el récord anterior de 8 segundos de fusión controlada hasta 20 segundos, con una temperatura del plasma de 100 millones de grados centígrados, obtenida con nueva tecnología y en particular gracias al desarrollo de bobinas superconductoras más potentes. Este logro tiene que ver también con el desarrollo de la barrera interna de transporte, que permite estabilizar el plasma en su periferia.



Reactor KSTAR
Fuente: Consejo Nacional de Investigación de Ciencia y Tecnología de Corea del Sur

El Tokamak HL-2M de China es otro de los desarrollos en curso. Presenta la peculiaridad de alcanzar temperaturas de 150 millones de grados centígrados, diez veces

Junto al proyecto ITER, hay otros avances en fusión en China, Corea del Sur, Estados Unidos y Reino Unido

más que la temperatura del Sol y permite a China ampliar su contribución científica y tecnológica al proyecto ITER.