



Luis Fernando ROJO VIRSEDA es Licenciado en Ciencias Físicas por la Universidad Complutense de Madrid y Diplomado en Ingeniería Nuclear. Desde 1971 en la JEN y a partir de 1974 en INITEC, ha desarrollado trabajos relacionados con el campo nuclear, participando, entre otros, en los proyectos de C. N. Ascó, C. N. Vandellós y fase previa de C. N. Escatrón, llevados a cabo por dicha empresa. Desde 1986, destacado por INITEC, se encuentra participando en el proyecto TJ-II, dispositivo de fusión termonuclear por confinamiento magnético, auspiciado por la Asociación CIEMAT-EURATOM.

COLABORACION EN UN PROYECTO DE INVESTIGACION

UNA EXPERIENCIA DE INGENIERIA

El objetivo final de la fusión nuclear es la producción de energía, pero a corto y medio plazo supone un medio de potenciar el desarrollo científico y progresar en el campo de las tecnologías avanzadas. La complejidad de las mismas requiere de una estrecha cooperación internacional a fin de obtener resultados con una mayor rapidez. Un ejemplo de esta colaboración lo constituye el programa de fusión de la CEE, al que España contribuye en el marco del Plan Nacional de Fusión.

Desde la firma, en 1980, de un acuerdo de cooperación entre España y Euratom para potenciar el desarrollo de la fusión y más concretamente desde 1986, año de nuestra plena integración en la Comunidad Europea, el Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y Tecnológicas (CIEMAT), se ha convertido en un organismo asociado al programa de fusión de Euratom. Esta circunstancia ha hecho que el CIEMAT se planteara la necesidad de establecer un laboratorio y un plan de fusión, contando para este último con el asesoramiento de Euratom, así como con la colaboración del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (USA), del Instituto de Física del Plasma Max Planck en Garching y del Centro de Investigaciones de Karlsruhe, ambos en Alemania. Para cumplir estos objetivos se decidió el comienzo del proyecto TJ-II en 1983, definido en principio como un experimento de confinamiento de plasma, complementario al programa de fusión de Euratom. Conviene dejar claro que en ningún caso va a constituir el TJ-II un reactor experimental de fusión, sino como queda dicho, un dispositivo para el estudio de características de confinamiento, de cuya explotación puedan extraerse conclusiones de cara a la construcción futura de centrales de producción de energía eléctrica.

Dado que los esfuerzos europeos se centran fundamentalmente en el terreno de los tokamaks, y por la razón anteriormente expuesta, se prefirió dirigir la atención

sobre un concepto de confinamiento magnético distinto al de los tokamaks, los stellarators.

Los stellarators cubren una amplia variedad de posibles configuraciones, de las cuales solamente un reducido número han llegado a plasmarse en dispositivos experimentales. Estos aparatos constituyen, en la historia de la fusión controlada, uno de los primeros diseños, anterior incluso al tokamak, ya que empezaron a estudiarse en los años cincuenta y sesenta, siendo prácticamente abandonados en favor de los tokamaks en los setenta. En la actualidad, los stellarators han alcanzado características de confinamiento similares a las de tokamaks de tamaño equivalente.

Desde finales de 1983, el grupo de fusión del CIEMAT y el de diseño del ATF en Oak Ridge, entablaron una colaboración para el estudio de configuraciones torsatrón y heliac, ambos pertenecientes a la familia de los stellarators. Puesto que el ATF es un tarsatrón, y para diversificarse, el CIEMAT se decantó por la opción del heliac, de la que, por otra parte, sólo existen dos precedentes en el mundo, una pequeña máquina toroidal en Australia, «SHEILA» y una versión lineal en Estados Unidos.

A partir del 31 de mayo del pasado año, con el acuerdo preferencial entre el CIEMAT y Euratom, el Proyecto TJ-II pasa a depender de un comité formado por miembros de Euratom y de organismos españoles, cada uno de los cuales tiene derecho a veto en las actividades que se efectúen en este campo, con la contrapartida de la financiación por Euratom de un 45 por 100 de los gastos generados por el proyecto.

El reto que para una ingeniería supone participar en un proyecto de estas características, con lo que de innovaciones tecnológicas conlleva, así como el poder contrastar los métodos de trabajo, necesariamente diferentes, entre una labor de investigación básica y otra de desarrollo

industrial, animó a INITEC a colaborar mediante la integración en el proyecto del TJ-II de dos miembros de su plantilla. El TJ-II, como stellarator que es, presenta frente a los tokamaks una diferencia básica, que es la ausencia de corrientes eléctricas netas en el plasma.

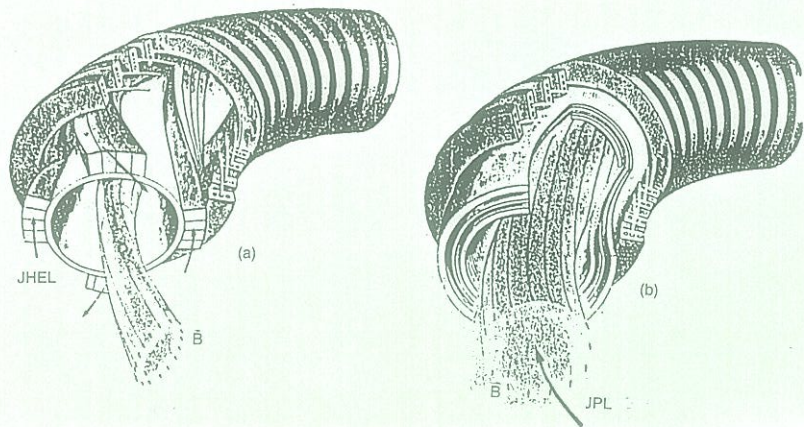
En efecto, en estos últimos dispositivos, la torsión o helicidad del campo magnético necesaria para el confinamiento del plasma se consigue mediante la combinación de un campo toroidal y otro poloidal. Este campo poloidal, véase Figura 1b, se crea generando en el plasma una corriente eléctrica, lo que hace de los tokamaks dispositivos de funcionamiento pulsado en lo que a este aspecto se refiere, ya que se precisan variaciones de flujo magnético para inducir la mencionada corriente. Este modo de operación presenta, no obstante, dos inconvenientes serios. En primer lugar, su carácter pulsante, lo que conlleva una mayor fatiga de materiales. En segundo lugar, y por la existencia de corrientes en el plasma, la posibilidad de que se produzcan disrupciones del mismo sobre las paredes de la cámara de confinamiento, con el evidente riesgo de daños graves.

En los stellarators, por el contrario (Fig. 1a), la helicidad del campo se consigue mediante bobinas helicoidales exteriores a la cámara, sin necesidad alguna de crear corrientes eléctricas en el plasma. No obstante, y pese a poder operar en régimen estacionario, este tipo de máquinas, dado el elevado consumo de energía eléctrica que alcanzan, suelen funcionar de modo discontinuo en esta fase experimental, si bien, tanto los stellarators como los tokamaks, persiguen un modo continuo de operación en cuanto futuros reactores.

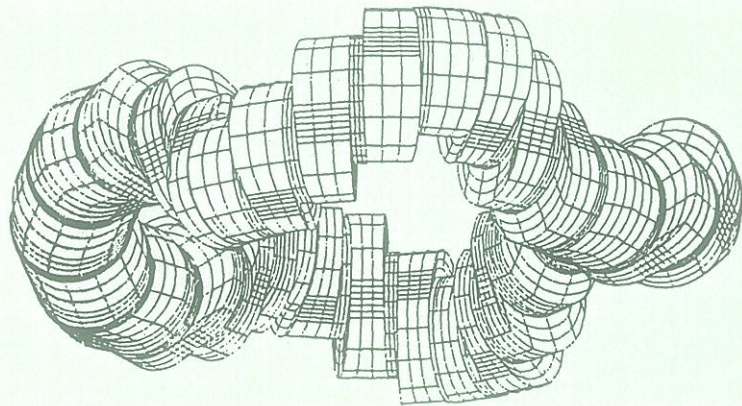
Dentro del, como ya se dijo, amplio número de posibles configuraciones de los stellarators, se encuentran los heliac, grupo al que pertenece el TJ-II. En este tipo de máquinas, la helicidad del campo magnético se alcanza mediante una especial disposición de las bobinas, lo que obliga a una torsión de la propia cámara. A diferencia del resto de los stellarators, en los que el eje magnético, que de un modo aproximado se podría definir como el lugar geométrico de los puntos que unen el centro del plasma en cada sección a lo largo del toro, es toroidal recta, en los heliac es toroidal helicoidal, dando lugar a una cámara de confinamiento de gran complejidad geométrica (Fig. II).

A grandes rasgos, la disposición de las bobinas del TJ-II es la siguiente (Fig. III):

- Una bobina central circular o núcleo circular.
- 32 bobinas toroidales cuyos centros forman una hélice alrededor del núcleo circular.
- Bobinas de campo vertical y de calentamiento óhmico.
- Una bobina helicoidal o núcleo helicoidal emplazada sobre el núcleo circular

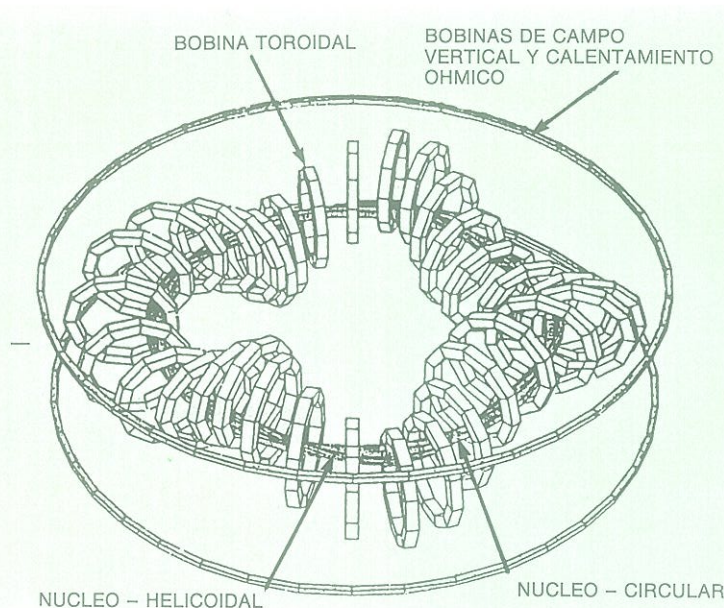


F I Representaciones esquemáticas de (A) un STELLARATOR y (B) un TOKAMAK.



F II Cámara de confinamiento de TJ-II

F III Disposición de las bobinas en el TJ-II



y en fase con los centros de las bobinas toroidales.

Esta última bobina permitirá un gran margen de puntos de operación al TJ-II, por lo que la configuración recibe el nombre de «heliac flexible».

Dejando a un lado una descripción detallada de las funciones de cada tipo de bobina, baste decir que la forma resultante del plasma es la que puede apreciarse en la Figura IV, que representa una vista en planta con el núcleo circular como referencia. Obsérvese que, pese a constituir un toro, la planta del TJ-II es claramente cuadrada, lo que da origen a simetrías que, como se verá más adelante, tienen su trascendencia.

Seguidamente, en la Tabla I, se da un cuadro resumen de lo que constituye el sistema del TJ-II.

En primer lugar, la máquina propiamente dicha, que consta de:

- Cámara de vacío.
- Bobinas.
- Estructuras soporte.

La construcción de la cámara de vacío será modular, a base de desarrollos planos, totalmente soldada, rígida, puesto que podría servir de soporte a las bobinas toroidales, con posibilidades de refrigeración y con una precisión constructiva no superior en algunos casos a 5 mm y permitiendo, además, un buen acceso al plasma existente en su interior.

Las bobinas del núcleo deben presentar continuidad, sin uniones mecánicas ni soldaduras para evitar que se produzcan zonas de espesor irregular, puntos débiles que puedan originar fallos eléctricos o zonas de elevada resistencia que, dadas las corrientes que las recorren, causen calentamientos locales en las mismas. Asimismo, y para atender a sus necesidades de refrigeración, los conductores serán huecos con enfriamiento por agua. En el caso de las bobinas del núcleo, que son las únicas sometidas a vacío, por encontrarse en el interior de la cámara, se presenta el problema adicio-

nal de su aislamiento con el exterior. Las estructuras soporte de la cámara tendrán como función primordial absorber las fuerzas magnéticas que se generan en las bobinas toroidales.

El suministro de potencia para el TJ-II puede estimarse en 60 MW, si bien como su funcionamiento va a ser pulsado, con una duración prevista por pulso de 0.5 segundos, la energía requerida en cada disparo será de 30 MJ. No obstante, como el suministro de energía eléctrica al CIEMAT no alcanza este valor en tan breve plazo de tiempo, se hará preciso recurrir a un dispositivo de almacenamiento de energía, probablemente mediante un volante de inercia, que, en el lapso entre dos pulsos consecutivos, haga posible la acumulación de energía necesaria para entregar a las bobinas. El sistema de refrigeración será el encargado de extraer el calor generado en las bobinas tras cada disparo, así como el que pueda crearse en los inyectores de microondas, dispositivo usado, como ya se verá, para calentar el plasma.

El sistema de vacío cumple dos funciones, una, evidente, de hacer el vacío en el interior de la cámara, para lo que se cuenta con turbobombas moleculares capaces de llegar a 10^{-8} Torr. El segundo cometido es el de inyectar el gas, hidrógeno en las primeras experiencias y posiblemente deuterio en otras más avanzadas, a partir del cual se formará el plasma.

El sistema de inyección de microondas tiene como objetivo producir e introducir en el plasma radiación electromagnética cuya frecuencia sea resonante con la propia de los electrones del plasma que se muevan en un campo magnético de una intensidad determinada, que en el caso del TJ-II es de 1 Tesla. Por medio de estas resonancias, se transmite energía a los electrones, que por colisiones la reparten a la población opuesta, iones en este caso, calentando globalmente el plasma, condición necesaria, puesto que a mayor temperatura menores son sus pérdidas energéticas, y considerando además que en los futuros reactores de fusión la reacción nuclear sólo tiene lugar por encima de una temperatura umbral o de ignición. Los elementos que componen el sistema son básicamente los girotrones, productores de las microondas, las guías de ondas y los dispositivos de inyección.

Debe hacerse notar que el suministro eléctrico para los girotrones es independiente del de las bobinas, por lo que a la elevada potencia eléctrica necesaria para aquéllas es preciso añadir el nada despreciable consumo del sistema de microondas.

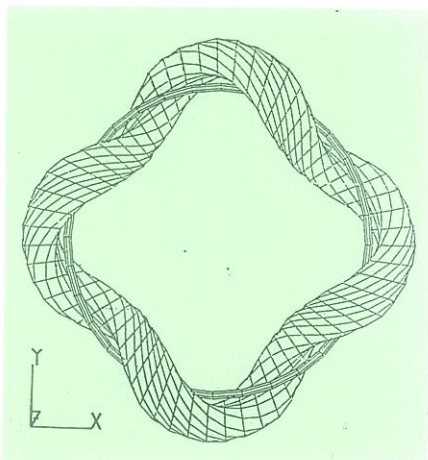
La inyección de neutros tiene el mismo objetivo que la de microondas, es decir, calentamiento del plasma. En esencia consiste en introducir en el plasma átomos neutros que transmiten por colisio-

nes al plasma la energía que poseen, antes de ionizarse y quedar confinados por el campo magnético. Este método tiene el atractivo suplementario de que, además de producir calentamiento, puede utilizarse para inyectar combustible, sin más que hacer coincidir el elemento empleado como haz neutro con aquel que constituya el plasma. En el TJ-II se tiene previsto el empleo de haces neutros en fases avanzadas de su explotación.

La necesidad de que el plasma permanezca libre de impurezas, puesto que la presencia de las mismas contribuye, por fenómenos de radiación, a enfriarlo rápidamente, obliga a disponer de un sistema de limpieza que permita eliminar de las paredes interiores de la cámara cualquier elemento extraño para posteriormente extraerlo. Debe considerarse, que, debido al elevado grado de vacío existente, la menor traza de impureza se expande hasta volúmenes considerables.

El resto de los sistemas del TJ-II responde, o bien a requisitos de manejo, sistema de control, o a necesidades de evaluación de las condiciones de operación, sistema de diagnósticos, o a la recopilación y tratamiento de información, sistema de toma de datos y ordenador, o finalmente a las instalaciones auxiliares que todo complejo experimental conlleva,

F IV Superficies magnéticas del plasma en el TJ-II



T I SISTEMAS DEL TJ-II

MAQUINA	- CAMARA DE VACIO - BOBINAS - ESTRUCTURAS SOPORTE
SUMINISTRO DE POTENCIA	
SISTEMA DE REFRIGERACION	
SISTEMA DE VACIO	- TURBOBOMBAS MOLECULARES - SISTEMA DE INYECCION DE GAS
INYECCION DE MICROONDAS	- GIROTRONES - GUIA DE ONDAS - SISTEMA DE INYECCION
INYECCION DE HACES NEUTROS	
SISTEMA DE LIMPIEZA	
SISTEMA DE CONTROL	
DIAGNOSTICOS	
SISTEMA DE TOMA Y TRATAMIENTO DE DATOS	
INSTALACIONES AUXILIARES	- ENERGIA ELECTRICA - REDES DE REFRIGERACION Y TIERRAS - AIRE ACONDICIONADO - AIRE COMPRIMIDO - AGUA - ILUMINACION - MEGAFONIA

suministro de energía eléctrica, red de refrigeración y de tierras, aire acondicionado, iluminación, etc.

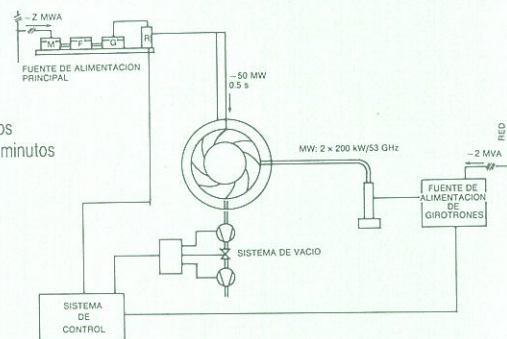
Como resumen de lo anteriormente expuesto, se ofrece en la Figura 5 un cuadro de los principales parámetros del TJ-II, entre los que cabe destacar el radio principal, 1.5 m, que corresponde al radio de la bobina central del núcleo, el campo magnético en el centro del plasma, 1 Tesla, la frecuencia del disparo, uno cada cinco minutos, lo que permite volver a las condiciones iniciales antes del nuevo pulso, la potencia inyectada de microondas, 400 KW, y la potencia de inyección de neutros que llegará a 4 o, posiblemente, 6 MW.

En un proyecto de estas características surgen necesariamente problemas específicos de ingeniería que, ante la novedad del campo de estudio, no se suelen haber abordado con anterioridad. Valgan como ejemplo los siguientes:

- Precisión de construcción. La configuración magnética del TJ-II es muy sensible a pequeños errores en el campo magnético derivados de deformaciones o pequeñas desviaciones de la posición correcta de las bobinas. Esta precisión depende, por otra parte, de la simetría. En efecto, el TJ-II es una máquina de simetría 4, es decir, su configuración magnética se repite exactamente cuatro veces en un recorrido a lo largo del toro. Si las deformaciones no rompen la simetría pueden aceptarse errores constructivos de hasta 1 cm, pero si la rompen, la máxima desviación aceptada es solamente de 1 mm. Huelga decir que esta regla complica considerablemente las cosas cuando se trata de suministrar energía eléctrica a las bobinas, o de establecer los puntos de ubicación de los diagnósticos.
- Utilización de materiales magnéticos. Para no perturbar el campo magnético del plasma, se hace necesario que, tanto el material de la cámara de vacío como la soldadura utilizada en su construcción, sean materiales muy poco imanables. Se ha hecho necesario, incluso, un estudio de qué perturbaciones podría producir sobre el plasma la existencia de transformadores u otros materiales ferromagnéticos en la proximidad de la cámara.
- Naturaleza pulsante de la operación. Este apartado afecta fundamentalmente a la necesidad de rápidas conmutaciones, recuérdese que la duración total del pulso es de medio segundo, en los sistemas de alimentación eléctrica a las bobinas que, por otra parte, transportan intensidades elevadas. Este modo de trabajo implica igualmente transitorios bruscos de temperatura que indudablemente contribuyen a la fatiga de los materiales.
- Interfase plasma - medios materiales. En la Figura VI, puede verse una sec-

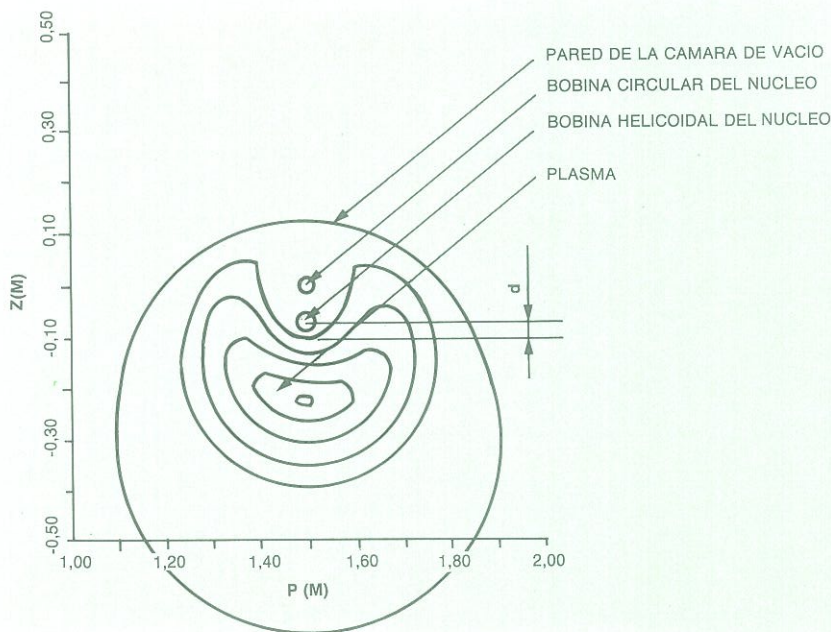
PRINCIPALES PARAMETROS

Dispositivo.....	heliac
Radio principal.....	1.5 m
Radio medio equivalente del plasma....	0.2 m
Campo magnético en el centro del plasma.....	1 tesla
Duración de cada disparo.....	0.5 segundos
Frecuencia de disparo.....	1 cada 5 minutos
Potencia inyectada de microondas.....	400 Kw
Potencia entregada a las bobinas.....	50 Mw
Energía consumida en cada disparo.....	30 Mj
Potencia tomada de la red	
- Fuente de alimentación principal..	2 MVA
- Fuente de alimentación de girotrones.....	2 MVA
Potencia de inyección de neutros.....	2-6 Mw
Presión del sistema de vacío.....	10 ⁻⁸ torr



F V Esquema del TJ-II.

F VI Sección poloidal del TJ-II. Forma del plasma



ción en la que se aprecia el plasma con la típica forma de judía que adopta en el TJ-II. Si se considera la proximidad del mismo a la pared interior de la cámara, representada por el círculo exterior y la escasa distancia que le separa de las bobinas del núcleo (en la figura los dos pequeños círculos sobre el plasma), se comprenderá que es necesario evitar un contacto accidental que, más que producir daños considerables, lo que puede ocurrir en el caso de las bobinas, situación altamente indeseable, contamine el plasma. Esta situación puede evitarse mediante el uso de limitadores, dispositivos que mediante un diseño apropiado

impiden al plasma alcanzar los puntos mencionados.

El programa de trabajo para la ejecución del proyecto TJ-II y su posterior explotación es, con algún posible deslizamiento, el que a grandes rasgos se ofrece en la Figura VII y que se detalla seguidamente en el texto.

Desde 1983 a 1985, Fase 1, y más concretamente en la segunda mitad de este período, diseño conceptual de la cámara y las bobinas, incluyendo:

- Elección de configuración.
- Estudios teóricos de las características de confinamiento de la configuración elegida.

- Determinación de parámetros magnéticos, de transporte, equilibrio y estabilidad del plasma.

- Diseño básico de ingeniería.

En 1986, Fase 2, acondicionamiento del edificio para ubicación del TJ-II y diseño de detalle, que extendiéndose también a lo largo de 1987, comprende entre otras actividades:

- Confección de planos y especificaciones para la construcción de la máquina (cámara, bobinas, soportes).
- Realización de especificaciones de materiales, soldaduras y acabado superficial.
- Estimación de costes.
- Estudios alternativos de soportado de bobinas.
- Especificaciones de pruebas y control de calidad.

Todas estas actividades se llevarán a cabo, por las razones que más adelante se verán, en estrecho contacto con la industria sobre la que recaiga el contrato de construcción.

De finales de 1987 a 1989, se efectuarán la construcción, el montaje y las pruebas parciales de la máquina, así como el desarrollo e implantación de sus sistemas asociados, entre los que cabe citar:

- Fuentes de alimentación para los girotrones.
- Fuentes de alimentación principales.
- Sistema de microondas (girotrones, guías de ondas, etc.).
- Sistemas de vacío y de control.
- Sistema de refrigeración.

En 1990, y tras los ensayos operativos de los sistemas, se efectuarán las primeras pruebas con plasma, comprobándose si la configuración geométrica del campo se ajusta a la prevista.

En 1991, se efectuará un estudio de las propiedades de confinamiento de la configuración heliac, optimizándola en la medida de lo posible.

En el período 1992-1995, se incrementará la capacidad de calentamiento del plasma mediante la puesta en operación de los inyectores de haces neutros.

Tal y como se indicó al principio de esta ponencia, tras la firma, en mayo del pasado año, del acuerdo preferencial entre CIEMAT y Euratom, para el desarrollo del proyecto TJ-II, quedó constituida la Asociación Euratom-CIEMAT, que depende de un Comité de Dirección formado por seis miembros, tres de Euratom y tres españoles, siendo estos últimos, el Director General del CIEMAT, el Director de Administración del mismo centro y una persona perteneciente al Ministerio de Educación y Ciencia. La dirección técnica del proyecto la ostenta José Luis Alvarez Rivas, y, como puede verse en la Figura 8, su estructura comprende tres grandes secciones, si bien la última de ellas, Física Experimental, contribuye de momento al proyecto mediante su experiencia en la ubicación y selección de diagnósticos, derivada de los conoci-

Trabajos a desarrollar	84	85	86	87	88	89	90	91	92-95
Diseño conceptual de cámara y bobinas									
Acondicionamiento del edificio del TJ-II									
Diseño de Detalle. Contactos con suministradores									
Construcción, instalación y pruebas parciales									
Primeras pruebas con plasma									
Optimización de la configuración magnética									
Incremento del calentamiento del plasma									

F VII Programa del proyecto TJ-II

mientos adquiridos en la explotación de un pequeño tokamak ya existente.

La Sección de Teoría y Simulación, que podría denominarse de desarrollo conceptual, es la encargada de todo lo relacionado con la configuración magnética y del estudio y optimización de todos aquellos parámetros en los que interviene el plasma. Lógicamente, el personal encuadrado en esta sección está constituido en su mayoría por físicos.

Finalmente, la Sección de Operación y Sistemas, que es la que desarrolla trabajos propiamente de ingeniería en relación con los problemas específicos del proyecto y construcción de la máquina, fundamentalmente mecánicos, eléctricos, de disposición, etc. En ella se encuentran trabajando los dos técnicos de INITEC que en estos momentos colaboran en el proyecto.

Por la mayor vinculación del autor al terreno de la ingeniería del proyecto, se presenta a continuación una visión algo más detallada de la labor que en ella se lleva a efecto.

Cabría preguntarse en primer lugar, cómo es la ingeniería de un proyecto de este tipo y con qué dificultades se enfrenta. Ya se vieron anteriormente algunos problemas técnicos derivados de la singularidad de la máquina, pero, sin ceñirse a hechos tan concretos, existen otros condicionantes de índole más general. El primero de ellos arranca de la novedad del diseño, y pese a la existencia de intercambios periódicos de información entre grupos que trabajan sobre proyectos de fusión, sólo es parcialmente aplicable la experiencia y documentación procedente de los mismos.

Otro de los inconvenientes nace de la inexistencia, en algunos casos, de normas oficiales de diseño y fabricación, que contemplen las condiciones excepcionales a que se encuentran sometidos los componentes y materiales de estos dispositivos experimentales, lo que obliga a la realización de estudios detallados para ajustar su diseño al de los existentes en la industria, evitando de este modo encarecimiento de la máquina y retrasos innecesarios.

Pese a las características especiales de que está dotado un proyecto de investigación, presenta algunos rasgos comunes con uno industrial, especialmente en

F VIII Organización del proyecto TJ-II

