

fusión

REACTORES DE FUSIÓN TERMONUCLEAR

www.luispastor.es

REACTORES DE FUSIÓN TERMONUCLEAR

En fusión, se trata de lograr que dos núcleos ligeros usualmente alguno de los isótopos del hidrogeno, como el deuterio o el tritio, se acerquen lo suficiente como para superar la repulsión electrostática y se fundan, para dar lugar a uno más pesado, en el caso del hidrógeno, se obtiene helio, y energía. Esta energía puede posteriormente convertirse en energía térmica y posteriormente en eléctrica, y puede ser una de las maneras de solventar la dependencia, enfermiza y cercana al agotamiento, de los combustibles fósiles de la sociedad industrializada.

Las temperaturas necesarias para que los núcleos se acerquen lo suficiente son de millones de grados, por lo que el hidrógeno esta totalmente ionizado, es decir, los electrones y los núcleos están separados, formando lo que se conoce como plasma, que constituye el cuarto estado de la materia, por encima del estado gaseoso. Para poder conservar esta altísima temperatura hay que evitar que el plasma choque contra las paredes del reactor.

Dada la tendencia del plasma a difundirse, separándose los núcleos unos de otros a gran velocidad, es necesario confinarlo en un espacio cerrado de donde no pueda escaparse. Además, debido a las altas temperaturas, el plasma no puede tocar las paredes de la vasija de confinamiento, no sólo porque provocaría la destrucción de las paredes, sino porque mucho antes de que esto ocurriera, la erosión de la misma contaminaría el plasma, haciéndole literalmente desaparecer.

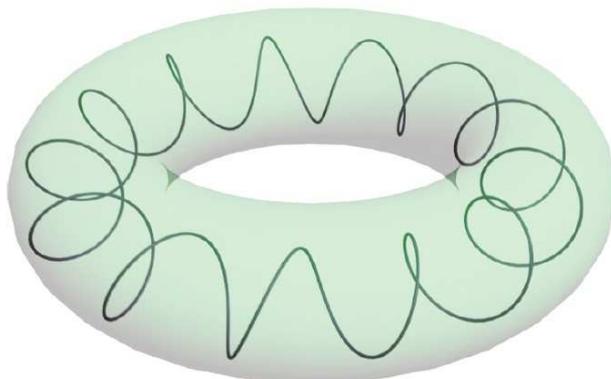
MODOS DE CONFINAMIENTO

Es necesario contener este plasma por un tiempo suficientemente largo como para que se produzcan muchas reacciones de fusión, y a temperaturas tan altas, no hay muchas formas de hacerlo. Dos líneas diferentes se han propuesto:

1) **confinamiento magnético**: puesto que el plasma esta formado por partículas cargadas, estas están obligadas a moverse describiendo hélices a lo largo de las líneas magnéticas. Disponiendo estas líneas de manera que se cierren sobre sí mismas, y estén contenidas en una región limitada del espacio, las partículas estarán confinadas a densidades más modestas durante tiempos lo suficientemente largos como para conseguir muchas reacciones de fusión. Con la ayuda de los campos magnéticos, las partículas del plasma seguirán las líneas magnéticas, como si fuesen guiadas por un carril.

2) **confinamiento inercial**: en la que el plasma se contiene por muy poco tiempo, microsegundos, pero a densidades muy altas, con lo que se producen muchas reacciones. Se consigue comprimiendo una pastilla de hidrógeno mediante láseres de gran potencia.

REACTORES DE FUSIÓN TERMONUCLEAR POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO



Confinamiento magnético

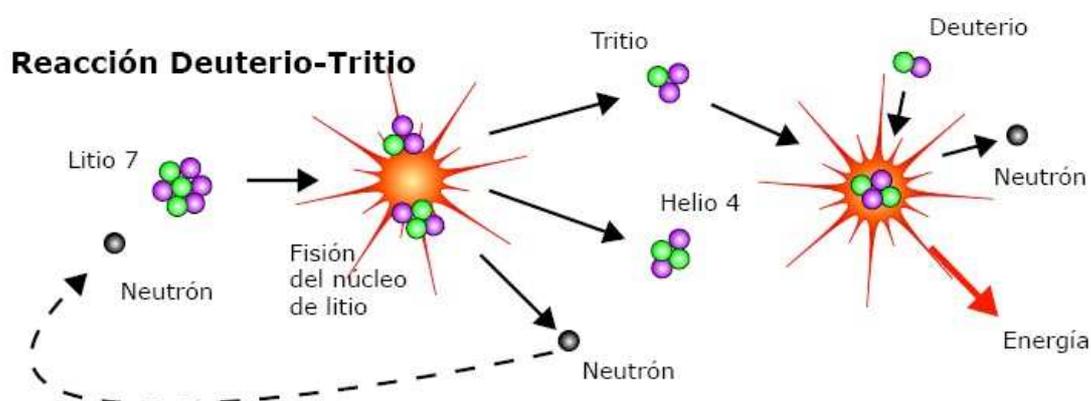
Los reactores atómicos de fusión termonuclear por confinamiento magnético son proyectos experimentales, que se hallan en proceso de diseño y realización. Se utilizan para la generación de energía a partir de la fusión termonuclear de iones confinados por campos magnéticos.

Su funcionamiento se basa en el de las reacciones

termonucleares producidas en las estrellas, que son reactores de fusión naturales y suelen utilizar el hidrógeno como combustible, ya que es el elemento químico más sencillo y común del universo. Al contraerse y fusionarse bajo la presión extrema de la gravedad, el hidrógeno se transforma en helio. En estas reacciones, alrededor del 0,5 % de la masa del hidrógeno se convierte en energía, de acuerdo con la ecuación de Einstein: $E=\Delta mc^2$; que relaciona la masa y la energía. De esta forma, las estrellas irradian energía en forma de luz y de calor.

Para poder reproducir una fusión artificial a pequeña escala, en lugar de hidrógeno, utilizamos deuterio y tritio como combustibles, dado que estos dos isótopos del hidrógeno, necesitan una menor energía calorífica para fusionarse que la utilizada por las estrellas.

El deuterio se obtiene del hidrógeno que existe en el agua, por lo que se convierte en una fuente casi inagotable de combustible. En un litro de agua hay 34 miligramos de deuterio.

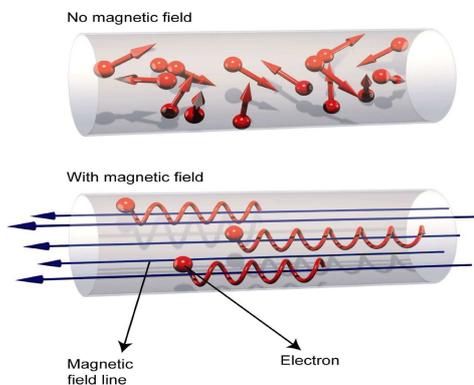


El otro elemento empleado, el tritio, es el isótopo inestable o radiactivo del átomo de hidrógeno. Está compuesto por un protón y dos neutrones y se desintegra por emisión beta con relativa rapidez, y aunque es escaso en la naturaleza, puede ser generado por reacciones de captura neutrónica con los isótopos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

mar. Las reservas de litio en el planeta son muy abundantes, por lo que tendríamos tritio para miles de años.

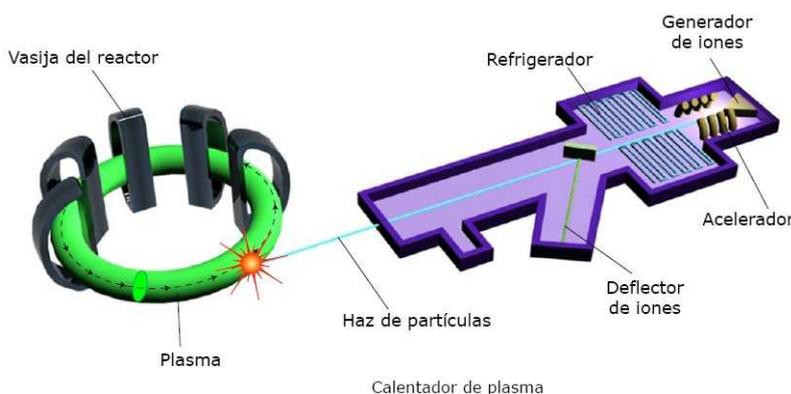
En un reactor de fusión, la presencia de tritio es un aspecto de seguridad importante, porque es un gas radiactivo que en estado natural tarda doce años en volverse inocuo. Artificialmente se produce en el interior del reactor a partir de litio. Por ello no hay que transportar el material radiactivo. En una central en funcionamiento nunca se acumularía mucha cantidad de este elemento químico. Las paredes del reactor se vuelven radiactivas; esta radiactividad desaparecerá totalmente en unos cincuenta años.

La manera de fusionar dos átomos es superar la fuerza de repulsión que ejercen los protones de los dos núcleos uno sobre el otro. Sólo si los dos núcleos se acercan lo suficiente pueden superar la cresta de repulsión. Esto se consigue haciéndolos chocar a gran velocidad y elevando la temperatura del plasma en el reactor a unos 150 millones de grados.



Los prototipos de reactores de fusión por confinamiento magnético son una aplicación más del hecho de que las partículas cargadas necesariamente describen hélices a lo largo de las líneas magnéticas como resultado de la fuerza de Lorentz.

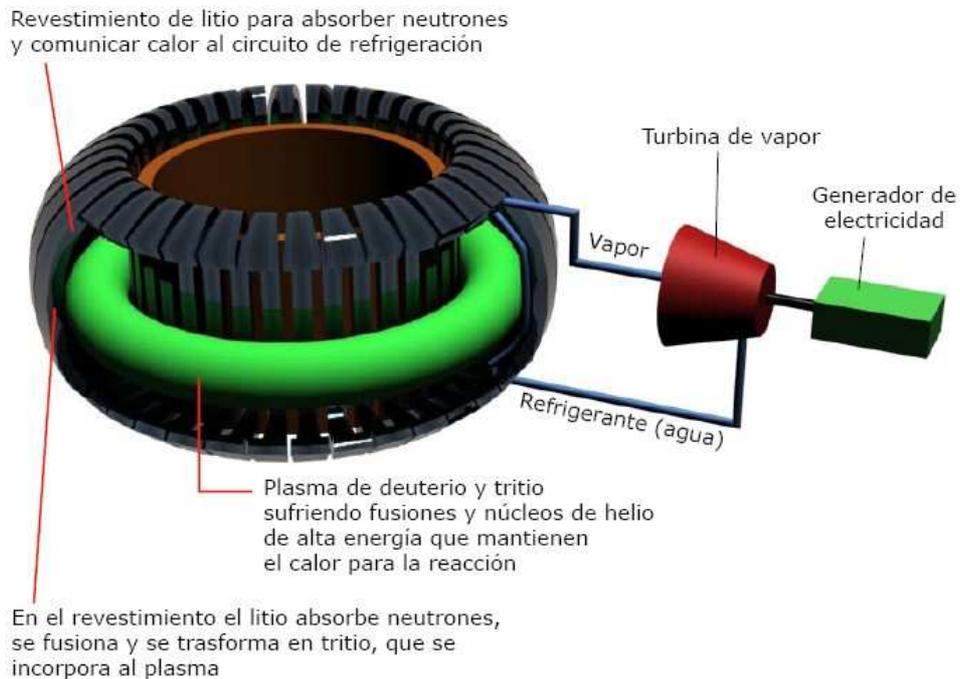
Una vez confinado el plasma hay que proporcionarle energía para alcanzar la temperatura de ignición necesaria para desencadenar la reacción de fusión. El factor de ganancia, que normalmente se expresa con la letra Q, es la relación entre la potencia de fusión producida en un reactor y la potencia requerida para mantener el plasma en estado estacionario. El objetivo, la ignición, un plasma que se calienta por la energía de fusión sin cualquier entrada externa, corresponde a Q infinito. Por otra parte, el logro de Q = 20 requiere una calidad de confinamiento casi tan buena como la que se requiere para conseguir la ignición. La condición de Q = 1 se refiere al punto de equilibrio.



Como el plasma magnéticamente confinado tiene una densidad muy baja (10^{14} iones/cm³, inferior al estado sólido), la temperatura se debe elevar millones de grados. Para elevar el plasma a estas

temperaturas se utilizan técnicas de radiofrecuencia e inyección de neutrones acelerados.

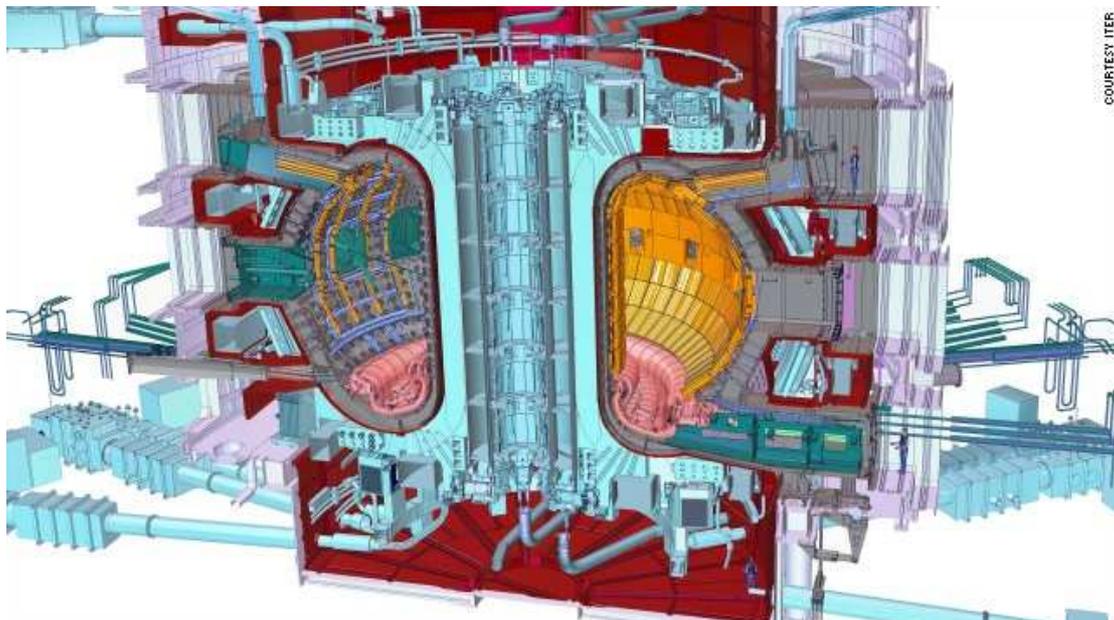
El calor generado es recogido en un revestimiento de litio, que traspa su calor al agua, esta se convierte en vapor que acciona una turbina.



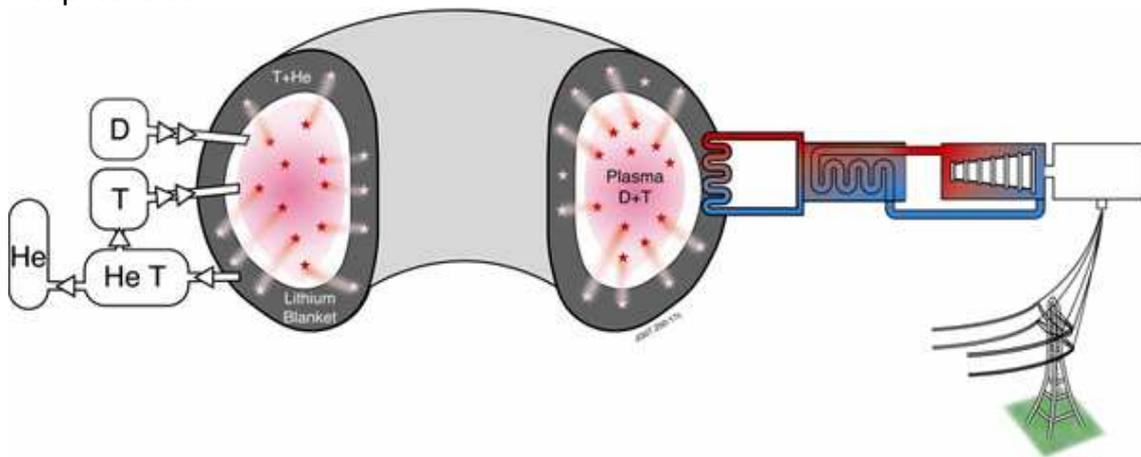
Circuito intercambiador de calor en reactores de fusión por confinamiento magnético

El concepto TOKAMAK

La palabra que procede del ruso y es acrónimo de **TO**rodal**na**y**a**, **KA**mera, **MAG**netitaya: *cámara toroidal con bobinas magnéticas* (TOroidal KAmera MAgnetiK). Un tokamak o cámara toroidal es un reactor de fusión de forma cilíndrica y anular (algo parecido a una rosquilla o la cámara de goma de una rueda de automóvil). Un tubo sin extremos rodeado exteriormente con unas bobinas que deben proporcionarle el campo magnético.



Por su interior circula el plasma confinado, a más de 150 millones de grados, que es guiado desde el exterior, por un campo magnético, con la finalidad de que el plasma no toque las paredes del Tokamak y pierda temperatura. Las dimensiones del toroide de plasma del Tokamak ITER son: 2 metros de radio interno y 6,2 metros de radio en el eje del toro. El plasma, que circula en el interior del toro central, está compuesto por 50% deuterio y 50% tritio, el cuál puede generar millones de vatios, lo que abastecería a miles de casas, pero se requiere también mucha energía para mantener el plasma circulando y a tales temperaturas.

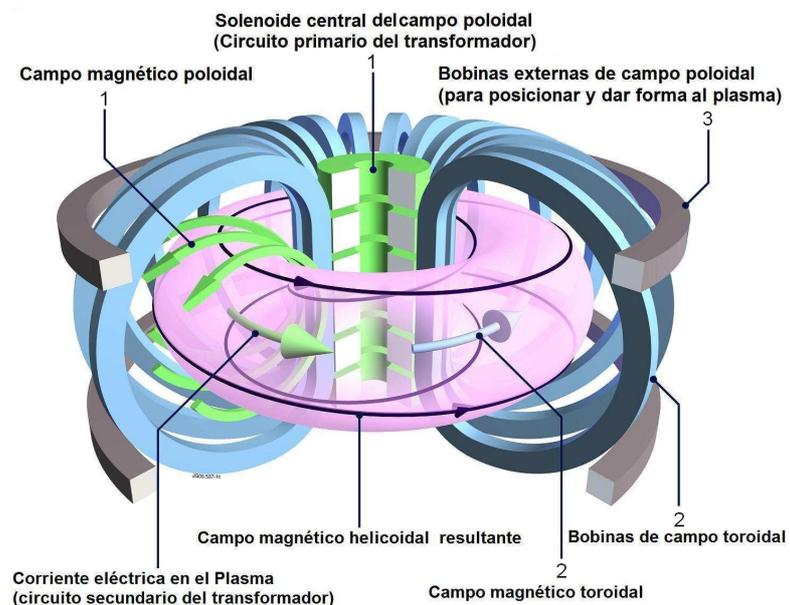


El campo magnético de un Tokamak, se compone de:

1.- Solenoide central: superconductor que induce la corriente en el plasma. Esta corriente dará lugar a la componente poloidal.

2.- Bobina toroidal: superconductoras que generan el campo magnético toroidal, confinan y estabilizan el plasma. Están situadas exteriormente alrededor del toroide.

3.- Bobina poloidal: superconductoras que confinan y posicionan el plasma en el toroide. Se posicionan en la parte más exterior, longitudinalmente al toroide.

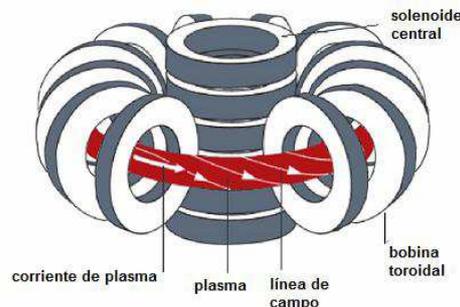


4.- Cámara de vacío: mantiene en vacío el plasma y es la primera barrera de confinamiento para el tritio que se encuentra en el interior del toroide.

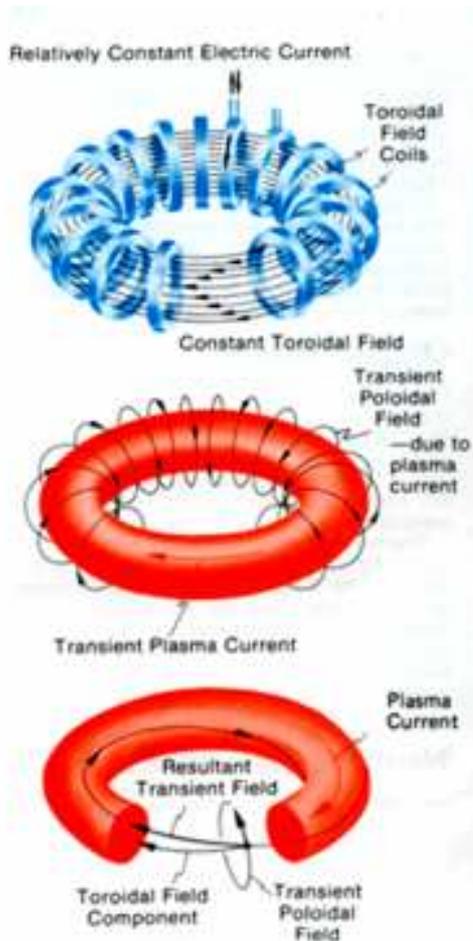
5.- Transformadores: conducen la electricidad que abastece a las bobinas toroidales y poloidales.

Trampa magnética:

Se obtiene mediante varios conjuntos de bobinas (circular y helicoidal) que configuran totalmente las superficies magnéticas antes de generar el plasma. Tendrá sólo dos componentes, una toroidal y otra poloidal.



Los fundamentos del confinamiento magnético son:



1 - El campo magnético toroidal: es el generado por las bobinas equidistantes que hay alrededor del toroide.

2 - El campo magnético poloidal: el producido por una corriente eléctrica que fluye en el interior del plasma, inducida principalmente por el solenoide central.

3 - El campo magnético helicoidal: es el campo resultante de la suma de los campos toroidal y poloidal. Tiene forma de muelle enrollado sobre sí mismo.

La acción conjunta de estos campos magnéticos genera superficies magnéticas que guían las partículas del plasma para que no choquen con las paredes de la cámara.

Para que el reactor sea seguro necesita tener una presión baja para que la densidad del plasma también lo sea. Esto es algo que tecnológicamente puede ser complicado, pero es indispensable para el buen funcionamiento del reactor.

En un reactor de fusión el combustible (deuterio y tritio) no produce una reacción en cadena que pueda contaminar el ambiente en caso de accidente, como ocurre con la fisión nuclear. Si al reactor de fusión se le deja de suministrar combustible, la reacción se para; lo cual hace que este tipo de reacción por fusión sea limpia, segura y ecológica.

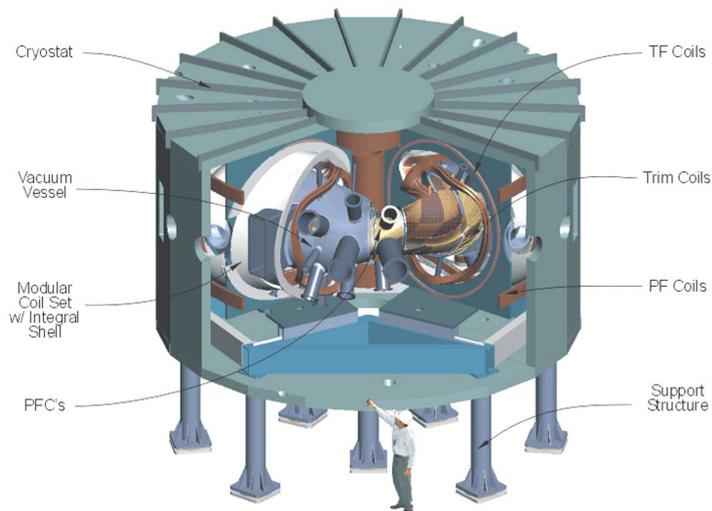
TOKAMAKS Y STELLARATORS

La forma de estos campos magnéticos puede entenderse del siguiente modo: recordad que un toroide es como un "donut" hueco. Sobre el toro se distinguen dos direcciones, una poloidal y otra toroidal: la primera sería la del ángulo con la que recorreremos una sección del toro equivalente a una rodaja del donut; la segunda, como si fuéramos de un extremo del donut al otro, que en el caso del toro coinciden.

Por lo tanto, el campo magnético, al estar tangente a cada punto del toro (ya que es tangente a las líneas magnéticas, que están contenidas en el toro), tendrá sólo dos componentes, una toroidal y otra poloidal. La componente toroidal se consigue mediante bobinas toroidales, que le dan un aspecto como de donut rodeado de aros circulares. Cuando una corriente recorre dichas bobinas estas producen un campo a lo largo de la dirección toroidal (como el producido por un solenoide a lo largo de su eje). La componente poloidal del campo puede producirse de dos maneras:

1) Usando también bobinas exteriores, dando lugar a un tipo de reactor llamado **stellarator**

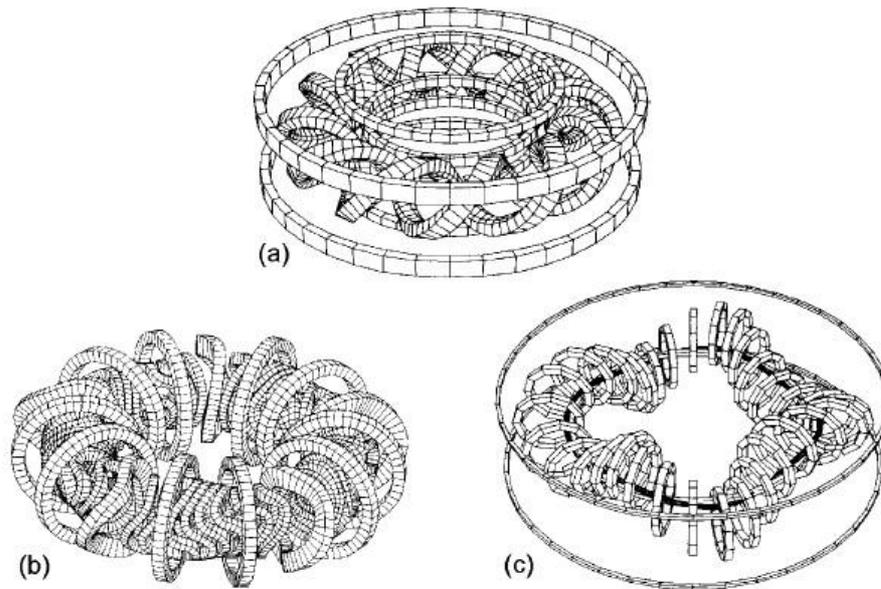
Los Stellarators son reactores de fusión toroidales con un campo magnético poloidal producido por bobinas exteriores al plasma. Su funcionamiento es continuo pues no existe ninguna corriente plasmática inductiva y no existe el riesgo de interrupciones al no tener corriente interna en el plasma.



Los actuales Stellarators están dando buenos resultados, igualándose a los resultados obtenidos en tokamaks.

Existen tres tipos de stellarators:

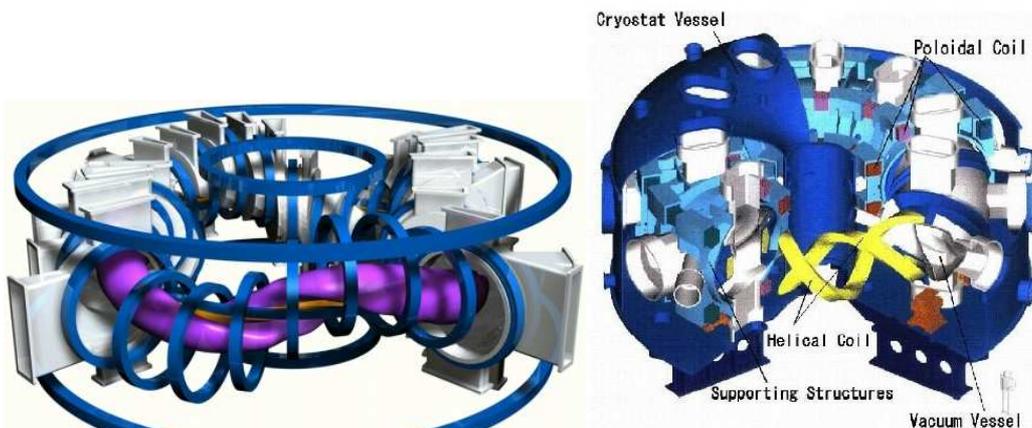
- Torsatrons: Las líneas de campo magnético que van a retener el plasma se configuran totalmente mediante bobinas helicoidales enrolladas alrededor de la cámara de vacío.
- b) - Modulares: Con una disposición toroidal de bobinas no planas.
- c) - Heliacs: Conjunto de bobinas planas circulares, distribuidas a lo largo de una hélice enrollada alrededor de una bobina central circular. El heliac flexible (TJ-II, TU-Heliac) añade una bobina helicoidal pequeña para permitir el giro.



Esquema de la disposición de las bobinas de los tres tipos de stellarators. a) torsatron, ATF; b) modular, W7-AS; c) heliac, TJ-II [Lyo90].

Parámetro	LHD	W7-AS	HSX	TJ-II
Tipo de configuración	torsatron	modular	modular	heliac
Número de periodos	10	5	4	4
Radio mayor (R_0)	3.9 m	2.0 m	1.2 m	1.5 m
Radio menor medio (a)	0.5-0.65 m	0.2 m	0.15 m	0.12-0.2 m
Campo magnético (B_0)	3-4 T	2.5-3.5 T	1.0 T	1.0 T
Volumen de plasma (V)	20-30 m ³	1.6 m ³	0.44 m ³	1.2 m ³
Potencia adicional		4.5 MW		
ECRH	10 MW		0.2 MW	~0.6 MW
ICRH	3-9 MW			
NBI	15-20 MW			≤ 3-6 MW
Duración del pulso	> 10 s	5 s	0.2 s	0.5 s

Principales parámetros de los stellarators LHD [Mot95], W7-AS [IPP00], HSX [And95] y TJ-II [Cie89]

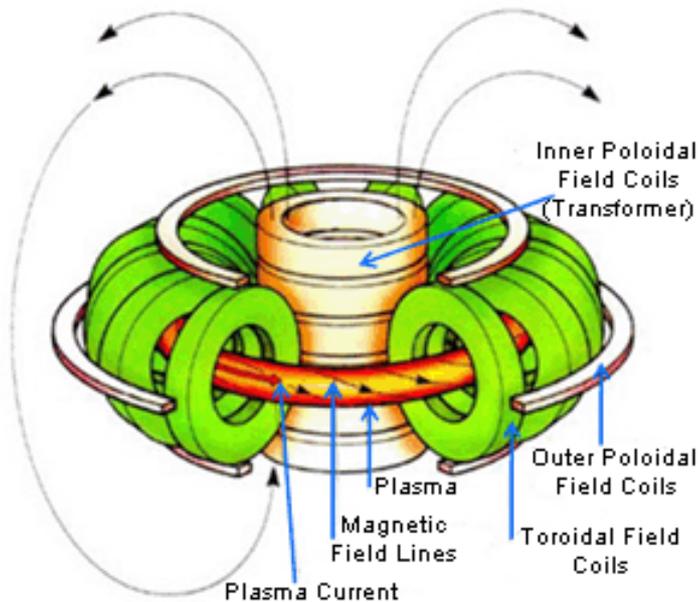


Esquema del Large Helical Device (LHD) [Lyo 95]

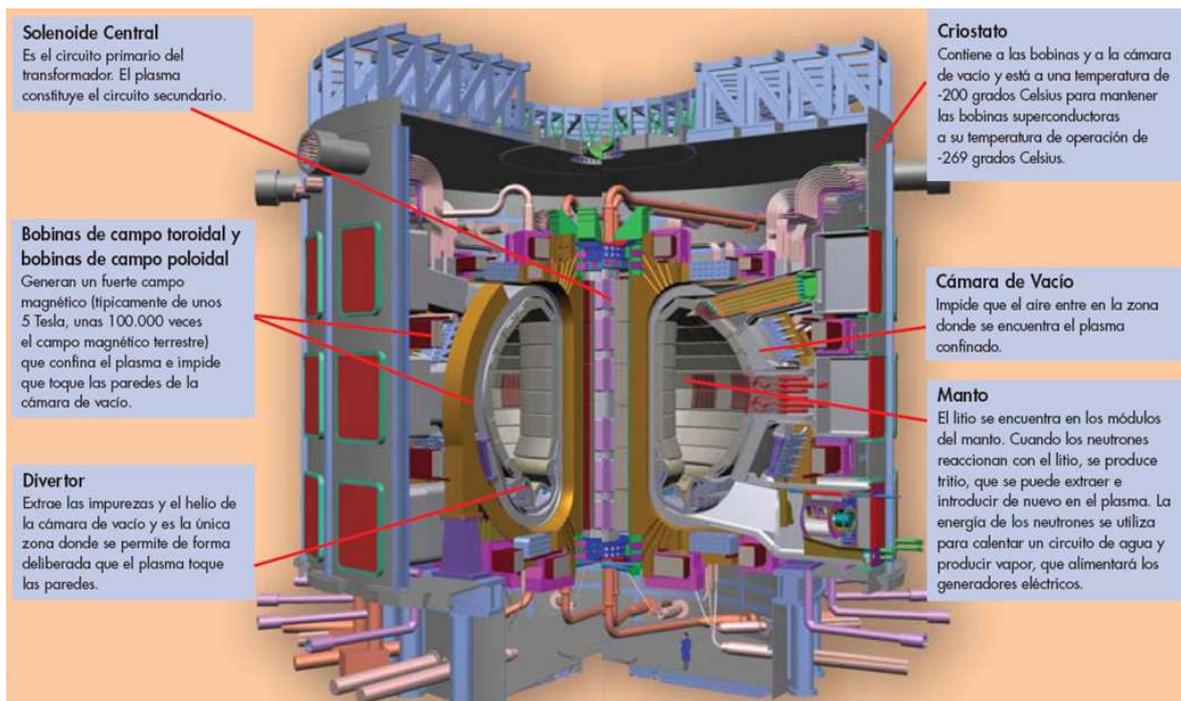
El Heliac Flexible TJII, un tipo de stellarator que está actualmente en operación en el CIEMAT, Madrid.

2) Haciendo que una corriente fluya dentro del plasma en la dirección toroidal. Esta corriente dará lugar a la componente poloidal (como el campo creado por un hilo recto de corriente). Esta corriente se consigue haciendo que el plasma sea el secundario de un transformador. Este tipo de reactores se llaman tokamaks, siendo con mucho, los más desarrollados.

El tokamak proporciona el giro requerido para las líneas de campo magnético, no mediante la manipulación del campo con las corrientes externas, sino conduciendo una corriente a través del propio plasma. Las líneas de campo alrededor de la corriente de plasma se combinan con el campo toroidal para producir líneas helicoidales de campo, que se envuelven alrededor del toro en ambas direcciones.



El siguiente paso que se tomará en el campo mundial de la investigación en fusión es el Tokamak experimental ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). La meta de ITER es demostrar que la generación de energía por el método de la fusión es viable técnicamente y científicamente. Para tal fin, ITER debe alcanzar ciertas condiciones para poder generar unos 500 Megavatios de energía durante un tiempo más o menos largo. El ITER producirá diez veces la



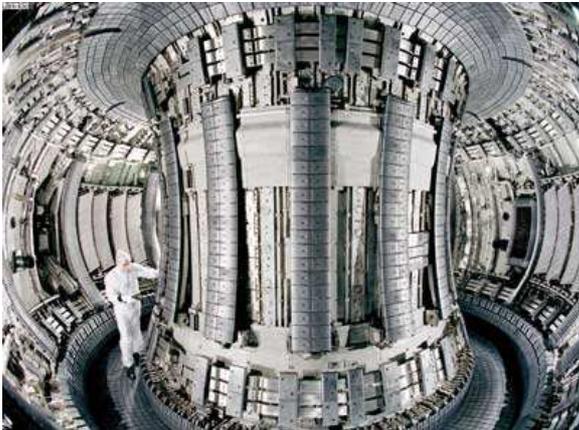
energía que la que usa para ponerse en funcionamiento. En el ITER, también se harán experimentos para probar componentes y tecnologías que son esenciales para una futura central de fusión industrial.

El ITER entrará en funcionamiento en unos años. El coste de construcción se eleva a unos 4,7 mil millones de euros. Los actuales socios del proyecto ITER, de escala mundial, son la Unión Europea, Japón, China, India, Rusia, los Estados Unidos de América y Corea del Sur. Dentro del proyecto, Europa ocupa un puesto de liderazgo.

El inmenso potencial energético de la fusión nuclear incentiva el continuo desarrollo tecnológico en ambos tipos de confinamiento. Con el Deuterio existente en todo el Planeta se podrían obtener 10^{21} kW/año, lo cual podría dar energía durante aproximadamente 10^{11} años, considerando la poca cantidad que se necesita por reacción de fusión.

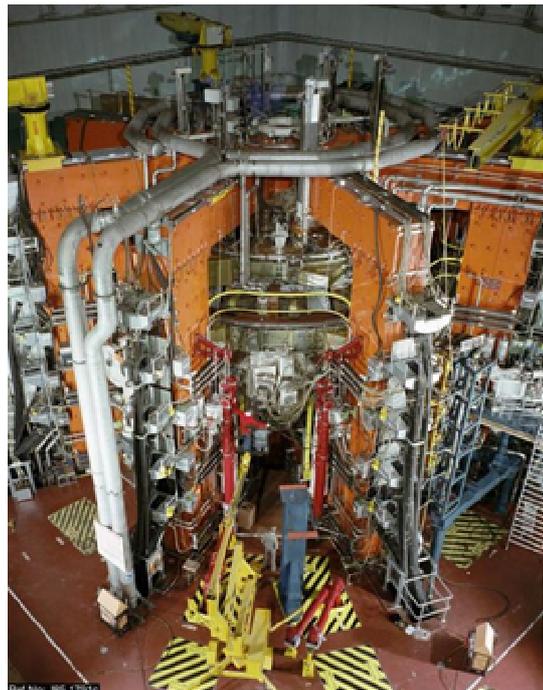
JET

El experimento Joint European Torus (JET), literalmente: Toro Común Europeo, se encuentra situado en una vieja base de la RAF cerca de Culham, en las afueras de Oxford (Reino Unido), es un reactor de fusión tipo tokamak. Y, seguramente, el mayor experimento de fusión en el mundo. Su construcción fue iniciada en 1978, aunque los primeros experimentos no comenzaron hasta 1983. JET es capaz de funcionar con los combustibles de las centrales de fusión futuras, concretamente deuterio y tritio. Está equipado con sistemas de manejo a distancia para hacer frente a la radioactividad producida por el combustible. A la espera de la construcción del ITER,



el JET es el único gran reactor de fusión con capacidad para usar este combustible.

Así, en 1997 JET produjo 16 Megavatios de energía proveniente de la fusión, lo cual sigue siendo el record mundial. El experimento JET es muy adecuado para probar los materiales que se usarán para construir la pared de la cámara del plasma, y para investigar el calentamiento y los métodos de medida y control en



condiciones realistas para un reactor.

En declaraciones hechas por su director: "La máquina JET tiene el mayor rango de actuación de todos los experimentos en fusión del mundo y ha puesto a Europa en la vanguardia del trabajo en fusión, un tema que probablemente será muy importante el próximo siglo"

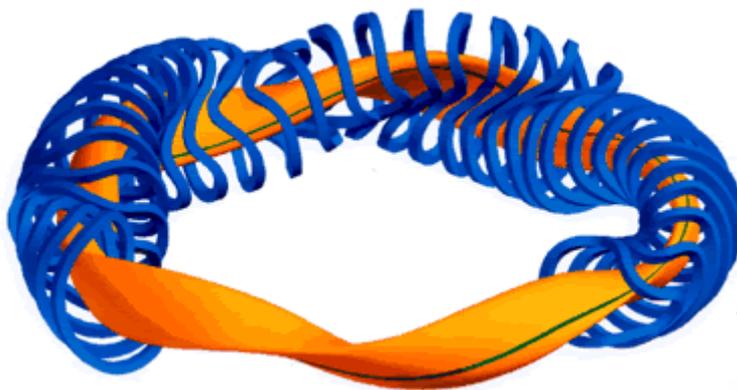
Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X es un stellarator experimental, actualmente en construcción en Greifswald, Alemania por el Plasmaphysik Max-Planck-Institut für (Instituto Max Planck de Física del Plasma, IPP), que se completará en 2015 y en el que ha participado la empresa española ENSA. El propósito de Wendelstein 7-X es evaluar los principales componentes de un futuro reactor de fusión construido con tecnología stellarator. Se pondrá a prueba un campo magnético optimizado que supere las dificultades de los conceptos anteriores

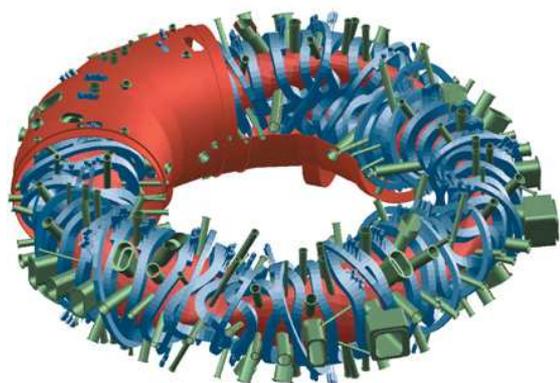
Se pretende demostrar que este tipo de instalaciones es adecuado para generar energía. El elemento central de la instalación es un sistema de

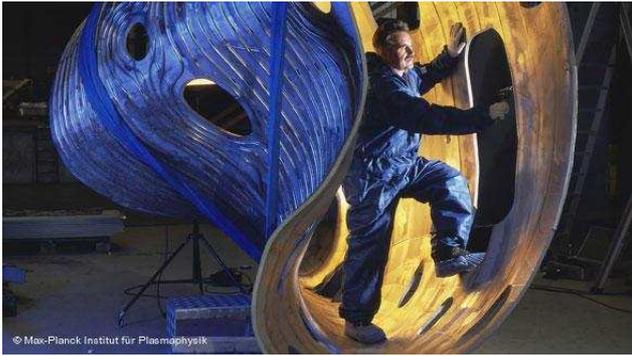
bobinas magnéticas superconductoras.

Wendelstein 7-X todavía no producirá energía de fusión pero permitirá llegar a conclusiones importantes con respecto a las características de los Stellarators.



La característica particular de Stellarators es que las bobinas que generan el campo magnético que contienen el plasma básicamente en forma de anillo, no están al mismo nivel, y tienen una geometría complicada. El plasma también tiene, de manera similar, forma retorcida con cambio de secciones transversales. La geometría de la bobina genera un campo magnético que encierra completamente el plasma. No son necesarias bobinas correctoras ni hay interrupciones de funcionamiento como se producen en los reactores Tokamak, cuando la corriente que aumenta continuamente ha alcanzado su máximo en las bobinas correctoras.





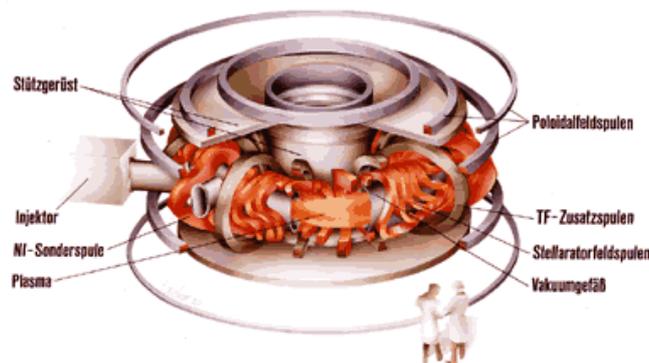
Las bobinas están dispuestas alrededor de un revestimiento aislante del calor llamado criostato. Un dispositivo de refrigeración produce suficiente helio líquido para enfriar los imanes y su recinto ya que la superconductividad mejora cuanto más baja es la temperatura. El recipiente de plasma, construido en 20 partes, está en el interior, se ajusta a la forma compleja del campo magnético. Se dispone de 299 orificios para calentamiento del plasma, el diagnóstico y la observación. La planta entera se construye en 5 módulos casi idénticos, que se montan en la sala experimento.

Está previsto operar con hasta 30 minutos de descarga de plasma continuo, lo que demuestra una característica esencial de una planta de energía de fusión en el futuro: la operación continua. Su terminación se había previsto en 2006, un deslizamiento horario de 8 años ha desplazado esta fecha a 2014. El 16 de noviembre de 2011, fue instalado en su lugar el último módulo del criostato.



El diseño de Wendelstein 7-X se basa en el anterior experimento Wendelstein 7-AS (1988-2002) que fue el primero de la nueva generación de "Stellarators avanzados" con bobinas modulares de campo para probar algunos de los elementos básicos de la optimización stellarator. Su funcionamiento con éxito sentó las bases para construir stellarators completamente optimizados como Wendelstein 7-X.

El diseño de Wendelstein 7-X se basa en el anterior experimento Wendelstein 7-AS (1988-2002) que fue el primero de la nueva generación de "Stellarators avanzados" con bobinas modulares de campo para probar algunos de los elementos básicos de la optimización stellarator. Su funcionamiento con éxito sentó las bases para construir stellarators completamente optimizados como Wendelstein 7-X.

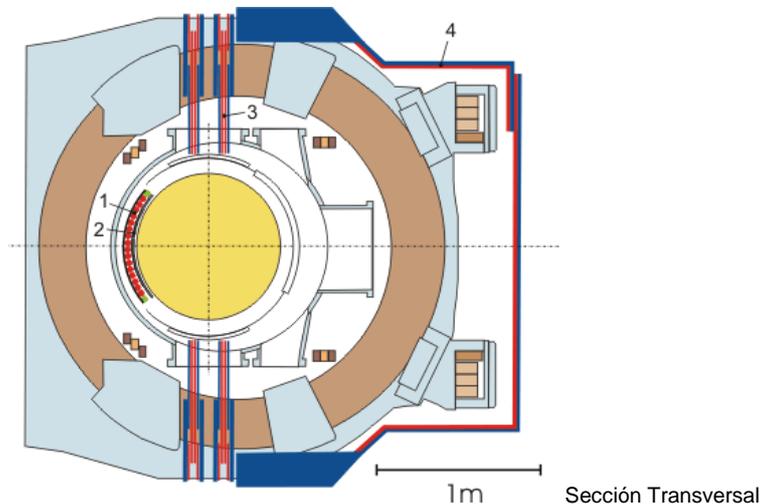
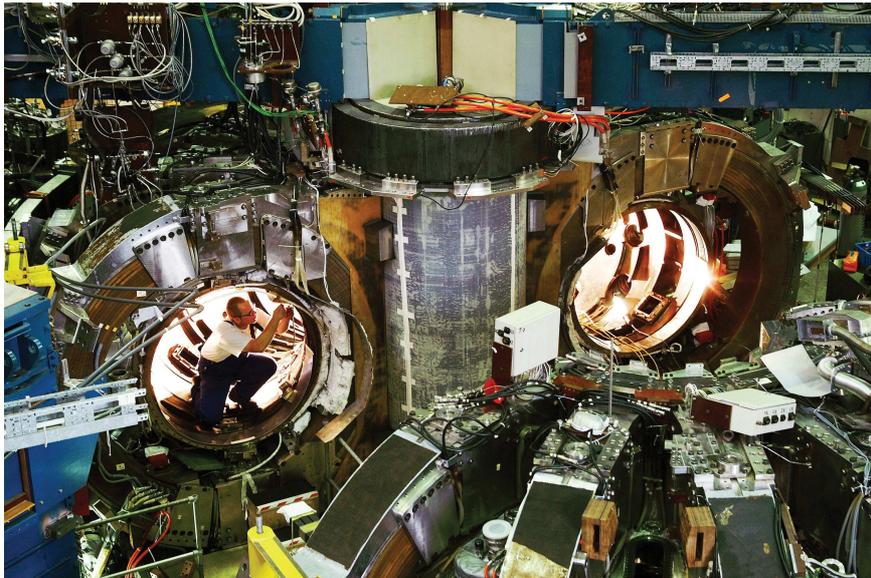


Wendelstein VII-AS

TEXTOR

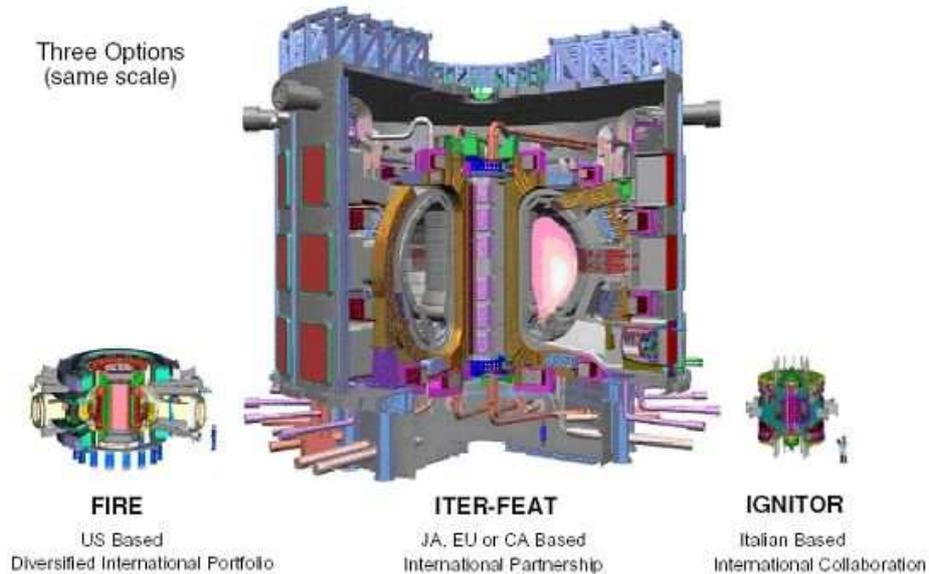
TEXTOR es un *Tokamak Experimental de Investigación Tecnológica Orientada* en el campo de la interacción del plasma con la pared. Se encuentra en el Forschungszentrum Jülich. Cerca de Dusseldorf, Alemania. En colaboración con las asociaciones, Euratom ERM / KMS (Bélgica) y FOM (Países Bajos) en el marco del "Grupo Trilateral Euregio" (TEC), estudia, no solo, cuestiones físicas y técnicas de las partículas y el intercambio de energía entre el plasma y la cámara que lo rodea, sino que, también desarrolla medidas activas para optimizar la primera pared y la región límite de plasma de tal modo que la erosión de la pared, la liberación de partículas y las impurezas en el núcleo plasma se reducen a niveles tolerables. TEXTOR tiene unas características de diseño especiales, tales como:

- excelente acceso para el diagnóstico a los dominios cercanos a la pared,
- grandes ojos de buey adecuados para la implementación de métodos para controlar el límite de plasma,
- instalaciones para calentar el recipiente de vacío y el forro,
- disposiciones para el intercambio de la camisa.



IGNITOR y FIRE

IGNITOR en Italia y FIRE en los Estados Unidos, tienen como base el concepto de aproximar las condiciones de combustión del plasma a partir de mayores energías concentradas en tokamaks de menor volumen.

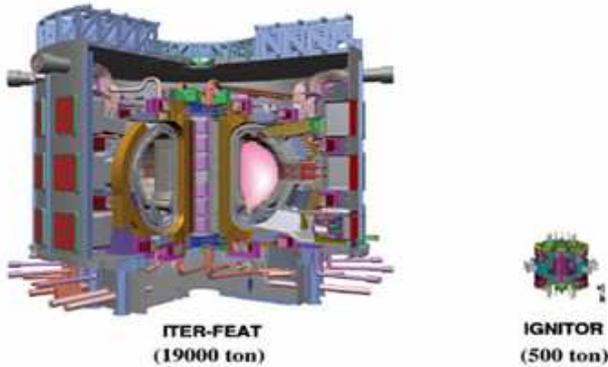


IGNITOR es el nombre italiano para un proyecto de investigación nuclear de fusión por confinamiento magnético, desarrollado por la Agencia Nacional Italiana para las Nuevas Tecnologías, la Energía y el Medio Ambiente (ENEA). Es la creación de Bruno Coppi, un físico italiano que investiga la fusión nuclear desde hace cuatro décadas en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en EEUU. Coppi ha trabajado desde 1969 en Alcator (ALto Campo TORus), un reactor de fusión la mitad de grande que Ignitor.

En el marco de la reunión cumbre Italia-Rusia celebrada en Milán el 26 abril 2010 se ha firmado el acuerdo para proceder con el programa Ignitor. Según los planes actuales, Ignitor se instalará en el Instituto de Innovación e Investigación de Fusión de Troitsk (Trinita), a las afueras de Moscú. Este centro adscrito al Instituto Kurchatov alberga el tokamak TSP, ideado por el ruso Velikhov durante la etapa soviética e inactivo desde 1987 por falta de fondos. El centro cuenta con instalaciones que pueden adaptarse para alojar y operar la máquina. La construcción del reactor se prevé que se complete en 2014, con la recogida de datos experimentales proyectada para 2016. Estas instalaciones serán abiertas y fácilmente accesibles para los científicos de todas las naciones. Para facilitar el éxito de la empresa, la gestión del programa de investigación pertinente implicará a Italia y Rusia.

En comparación con el ITER (ITER-FEAT o *Tokamak Avanzado de Energía de Fusión*), Ignitor es mucho más pequeño y más barato: el reactor ITER tiene 19.000 toneladas en peso, mientras que el dispositivo Ignitor sólo 500 toneladas. Ignitor está diseñado para producir aproximadamente 100 MW de energía de fusión.

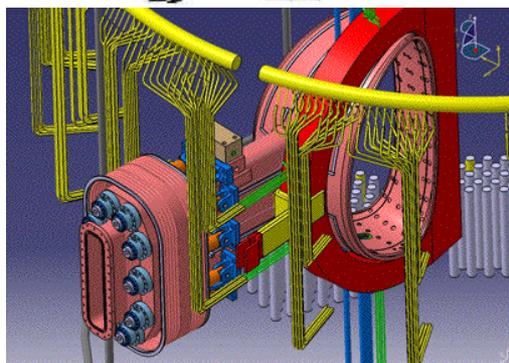
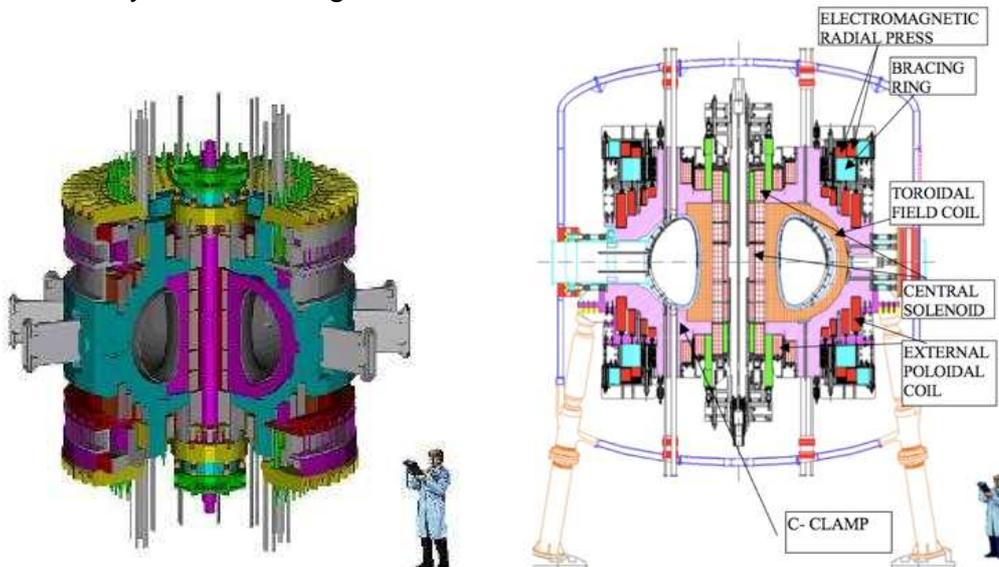
ITER/Ignitor: Dimensiones relativas



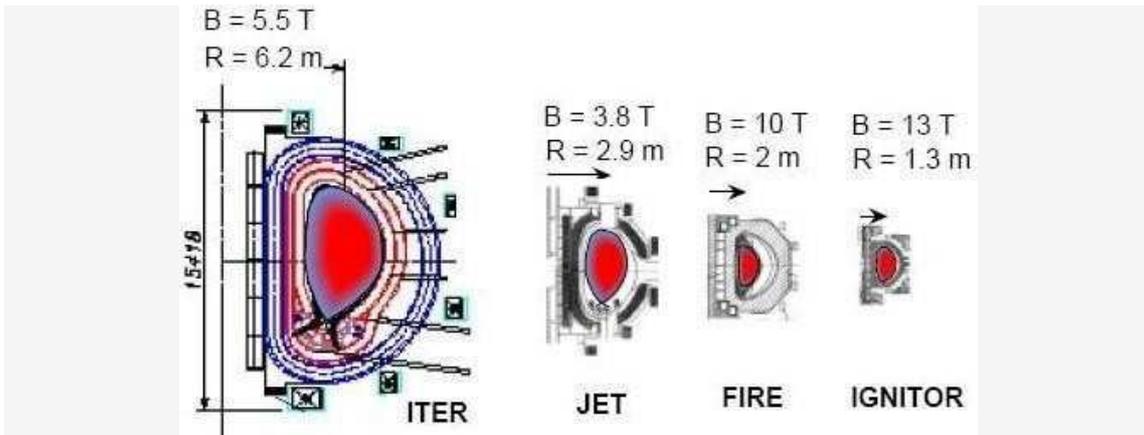
Es el primer experimento propuesto y diseñado para conseguir la ignición en un plasma, un estado en el que la energía producida por las reacciones de fusión es suficiente para mantener esta sin calentamiento externo, es decir, $Q=\infty$. Ignitor proporcionará a la comunidad científica la comprensión esencial de la física de los plasmas de

fusión, así como las condiciones necesarias para lograr un control, auto-sostenible de la reacción. Este es un paso necesario para demostrar que un reactor de fusión puede producir potencia neta, por lo tanto, el aprovechamiento del recurso atractivo, la energía sostenible, que es la fusión.

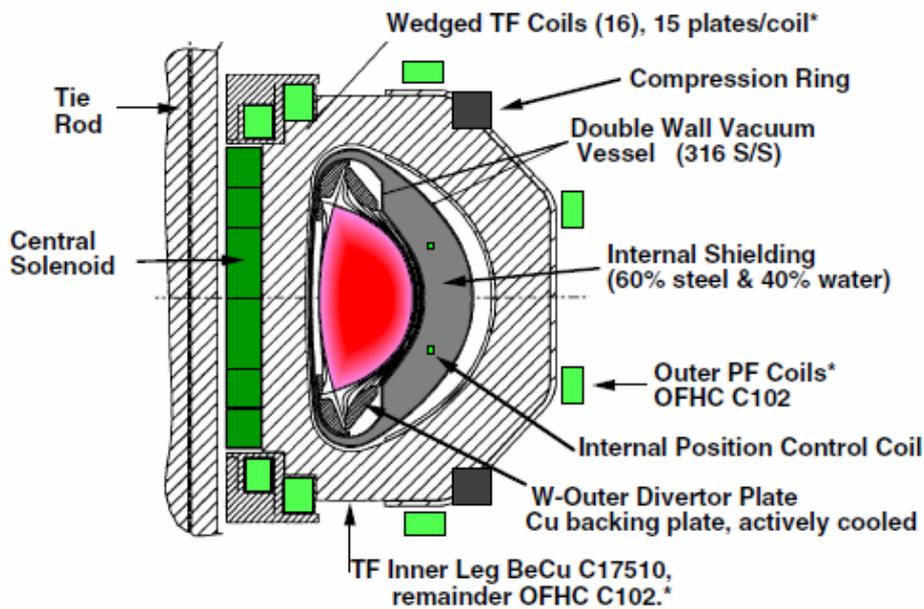
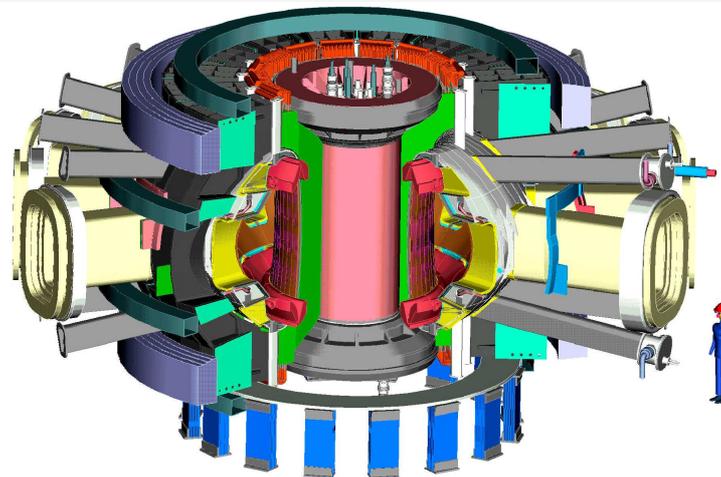
Al ser 40 veces más pequeño que el tokamak ITER (su radio es de sólo 1,3 metros comparado con 6,2 metros de ITER), se espera que esté terminado antes. Si funciona, la máquina se adentrará en un terreno desconocido. Nadie sabe cómo se comporta el plasma en ignición ni si se puede controlar para mantenerla y extraer energía de ella.



El campo toroidal es creado por 24 bobinas de cobre soldadas entre sí. Los campos magnéticos generados por el Ignitor serán casi tres veces mayores que los del ITER



El objetivo del programa FIRE (Fusion Ignition Research Experiment) es desarrollar una máquina experimental que pueda acceder a una región de plasma en condiciones de que una cantidad significativa de deuterio-tritio produzca la fusión, de tal manera que la ganancia de energía se encuentre en un orden de 10.

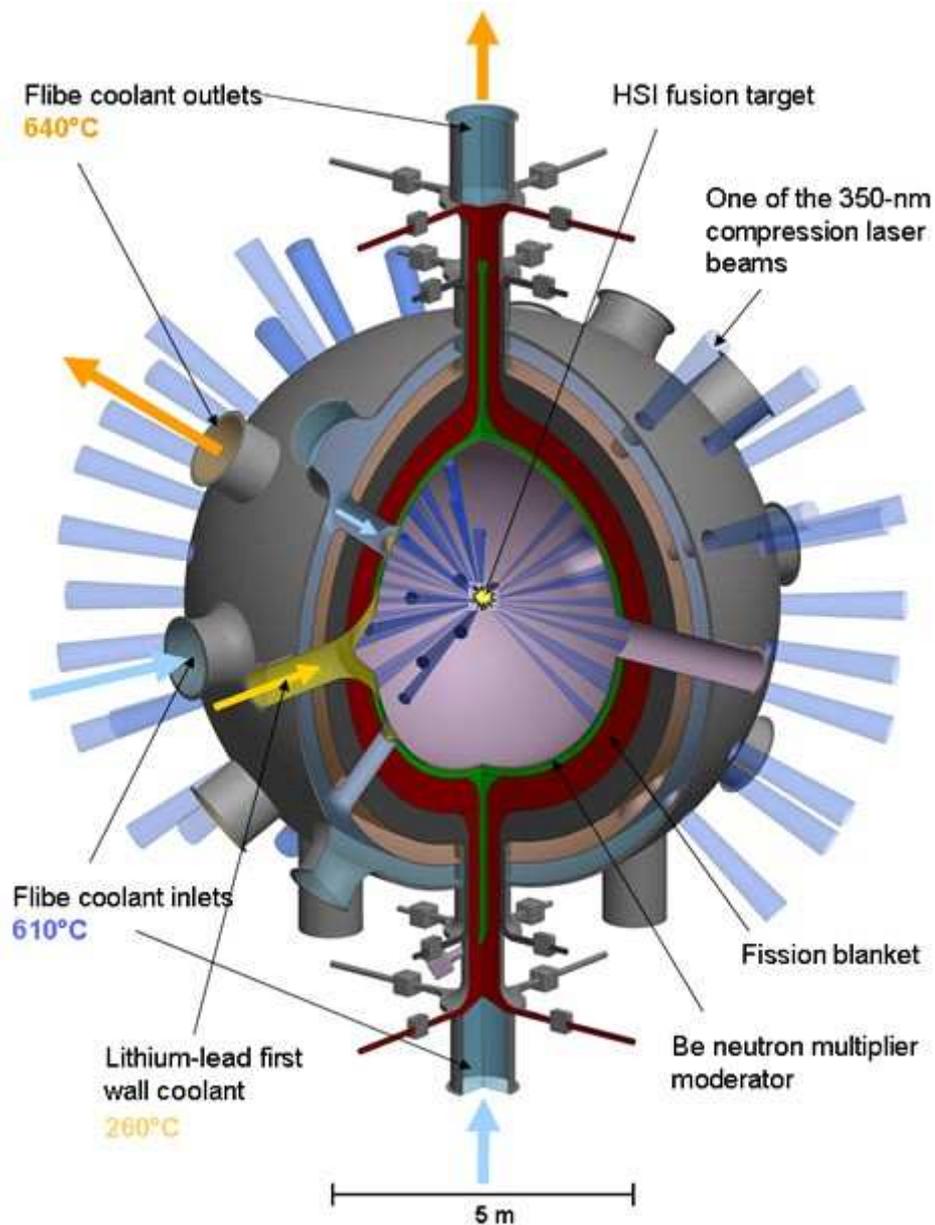


FIRE components

REACTORES DE FUSIÓN TERMONUCLEAR POR CONFINAMIENTO INERCIAL

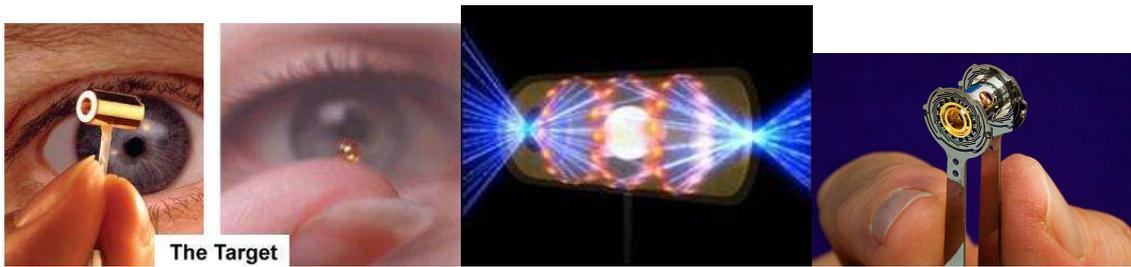
En el confinamiento inercial, el plasma es de alta densidad, baja temperatura y muy bajo tiempo de confinamiento.

El combustible está confinado en un recipiente esférico de dimensiones milimétricas, denominado “blanco de fusión” (Hohlraum).

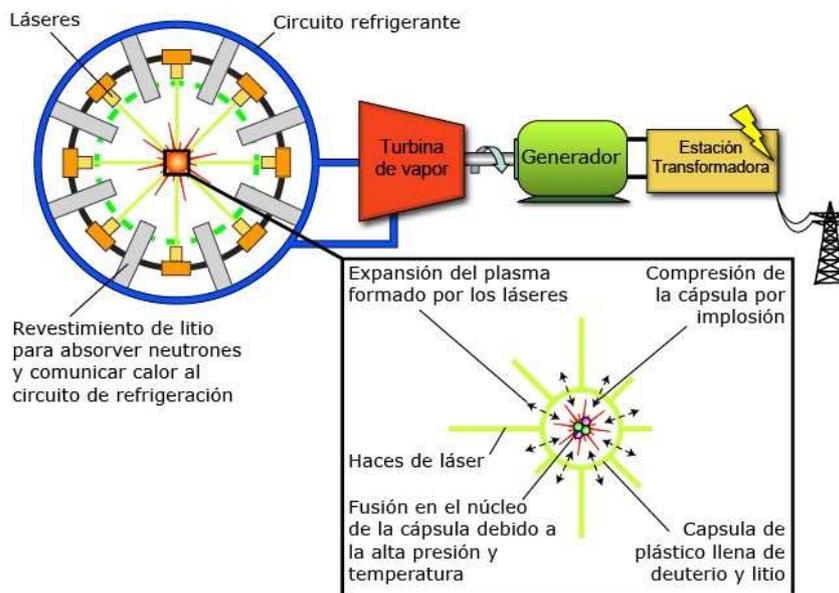


Al iluminar la superficie exterior del blanco con un láser muy potente se produce un proceso de ablación de la superficie del blanco y su compresión hasta densidades del orden de 100 a 1.000 veces la normal del combustible, entre 600 y 1.000 g/cm³ y con una energía de los haces de láser en el blanco de aproximadamente 5 - 10 MJ, se puede obtener teóricamente un factor de ganancia del orden de 100, lo que representa una energía de 1.000 MJ. Además, si se reproduce dicho proceso con una frecuencia de 5 - 10 Hz (s⁻¹) se

podría obtener una central de fusión nuclear con una potencia de 1.000 MWe, muy similar a la potencia de las centrales nucleares de fisión convencionales.



La idea básica de un reactor de fusión accionado por láser se muestra en la figura. Podemos ver que consta de un núcleo en el centro del cual convergen varios haces láser que inciden en una microesfera que contiene una mezcla de deuterio y tritio (D-T) en su interior. Debido a la intensa irradiación láser en la superficie de cada microesfera se forma un plasma en expansión. Este ocasiona la implosión de la mezcla de D-T del interior y eleva su temperatura y su densidad a valores en los cuales la fusión nuclear entre los átomos de deuterio y tritio ocurre de acuerdo con la reacción:



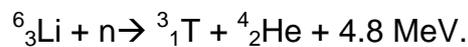
Esquema básico de un reactor de fusión por confinamiento inercial

La energía liberada en esta microexplosión termonuclear aumenta la temperatura del litio líquido que se encuentra en el interior del reactor hasta aproximadamente 800 grados centígrados. El litio caliente se extrae del reactor y en un intercambiador de calor produce vapor de agua que acciona una turbina de vapor. Después, el eje de rotación de la turbina de vapor conectado a un generador eléctrico produce electricidad que se transmite a través de líneas de distribución convencionales.

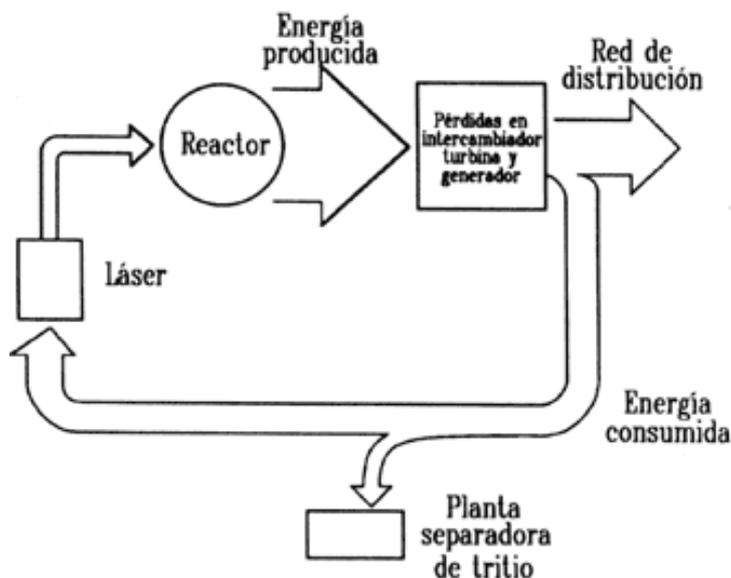
En las instalaciones tradicionales de FCI el láser "inductor" se utiliza para comprimir el blanco a muy altas densidades. La onda expansiva creada por este proceso calienta aun más el combustible comprimido cuando choca en el centro de la esfera. Si la compresión es suficientemente simétrica, el aumento de la temperatura puede crear condiciones parecidas a los criterios de Lawson (establecen una relación entre la temperatura del sistema, su densidad y el tiempo de confinamiento necesario), conduciendo a una significativa producción de energía de fusión. Si la tasa de fusión resultante es bastante alta, la energía liberada en estas reacciones calentará el combustible colindante a temperaturas similares, induciendo también su fusión. En este caso, conocido como ignición, una porción significativa del combustible se fusionará liberando grandes cantidades de energía. La ignición es el objetivo fundamental de cualquier instalación de fusión.

Una característica de estos reactores es su seguridad intrínseca, debido a que sólo utilizan el combustible suministrado. No es posible que el núcleo de un reactor explote debido a que se genere energía de fusión en exceso ya que aun si deliberadamente se intentara producir una explosión introduciendo una microesfera más grande (o con más combustible) el láser no sería capaz de llevar esa nueva microesfera a la temperatura y densidad adecuadas para que ocurra la fusión nuclear.

Como hemos dicho, el combustible nuclear utilizado es una mezcla de deuterio y tritio. El deuterio existe en abundancia y se extrae fácilmente del agua de mar, que contiene un átomo de deuterio por cada 6.500 átomos de hidrógeno. Sin embargo, es necesario producir tritio mediante la reacción:



Debido a esto, se utiliza litio para extraer la energía de fusión liberada en la reacción de D-T, ya que el litio, además de su función como elemento de transporte térmico, al ser bombardeado por los neutrones de fusión liberados produce el tritio, que posteriormente se mezcla con el deuterio para ser usado como combustible del reactor en las microesferas utilizadas.



Desde luego que la operación del láser utilizado y la de la planta de separación del litio y tritio requieren energía y ésta debe ser proporcionada por el propio reactor. La figura ilustra que un reactor útil debe producir mucha más energía de la que consume.

Ventajas sobre el confinamiento magnético

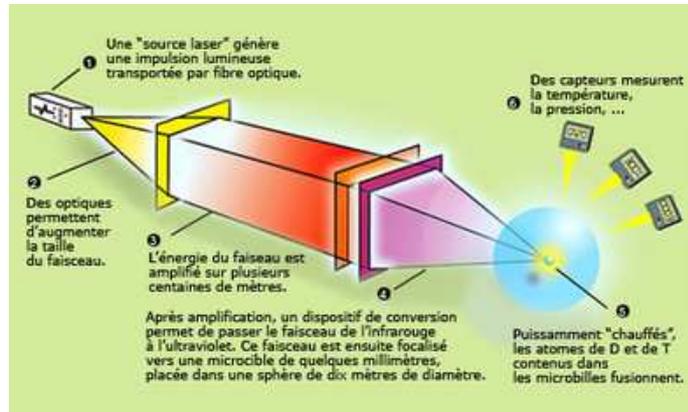
Las ventajas de una instalación por confinamiento inercial respecto de una por confinamiento magnético son:

1. No es necesario crear un alto vacío en torno al blanco, condición imprescindible en el caso de los plasmas utilizados en el confinamiento magnético.
2. Tampoco es necesario crear sistemas de confinamiento del combustible nuclear.
3. Las paredes estructurales afectadas por la radiación generada en las reacciones de fusión, no deben ser sustituidas periódicamente debido a los daños producidos por esas radiaciones.
4. También resulta más fácil proteger la estructura de la máquina de fusión inercial frente a las radiaciones. Normalmente esto se hace con duchas de litio líquido que además es productor de combustible adicional. Esta característica supone una mayor protección para toda la instalación, incluida la instrumentación necesaria para el control de las reacciones, así como una reducción importante en la cantidad de residuos radiactivos generados. Esta solución se probará en ITER.
5. Los niveles de radiactividad en los componentes de una instalación de fusión por confinamiento magnético en funcionamiento son mayores que en una de fusión por confinamiento inercial, lo que obligará inevitablemente a unos tratamientos más costosos de los residuos generados.



Reactores

El **Laser Megajoule** (LMJ) es un dispositivo de fusión por confinamiento inercial, su construcción comenzó en 2003 en la Cesta-CEA (*Centre d'études scientifiques et Techniques d'Aquitaine*, Centro de Estudios Científicos y Técnicos de Aquitania), en la Barp, cerca de Burdeos. El edificio, de 300 metros de largo, 150 metros de ancho y 35 metros de alto, está diseñado para dar cabida a 240 rayos láser que convergen en una cámara de aluminio de más de 10 metros de diámetro y 350 toneladas. En el interior hay una microesfera de dos milímetros de diámetro que contiene deuterio y tritio.

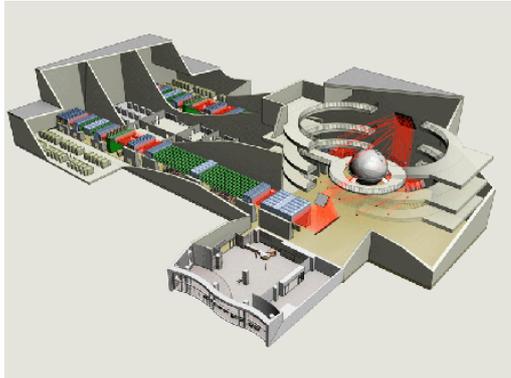


En esta microesfera, la temperatura alcanza varios millones de grados, a medida que la presión aumenta varios millones de atmósferas.

El Laser Mégajoule fue diseñado para entregar 1,8MJ a su objetivo, es decir, la energía que se ha acumulado en una masa de una tonelada después de caer desde una altura de 200 metros, es casi tan potente como su homólogo de EE.UU., National Ignition Facility (NIF). La tarea principal del Laser Mégajoule será los cálculos de refinamiento de fusión para la propia industria nuclear de Francia.

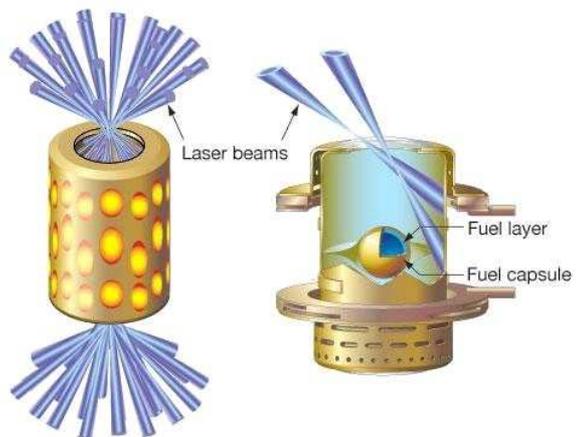


HiPER (High Power laser Energy Research, Investigación sobre Energía con Láseres de Alta Potencia) es una instalación experimental para lograr la fusión por confinamiento inercial (FCI) mediante láser. Actualmente se encuentra en fase de diseño y es un proyecto de la Unión Europea dentro del VII Programa Marco de I+D+i en el que participa el Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid. HiPER es el primer experimento diseñado específicamente para estudiar la "ignición rápida" enfocada a lograr la

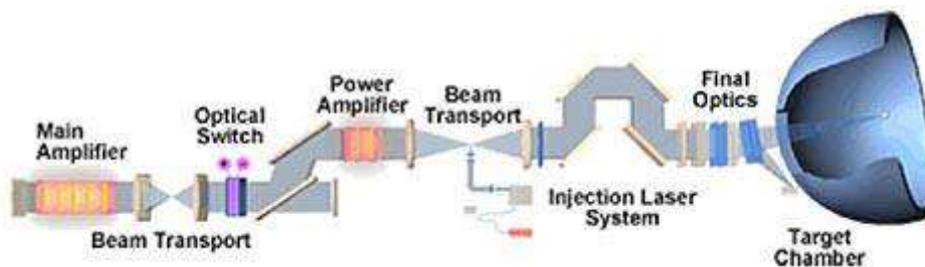


fusión nuclear utilizando láseres menos potentes que los utilizados en los diseños convencionales y produciendo similares energías de fusión con el horizonte en 2020 y disponer así de una planta de demostración a partir del 2040 ó 2050. Esto supone una "ganancia total" en la fusión mucho mayor que la de las instalaciones como el National Ignition Facility (NIF) y una reducción en los costos de construcción cercana al 90%.

El laboratorio de fusión por confinamiento inercial mediante láser más potente del mundo, **NIF (National Ignition Facility)**, situado en el LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory) a unos 50 Km. al este de San Francisco en California, es el gran proyecto de Estados Unidos de fusión inercial. En un edificio del tamaño de un estadio olímpico, los ingenieros han ensamblado la estructura para una red de 192 rayos láser, cada uno de los cuales recorrerá un largo camino de 1.500 metros desde su generación en el oscilador principal hasta el centro de la cámara del combustible para converger simultáneamente en un blanco del tamaño de una chincheta.



En este proceso la cápsula de combustible se comprimirá alcanzando una densidad 100 veces mayor que la del plomo sólido y se calentará a más de 100 millones de grados centígrados. En la etapa de compresión los rayos X

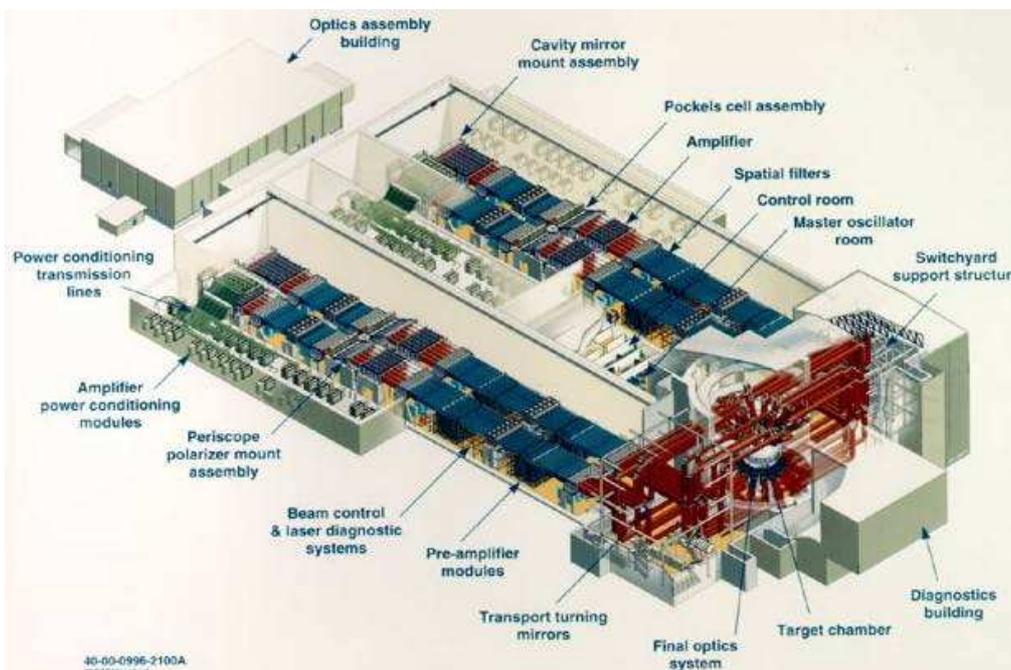


En este proceso la cápsula de combustible se comprimirá alcanzando una densidad 100 veces mayor que la del plomo sólido y se calentará a más de 100 millones de grados centígrados. En la etapa de compresión los rayos X

generados por la irradiación del láser ceden su energía a la parte exterior de la esfera que rápidamente se expande hacia el exterior. Esto produce que el resto del combustible se mueva hacia al interior formando una estructura densa uniforme. Para producir la ignición será necesario un segundo pulso que transfiera 20 kJ de energía en un punto de 35 micras de tamaño en unos pocos picosegundos, calentando el combustible hasta la temperatura de ignición e iniciando la reacción termonuclear.

La tarea principal del centro consiste en estudiar la fusión por confinamiento inercial. Además, la instalación la utilizan los militares estadounidenses para diversos estudios relativos al armamento nuclear.

NIF ha sido polémico desde que se propuso en la década de 1990, los graves problemas técnicos que sufrió durante su construcción, que la retrasaron 7 años y triplicaron su coste inicial, siempre han sido su punto débil, pero desde 2010, el 80% de los disparos del láser han sido para aplicaciones civiles (lograr la ignición). La parte más difícil es conseguir que la cápsula con el combustible implote de forma suave y simétrica, logrando un punto central suficientemente caliente para lograr la ignición, como predicen las simulaciones numéricas. Pero por ahora, todas las pruebas realizadas han requerido más energía en el pulso láser (en la actualidad unos 1,8 megajulios) que la obtenida tras la implosión.

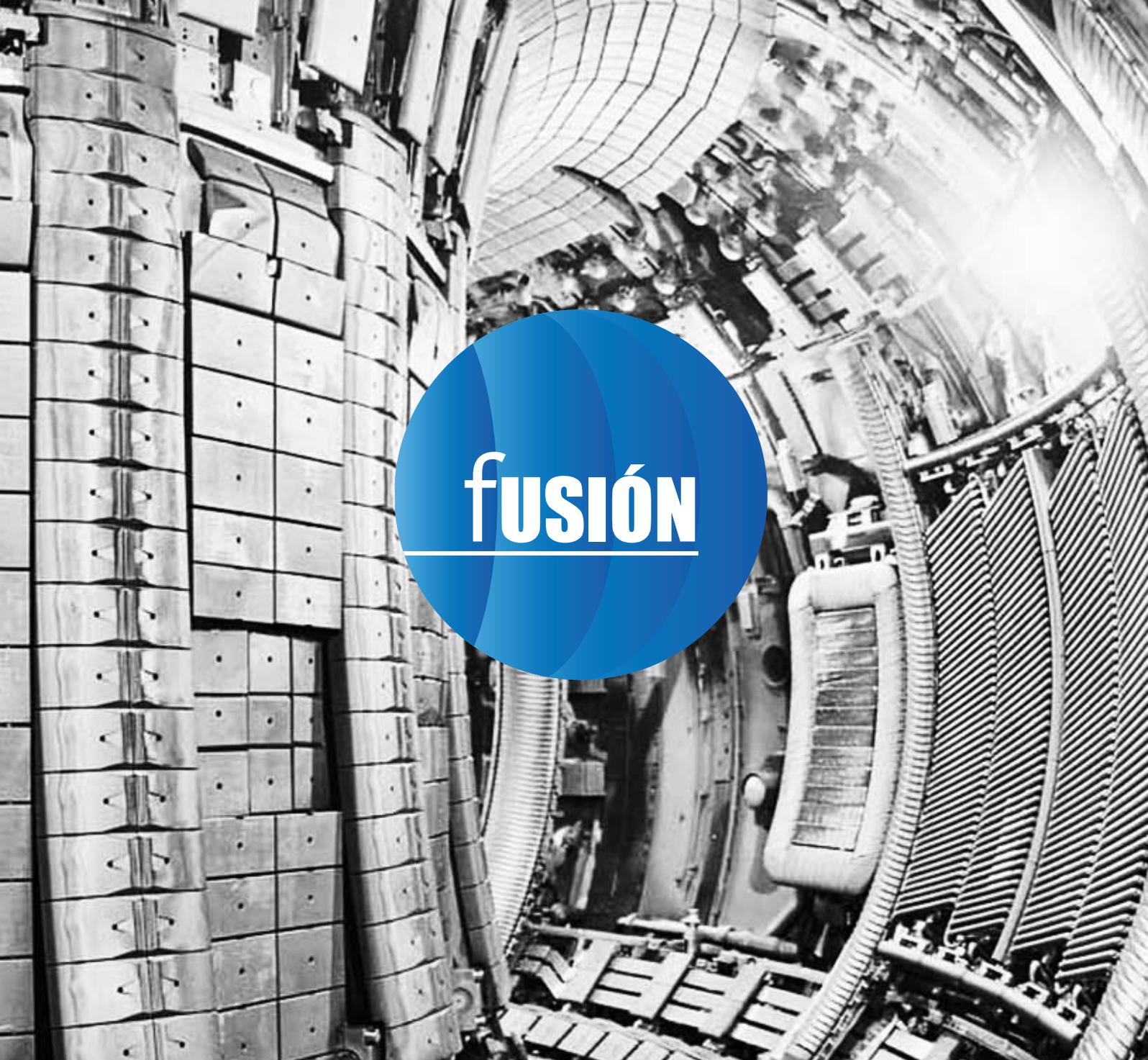


Es nuestro objetivo

Con las energías renovables no podemos garantizar el suministro energético. La solución está allí, disponible, pero requiere un esfuerzo importante. Creemos que el progreso de la humanidad es debido a que en un momento dado hemos podido priorizar y elegir objetivos. Y la fusión nuclear es el objetivo que tenemos que apoyar ahora ya que los beneficios que dará superan con creces la inversión que ahora estamos aportando.

DISPOSITIVOS EXPERIMENTALES DE FUSIÓN POR EL MÉTODO DE CONFINAMIENTO

MAGNÉTICO	TOKAMAK	INTERNACIONAL	ITER-DEMO
		AMÉRICA	 DIII-D/TFTR/NSTX/ALCATOR/PEGASO/UCLA ET  STOR-M
		ASIA	 EAST/HT-7  ADITYA/SST-1  JT-60  KSTAR
		EUROPA	 JET  TORE SUPRA/TFR  ASDEX/TEXTOR  FTU/IGNITOR  T-15  TCV  MÁSTIL-START
	STELLARATOR	 H-1NT  WENDELSTEIN 7-X  DHG  NCSH/HSX  TJ II	
	RFT	 MST  RFX  TPE-RX  T2R	
	OTROS	 LDX/FSSPX/MFTF/MCX/POLYWEL/FOCO DE PLASMA DENSO  MTF	
	INERCIAL	LÁSER	AMÉRICA
ASIA			 GEKKO XII
EUROPA			 HIPER  ASTERIX IV  LMJ/LULI 2000  ISKRA  VULCANO
SIN LÁSER		 Z máquina PACER	



fusión

REACTORES DE FUSIÓN TERMONUCLEAR

www.luispastor.es