

# Capítulo 1

## Fusión nuclear

## 1.- Fusión nuclear

### 1.1.- Principio físico

Los átomos están formados por el núcleo y los electrones. En el núcleo se encuentran los nucleidos, que son los protones y neutrones. Los protones y neutrones se mantienen ligados dentro del núcleo por la fuerza de enlace, pues si no hubiera esta fuerza la repulsión electromagnética entre los protones impediría la existencia de núcleos estables mayores que el hidrógeno.

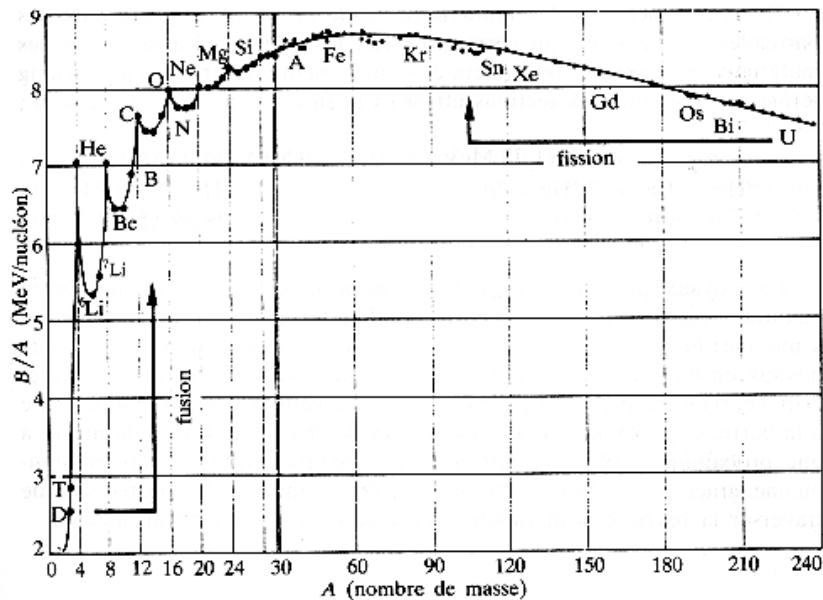


Fig. 1.1. Energía de enlace por nucleón en función de la masa atómica.[Dau 87]

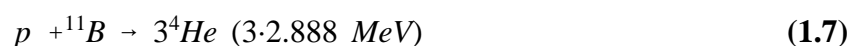
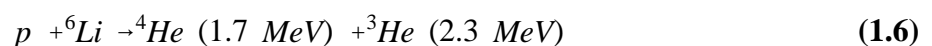
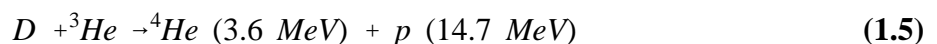
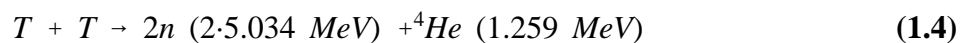
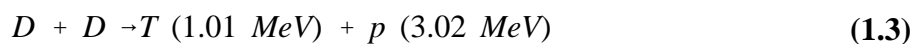
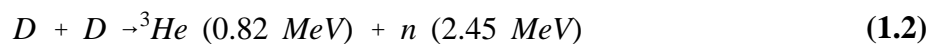
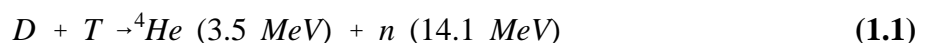
Cada isótopo tiene una energía de enlace, si esta energía se divide entre el número de nucleones de cada núcleo y se pone en función del número másico de cada isótopo, se obtiene una gráfica como la de la figura 1.1 en la que se observa que hay un máximo de energía por nucleón alrededor del isótopo de hierro 56. De esta manera se pueden ver dos maneras de obtener energía a partir de reacciones nucleares.

Una de ellas es la fisión nuclear, consistente en separar un núcleo pesado en dos o más núcleos más ligeros. La suma de las masas de los núcleos ligeros es menor que la del núcleo pesado, el decremento de masa se ha transformado en energía.

El otro modo de obtener energía es la unión de dos núcleos ligeros para dar lugar a otro más pesado, esta reacción se conoce como fusión nuclear. En este caso la energía también se obtiene por la diferencia de masa entre los núcleos que se fusionan y el núcleo resultado de la fusión. Con esta reacción la energía por unidad de masa es mucho mayor que con la fisión, de manera que con la misma cantidad de combustible se logra más energía, obteniendo mayor rendimiento energético por unidad de masa.

## 1.2.- Fusión termonuclear controlada

Para obtener reacciones de fusión se deben unir dos núcleos ligeros para formar otro mayor; en condiciones normales no sucede por la fuerte repulsión electrostática entre los dos núcleos, que sólo tienen cargas positivas. Para que se puedan fusionar dos núcleos superando la barrera electrostática éstos han de tener energías suficientemente elevadas para pasar la barrera de potencial gracias al efecto túnel. Las principales reacciones estudiadas para producir energía por fusión nuclear, ordenadas de menor a mayor temperatura para obtener una tasa significativa de fusiones, son las siguientes [NRL 00]:



Pero todas estas reacciones necesitan altas temperaturas para obtener un valor de la sección eficaz que permita una tasa significativa de reacciones de fusión. La más atractiva actualmente es la fusión de deuterio y tritio para producir una partícula alfa y un neutrón, pues es la que tiene mayor sección eficaz a bajas temperaturas como puede verse en la figura 1.2. Pero en el futuro se piensa utilizar otras reacciones para evitar el empleo de tritio, un isótopo radiactivo del hidrógeno y que entre los productos de la reacción se produzca un neutrón, que activaría las paredes del reactor.

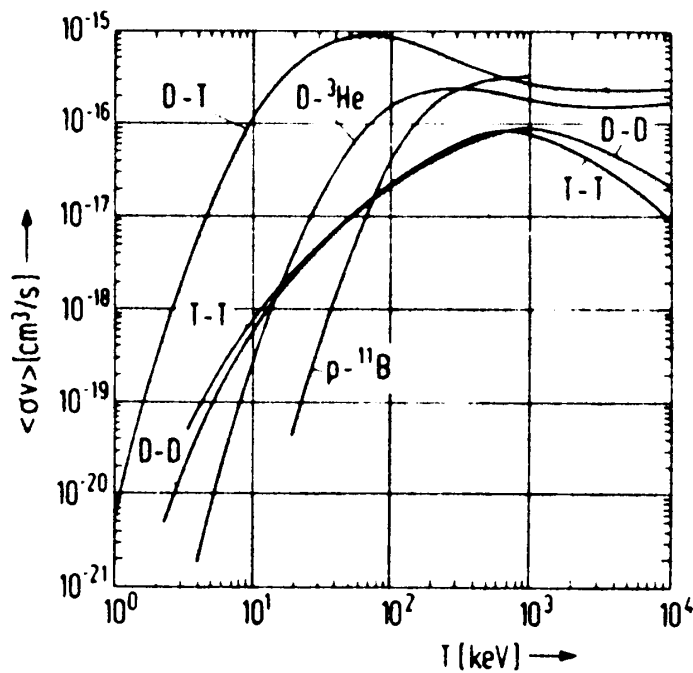


Fig. 1.2. Sección eficaz en función de la temperatura de los dos núcleos para diferentes reacciones de fusión. [Rae 86]

Las temperaturas necesarias para que se produzcan reacciones de fusión están por encima de los 10 keV ( $116 \cdot 10^6$  K). A estas temperaturas, el gas se encuentra en forma de plasma, es decir, está ionizado, los electrones se han separado de sus núcleos y tenemos un gas formado por dos fluidos, los electrones y los iones. Con estas temperaturas no se puede pensar en un contenedor normal para el plasma, pues el contacto con las paredes lo enfriaría inmediatamente. Para ello se tiene que confinar el plasma de otra manera. Esto se puede realizar con el confinamiento magnético, aprovechando que el plasma es un gas ionizado se confina mediante campos magnéticos de manera de no tocar ninguna pared.

### 1.2.1.- Balance de energía

Para mantener el plasma a la temperatura adecuada para que se produzcan las reacciones de fusión, se deben tener en cuenta las entradas y pérdidas de energía dentro del plasma.

En este apartado se hará un balance de potencia de sólo el plasma, sin tener en cuenta aportaciones o pérdidas externas a él. Como entrada de energía se tiene en cuenta el calentamiento óhmico y la potencia de fusión. Las pérdidas se producen principalmente por radiación, transporte del calor y fuga de partículas.

#### 1.2.1.1. Potencia de fusión

Es el término creado por las reacciones de fusión producidas en el plasma. Sólo se tienen en cuenta las partículas cargadas, que son las que quedan confinadas en el plasma, pues las neutras escapan del plasma no contribuyendo al calentamiento de éste. Para el balance se coge como reacción de partida la de la ecuación (1.1) y se obtiene la siguiente expresión:

$$P_{\alpha} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{\alpha} \quad (1.8)$$

Donde  $P_{\alpha}$  es la densidad de potencia producida por fusión;  $n_D$  y  $n_T$  es la densidad de deuterio y tritio del plasma;  $\langle \sigma v \rangle$  es la tasa de reacciones de fusión; y  $E_{\alpha}$  es la energía de la partícula alfa resultante de la reacción.

#### 1.2.1.2. Calentamiento óhmico

Si se produce una corriente en el plasma, éste se calentará por efecto Joule según la siguiente ecuación que nos da la densidad de potencia óhmica:

$$P_{ohm} = \eta j^2 \quad (1.9)$$

Donde  $j$  es la densidad de corriente dentro del plasma y  $\eta$  es la resistividad del plasma, que se puede modelizar como se indica a continuación:

$$\eta = \eta_s Z_{eff} f\left(Z_{eff} \nu, \frac{r}{R}\right) \quad (1.10)$$

Donde  $Z_{eff}$  es una media de la carga de los iones del plasma;  $f$  es una función que tiene en cuenta los electrones atrapados del plasma que a su vez es función de  $Z_{eff}$ , de la frecuencia de colisión  $\nu$  y de la relación entre el radio menor  $r$  y el radio mayor  $R$  del plasma. Finalmente  $\eta_s$  es la resistividad de Spitzer.

El término de la resistividad de Spitzer depende la temperatura como  $T_e^{-3/2}$ , con lo que con sólo calentamiento óhmico no se podrán obtener las altas temperaturas necesarias para la producción de reacciones de fusión. Por ello son necesarios los sistemas de calentamiento adicional.

### 1.2.1.3. Pérdidas por radiación

Un primer tipo de radiación es la radiación de línea. Es la que se produce por los diferentes iones presentes en el plasma, estos se excitan y desexcitan según su nivel atómico y emiten radiación de una longitud de onda precisa, dependiendo del estado inicial y final. Pueden modelizarse según la siguiente expresión [Fon 01]:

$$P_{line} = C_{line} n_e n_{imp} Z_{imp}^{1/2} \frac{T_e'^2}{1 + T_e'^4}; \quad T_e' = \frac{T_e}{10^{-4} Z_{imp}^2} \quad (1.11)$$

Donde  $n_e$  y  $n_{imp}$  es la densidad de los electrones y de las impurezas respectivamente;  $Z_{imp}$  es el número atómico de las impurezas del plasma;  $T_e'$  es una temperatura electrónica corregida según se indica; y  $C_{line}$  es una constante.

Otro tipo de pérdida de radiación es la de *Bremsstrahlung*. Se debe al frenado de los electrones por el campo creado por los iones. Puede describirse mediante la siguiente expresión [Alb 01]:

$$P_B = C_B Z_{eff}^2 n_e^2 T_e^{1/2} \quad (1.12)$$

Donde  $C_B$  es una constante. Como se ve depende de la raíz cuadrada de la temperatura electrónica, con lo que al aumentar la temperatura su contribución a las pérdidas será menor.

Una última fuente de pérdidas por radiación es la radiación sincrotrón, que es la que se produce al tener cargas en movimiento. Su expresión para pérdidas por unidad de volumen es [Alb 01]:

$$P_{syn} \approx C_{syn}(1-t)^{1/2}R_0a^{3/2}T_e^{5/2}B_0^{5/2}n_e^{1/2} \quad (1.13)$$

Donde  $C_{syn}$  es una constante;  $t$  es un parámetro que tiene en cuenta que no toda la radiación sincrotrón se pierde, pues debido a su frecuencia una parte viene reflejada y reabsorbida;  $R_0$  es el radio mayor del plasma;  $a$  el radio menor del plasma;  $T_e$  la temperatura electrónica;  $B_0$  el campo magnético en el centro del plasma; y  $n_e$  la densidad electrónica. En este caso la dependencia con la temperatura es cuadrática, con lo que a mayores temperaturas mayores serán las pérdidas por este tipo de radiación.

#### 1.2.1.4. Transporte de calor y de partículas

Estas pérdidas son debidas al transporte de la materia y del calor a través de las superficies magnéticas. Para estudiarlas se modela el plasma como un fluido de dos especies, los electrones y los iones. A cada una de ellas se le aplican las ecuaciones de difusión y de conservación de la energía para determinar las pérdidas totales por transporte del calor y las partículas.

Un parámetro que sirve para medir la calidad de confinamiento de un plasma, y por tanto sus pérdidas por transporte es el llamado tiempo de confinamiento, que nos da una idea del tiempo que tarda en escapar la energía de dentro del plasma. Su expresión matemática viene dada por:

$$\tau_E = \frac{W_e + W_i}{P_{ohm} + P_{add} + P_\alpha} \quad (1.14)$$

Donde  $W_e$  y  $W_i$  son respectivamente la energía contenida en los electrones e iones;  $P_{ohm}$  es la potencia óhmica;  $P_{add}$  es la potencia adicional y  $P_\alpha$  es la potencia de las partículas alfa producidas por las reacciones de fusión.

### 1.2.2.- Criterio de Lawson e ignición

Una vez estudiadas las fuentes de ganancia y pérdida de energía se ha de hacer un balance para saber si se obtiene energía o sólo se consume. Para ello se tiene el criterio de Lawson, que sirve para saber cuándo las ganancias de energía igualan a las pérdidas. En su forma más simple se puede formular como sigue:

$$E_{in} = \eta E_{out} \quad (1.15)$$

Donde  $\eta$  es la eficiencia global del ciclo de energía y  $E_{in}$  es la energía introducida en el sistema y  $E_{out}$  es la energía saliente del sistema. Si se sustituyen la energía entrante y la saliente por las ecuaciones de los apartados anteriores y después de cierta álgebra, se llega la siguiente expresión para el criterio de Lawson:

$$n\tau_e \geq 10^{20} m^{-3} s \quad (1.16)$$

Donde  $n$  es la densidad del combustible y  $\tau_e$  es el tiempo de confinamiento de la energía. Si en una máquina de fusión se cumple este criterio es que la producción de energía es mayor o igual a la energía inyectada para producir y mantener el plasma.

Hay otros dos puntos importantes para la operación de un reactor:

- Breakeven: cuando la energía producida por las partículas alfa en el plasma iguala la energía externa de calentamiento del plasma. Si se apagase el calentamiento adicional también se pararían las reacciones de fusión.
- Ignición: es necesario el calentamiento adicional para empezar las reacciones de fusión, pero una vez alcanzado este estado las propias reacciones de fusión son suficientes para mantenerse. Si se apagase el calentamiento adicional no se pararían las reacciones de fusión.



### 1.3.- Confinamiento magnético

Para obtener energía de las reacciones de fusión una de las vías es el confinamiento magnético. En este tipo de confinamiento los plasmas son de muy baja densidad pero el tiempo de confinamiento es alto, de esta manera se puede cumplir el criterio de Lawson, que es el que nos indica la posibilidad de producir energía en un reactor de fusión.

Un plasma es un gas ionizado, en el que los iones y electrones que lo forman están disociados. De esta manera se tiene que el conjunto es eléctricamente neutro pero cada partícula está cargada. Como cada partícula tiene carga eléctrica, éstas experimentan la fuerza de Lorentz, con lo que podrán confinarse mediante campos magnéticos, ya que una partícula cargada gira alrededor de una línea de campo magnético.

Una primera aproximación para confinar el plasma sería realizar un cilindro magnético e ir inyectando combustible por los extremos, de manera de tener siempre plasma en el centro donde se producirían las reacciones de fusión.

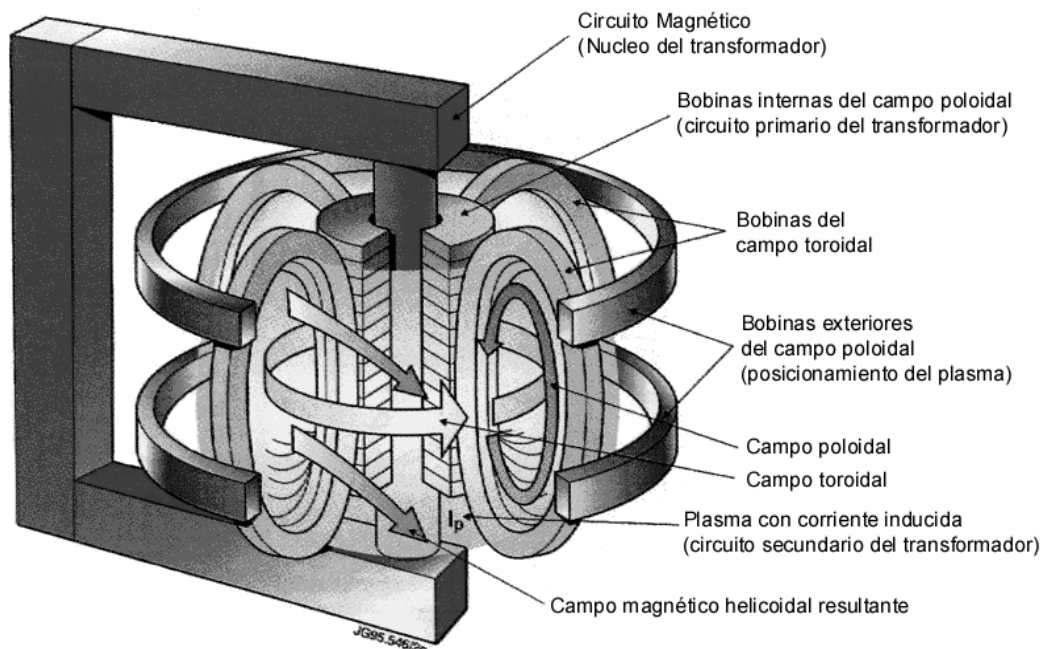
Otra opción es cerrar el cilindro sobre sí mismo y de esta manera obtener un toro, no se escapan partículas por los extremos y el llenado se puede hacer fácilmente pues se llenaría con gas neutro, al que no afectan los campos magnéticos y una vez ionizado quedaría confinado en el toro. En este caso ideal hay un problema, la no uniformidad del campo magnético en el radio mayor hace que los electrones e iones del plasma experimenten una deriva contraria una del otro, creando un campo eléctrico que hace que las partículas escapen del confinamiento para acabar contra las paredes del contenedor y de este modo enfriándose sin llegar a producir reacciones de fusión.

Para evitar las derivas creadas por la no uniformidad del campo magnético se superpone un campo magnético poloidal al toroidal, de manera que la nueva curvatura del campo compensa las derivas y de este modo no se crea el campo eléctrico que rompe el confinamiento. Para obtener este campo magnético poloidal se usan dos estrategias: se induce una corriente en el plasma o se crea mediante bobinas externas a éste. Según el método utilizado para obtener el

campo magnético se tendrá una máquina de una de las dos principales familias de dispositivos de fusión por confinamiento magnético: tokamaks o stellarators.

### 1.3.1.- Tokamaks

En este tipo de máquinas el campo poloidal se crea induciendo una corriente en el plasma. El plasma será el secundario de un transformador, de este modo con las bobinas externas se crea el campo toroidal y con la corriente un campo poloidal, que sumados hace que se compense la deriva de las partículas.



**Fig. 1.3.** Esquema de un tokamak [Bar 96]

El mismo funcionamiento del tokamak hace que sea una máquina pulsada, como es un transformador, éste no puede funcionar de manera continua. Este es el principal inconveniente de este tipo de máquinas, aunque actualmente se están llevando a cabo experimentos para crear el campo poloidal mediante corrientes no inductivas.

### 1.3.2.- Stellarators

En este tipo de máquinas el campo magnético poloidal es creado por bobinas externas al plasma. Todos los campos magnéticos de este tipo de configuración son creados por bobinas exteriores, de modo que no se induce ninguna corriente en el plasma, pudiéndose obtener un funcionamiento continuo de la máquina.

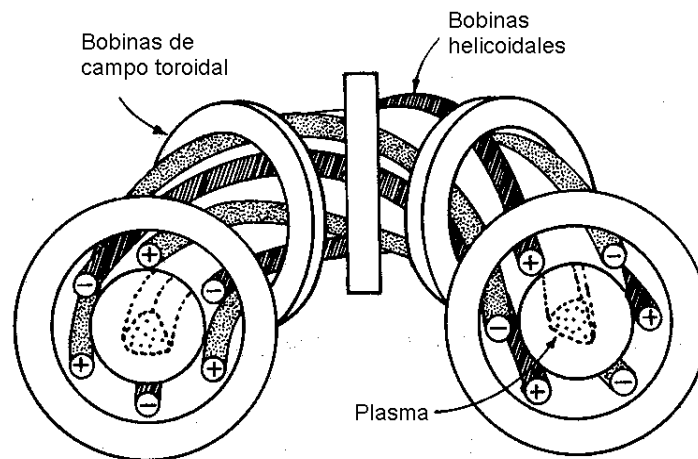


Fig. 1.4. Esquema de un stellarator. [Dol 82]

Los stellarators fueron las primeras máquinas en construirse, pero cuando los experimentos fueron haciéndose mayores se abandonó un poco esta vía, pues se requieren precisiones muy altas para su construcción y con la tecnología de la primera época de la fusión no era posible.

## 1.4.- Estado actual

Actualmente en la investigación sobre fusión nuclear ya se ha conseguido demostrar su viabilidad científica, es decir en alguna de las máquinas actuales se han producido reacciones de fusión. Ha sido en dos grandes tokamaks, como son JET (*Joint European Torus*) de la Unión Europea y TFTR (*Tokamak Fusion Test Reactor*) de los Estados Unidos.

Hasta ahora las máquinas que parecían con más futuro eran los tokamaks, pues la tecnología para construirlos es relativamente más sencilla que no la de los stellarators. Este hecho provocó que las primeras máquinas de tamaño medio fueran del tipo tokamak, con lo que están más avanzadas

y se tiene más experiencia en su operación. De todos modos actualmente la vía de los stellarators, una vez disponible la tecnología necesaria para su construcción, es muy prometedora pues al ser máquinas con un posible funcionamiento continuo, las hacen más aptas para un futuro reactor.

#### 1.4.1.- JET

JET es un gran tokamak construido por la asociación EURATOM y que está emplazado en Abingdon (Inglaterra), entró en funcionamiento en 1983. Una primera etapa de funcionamiento empezó en 1978 para construir y operar el tokamak, esta etapa finalizó en 1999. A partir del 1 de enero de 2000 entró en vigor un nuevo contrato, el EFDA-JET (*European Fusion Development Agreement-JET*) por el que el mantenimiento de las instalaciones quedaba encargado a la asociación UKAEA, mientras que los experimentos son propuestos y realizados por los diferentes laboratorios pertenecientes a la asociación EURATOM [Pam 01]. La máquina tiene unos 15 metros de diámetro y 12 metros de altura. Sus características principales están resumidas en la tabla 1.1.

Parámetro	
Radio menor del plasma (horizontal)	1.25 m
Radio menor del plasma (vertical)	2.1 m
Radio mayor del plasma	2.96 m
Duración del pulso	60 s
Campo magnético toroidal	3.45 T
Corriente del plasma	7 MA
Potencia adicional	~50 MW

**Tabla 1.1.** Principales características de JET [EUR 98]

Es uno de los dos tokamaks en el que se han obtenido reacciones de fusión. Los experimentos llevados a cabo para probar la viabilidad científica de la fusión se produjeron a partir del año 1991. Se inyectó deuterio y tritio en la cámara de vacío y calentando con suficiente potencia se produjeron las reacciones de fusión. Este gran tokamak tiene algunos récords de producción de reacciones de fusión, como son: mayor energía, mayor potencia y mayor relación entre potencia producida e inyectada.

#### 1.4.2.- *Tore-Supra*

*Tore-Supra* es un gran tokamak cuya principal característica son sus bobinas superconductoras. Pertenece a la asociación CEA-Cadarache y comenzó su operación en 1988. Tiene un radio mayor de 2.25 m y un radio menor del plasma de 0.7 m. El tener sus bobinas superconductoras y que todos sus componentes estén refrigerados hace que se pueda operar en estado casi estacionario, obteniendo pulsos de hasta dos minutos.

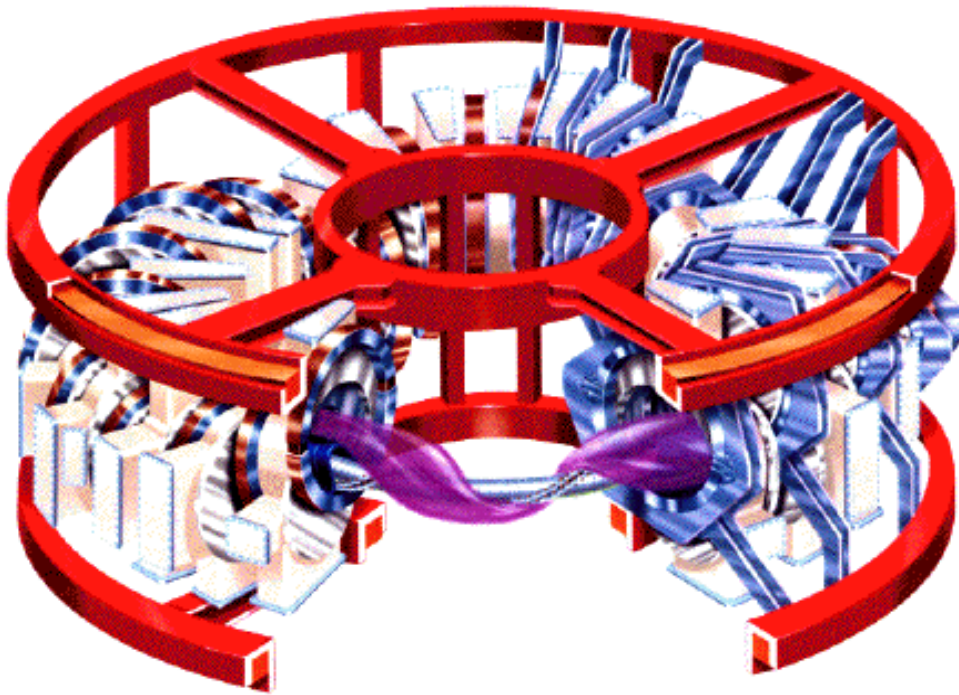
Los principales objetivos científicos de este tokamak comprenden [Cea]:

- Experiencia en bobinas superconductoras trabajando a temperaturas criogénicas.
- Puesta a punto de tecnologías de primera pared capaces de aguantar flujos de algunos megavatios de potencia por metro cuadrado.
- Obtener experiencia en plasmas de larga duración.
- Control y comprensión del plasma del borde, así como control de la pérdida de calor del plasma.
- Dominio de la tecnología del calentamiento por microondas.

#### 1.4.3.- *Heliac flexible TJ-II*

El stellarator TJ-II es el mayor proyecto de fusión nuclear que se ha realizado en España. Este proyecto se inicia en 1986 cuando se presenta ante EURATOM para demostrar su interés científico, en 1990 se demuestra su viabilidad técnica y obtiene el apoyo preferencial de EURATOM, que financia el 45% del proyecto. En 1997 finaliza su construcción y en diciembre de ese mismo año se confinaron los primeros plasmas.

El heliac flexible TJ-II es un stellarator de tamaño medio ( $R_0=1.5$  m,  $a=0.2$  m) construido por el Laboratorio Nacional de Fusión y emplazado en Madrid. La configuración magnética está formada por superficies anidadas en forma de judía que se enrollan helicoidalmente a lo largo del toro con cuatro periodos. Ha sido diseñado con suficiente flexibilidad para generar una amplia variedad de configuraciones magnéticas con una transformada rotacional de 0.9 a 2.5, baja cizalla magnética (-1%;-10%), alto pozo magnético (0 a 6%) y un radio menor medio del plasma comprendido entre 0.1 y 0.2 metros. [Ale 90][Cie 89]



**Fig. 1.5.** Dibujo del stellarator TJ-II en el que se pueden ver las bobinas y la forma del plasma. [Cie]

La finalidad de los experimentos de TJ-II es profundizar en el estudio de la física de los dispositivos con eje magnético helicoidal. La operación de este dispositivo comprenderá tres fases: en la primera se utilizará hasta 600 kW de calentamiento por ondas en la resonancia ciclotrón electrón (ECRH), la segunda fase dispondrá de 3 MW de calentamiento per NBI y por último en la tercera fase se llevará a la máquina a su límite de beta. Los valores máximos previstos son de  $2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$  para la densidad y 2 keV para la temperatura.

Se ha desarrollado un programa experimental destinado a lograr los objetivos previstos. Se definen cuatro grandes grupos de experimentos (estudio del confinamiento, estudio de procesos cinéticos electrónicos, estudio de fluctuaciones y estudio de la interacción plasma-pared) donde en cada uno de ellos están asociados otros experimentos más concretos. [Cie]

La configuración magnética de TJ-II se obtiene con un conjunto de bobinas formado por una bobina circular (CC) de 1.5 m de radio; una bobina helicoidal (HX) que se enrolla alrededor de la bobina circular; 32 bobinas de campo toroidal (TF); dos bobinas de campo vertical (VF); cuatro bobinas óhmicas (OH); y 4 bobinas de campo radial (RF). [Cie 89]

La cámara de vacío se enrolla alrededor del *hard core* (el *hard core* es el conjunto formado por la bobina circular y la helicoidal) siguiendo la forma del plasma dejando el *hard core* fuera de la cámara de vacío. La cámara cuenta con un total de 96 ventanas distribuidas tanto en el exterior del toro como en la parte inferior y superior lo que permite una observación detallada de su geometría tridimensional. El tamaño de las ventanas varía según su posición ya que depende del espacio que dejan libres las bobinas.

Los sistemas de calentamiento se implementan por fases. En la primera fase se dispone de un sistema ECRH proporcionado por dos girotrones en el segundo armónico (53.2 Ghz) para lograr una potencia inyectada total de 600 kW. En la segunda fase se añadirán hasta 3 MW de potencia por inyección de haces neutros en dos líneas. Finalmente en la tercera fase se llevará TJ-II a su límite beta y el sistema de calentamiento utilizado dependerá de los resultados alcanzados en las anteriores fases y otros dispositivos.

#### 1.4.4.- LHD

LHD (*Large Helical Device*) es un stellarator situado en Toki (Japón) con bobinas superconductoras, entró en funcionamiento en 1998 y desde entonces está obteniendo resultados con pulsos cada vez más largos, actualmente el pulso más largo ha sido de 2 minutos [Sao 02]. Es el mayor stellarator actualmente en funcionamiento.

El objetivo general del LHD es demostrar el potencial de los dispositivos helicoidales para producir plasmas sin corrientes en estado estacionario con un alto parámetro de Lawson e investigar los plasmas en un amplio rango de operación.

#### 1.4.5.- Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X es un gran stellarator actualmente en construcción en Greifswald (Alemania) y que está previsto que inicie su operación en 2006. En esta máquina todas sus bobinas son superconductoras, con lo que se podrá tener un funcionamiento continuo y obtener experiencia para la operación de un reactor comercial. Para su funcionamiento en continuo el calentamiento será por ondas electromagnéticas, si se calienta por inyección de neutros, la duración máxima del

pulso será inferior a media hora. No está previsto operar con tritio, pues las características de los plasmas en ignición en un tokamak y un stellarator son muy parecidas, el no emplear este isótopo hace que se ahorre mucho en el coste pues no se inducirá radioactividad en la máquina.

Parámetro	W7-X	LHD	TJ-II
Tipo de configuración	modular	torsatrón	heliac
Número de periodos	5	10	4
Radio mayor	5.5 m	3.9 m	1.5 m
Radio menor medio	0.5 m	0.5-0.65 m	0.12-0.2 m
Campo magnético	3 T	3-4 T	1 T
Volumen del plasma	~30 m <sup>3</sup>	20-30 m <sup>3</sup>	1.2 m <sup>3</sup>
Potencia adicional	~14 MW		
ECRH		10 MW	~0.6 MW
ICRH		3-9 MW	
NBI		15-20 MW	≤3-6 MW
Duración del pulso	<30 min	>10 s	0.5 s

**Tabla 1.2.** Principales características de los stellarators W7-X, LHD y TJ-II. Adaptada de [Fon 01]

#### 1.4.6.- ITER

ITER es el llamado siguiente paso. Se trata de un gran tokamak en el que se pretende probar la viabilidad tecnológica de la fusión, es decir demostrar que con la tecnología actual se puede construir un reactor donde se produzcan suficientes reacciones de fusión como para producir electricidad. Éste es un proyecto internacional en el que colaboran los científicos y gobiernos de Canadá, Unión Europea, Rusia, Japón, Estados Unidos, China y Corea del Sur. Ha sufrido diversas modificaciones en su diseño, los parámetros actuales para su construcción y operación están resumidos en la tabla 1.3.

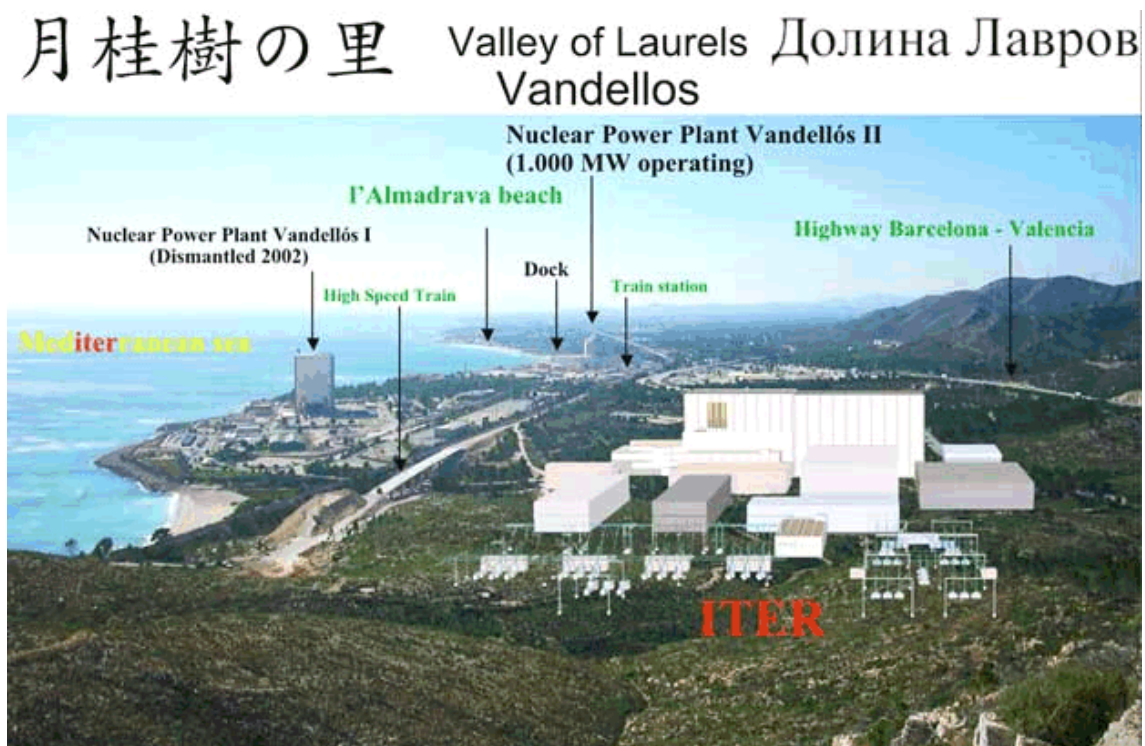
Actualmente la fase de diseño ya ha concluido y queda por decidir el emplazamiento del reactor. Los lugares candidatos a albergar este gran reactor de fusión son: Clarington (Canadá), Cadarache (Francia), Vandellòs (España) y Rokkasho- Mura (Japón).



Potencia de fusión	500 MW
Duración del pulso	$\geq 400$ s
Radio mayor del plasma	6.2 m
Radio menor del plasma	2 m
Corriente inducida	15 MA
Campo magnético toroidal	5.3 T
Volumen del plasma	837 m <sup>3</sup>
Calentamiento auxiliar	73 MW

**Tabla 1.3.** Principales características del reactor ITER.

La posibilidad de la construcción de ITER en Vandellòs es una excelente oportunidad para el desarrollo de la ciencia y tecnología en el país, ya que su construcción supondría una inversión de más de 4000 millones de euros. Además implicaría la creación de un gran parque tecnológico pues en su construcción concurrirían las más avanzadas tecnologías en diferentes aspectos como pueden ser energía, superconductores, materiales avanzados, electrónica, electrotécnica, computación.



**Fig 1.6.** Composición del emplazamiento ofertado por España para la construcción de ITER. [ITE]

## **1.5.- Conclusiones**

La fusión termonuclear es una fuente de energía limpia, segura y prácticamente inagotable con un costo de combustible casi nulo. Pero presenta múltiples desafíos científicos y tecnológicos que hace que sea necesario un gran esfuerzo de investigación para su consecución.

Actualmente se ha logrado obtener reacciones de fusión en grandes máquinas, el siguiente paso sería obtener energía de estas reacciones y finalmente, obtenerla de manera competitiva. Para ello se están construyendo grandes máquinas de fusión para estudiar mejor las características del plasma y obtener experiencia en operación continua de este tipo de máquinas.

La posibilidad de la construcción de ITER en Vandellòs es una oportunidad para impulsar la investigación en España, ya que supondría una gran inversión en tecnologías punteras de diversa índole y la implicación de miles de científicos en la operación del tokamak.