

Fusión Nuclear, una opción energética para el futuro

Alicia Medialdea Utande - Joaquín Sánchez Sanz

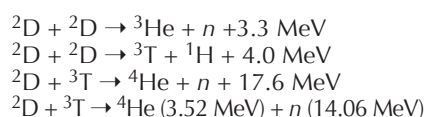
La fusión nuclear es la fuente de energía del Sol y las demás estrellas. En la Tierra, la abundancia y gran accesibilidad de los combustibles necesarios para llevar a cabo reacciones de fusión energéticamente rentables, la seguridad intrínseca del proceso y el buen comportamiento ambiental de la fusión la convierten en una atractiva opción energética para el futuro de la humanidad. La gran cooperación en el ámbito europeo y mundial está logrando que la investigación en fusión avance a pasos agigantados aportando prometedores resultados.

Nuclear fusion is the energy source of the Sun and the rest of stars. The great availability of deuterium on Earth, the inherent safety of the reactions involved and the intrinsic environmental respect make fusion an attractive energy source for the future of mankind. International promising contributions are making Fusion Science and Technology progress by leaps and bounds to achieve its long term goal of cost-effective energy-producing plasmas.

INTRODUCCIÓN

La fusión es la reacción nuclear que proporciona energía al Sol y demás estrellas. En la Tierra, la fusión nuclear se presenta como una gran apuesta energética para el futuro ya que aporta ventajas importantes como el hecho de que los combustibles primarios son abundantes y ampliamente accesibles, no genera gases de efecto invernadero y los residuos que se puedan generar no representarán una carga para las generaciones futuras.

En el interior del Sol, la densidad y la temperatura son tan elevadas que se dan procesos autosostenidos de reacciones termonucleares. En la Tierra, para lograr que dos núcleos se fusionen es necesario alcanzar temperaturas de hasta 10 veces la temperatura del Sol. Al intentar acercar dos núcleos, éstos se repelen debido a la fuerza electrostática; para vencer esa fuerza de repulsión es necesario que los núcleos se acerquen lo suficiente como para que las fuerzas nucleares de atracción dominen sobre la repulsión electrostática. Esto se puede lograr proporcionando gran cantidad de energía térmica a los núcleos lo que hace que colisionen a gran velocidad. Las reacciones de fusión que involucran núcleos ligeros se producen más fácilmente. En el Sol, el ciclo del hidrógeno se puede resumir en una fusión de hidrógeno en helio pero en la Tierra, las reacciones en las que interviene el hidrógeno requerirían una temperatura inalcanzable para resultar energéticamente eficientes por lo que se recurre a un isótopo del hidrógeno, el deuterio ($^2\text{H}_1$), cuyas posibles reacciones de fusión son las siguientes:



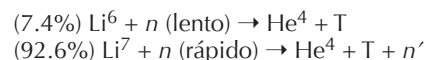
La figura 1 muestra una representación de las secciones eficaces de dichas reacciones en función de la temperatura, donde se puede apreciar claramente que la reacción más probable será la de fusión deuterio-tritio (D-T) debido a su elevada sección eficaz. Esta reacción genera un neutrón de alta energía y Helio.

Combustibles para la fusión

El deuterio y el tritio son dos isótopos del hidrógeno. Cada litro de agua contiene 33 mg de deuterio cantidad que, al fusionarse con tritio, puede generar

el equivalente a 340 l de gasolina. En la Tierra, hay suficiente deuterio en el agua como para proporcionar energía durante miles de millones de años.

El tritio tiene un tiempo de vida medio de 12.3 años por lo que es difícil encontrarlo en la naturaleza y tiene que ser producido de forma artificial. El tritio se genera a partir del litio dentro del reactor de fusión como resultado del choque de los neutrones liberados en la reacción de fusión con una pared de litio según las siguientes reacciones:



Por tanto, si se crea una envoltura de litio para la zona en la que se producen las reacciones de fusión, los neutrones muy rápidos (14 MeV) resultantes de la fusión podrían inducir varias reacciones en el Li^7 e ir perdiendo energía antes de ser absorbidos definitivamente en el Li^6 . En cada una de esas reacciones nucleares se produce un núcleo de tritio. Esta envoltura de litio recibe el nombre de *Breeding Blanket*. Actualmente se está trabajando en el desarrollo de estos breeding blankets para obtener sistemas reproductores de tritio que permitan que los futuros reactores de fusión sean autosuficientes en tritio. Por tanto, el combustible necesario para llevar a cabo reacciones de fusión no es el tritio sino el litio, que se encuentra de forma abundante en la corteza terrestres así como disuelto en el agua de mar.

A las temperaturas a las que se debe trabajar para lograr que se produzca esta reacción de fusión, los átomos se separan

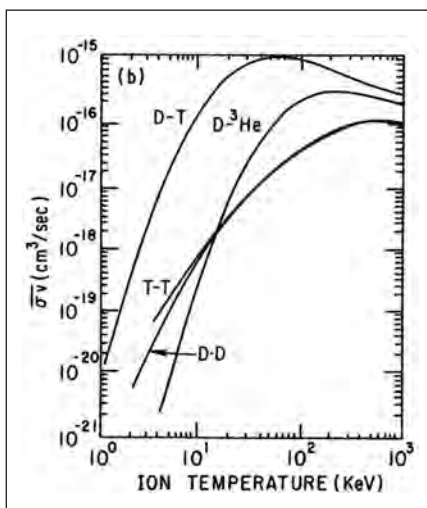


Figura 1. Secciones eficaces de las reacciones de fusión.

en núcleos y electrones. Es lo que se conoce con el nombre de *plasma*.

Para que un reactor de fusión funcione en estado estacionario es necesario mantener la temperatura del plasma en los altos valores requeridos por la reacción y por tanto, será necesario aportar energía al mismo ritmo que el plasma la pierde. Estas pérdidas se pueden producir por distintos motivos, por escape de partículas, en particular las más rápidas o por emisión de radiación electromagnética, sobre todo la "radiación de frenado" o bremsstrahlung producida por la desaceleración de las partículas cargadas, electrones en este caso, cuando son desviados en presencia de otras partículas cargadas. La pérdida de energía por bremsstrahlung depende de la densidad del plasma y de su temperatura. Los criterios de Lawson establecen las condiciones necesarias para que se produzca la ignición en un plasma. Se debe cumplir además un valor mínimo para el triple producto de la densidad electrónica del plasma, n_e , la temperatura, T , y el tiempo de confinamiento, τ_e , que en el caso de la reacción deuterio-tritio es:

$$n_e T \tau_e \geq 10^{21} \text{ KeV s/m}^3$$

Otros factores, como la presencia de impurezas de alto número atómico puede aumentar considerablemente la pérdida de energía por bremsstrahlung.

CONFINAMIENTO DEL PLASMA

Para poder controlar estos factores determinantes en la obtención de energía por fusión es necesario aislar el combustible de su entorno frío, es decir, se debe

confinar el plasma. Esto se ha intentado históricamente mediante dos líneas de desarrollo: confinamiento inercial y confinamiento magnético.

Confinamiento inercial

El confinamiento inercial aprovecha la propia inercia de la materia. Se trata de ceder energía al plasma de una manera tan rápida que la fusión se alcance antes de que al material le haya dado tiempo a expandirse. En la práctica, se comprime una microesfera de 1-0,1 mm de diámetro de deuterio y tritio hasta densidades del orden de 10^{32} partículas/cm³ utilizando iluminación intensa por medio de láseres o iones acelerados fuertemente, el material en la superficie se evapora (ablación) y por conservación de la cantidad de movimiento, el resto del material se acelera en dirección radial hacia el centro de la esfera produciéndose una onda de choque que comprime el gas. Por efecto de la convergencia de esta onda de choque, se produce un calentamiento del gas y, consecuentemente, la reacción de fusión.

Actualmente están en marcha dos proyectos de investigación con grandes instalaciones de láseres: NIF (National Ignition Facility) en EEUU, que ya se encuentra operando y LMJ (Laser Megajoule) en Francia, cuya entrada en funcionamiento está prevista para 2010.

Fusión por confinamiento magnético

El confinamiento magnético es la línea que se ha elegido en el programa de la Unión Europea de cara al desarrollo de la fusión como fuente energética. Se basa en el hecho de que el combustible, a las temperaturas en las que se trabaja para conseguir reacciones de fusión, se encuentra en estado de plasma y por tanto está compuesto por partículas cargadas eléctricamente. Como se ha mencionado previamente, en estado de plasma los

átomos se encuentran separados en núcleos y electrones que forman un conjunto de cargas que globalmente puede considerarse neutro o cuasi neutro. Al someter esta "sopa de cargas" a un campo magnético, la fuerza de Lorentz, $F = qv \times B$, permite que las partículas cargadas sigan las líneas de campo pero obligándolas a describir trayectorias espirales en torno a ellas.

Estas líneas de campo deben ser cerradas, por lo que se emplea una geometría toroidal pero si eso se hace dejando las líneas de campo paralelas al eje del toro, se genera un gradiente de campo magnético que hace que las partículas escapen en microsegundos. Para evitar este efecto es necesario obligar a las líneas de campo a torsionarse a lo largo del toro en vez de cerrarse sobre si mismas, produciendo lo que denominamos *transformada rotacional*.

Dispositivos de confinamiento magnético

Existen dos tipos principales de dispositivos de confinamiento magnético que emplean esta distribución de las líneas de campo, Stellarator y Tokamak; la diferencia entre los dispositivos tokamak y los stellarator está en la forma de obtener la componente de campo magnético que da lugar a la transformada rotacional. Los tokamaks emplean un transformador central, por el contrario, en los stellarators, esa componente del campo magnético se genera utilizando bobinas externas adicionales. Al obtenerse la configuración de campo magnética sólo con bobinas externas, esto supone un diseño de bobinas mucho más complejo que en el caso de los tokamaks y por lo tanto, una mayor dificultad de construcción. En un stellarator, las pequeñas imperfecciones de construcción pueden suponer la degradación del confinamiento. Esta es la principal desventaja de los stellarators frente a los tokamaks. En los años 70, los stellarators sufrieron un frenazo en su desarrollo debido a las limitaciones de la ingeniería disponible que no tenían la precisión necesaria para obtener plasmas de alta calidad. Los avances de ingeniería de las décadas posteriores permitieron la construcción de stellarators capaces de proporcionar tiempos de confinamiento similares a los obtenidos en tokamaks.

Este transformador sirve además para calentar el plasma por efecto Joule. Las bobinas magnéticas empleadas en un tokamak son más sencillas que las de un stellarator, lo que supone menos complicaciones en la construcción. Esta es la principal razón por la que los tokamak se encuentran en un estado más desarrollado, aunque no exento de dificultades que

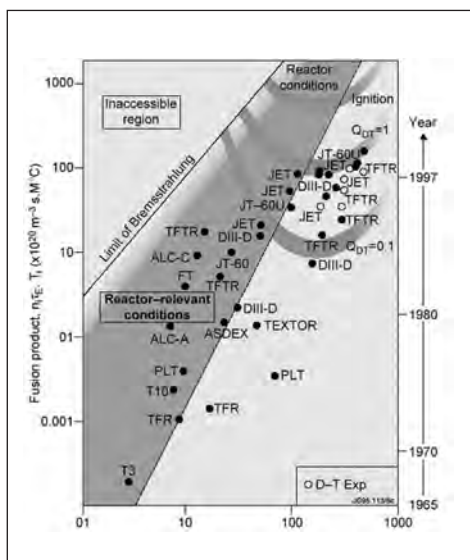


Figura 2. Representación de los distintos dispositivos de fusión por confinamiento magnético según las condiciones alcanzadas.

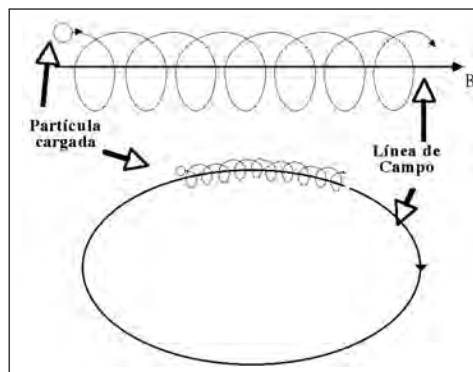


Figura 3. Las partículas cargadas sometidas a un campo magnético, siguen las líneas de campo.

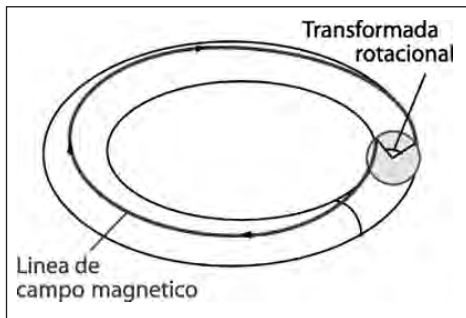


Figura 4. Transformada rotacional del campo magnético.

superar de cara a la construcción de una planta productora de energía basada en este concepto.

Ambos conceptos, tokamak y stellarator, fueron concebidos prácticamente de forma simultánea. El primer tokamak, acrónimo de las palabras rusas toroidalnaya kamera ee magnitnaya katushka (cámara toroidal y bobina magnética), fue propuesto por A. Sakharov e I. Tamn en 1951 y desarrollado en el Instituto Kurchatov de Moscú. No fue hasta 1958, en la conferencia "Átomos por la Paz" cuando fue descrito y se hicieron públicos los excelentes resultados obtenidos. Estos prometedores resultados dieron lugar a la aparición de dispositivos similares en todo el mundo: Alcator, ISX, PLT, Doublet en EEUU; T3, TM-3, T10 en Rusia; TFR en Francia; ASDEX en Alemania, etc. El desafío que tuvieron que afrontar los tokamak en los años 70 fue el aumento de la temperatura de los iones, para lo que desarrollaron sistemas de calentamiento adicional basados en la inyección de partículas neutras aceleradas o en la inyección de ondas de radiofrecuencia. En los años 80 se hicieron grandes mejoras en el confinamiento de los tokamak y se desarrolló el concepto de *divertor* para el control de las impurezas. El divertor es una cámara auxiliar a la que se llevan las líneas de campo del borde de manera que las impurezas quedan recogidas lejos del plasma principal. Además del uso del divertor, se logran mejoras en la estabilidad del plasma que aportan una mejora significativa de todos los parámetros mediante la utilización de secciones no circulares para el plasma. En 1982, el tokamak ASDEX, del Instituto Max Planck en Garching, Alemania, descubrió el denominado H-mode, basado en una barrera de transporte en el borde que aparece como consecuencia de una cizalladura en la rotación del plasma que rompe las estructuras turbulentas. Este régimen, que aparece en plasmas en los que se ha usado un divertor a alta densidad de potencia adicional, se va produciendo en otras máquinas y se convierte una situación ideal para alcanzar mejores valores en el triple producto establecido por los criterios de Lawson.

EL GRAN TOKAMAK JET Y EL PROYECTO ITER

En 1978 se firmó un acuerdo conjunto coordinado por EURATOM, que contemplaba la construcción del gran tokamak JET (Joint European Torus). JET comenzó su operación en 1983 y pasó rápidamente a ser el proyecto principal del Programa Europeo de Fusión. En su construcción se tuvo en cuenta que este dispositivo debería aprovechar los descubrimientos que aparecieran durante su, previsiblemente, larga vida. El diseño estuvo condicionado además por la necesidad de operar con tritio, lo que implica determinados elementos de seguridad. Además, el diseño era flexible de manera que posteriormente, permitiera su modificación y el aumento de algunos de los parámetros iniciales. En 1991 se realizan los primeros experimentos con deuterio-tritio, obteniendo reacciones de fusión y generando una potencia de 2MW. En 1997, JET establece el record de potencia generada (16 MW) así como el de energía (20 MJ: 4 MW durante 5 segundos).

Los prometedores resultados obtenidos en los grandes tokamaks en cuanto a la física del plasma y los métodos de calentamiento, así como el desarrollo de tokamaks superconductores están asentando una sólida base para dar el siguiente gran paso en la investigación en fusión por confinamiento magnético. En su cumbre de noviembre de 1985, los presidentes Reagan y Gorbachov llegaron a un acuerdo para colaborar en un proyecto de investigación de interés común, la fusión nuclear como fuente energética para el futuro. Esta colaboración se extendió a la Unión Europea y Japón y nació el proyecto ITER (Internacional Termonuclear Experimental Reactor).

El proyecto ITER tiene como objetivo demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la fusión como fuente de energía medioambientalmente aceptable para el futuro.

LOS STELLARATORS Y EL PROGRAMA ESPAÑOL DE FUSIÓN

La ausencia de corriente en el plasma en un stellarator, supone una desventaja en la construcción de sus bobinas frente al tokamak pero es al mismo tiempo la gran ventaja frente a estos ya que, al no emplear utilizar transformador, puede operar en estado estacionario. En un tokamak, al tener que obtener la corriente del plasma por inducción, esto implica que el régimen de funcionamiento no puede ser sino pulsado. Un stellarator que emplee bobinas magnéticas superconductoras puede mantener el plasma en una configuración estable por tiempo indefinido, realizando tan sólo las paradas necesarias de mantenimiento y repa-

ración del sistema; condición necesaria de cara a la construcción de un reactor comercial de energía de fusión. Si bien el stellarator reúne las propiedades para ser mejor candidato como futuro reactor de fusión comercial, el tokamak, gracias a su simplicidad, se ha desarrollado más rápidamente y está más cerca de alcanzar los objetivos de ignición y rentabilidad energética, lo que lo convierte en una mejor alternativa para un reactor experimental en el que llevar a cabo estudios en el comportamiento de plasmas y sobre el que realizar mejoras tecnológicas.

En el momento de la integración española en la Unión Europea, en la década de los años 80, había más de 20 dispositivos de tokamak funcionando en Europa y fue en esta década cuando entró en funcionamiento el tokamak JET, el tokamak más grande del mundo, perteneciente a la Unión Europea, con un coste de unos 500 millones de euros. Estaban además en proyecto tres tokamaks de tamaño medio con costes de inversión de aproximadamente 100 millones de euros. España deseaba sumarse al Programa de Fusión Europeo pero para entrar de forma competitiva en el campo de los tokamaks, sería necesaria una inversión española entorno a los 100 millones de euros. Otra alternativa era la de proponer un dispositivo competitivo en una línea de investigación menos explotada, como era el caso de los dispositivos de tipo stellarator, o bien, una participación más modesta era la de aportar personal para JET y otros proyectos y asumir ocasionalmente la construcción de algunos sistemas auxiliares. Finalmente, España optó por sumarse al Programa Marco de investigación europeo con la propuesta del proyecto de fusión magnética TJ-II que incluía la construcción del Stellarator TJ-II. La propuesta de este proyecto tenía la doble finalidad de

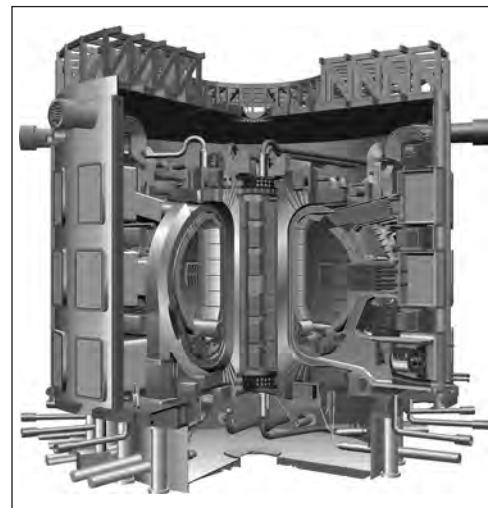


Figura 5. Diseño del Tokamak ITER.