

fusión

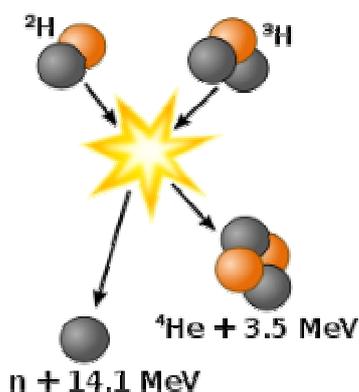
# FUSIÓN NUCLEAR:

CONCEPTOS BÁSICOS

---

[www.luispastor.es](http://www.luispastor.es)

# Fusión nuclear: Conceptos



Fusión de deuterio con tritio, por la cual se producen helio 4, se liberan un neutrón y se generan 17,59 MeV de energía, como cantidad de masa apropiada convertida de la energía cinética de los productos, según la fórmula  $E = \Delta m c^2$ .

La fusión nuclear es una reacción en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos, deuterio y tritio, se unen para formar otro núcleo más pesado, liberando una gran cantidad de energía. Este proceso desprende energía porque la masa del núcleo pesado es menor que la suma de las masas de los núcleos más ligeros. Este defecto de masa que se transforma en energía, se relaciona mediante la fórmula:  $E = \Delta m c^2$ , aunque el defecto de masa es muy pequeño y la ganancia por átomo es muy pequeña, se ha de tener en cuenta que es una energía muy concentrada, en un gramo de materia hay millones de átomos, con lo que poca cantidad de combustible genera mucha energía.

Un ejemplo claro lo vemos a diario en la energía solar que tiene su origen en la fusión de núcleos de hidrógeno, generándose helio y liberándose una gran cantidad de energía que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. Las temperaturas en las estrellas están en el entorno de los 15 millones de grados Celsius. Por ello a las reacciones de fusión se les denomina termonucleares.

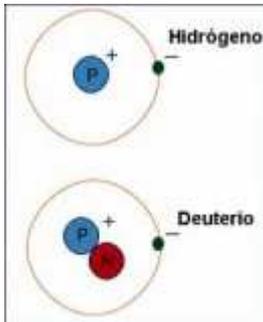
El aprovechamiento por el hombre de la energía de fusión pasa por la investigación y el desarrollo de sistemas tecnológicos que cumplan dos requisitos fundamentales: calentar y confinar. Calentar para conseguir un gas sobrecalentado (plasma) donde los electrones salgan de sus órbitas y los núcleos puedan ser controlados por un campo magnético; y 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.

## Descripción general

### Requisitos

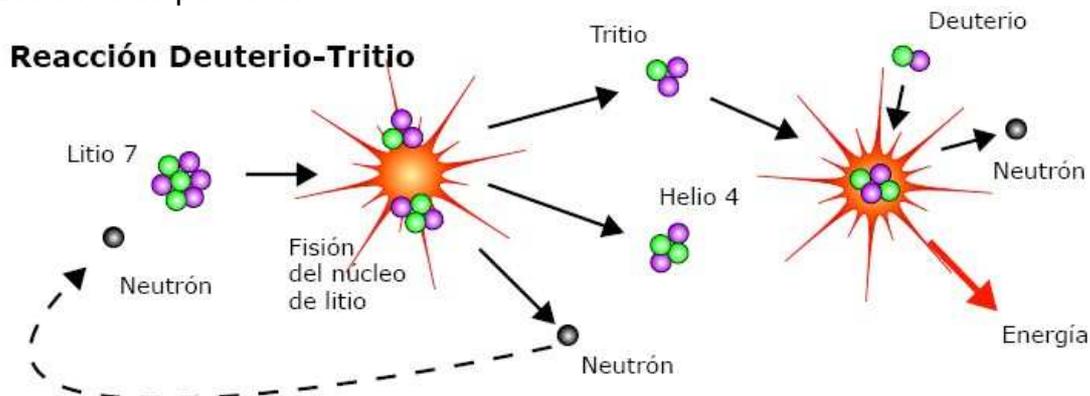
- **Temperatura muy elevada** para separar los electrones del núcleo y que éste se aproxime a otro venciendo las fuerzas de repulsión electrostáticas. La masa gaseosa compuesta por electrones libres y átomos altamente ionizados se denomina PLASMA.
- **Confinamiento** necesario para mantener el plasma a elevada temperatura durante un tiempo mínimo.
- **Densidad del plasma suficiente** para que los núcleos estén cerca unos de otros y puedan dar lugar a reacciones de fusión.

Los elementos atómicos empleados normalmente en las reacciones de fusión nuclear son el Hidrógeno y sus isótopos: el Deuterio (D) y el Tritio (T). Las reacciones de fusión más importantes son:



El Deuterio es un isótopo estable del hidrógeno formado por un protón y un neutrón. Su abundancia en el agua es de un átomo por cada 6.500 átomos de Hidrógeno, lo que significa que con el contenido de deuterio existente en el agua del mar -34 gramos por metro cúbico- es posible obtener una energía inagotable mediante la fusión nuclear, y cuyo contenido energético es tal que, la energía obtenida por la fusión nuclear de estos átomos de deuterio es equivalente aproximadamente a la energía obtenida con

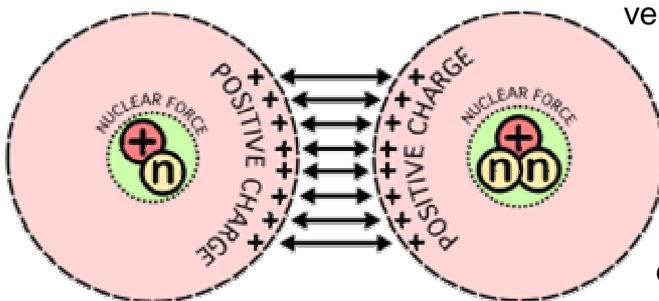
250 litros de petróleo.



El otro elemento empleado en la fusión nuclear es el Tritio, es el isótopo inestable o radiactivo del átomo de hidrógeno. Está compuesto por un protón y dos neutrones y se desintegra por emisión beta con relativa rapidez, y aunque es escaso en la naturaleza, puede ser generado por reacciones de captura neutrónica con los isótopos del Litio, material abundante en la corteza terrestre.

El neutrón producido en la reacción D-T puede activar, volver radioactiva, la estructura del reactor y el moderador por lo que es importante el desarrollo de materiales que sufran poca activación y que, una vez activados, la pierdan rápidamente.

Para que tengan lugar estas reacciones debe suministrarse a los núcleos la energía cinética necesaria para que se aproximen los núcleos reaccionantes,



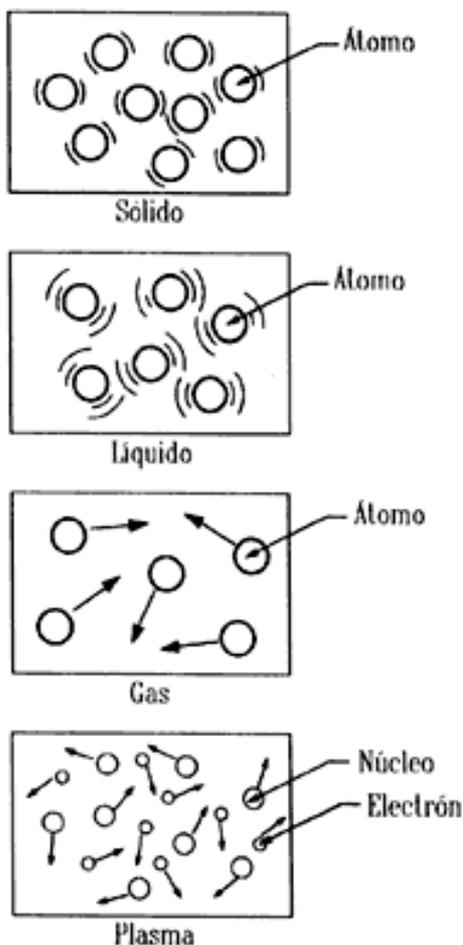
venciendo así las fuerzas de repulsión electrostáticas. Para ello se necesita calentar el gas hasta temperaturas muy elevadas ( $10^7$  ó  $10^8$  °C), como las que se supone que tienen lugar en el centro de las estrellas.

A grandes distancias, dos núcleos se repelen debido a la fuerza de repulsión electrostática entre sus protones, cargados positivamente.

En distancias cortas la interacción nuclear fuerte (atracción) es mayor que la fuerza electrostática (repulsión). Así, la mayor dificultad técnica para la fusión es conseguir que los núcleos se acerquen lo suficiente para que ocurra este fenómeno.

El gas sobrecalentado a tan elevadas temperaturas, recibe el nombre de plasma, que constituye el cuarto estado de la materia -estado fluido similar al estado gaseoso- es un gas ionizado, compuesto por electrones, cationes y neutrones; todos ellos separados entre sí y libres; por eso es un excelente conductor.

Para comprender qué es el plasma imaginemos una barra de plomo.



Inicialmente la barra se encuentra en estado sólido, lo cual significa que sus átomos están en posiciones fijas alrededor de las cuales sólo pueden vibrar ligeramente. Si la calentamos proporcionamos energía a los átomos de la barra y la magnitud de las vibraciones aumentará hasta llegar a una transición de fase en la cual la barra de plomo se funde, pasando al estado líquido. Si en este estado líquido continuamos proporcionando energía, calentando aún más, los átomos de plomo finalmente adquirirán tanta energía que dejarán de formar un plomo líquido para constituir un gas de átomos de plomo. Finalmente, si en el estado gaseoso continuamos proporcionando energía a los átomos del gas, los electrones de éstos saldrán de sus órbitas atómicas y terminaremos con un gas formado por núcleos y electrones libres; esto es lo que llamamos plasma.

El plasma presenta características propias que no se dan en los sólidos, líquidos o gases, por lo que es considerado otro estado de agregación de la materia. Como el gas, el plasma no tiene una forma definida o un volumen definido, a no ser que esté encerrado en un contenedor; pero a diferencia del gas en el que no existen efectos colectivos importantes, el plasma bajo la influencia de un campo magnético puede formar estructuras como filamentos, rayos y capas dobles. Los átomos de este estado se mueven libremente; cuanto más alta es la temperatura más rápido se mueven los átomos en el gas y en el momento de colisionar la velocidad es tan alta que se produce un desprendimiento de electrones.

Calentar un gas puede ionizar sus moléculas o átomos (reduciendo o incrementado su número de electrones para formar iones), convirtiéndolo en un plasma. La ionización también puede ser inducida por otros medios, como la aplicación de un fuerte campo electromagnético, mediante un láser o un generador de microondas, y es acompañado por la disociación de los enlaces covalentes, si están presentes.

El plasma es el estado de agregación más abundante de la naturaleza, y la mayor parte de la materia en el Universo visible se encuentra en estado de plasma.

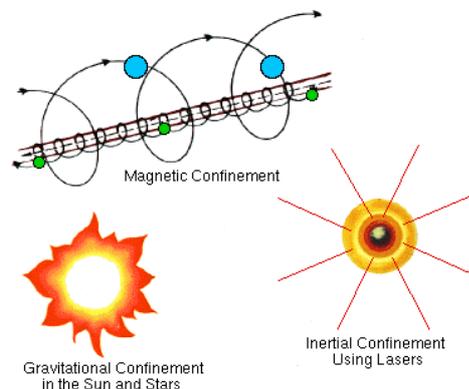


El sol quizás sea el ejemplo de plasma más identificable. Los rayos y relámpagos son un plasma que alcanza una temperatura de 27.000°C. Las LCF son ejemplo de aplicación del plasma.

Uno de los requisitos de cualquier reactor de fusión nuclear es confinar dicho plasma con la temperatura y densidad lo bastante elevadas y durante el tiempo justo, a fin de permitir que ocurran suficientes reacciones de fusión nuclear, evitando que escapen las partículas, para obtener una ganancia neta de energía. Esta ganancia energética depende de que la energía necesaria para calentar y confinar el plasma, sea menor que la energía liberada por las reacciones de fusión nuclear. El factor de ganancia normalmente se expresa con la letra Q, el objetivo: la ignición, un plasma que se calienta por la energía de fusión sin cualquier entrada externa, corresponde a Q infinito.

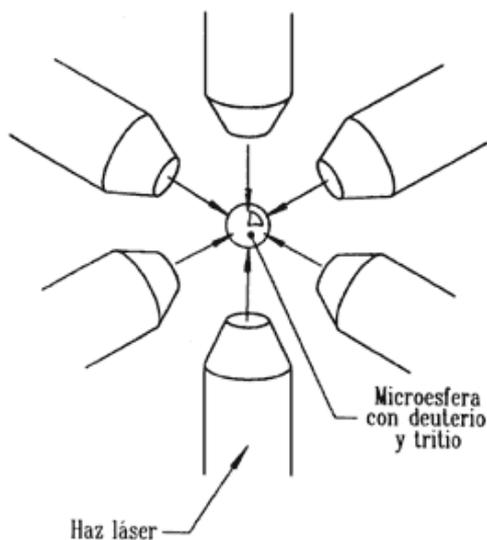
El Sol utiliza la gravedad para contener el plasma de hidrógeno, pero en la Tierra no tenemos ni tanto plasma ni tanto sitio, por lo que hay que conformarse con soluciones más modestas. Los confinamientos convencionales, como las paredes de una vasija, no son posibles debido a las altas temperaturas del plasma. Por este motivo, se han desarrollado dos importantes métodos de confinamiento:

- Fusión nuclear por confinamiento inercial (FCI): Tecnología para producir la fusión termonuclear aprovechando la inercia mecánica de pequeñas esferas sólidas y densas de Deuterio-Tritio calentándolas hasta la temperatura de fusión mediante la inyección de breves e intensos pulsos de energía, radiación láser o partículas muy energéticas procedentes de un acelerador. El bombardeo de estas esferas provoca su calentamiento y la

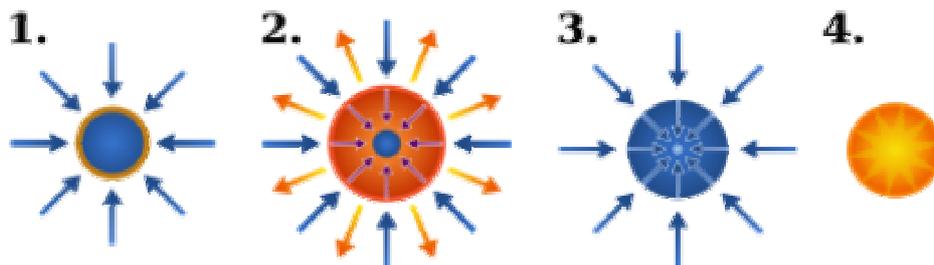


posterior compresión de su superficie a una altísima temperatura, formando un plasma caliente.

El nombre de *confinamiento inercial* aplicado a este método es debido a lo siguiente. La primera ley de Newton (que también se conoce como *principio de inercia* y que originalmente fue propuesto por Galileo), establece que: todo cuerpo en reposo, o movimiento uniforme no acelerado, permanece en ese estado a menos de que sea perturbado por alguna fuerza externa. Por tanto, debido a que la fuerza producida por el haz láser es *simétrica* (en todas direcciones alrededor de la esfera) éste no ejerce fuerza neta resultante en la microsfera. Por otra parte, el peso de la esfera es tan pequeño que durante el breve lapso en que es irradiada por el láser, ésta prácticamente no tiene tiempo de caer, y para cualquier fin práctico podemos considerarla inmóvil. Es decir, que durante las millonésimas de segundo en que el proceso de irradiación láser ocurre, la microsfera, por su propia inercia, permanece inmóvil y es así como en ese breve instante el plasma es confinado.



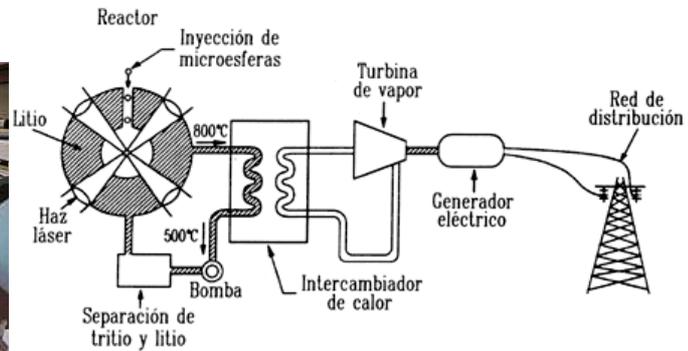
Consiste en crear un medio tan denso que las partículas no tengan prácticamente ninguna posibilidad de escapar sin chocar entre sí. Súbitamente impactadas por poderosos haces luminosos creados por láser, una pequeña esfera de un compuesto sólido de deuterio y tritio implosiona bajo los efectos de la 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.



Proceso de implosión, comienzo de la fusión y liberación de energía de una cápsula de combustible de fusión:

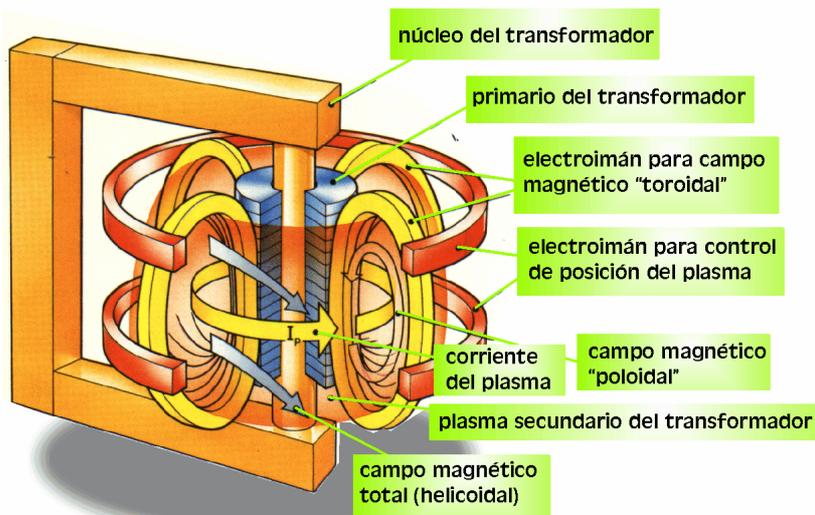
1. El rayo láser calienta rápidamente la superficie del "target", generando plasma alrededor.
2. El objetivo es comprimido debido a la expulsión del material que lo rodeaba en su superficie.
3. Se produce la implosión de la micro cápsula, alcanzando una densidad de 20 veces la del plomo y se produce la ignición a 100.000.000 °C

4. La reacción termonuclear se distribuye por el combustible, provocando una salida de energía mayor que la energía entrante, después se genera un efecto parecido al de una supernova y el target quedara quemado.



El confinamiento inercial ha progresado hasta el punto de disponer de unos cuantos pulsos para fusionar un objetivo

- Fusión nuclear por confinamiento magnético (FCM): Tecnología para provocar la fusión manteniendo el plasma de Deuterio-Tritio confinado mediante un campo magnético de la configuración e intensidad adecuadas. Con el uso de los campos electromagnéticos se consigue que las partículas del plasma se aceleren, evitando que sigan caminos aleatorios y puedan reaccionar con más facilidad. Las fases de calentamiento y confinamiento se hacen por separado. El confinamiento magnético más

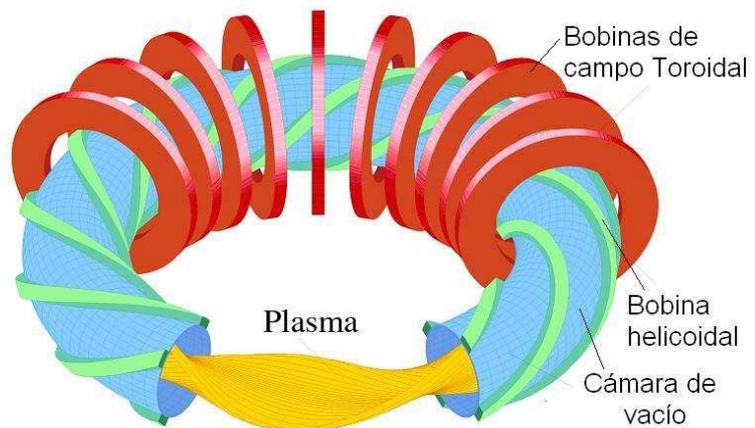


simple es un campo magnético uniforme, donde las partículas realizarán trayectorias espirales alrededor de la dirección del campo. Esto sería suficiente para confinar las partículas en sólo dos direcciones. Para evitar la pérdida de las partículas a lo largo del eje del campo hay dos posibles opciones: Se puede construir un toro –configuración cerrada – o se puede

simple es un campo magnético uniforme, donde las partículas realizarán trayectorias

espirales alrededor de la dirección del campo. Esto sería suficiente para confinar las partículas en sólo dos direcciones. Para evitar la pérdida de las partículas a lo largo del eje del campo hay dos posibles

opciones: Se puede construir un toro –configuración cerrada – o se puede



crear en los extremos una zona de alta densidad de líneas de campo magnético que reflejaría las partículas dentro de la región donde el campo es inferior. Serían los espejos magnéticos.

## Las ventajas de la fusión nuclear

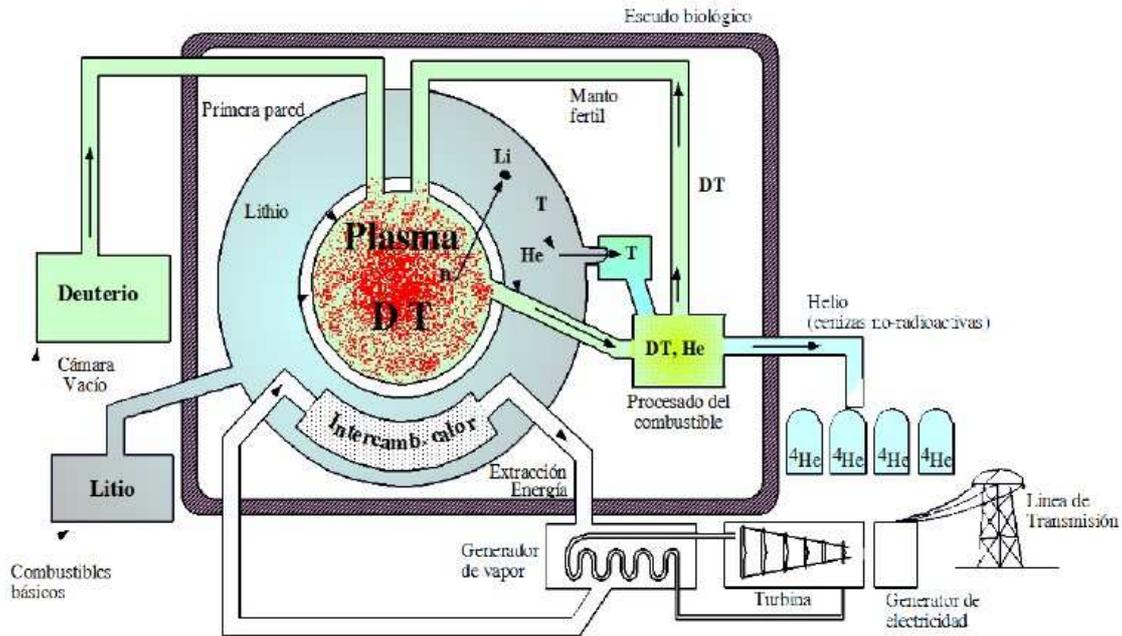
- La fusión nuclear es una **energía limpia ya que no produce gases nocivos y genera residuos nucleares de muy baja actividad**. La pared del reactor de fusión, expuesta a las radiaciones provenientes del plasma, sí se vuelve radioactiva después de un tiempo, pero la mayor parte de esta radioactividad desaparecerá en un plazo de unos cincuenta años, de tal modo que los reactores de fusión no suponen una carga para las generaciones futuras.
- Un reactor de **fusión nuclear es intrínsecamente seguro** ya que la propia reacción se detiene al cortar el suministro de combustible. No depende de ningún sistema externo de seguridad susceptible de errores.
- Es una **fuentes inagotable de energía** ya que el Deuterio existe en abundancia en la naturaleza y el Tritio es generado dentro del propio reactor a partir del Litio.

La meta de la investigación internacional en el campo de la fusión es diseñar un prototipo de central de generación de energía de fusión, que cumpla con los requisitos de la sociedad: que sea seguro, fiable, sostenible, no dañe el medioambiente y económicamente viable.

## Reactores de fusión

No existen por el momento centrales comerciales que produzcan electricidad a partir de la fusión. Sin embargo, los conocimientos adquiridos en la operación de grandes dispositivos experimentales y los estudios teóricos realizados permiten tener una idea bastante clara de cómo serán los reactores comerciales de fusión. Como ocurre con las centrales de fisión, pueden distinguirse dos áreas claramente diferenciadas. Por un lado está el reactor de fusión propiamente dicho, donde se producen las reacciones de fusión que generan calor y por el otro, los intercambiadores de calor, turbinas y generadores, que producen la electricidad como en cualquier central térmica.

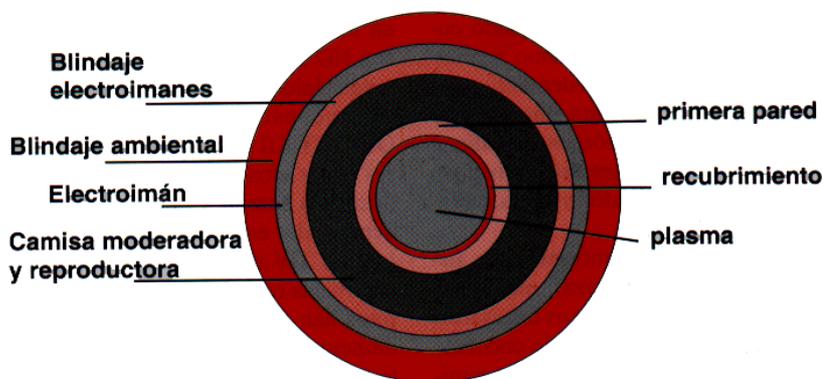
Uno de los problemas fundamentales para el desarrollo de los reactores de fusión es la producción de materiales apropiados para los distintos componentes del reactor. La identificación de dichos componentes y los requisitos que estos deben satisfacer, se encuentran íntimamente ligados a las características de las reacciones de fusión empleadas. A continuación se describen los componentes fundamentales de un reactor por confinamiento magnético, que utilice la reacción deuterio-tritio.



**Figura 4. Esquema de una central de fusión nuclear.**  
**(Fuente: CIEMAT Laboratorio Nacional de Fusión Nuclear).**

La cámara de reacción contiene el combustible en estado de plasma y en ella tienen lugar las reacciones de fusión. Su cara interna se halla en contacto con las partículas de plasma que escapan al confinamiento, por lo que debe ser recubierta con materiales especiales que la protejan y eviten que el plasma se contamine. Se trata además de que estos materiales retengan la menor cantidad posible de tritio, que es radiactivo y constituye el mayor peligro en caso de accidentes.

Por el momento, los materiales más utilizados para el recubrimiento de la cara interna son grafito, berilio y tungsteno.



La camisa moderadora y reproductora rodea la cámara de reacción y tiene dos funciones: la primera es extraer la energía liberada para generar vapor. La segunda es producir tritio a partir de litio. El tritio es luego

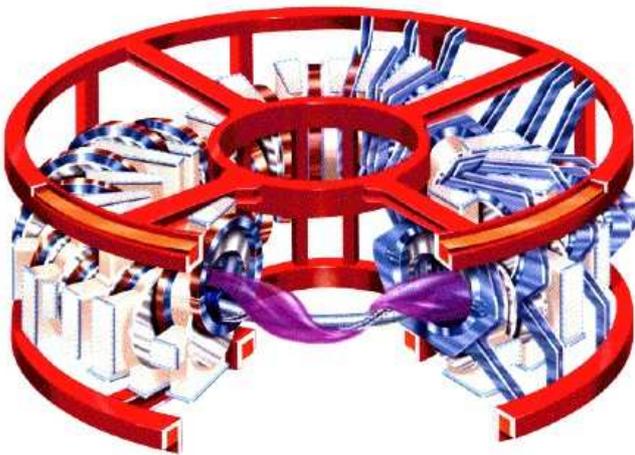
extraído para ser utilizado como combustible en el mismo reactor.

Rodeando la camisa moderadora y reproductora se encuentra una capa de blindaje, cuya función es impedir el paso de los neutrones, que consiguen atravesar el moderador, y de la radiación gamma.

Finalmente, encontramos los inductores (electroimanes), que generan los campos magnéticos necesarios para confinar el plasma y la corriente que circula por el mismo. Para minimizar la cantidad de energía consumida para producir los campos magnéticos se usarán materiales superconductores. Los inductores superconductores son los componentes más costosos de un reactor de fusión.

## Resultados y futuro.-

Recientemente se ha logrado en el reactor español de fusión TJ-II, del CIEMAT, confinar plasma a una temperatura similar a la del sol. El objetivo de este reactor no es conseguir la fusión y generar electricidad, sino estudiar durante los próximos años el comportamiento del plasma.



Hasta el momento se han logrado en 120 ocasiones plasma, durando cada prueba aproximadamente un segundo. El éxito de este experimento es un paso más en la consecución de la esperada energía de fusión.

Comparativamente, la energía de fusión proporciona más energía que la de fisión. Por ejemplo, medio kilo de hidrógeno, muy abundante en la naturaleza, ya que forma parte del agua, produciría unos 35 millones de kilovatios hora;  $1\text{m}^3$  de agua de mar contiene  $10^{25}$  átomos de Deuterio, con una masa de 34,4 gr. y una energía de  $8 \times 10^{12}$  julios.

Como los océanos tienen 1.500 millones de  $\text{Km}^3$  de agua, el empleo de 1% del deuterio del océano equivale a 500.000 veces la energía de todos los combustibles fósiles existentes.

En cuanto al tritio, puede obtenerse a partir de la fusión de los átomos de litio, cuyas reservas también pueden considerarse ilimitadas.

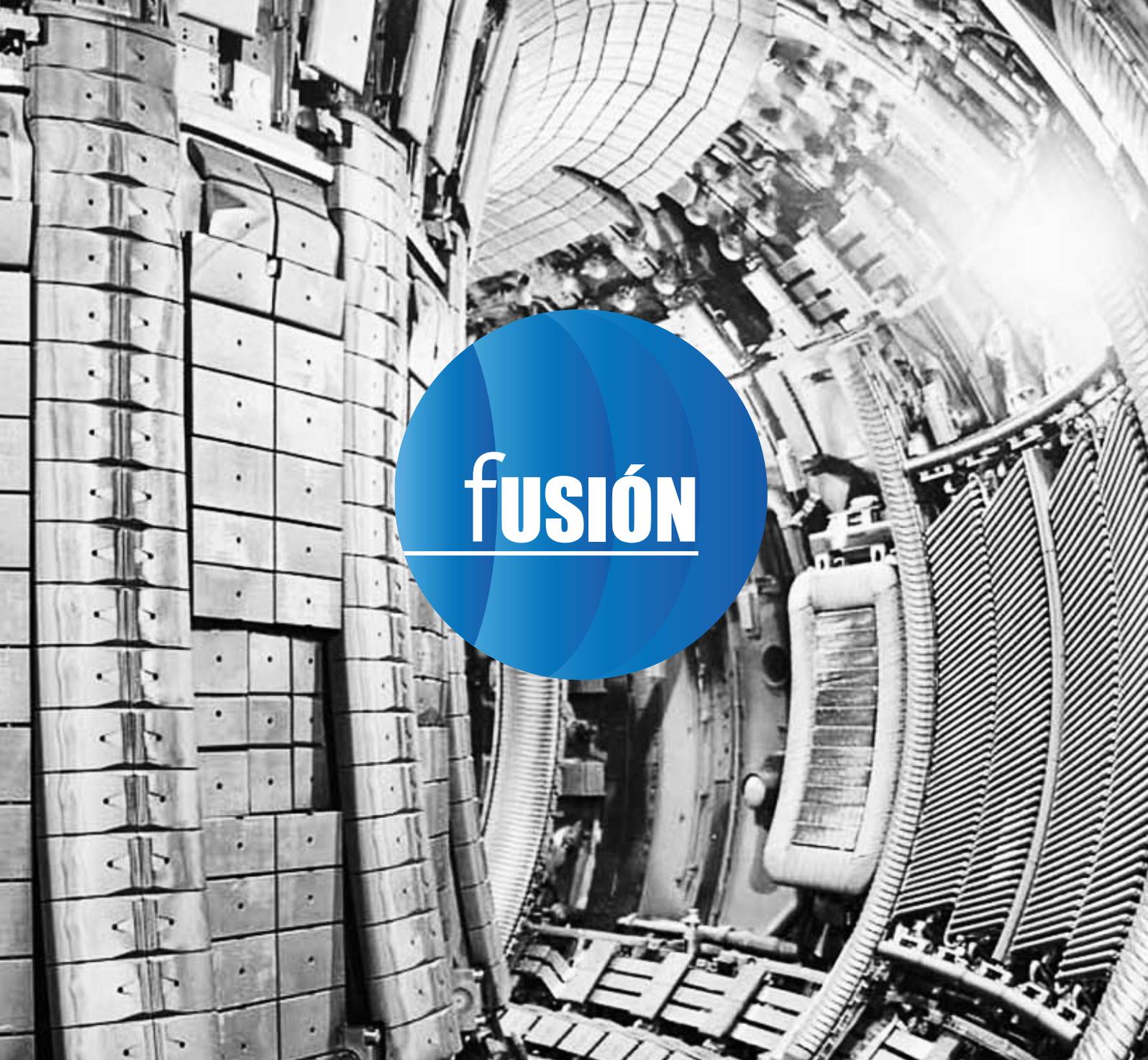
En cuanto a la utilidad de la energía de fusión, que es la que se da en el Sol para generar el calor que nos permite vivir, podemos destacar primeramente que sería una fuente casi inagotable de electricidad. Paulatinamente se deberían ir sustituyendo los reactores de fisión por los nuevos de fusión, evitándose así los problemas de radioactividad.

En un futuro no demasiado lejano incluso podrían instalarse estos reactores, como ahora ocurre con los de fisión, en submarinos, naves espaciales, y también en aeronaves y vehículos terrestres. Quizás se pueda llegar a tener automóviles, camiones, trenes, autobuses...con motores de fusión, ¿quién sabe?

Aparte de que esto, técnicamente, llegará a ser factible, habrá que contar de nuevo con los intereses económicos y políticos. La industria del petróleo mueve anualmente billones de euros, y los estados ganan muchísimo a través de los impuestos.

Con todos estos antecedentes cabe preguntarnos si de verdad podremos ver un día estos avances y beneficiarnos, como ciudadanos de a pie, de ellos.





fusión

# FUSIÓN NUCLEAR:

CONCEPTOS BÁSICOS

---

[www.luispastor.es](http://www.luispastor.es)