

Capítulo 5

Los stellarators

Los stellarators se consideran una alternativa a los tokamaks para la construcción del próximo reactor de demostración debido a sus ventajas respecto a estos desde el punto de vista de rentabilidad comercial, principalmente debido a la posibilidad de funcionamiento continuo. En los últimos años el desarrollo de los stellarators ha evolucionado de forma notable gracias al esfuerzo de investigación que se está realizando en todo el mundo. En los últimos años diversos dispositivos se han puesto en funcionamiento y otros están en construcción.

La importancia de la investigación en stellarators no reside únicamente en que constituyen una alternativa a los tokamaks como concepto de diseño de los futuros reactores de fusión sino que además su investigación permite ampliar el conocimiento de la física de los plasmas confinados magnéticamente. La comparación de resultados de stellarators y tokamaks ayuda a conocer mejor el comportamiento de los plasmas termonucleares y a perfeccionar conceptos en vista a la construcción de un reactor comercial sea este o no un stellarator.

Finalmente hay que considerar la situación actual en Europa, donde se está aumentando la investigación en stellarators, y en especial el programa español de fusión centrado en stellarators con el Helic Flexible TJ-II de la Asociación EURATOM-CIEMAT.

5.1 Características

5.1.1 Similitudes y diferencias con los tokamaks

Los stellarators son dispositivos toroidales de confinamiento magnético con unas propiedades similares a los tokamaks, ambos tipos de dispositivos tienen superficies magnéticas anidadas. Las diferencias aparecen al considerar cómo se produce el campo magnético helicoidal, en los stellarators éste se crea únicamente mediante bobinas exteriores al plasma con lo que no se necesita inducir la corriente del plasma propia de los tokamaks.

Las principales diferencias con los tokamaks son que el plasma de los stellarators no tiene simetría axial, es decir su forma varía al girar a lo largo del eje magnético. La ausencia de corriente en el plasma también implica la ausencia de disrupciones internas (dientes de sierra) e inestabilidades inducidas por el *current-drive*. Otras diferencias son que los stellarators tienen el *shear* con signo contrario a los tokamaks, este *shear* invertido es importante como mecanismo para la mejora del confinamiento en los tokamaks. Además, las corrientes de *bootstrap* son útiles en los tokamaks porque permiten reducir la magnitud de la corriente inducida pero en los stellarators no son deseables porque perturban la configuración magnética y es necesario minimizarlas.

Existen tres tipos de stellarators (figura 5.1): torsatrons con bobinas helicoidales continuas, los stellarators modulares con una disposición toroidal de bobinas no planas y los heliacs con un conjunto de bobinas planas circulares distribuidas a lo largo de una hélice enrollada alrededor de una bobina central circular. Los torsatrons tienen un *shear* parecido al de los tokamaks (pero cambiado de signo), un pozo magnético central que aumenta con el valor de la beta y un eje magnético casi circular. Los stellarators modulares y heliacs tienen un *shear* muy bajo, un pozo magnético que no varía con la beta y un eje magnético con una marcada forma helicoidal.

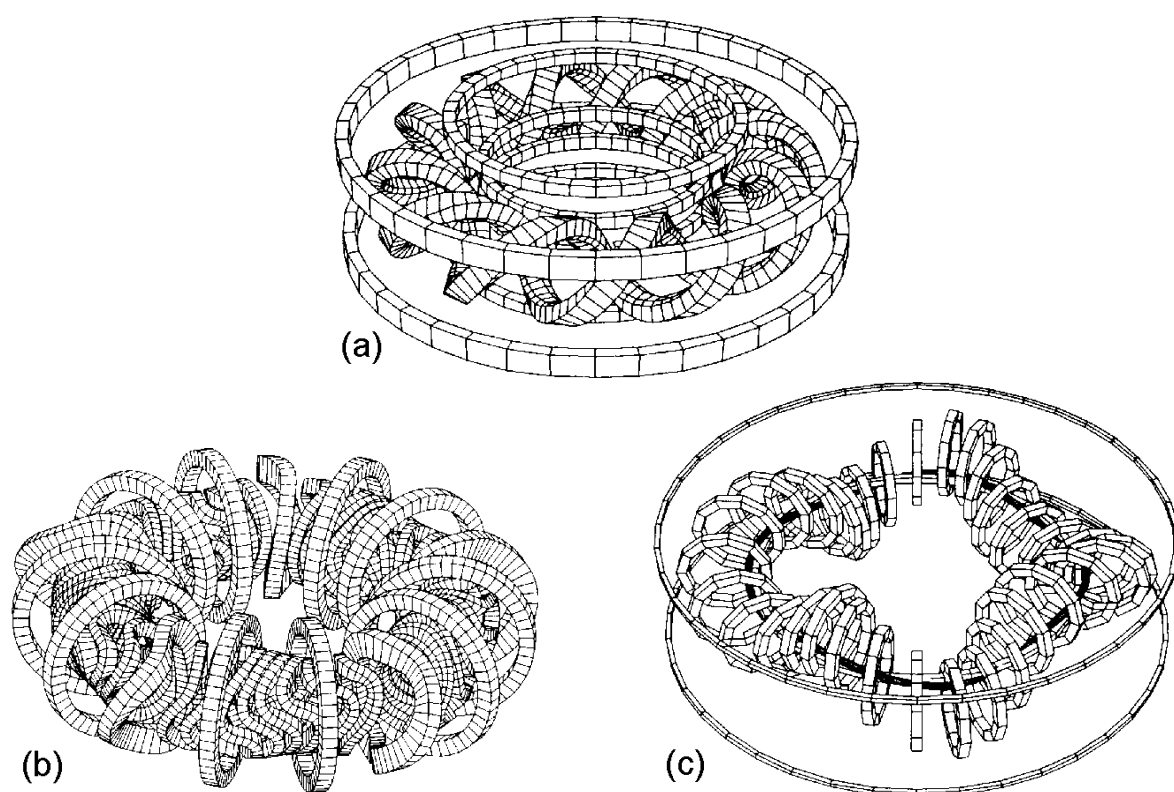


Figura 5.1 Esquema de la disposición de las bobinas de los tres tipos de stellarators. a) torsatron, ATF; b) modular, W7-AS; c) heliac, TJ-II [Lyo90].

5.1.2 Ventajas e inconvenientes de los stellarators

La ausencia de corriente inducida en el plasma implica que los stellarators presenten un gran potencial como reactor comercial ya que son dispositivos que inherentemente funcionan en estado estacionario y que no existe peligro de disrupción.

Otras ventajas son que los stellarators permiten un mayor rango de configuraciones magnéticas y un mejor control externo que en los tokamaks. Esta mayor flexibilidad permite distinguir algunos de los mecanismos responsables del transporte, contribuyendo de esta forma al conocimiento del transporte en plasmas, incluso en tokamaks.

Pero los stellarators tienen el inconveniente que su diseño es bastante más complejo que el de los tokamaks y requiere un importante esfuerzo de construcción para lograr la precisión necesaria para conseguir un correcto confinamiento del plasma. Un problema asociado a su diseño es la disposición de las ventanas de acceso al plasma cuya ubicación está condicionada por los espacios libres disponibles entre las bobinas.

Otros inconvenientes son las elevadas fuerzas electromagnéticas entre las bobinas (especialmente en stellarators modulares), un elevado rizado toroidal y la existencia del rizado helicoidal, produciendo partículas atrapadas debido a diferencias del campo magnético a lo largo de una línea de campo.

5.1.3 Estado actual del desarrollo de los stellarators

En la actualidad diversos dispositivos están en funcionamiento en todo el mundo, los últimos stellarators puestos en marcha son de dimensiones comparables a los tokamaks existentes y también lo son sus resultados. Además se está construyendo el stellarator modular Wendelstein 7-X.

El progreso de los stellarators en los últimos años ha sido impulsado por el desarrollo de herramientas computacionales que permiten un cálculo preciso de la geometría de la máquina y una fabricación de las bobinas y de la cámara de vacío dentro de los pequeños márgenes de tolerancia exigidos.

Algunos de los dispositivos más relevantes actualmente en funcionamiento son el LHD (Japón), W-7AS (Alemania), HSX (Estados Unidos) y el TJ-II (España). Las principales características de estos dispositivos se recogen en la tabla 5.1

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

Tabla 5.1 Principales parámetros de los stellarators LHD [Mot95], W7-AS [IPP00], HSX [And95] y TJ-II [Cie89]

a) Large Helical Device (LHD)

El LHD del National Institute for Fusion Science (NIFS) produjo su primer plasma en marzo de 1998. Es un torsatron con dos bobinas helicoidales superconductoras de NbTi y tiene un radio mayor $R_0 = 3.9$ m, un radio menor medio $a = 0.65$ m y el campo magnético en el eje es $B_0 = 4$ T.

Además de las dos bobinas helicoidales dispone de tres pares de bobinas poloidales para controlar la configuración magnética. Todas las bobinas son superconductoras lo que permite explorar propiedades del plasma en pulsos de larga duración en condiciones de estado estacionario.

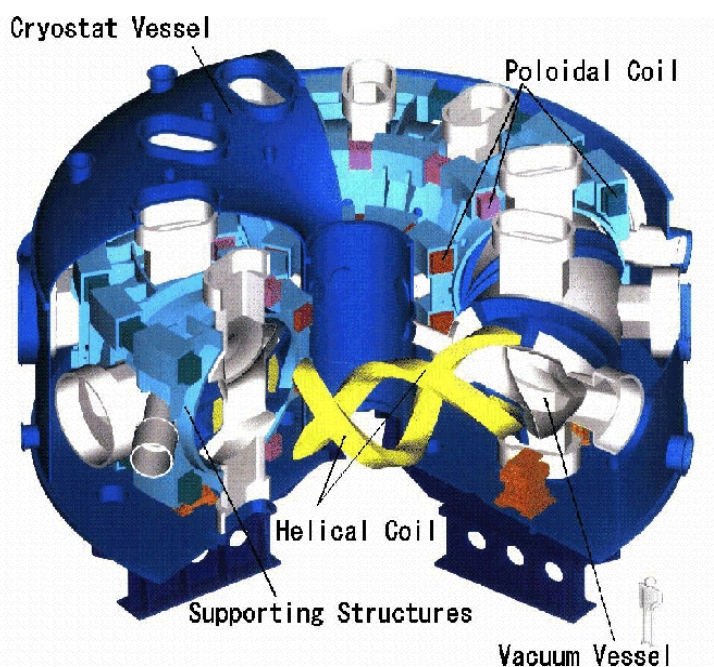


Figura 5.2 Esquema del Large Helical Device (LHD) [Lyo 95]

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. Los principales objetivos a realizar son [IFM90]:

- Estudio del transporte del plasma en condiciones de alto valor del triple producto $n\tau T$ que se puedan extrapolar a los plasmas de reactores. La comparación con stellarators más pequeños permitirá establecer leyes de escala que incluyan la dependencia con el tamaño y el campo magnético.
- Consecución de plasmas con alta beta. Este es uno de los temas fundamentales en la investigación de plasmas toroidales.
- Operación en estado estacionario a través de experimentos con control del plasma usando un divertor.

- Estudio del comportamiento de las partículas de alta energía.
- Aumento del conocimiento de los plasmas confinados toroidalmente realizando estudios complementarios a los realizados en tokamaks.

Experimentos con 2.6 MW de potencia auxiliar NBI han permitido alcanzar temperaturas de los electrones de 3.3 keV, 2.4 keV para los iones y un máximo de la energía almacenada de 0.75 MJ. Otros parámetros alcanzados son una densidad máxima de $7.7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, tiempo de confinamiento de 0.28 s. El LHD también ha demostrado su potencial para la operación en estado estacionario con descargas de hasta 22 segundos de duración [Kom00].

b) Wendelstein 7-AS

El Wendelstein 7-AS es un stellarator modular de periodo 5, con $R_0 = 2.0 \text{ m}$, $a = 0.2 \text{ m}$ y $B_0 = 2.5\text{-}3.5 \text{ T}$, que está en funcionamiento desde 1988 en el Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (Alemania). Fue pionero en la utilización de bobinas modulares. Su configuración magnética se consigue con 45 bobinas modulares no planas (figura 5.3), al campo magnético generado por estas bobinas se superpone un campo toroidal generado por 10 bobinas planas y un campo vertical generado por tres pares de bobinas poloidales. La variación de la intensidad de estos campos confiere al dispositivo la flexibilidad de la configuración magnética.

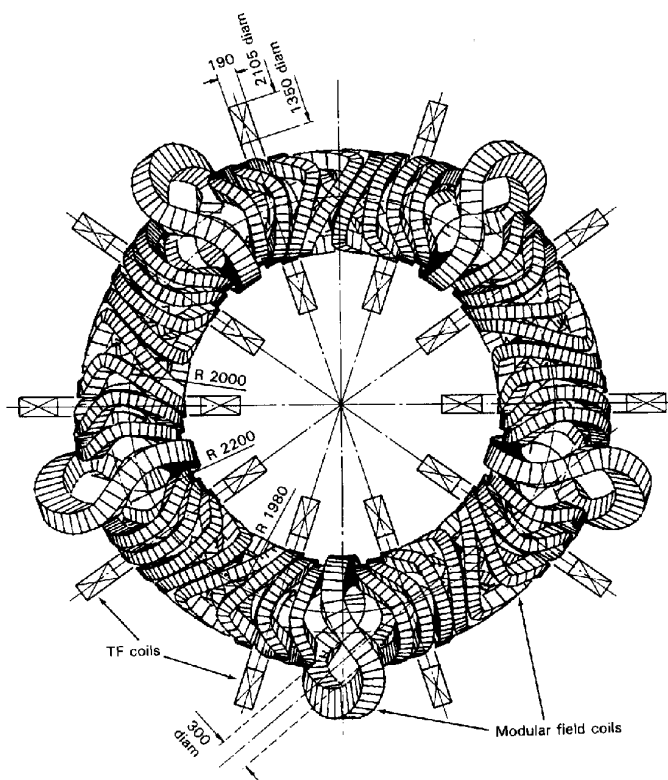


Figura 5.3 Disposición de las bobinas modulares y toroidales del Wendelstein 7-AS [SaR90]

Entre los principales objetivos del Wendelstein 7-AS figuran [SaR90]:

- Investigación de los plasmas libres de corrientes y optimización de los métodos de calentamiento.
- Estudio del equilibrio y límites de estabilidad en función de los parámetros de la configuración magnética. Demostración del equilibrio y transporte mejorado debido a la mejora de la configuración magnética.
- Descripción del transporte local y determinación de los efectos del rizado, partículas atrapadas y campos eléctricos.
- Estudio de las fuentes de impurezas y transporte en el borde y control de impurezas y densidad en operación en estado estacionario.

Los máximos parámetros alcanzados en diferentes experimentos son una temperatura de electrones de 5.8 keV, temperatura de iones de 1.5 keV, una densidad hasta $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ y un tiempo de confinamiento hasta 50 ms [Wen99].

c) Helically Symmetric Experiment (HSX)

El Helically Symmetric Experiment (HSX) [And95] es un stellarator modular construido en Universidad de Wisconsin (Estados Unidos) cuyos primeros plasmas se produjeron en Agosto de 1999. Las principales características de la máquina son: radio mayor $R_0 = 1.2 \text{ m}$, radio menor $a = 0.15 \text{ m}$ y campo magnético en el eje $B_0 = 1 \text{ T}$. Es una máquina de tamaño medio que tiene una razón de aspecto de 8, pero la curvatura toroidal del campo equivale a un stellarator con una razón de aspecto de 300.

Con estos parámetros de la máquina el HSX alcanza, con 200 kW de potencia ECRH, una temperatura central de los electrones de 0.7 keV, con una densidad de hasta $1 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y un tiempo de confinamiento de unos 2 ms. [And99].

El HSX está diseñado para tener una configuración magnética quasi-simétrica helicoidalmente. Esta configuración se obtiene por medio de 48 bobinas modulares, otras 48 bobinas planas, pero no circulares, proporcionan flexibilidad a la máquina permitiendo variar su configuración.

Los principales objetivos que comprende el programa experimental del HSX son [And99b]:

- Estudio del confinamiento del plasma en una configuración quasi-helicoidalmente simétrica.
- Control de las órbitas de pérdida directa.
- Estudio de la viscosidad neoclásica.
- Análisis de la conductividad neoclásica en regímenes de baja colisionalidad.
- Medida de las corrientes Pfirsch-Schluter.
- Estudio del transporte anómalo en dispositivos con geometría helicoidal.

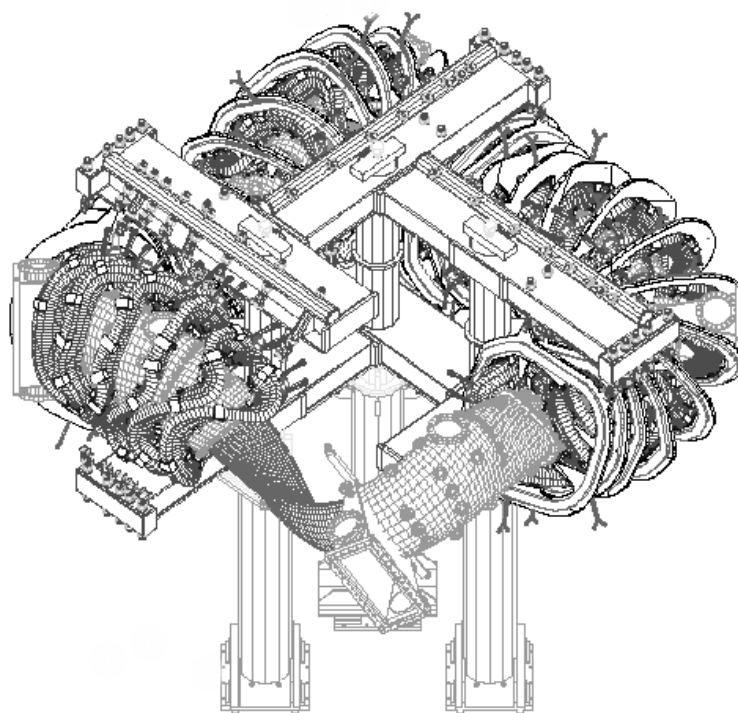


Figura 5.4 Esquema del Helically Symmetric Experiment (HSX) [And95]

5.2 El 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 (fase I), en 1990 se demuestra su viabilidad técnica (fase II) y obtiene el apoyo preferencial de EURATOM, que financia el 45% del proyecto. En 1997 finaliza su construcción y en diciembre de ese año se confinaron los primeros plasmas.

El TJ-II es un heliac de tamaño medio ($R_0 = 1.5$ m, $a = 0.2$ m) con una configuración magnética formada por superficies anidadas en forma de judía que se enrollan helicoidalmente a lo largo del toro con cuatro periodos. El TJ-II ha sido diseñado con suficiente flexibilidad para generar una amplia variedad de configuraciones magnéticas con una transformada rotacional de 0.9 a 2.5, bajo *shear* (-1% - 10%), alto pozo magnético (0 a 6%) y un radio menor del plasma comprendido entre 0.1 y 0.2 metros [Ale90][Cie89].

5.2.1 Objetivos

La finalidad de los experimentos del TJ-II es profundizar en el estudio de la física de los dispositivos con eje magnético helicoidal. La operación del TJ-II comprenderá tres fases: en la primera se utilizará hasta 600 kW de calentamiento ECRH, la segunda fase dispondrá de 3 MW de calentamiento por NBI y por último en la tercera fase se llevará al TJ-II a su límite de

beta. El máximo valor previsto que se alcance para la densidad es de unos $2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$ y de 2 keV para la temperatura.

Se ha desarrollado un programa experimental destinado a lograr los objetivos previstos. Se ha definido cuatro grandes grupos de experimentos y en cada uno de ellos están asociados experimentos más concretos [Cie98].

Estudio del confinamiento. Con estos estudios se pretende entender mejor los parámetros que influyen en el confinamiento del plasma, así como la manera como lo hacen. Se presta especial atención a los siguientes fenómenos:

- Superficies magnéticas y estudio de los errores del campo.
- Ventanas de equilibrio. Dependencia de la transformada rotacional y del pozo magnético.
- Plasmas de baja colisionalidad. Efectos de las partículas atrapadas sobre el confinamiento del plasma.
- Partículas rápidas.
- Transporte fuera del equilibrio.
- Estructuras del núcleo del plasma.
- Transporte de partículas y efecto isotópico.

Estudio de procesos cinéticos electrónicos. Estos estudios se refieren a los procesos cinéticos producidos por ondas en la resonancia ciclotrónica de los electrones. Ayudarán a comprender mejor este método de calentamiento. Incluye los siguientes experimentos:

- Estudios de la corriente inducida por estas ondas en el TJ-II.
- Modulación de potencia y perfil de deposición.

Estudios de fluctuaciones. Estos estudios se centran en la producción de posibles inestabilidades, así como la manera de evitarlas. Se analizan:

- Fluctuaciones de la temperatura electrónica y los mecanismos de generación de las mismas.
- Turbulencia magnética.
- Fenómenos no estacionarios.
- Control de confinamiento y turbulencia.
- Estudios comparativos en dispositivos con configuraciones magnéticas diferentes.

Interacción plasma-pared. En este grupo de experimentos se estudia la física del borde del plasma y la interacción con la pared, que comprenden:

- Estudios de reciclado.
- Estudios de sondas de superficie.

5.2.2 Diseño

a) Sistema de bobinas

La configuración magnética del TJ-II se obtiene con un conjunto de bobinas (figura 5.5) formado por: una bobina circular (CC) de 1.5 m de radio, fabricada de una sola pieza para poder soportar la elevada densidad de corriente que circula por ella. Una bobina helicoidal (HX), dividida en dos mitades, que se enrolla alrededor de la bobina circular, esta bobina está mecanizada en el mismo armazón que la bobina circular formando lo que se llama *Hard Core* (HC). 32 bobinas de campo toroidal (TF) se disponen siguiendo una hélice enrollada a lo largo del *hard core*, estas bobinas son planas y circulares. Finalmente para controlar la posición del plasma y anular campos no deseados se dispone de un grupo de bobinas compuesto por: dos bobinas de campo vertical (VF) que se encargan de controlar la posición del eje magnético, cuatro bobinas óhmicas (OH) sirven para anular posibles corrientes espúreas creadas por efecto del calentamiento del plasma y cuatro bobinas de campo radial (RF) que son las encargadas de compensar campos no deseados [Cie89].

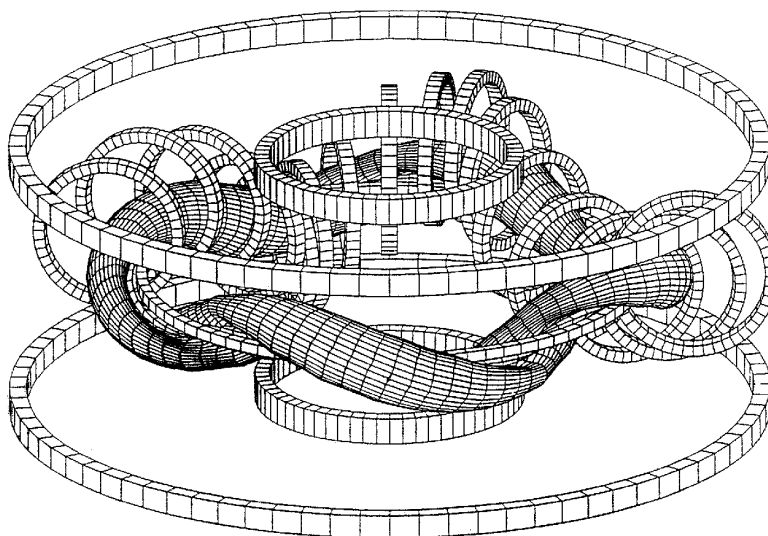


Figura 5.5 Esquema de la disposición de las bobinas del TJ-II. También se muestra la forma del plasma [Bot96]

De las 32 bobinas toroidales (TF), 28 tienen un radio de 42.5 cm y las cuatro restantes tienen un radio de 47.5 cm y sus centros también están desplazados 5 cm en la dirección radial relativa a la posición de referencia para permitir la ubicación de los inyectores de haces neutros.

Las bobinas del *hard core* (CC y HX), debido a su proximidad al plasma, tienen un gran efecto sobre él y son las principales responsables de la transformada rotacional de la configuración magnética. La flexibilidad de la máquina (figura 5.6), es decir los

diferentes valores de la transformada rotacional, se consigue variando la relación entre la corriente que circula por la bobina circular y por la bobina helicoidal.

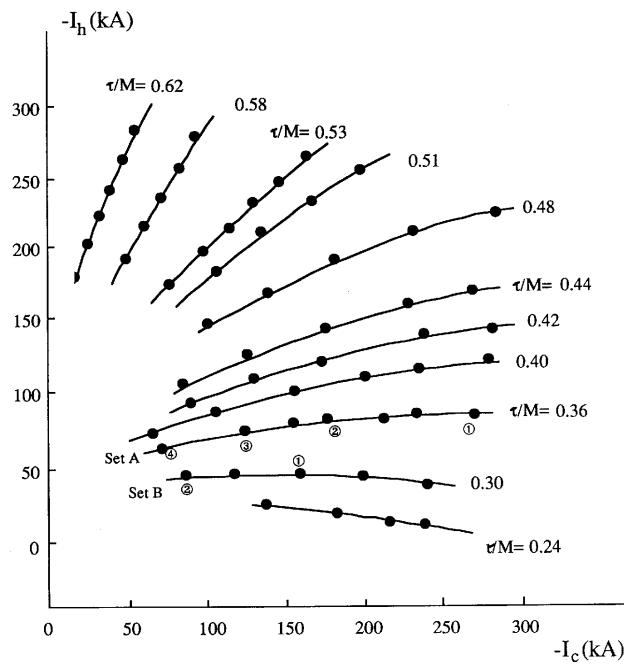


Figura 5.6 Diagrama de flexibilidad del TJ-II. Se representa el valor de la transformada rotacional por periodo en función de la corriente que circula por la bobina circular (I_c) y por las bobinas helicoidales (I_h) [Cie89]

b) Cámara de vacío.

La cámara de vacío se enrolla alrededor del *hard core* siguiendo la forma del plasma. El *hard core* se deja fuera de la cámara de vacío, esta disposición obliga a realizar un surco en la cámara para alojarlo. La cámara de vacío debe dejar suficiente espacio para las ventanas donde se ubican los sistemas de diagnóstico y los sistemas de calentamiento. Hay un total de 96 ventanas distribuidas tanto en el exterior del toro como en la parte inferior y superior que permiten una observación detallada de su geometría tridimensional. El tamaño de las ventanas varía según la posición que tengan ya que depende mucho del espacio que dejan libre las bobinas.

c) Sistemas de calentamiento

Está previsto implementar los distintos sistemas de calentamiento en tres fases diferentes:

- En la **fase I** se dispone de calentamiento ECRH proporcionado por dos girotrones funcionando en el segundo armónico (53.2 GHz) con una potencia inyectada de hasta 600 kW. Se dispone de dos líneas de transmisión localizadas en dos posiciones toroidalmente simétricas para conseguir una alta flexibilidad tanto en

el calentamiento del plasma como en los experimentos de generación de corriente. En esta fase se han obtenido los siguientes parámetros del plasma, $n_e \approx 1.2 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $T_e(0) \approx 2 \text{ keV}$, $W_{\text{th}} \approx 1.5 \text{ kJ}$ y $\tau_E \approx 4 \text{ ms}$ en pulsos de hasta 300 ms de duración [Ale00].

- En la **fase II** se añaden hasta 3 MW de potencia por inyección de haces de neutros en dos líneas (una en la dirección del campo magnético y la otra en la dirección contraria). Los parámetros del plasma que se alcanzarán son: $n_e(0) \approx 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $\beta(0) \approx 3\%$ y $\tau_E \approx 6 \text{ ms}$.
- En la **fase III** se llevará al TJ-II a su límite de beta y se estudiará la posibilidad de alcanzar la segunda región de estabilidad. El sistema de calentamiento empleado dependerá de los resultados alcanzados en la fase II y en otros dispositivos.

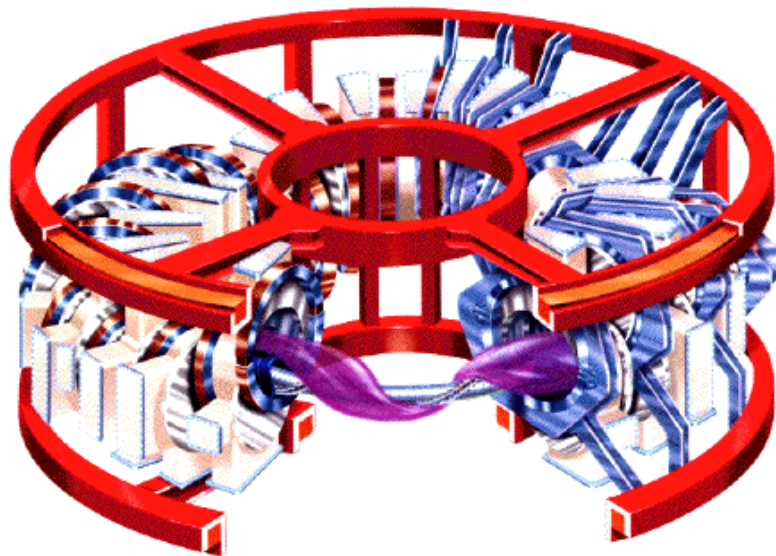


Figura 5.7 Esquema del TJ-II, en el que se muestran sus principales componentes [CIEMAT]