

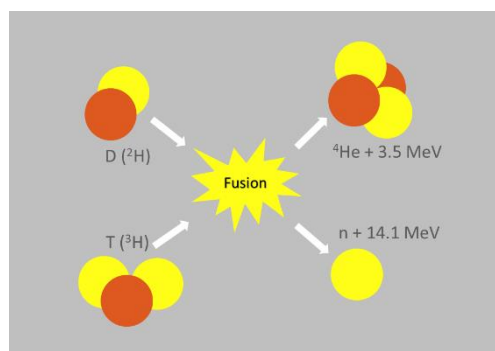
Información básica

La fusión en pocas palabras	1
El camino hacia la energía de fusión.....	2
Comparación de contenidos energéticos	3
Comparación entre el JET, ITER y DEMO	3
Deuterio-tritio: la mezcla ideal de combustible	4
El JET (“Joint European Torus”): una instalación única que permite operar con D-T.....	4
Mejoras en el JET	5
La generación de ITER.....	5
Objetivos de los experimentos con deuterio-tritio del JET en 2021.....	5
Limitaciones del JET	6
Récords de fusión del JET en 1997	6
Un nuevo récord de energía de fusión en 2021	7

La fusión en pocas palabras

La fusión, fuente de energía responsable de la luz y el calor procedentes del Sol y de las estrellas, es una reacción nuclear en la que dos núcleos ligeros se unen para formar otro más pesado, liberando enormes cantidades de energía. Tiene, por tanto, el potencial de proporcionar una energía segura, sostenible y con bajas emisiones de carbono*, que complementa otras fuentes de energía limpias como la energía eólica y la solar. La fusión podría suministrar una parte importante de la energía necesaria a nivel mundial durante muchos miles de años.

Para que las reacciones de fusión se produzcan se necesitan temperaturas extremadamente altas, de más de cien millones de grados Celsius, lo que permite que estas partículas puedan superar su repulsión eléctrica y se fusionen. Además de estas temperaturas tan elevadas, para poder utilizar la fusión como fuente de energía se necesita que la densidad de núcleos sea suficientemente alta y que ambas magnitudes se mantengan durante un tiempo suficientemente largo.



En los dispositivos de fusión por confinamiento magnético o *tokamaks*, el combustible de fusión se calienta hasta que se forma un plasma, que es básicamente un gas de partículas cargadas (electrones libres e iones positivos) y se confina dentro una cámara de vacío utilizando campos magnéticos. Una vez producido el plasma, los investigadores optimizan su rendimiento (en términos de la energía obtenida y su duración en condiciones estacionarias) **. Por ejemplo, utilizando sistemas de control como la inyección de gas o los sistemas de calentamiento, es posible ajustar la presión, la temperatura de los iones y los electrones, y así estabilizar las corrientes eléctricas y otros procesos físicos que se producen en el complejo entorno del plasma magnetizado.

** Un kilogramo de combustible de fusión contiene unos diez millones de veces más energía que un kilogramo de carbón, petróleo o gas, y su uso no libera gases de efecto invernadero.*

*** El tokamak JET del programa EUROfusion ostenta el récord de energía de fusión producida (21.7 megajulios en 1997), aunque el plasma requirió más calentamiento externo del que produjo en energía de fusión.*

El camino hacia la energía de fusión

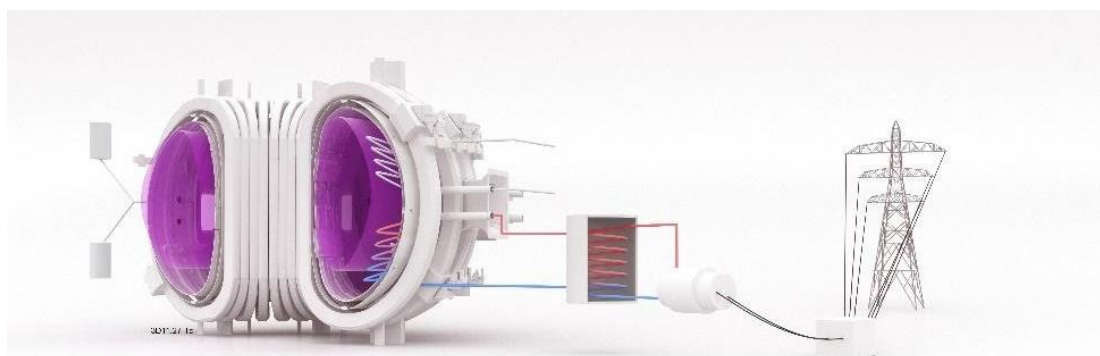
EUROfusion es un consorcio de 30 miembros de 25 países europeos además de Ucrania, Suiza y el Reino Unido, cuyo objetivo final es desarrollar un futuro reactor de fusión, que se conoce como "EU DEMO".

Para que esto sea posible, Europa ha acordado la llamada [Hoja de Ruta para la Energía de Fusión \("Fusion Roadmap"\)](#), el plan de I+D sobre fusión más detallado y completo del mundo. Esta hoja de ruta incluye toda la investigación y el desarrollo tecnológico necesarios para que la fusión pase de ser un proyecto que se desarrolla en los laboratorios a materializarse en un programa basado en la industria y la tecnología.

En esta hoja de ruta, el dispositivo de fusión del programa EUROfusion, JET, y el proyecto internacional de fusión, ITER, son pasos importantes en el camino hacia DEMO.

- Los experimentos del JET en 2021, en los que se utilizó la mezcla de combustible de fusión de deuterio-tritio prevista para el ITER y las futuras centrales de fusión, proporcionan una información de gran utilidad al ITER cuando comience sus propios experimentos con deuterio-tritio en 2035.
- El JET es el único experimento de fusión del mundo en el que los investigadores ya pueden experimentar y adquirir experiencia en condiciones similares a las del ITER, creando un plasma que libera una cantidad importante de energía de fusión.
- El ITER se está construyendo en el sur de Francia. En diciembre de 2035 está previsto que el ITER comience a funcionar con deuterio-tritio (D-T). El ITER pretende convertirse en el primer dispositivo de fusión experimental del mundo que produzca diez veces más energía de fusión que la energía utilizada para calentar el combustible*.
- La central de demostración europea DEMO será el sucesor de ITER y su objetivo es el de utilizar la energía de fusión para producir energía eléctrica neta, produciendo más electricidad que la utilizada en toda la central.

** Al ser un experimento que funciona durante un tiempo limitado al día, el ITER no convertirá su exceso de calor producido por la energía de fusión en electricidad. Eso sería posible con la tecnología existente, pero también aumentaría el coste y la complejidad de la instalación.*



Comparación de contenidos energéticos

Fuente: https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_density

Combustible	Megajulios por kilo	Equivalente a
Combustible de fusión (deuterio + tritio)	337.3 millones	1 kg D-T
Combustible de fisión (uranio enriquecido)	80.6 millones	4.2 kg uranio
Gas natural (metano)	53.6	6.3 millones kg metano
Carbón (antracita)	29.5	11.4 millones kg antracita

Comparación entre el JET, ITER y DEMO

Parámetro	JET (1997)	JET (2021)	ITER	EU-DEMO
Radio del plasma	2.96 m	2.96 m	6.2 m	9 m
Volumen del plasma	83 m ³	79 m ³	840 m ³	2519 m ³
Duración máxima del pulso de plasma	30 segundos, de los cuales 5 segundos* a alta potencia	30 segundos, de los cuales 5 segundos* a alta potencia	1000 segundos	2 horas
Campo magnético	3.45 Tesla	3.45 Tesla	5.3 Tesla	5.9 Tesla
Potencia de fusión	16 MW térmicos	10-15 MW térmicos durante 5 segundos**	500 MW** térmicos Durante más de 300 segundos (objetivo)	2000 MW térmicos, 500 MW de electricidad*** (objetivo)
Calentamiento externo del plasma	24 MW térmicos	40 MW térmicos	50 MW térmicos	50 MW térmicos
Rendimiento (potencia de fusión / calefacción externa)	0,67 (realizado) durante 0.15 segundos, o 0.18 durante 5 segundos **	De 0.25 a 0.375 durante 5 segundos** (propósito)	10 (objetivo)	40 (objetivo)
¿Produce electricidad?	No	No	No	Sí
Primer plasma	25 de junio de 1983	<<	Dic 2025	~2055
Primer plasma de tritio	9 de noviembre 1991 (primer plasma de D-T del mundo)	<<	Dic 2035	~2055

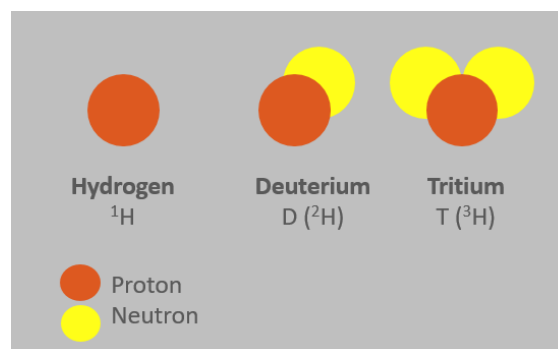
* La duración de los plasmas de alta energía del JET está limitada por sus electroimanes de cobre, que no están refrigerados criogénicamente. Los imanes superconductores utilizados en ITER y DEMO pueden permanecer activos todo el tiempo que sea necesario.

** EU DEMO tiene como objetivo obtener una potencia de fusión de 2000 MW, que se convierte en unos 2400MW de potencia térmica (debido a la multiplicación de energía que se produce en la pared interna de la cámara de vacío), que se convierte en ~900 MW de potencia eléctrica, que a su

vez se convierte en 500MW (objetivo) de potencia eléctrica a la red (~400 MW se recirculan para hacer funcionar los sistemas de la planta).

Deuterio-tritio: la mezcla ideal de combustible

El combustible de fusión ideal es una mezcla de los isótopos pesados del hidrógeno, el deuterio y el tritio* (D-T); que son hidrógeno con uno y dos neutrones adicionales en el núcleo, respectivamente. De todos los combustibles de fusión posibles, esta combinación es la que se fusiona con mayor facilidad y a menor temperatura. Esta reacción es la que se utilizará para crear un excedente de energía en forma de calor en ITER y de energía eléctrica neta en DEMO.



El deuterio y el tritio se fusionan a una temperatura de 150 millones de grados Celsius. En la reacción se libera helio (dos neutrones y dos protones), que es un gas no nocivo, y un neutrón de alta energía. El neutrón sirve para transportar la energía de fusión hacia los componentes de la pared del dispositivo, donde se deposita en forma de calor; mientras que el helio calienta el combustible circundante para mantener las condiciones de fusión.

La mezcla de combustible de fusión D-T rara vez se utiliza en los experimentos porque genera cantidades masivas de neutrones de alta energía. Cada neutrón se desplaza a 52.000 km/s, es decir, a un 17,3% de la velocidad de la luz, tan rápido que podría llegar a la Luna en menos de 8 segundos. Por tanto, un dispositivo que utilice D-T necesita un blindaje especial, lo que limita su uso. El tritio también requiere una manipulación específica porque es radiactivo. Además, es extremadamente raro porque decae a un ritmo del 50% cada 12,3 años (vida media de 12,3 años), de manera que es imprescindible recuperar todo el tritio que no se fusiona. Para los experimentos llevados a cabo en 2021, el JET disponía de 60 gramos de tritio, procedentes de un reactor canadiense de fisión nuclear CANDU, y que se han reutilizado durante los experimentos.

** El deuterio está disponible en abundancia en el agua de mar, pero el tritio es extremadamente raro. Por ahora, el tritio se produce en reactores de fisión nuclear. Las futuras centrales de fusión podrán producir su propio combustible de tritio utilizando los neutrones producidos en las reacciones de fusión, que al incidir sobre una capa de litio que se instala en la cara interior de la cámara de vacío que contiene la reacción, generan tritio y helio. Esta técnica se probará en el experimento internacional de fusión ITER.*

El JET (“Joint European Torus”): una instalación única que permite operar con D-T

El tokamak JET y su programa científico son un proyecto europeo, supervisado por los 30 miembros del consorcio EUROfusion.

JET es uno de los pilares del Programa de Fusión Europeo, y es el mayor y más exitoso experimento de fusión del mundo en cuyo diseño se inspira el proyecto ITER. Más de 30 laboratorios europeos utilizan el JET bajo la gestión de EUROfusion, y sus experimentos son diseñados y operados por más de 350 científicos e ingenieros de los miembros de EUROfusion.

La gran relevancia de la instalación JET del programa EUROfusion se debe a su posición como único tokamak* donde se puede utilizar el combustible D-T hasta que entre en funcionamiento ITER. Casi todos los experimentos de fusión del mundo utilizan plasmas exclusivamente de hidrógeno o deuterio. Estos experimentos permiten a los investigadores estudiar cómo producir y controlar los

plasmas de alta temperatura sin la enorme cantidad de neutrones rápidos que produce la reacción de deuterio-tritio, que implican la instalación de blindaje adicional.

Como además de utilizar el mismo combustible de fusión, los materiales de la pared de la cámara de vacío son los mismos materiales que se utilizarán en ITER, el JET ofrece unas condiciones únicas para preparar la operación de ITER. Por ejemplo, su capacidad única para operar utilizando plasmas de Deuterio y Tritio le permite explorar cómo esta mezcla de combustible altera los procesos de transporte y estabilidad en el plasma de fusión, en comparación con los plasmas de hidrógeno o deuterio.

** El diseño del tokamak JET representa el tipo de experimento de fusión más avanzado del mundo y se considera la estrategia más segura para obtener energía de fusión en el menor tiempo.*

Mejoras en el JET

Con el objetivo de convertir a JET en un banco de pruebas para ITER, los investigadores e ingenieros de EUROfusion han modificado este dispositivo hasta hacerlo lo más parecido posible al ITER. Estos cambios, llevados a cabo en los últimos 15 años, incluyen la sustitución del material de la pared interior de la cámara de vacío, originalmente de carbono, por berilio y wolframio, los materiales que se utilizarán en el ITER, así como la instalación de sistemas adicionales de calentamiento, medición y control. Las mejoras mencionadas han permitido a los investigadores, operadores y personal de apoyo técnico de la fusión adquirir experiencia en la operación de un tokamak en condiciones similares a las de ITER. Los resultados obtenidos permitirán además validar los modelos computacionales utilizados para predecir cómo se comportarán los plasmas en ITER. Todo ello proporciona una información crucial para la investigación europea sobre la fusión, el funcionamiento del ITER y el diseño de futuras centrales de fusión.

La generación de ITER

De los 300 científicos/as que trabajan en la campaña D-T en el JET, una cuarta parte pertenece a una generación más joven. Esto representa una oportunidad única para transferir conocimientos y experiencia de una generación de investigadores de fusión a la siguiente, que a su vez los compartirá con el resto del mundo en el ITER. La importancia de este relevo, en un proyecto multi-generacional como es la fusión, no puede sobreestimarse. Al fin y al cabo, será esta nueva generación, "la generación de ITER", la que dirija los experimentos D-T en el ITER a partir de 2035.

Objetivos de los experimentos con deuterio-tritio del JET en 2021

La campaña del JET con deuterio y tritio de 2021 ha sido la primera en la que se ha utilizado este tipo de combustible en los últimos 20 años. Estos experimentos han supuesto una oportunidad única para poner a prueba los modelos computacionales, nueva instrumentación para diagnosticar el plasma y técnicas de control desarrolladas para preparar la operación de ITER.

Los sistemas de medida de JET, muchos de ellos de última generación y algunos diseñados específicamente para estos experimentos, y la modelización avanzada permitirán a los investigadores de EUROfusion estudiar el comportamiento del plasma D-T con un nivel de detalle que no era posible en los experimentos anteriores. Estos experimentos, donde los datos experimentales se adquieren en intervalos de una millonésima de segundo, proporcionarán cantidades ingentes de datos, suficientes para alimentar la próxima década de investigación europea sobre la fusión.

La campaña experimental D-T tiene seis objetivos principales

- Demostrar una potencia de fusión de entre 10 y 15 megavatios sostenida durante cinco segundos*.
- Demostrar que se pueden generar y mantener los plasmas D-T en condiciones relevantes para ITER, en particular teniendo en cuenta el impacto de los materiales de la primera pared
- Demostrar claramente cómo los átomos de helio rápidos (o partículas alfa), producto de la reacción de fusión, afectan el comportamiento del plasma.
- Aclarar cómo los diferentes isótopos (deuterio y tritio) afectan al transporte de energía y partículas en el plasma.
- Estudiar la interacción entre el plasma caliente y la pared del dispositivo.
- Demostrar los esquemas de calentamiento por radio frecuencia que podrían utilizarse en los plasmas de D-T de ITER.

* Para entender mejor cómo se compara esto con los experimentos D-T de 1997 en el JET, véase más abajo.

Limitaciones del JET

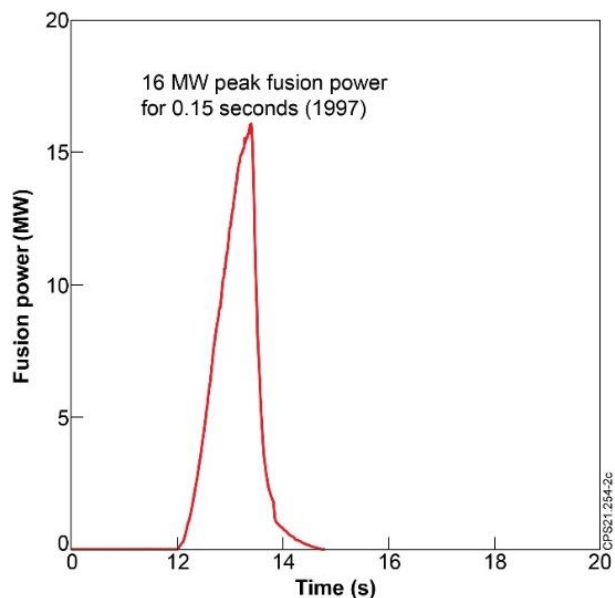
Una de las limitaciones del tokamak JET es la duración de sus plasmas de alta energía, que en la jerga de fusión se conocen como descargas. En el caso de JET la duración de las descargas está limitada a 5 segundos porque utiliza bobinas de cobre para generar el campo magnético que confina el plasma y estas necesitan refrigeración. El sucesor del JET, ITER, estará equipado con bobinas superconductores refrigeradas criogénicamente, que permiten mantener el campo magnético necesario de forma indefinida.

Por otra parte, el JET, a diferencia de su sucesor, ITER, no puede producir más calor de fusión que el necesario para mantener el plasma a temperaturas de fusión. Aunque esto no es realmente una limitación ya que, como instalación de investigación, el valor del JET no reside en maximizar la energía, sino en permitir a los científicos estudiar y optimizar los procesos físicos implicados en la generación y estabilidad de los plasmas.

Por último, un parámetro importante a tener en cuenta es el volumen total del plasma de JET, que está directamente relacionado la energía del plasma. Su volumen de plasma actual es de 79 m³, significativamente menor que el del ITER (840 m³). Las mejoras realizadas en el JET desde 1997 lo han acercado al ITER en cuanto a las características de la máquina y el comportamiento del plasma, pero han reducido ligeramente el volumen del plasma original, que era de unos 83 m³.

Récords de fusión del JET en 1997

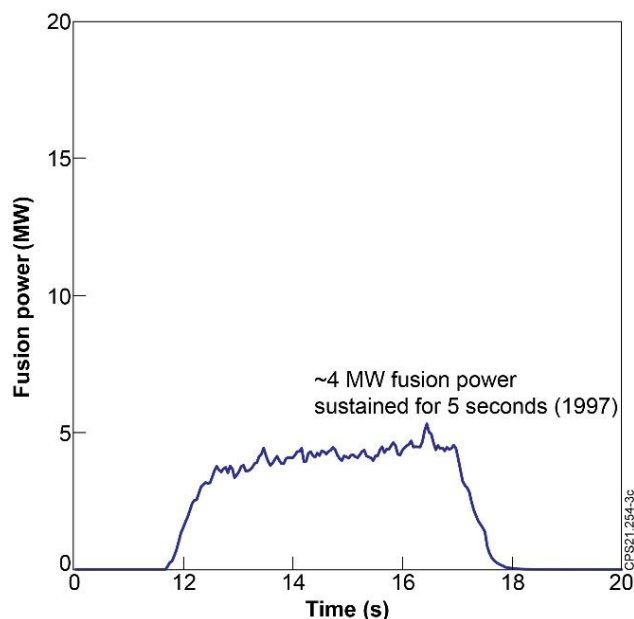
En 1997, el JET estableció tres récords mundiales de fusión.



El JET estableció un **récord de potencia máxima de fusión** de 16 megavatios durante una descarga de plasma muy corta e intensa, que duró sólo 0,15 segundos (véase el gráfico). Sin embargo, para los investigadores, el funcionamiento del ITER y el diseño de futuras centrales de fusión de demostración los regímenes de plasma "transitorio" como éste no son tan valioso como descargas estables con una duración más larga.

Esta descarga también estableció un récord de la magnitud comúnmente llamada "Q", o más exactamente Q_{plasma} , que representa el factor de

ganancia de la reacción de fusión. Q_{plasma} se calcula dividiendo la potencia de fusión generada por el plasma por la potencia de calentamiento que se utiliza. El JET alcanzó un **récord en Q** de 0,67, calculado a partir de una potencia de fusión de 16 megavatios (MW) dividida por 24 MW de potencia de calentamiento utilizada.

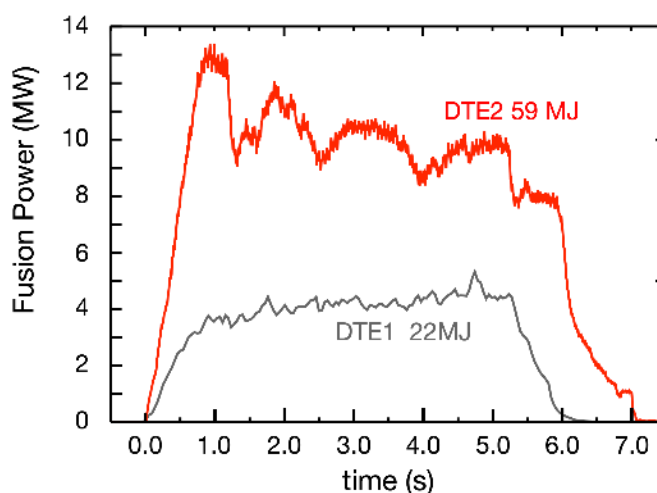


Aunque el parámetro Q_{plasma} es una medida importante del progreso de la investigación sobre la fusión, no tiene en cuenta las pérdidas que se producen al convertir la electricidad en calor y el calor en electricidad (con la tecnología actual es de entre el 30% y el 40%), ni tampoco la energía utilizada por el dispositivo experimental y todos sus sistemas asociados. Para que un dispositivo de fusión sea realmente rentable, tiene que alcanzar un factor Q_{plasma} de al menos 10, que es el objetivo del proyecto ITER. El objetivo de la central europea de demostración DEMO es alcanzar un factor $Q_{\text{plasma}} = 50$.

El tercer récord mundial del JET, eclipsado por la atención prestada al resultado de $Q = 0.67$, fue un **récord de energía de fusión total de un plasma en estado estacionario** que generó ~4.5 megavatios de potencia de fusión durante 5 segundos, para un total de 22 megajulios de energía de fusión creada (véase el gráfico).

Un nuevo récord de energía de fusión en 2021

En la campaña JET D-T de 2021, los investigadores trataron de batir el récord de fusión obtenido en los experimentos anteriores. Esto suponía generar y mantener plasmas estables que generaran unos 10 megavatios de potencia de fusión durante 5 segundos. Véase figura donde se comparan los dos records obtenidos en el JET, el obtenido en 1997 (DTE1) y en 2021 (DTE2).



La obtención de plasmas con altos niveles de energía de fusión, mantenidos durante 5 segundos, ha sido posible gracias a los conocimientos adquiridos y la experiencia acumulada durante los últimos

20 años en la operación de JET y al aumento en la potencia de calentamiento instalada, que pasó de 24 Megavatios en 1997 a casi 40 Megavatios* en la actualidad.

Aunque cinco segundos no parezcan mucho tiempo, esta duración del plasma es diez veces mayor que las escalas de tiempo relevante en los procesos físicos involucrados en mantener el plasma confinado por los campos magnéticos y, desde ese punto de vista representa un comportamiento estacionario. Será relativamente sencillo ampliar la duración del plasma en futuras dispositivos de fusión que utilicen bobinas superconductores que puedan mantener el campo magnético durante más tiempo.

* Aunque la capacidad de calentamiento instalada es de 40 megavatios, el máximo rendimiento alcanzado durante los experimentos de D-T de 2021 fue de unos 33 megavatios.