



COMISIÓN  
EUROPEA

Investigación comunitaria

# LA INVESTIGACIÓN EN FUSIÓN

## Una Opción Energética para el Futuro de Europa

INFORMACIÓN GENERAL



*¿Te interesa la investigación europea?*

*RTD info es nuestra revista trimestral para mantenerte al corriente de los acontecimientos principales (resultados, programas, eventos, etc.).*

*Está disponible en inglés, francés y alemán. Se puede solicitar un ejemplar o suscripción gratuitos a:*

*Comisión Europea*

*Dirección General de Investigación*

*Unidad de Información y Comunicación*

*B-1049 Bruselas*

*Fax (32-2) 29-58220*

*Correo-e: [research@cec.eu.int](mailto:research@cec.eu.int)*

*Internet: [http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/rtdinfo/index_en.html)*

**COMISIÓN EUROPEA**

*Dirección General de Investigación*

*Investigación en Energía de Fusión*

*Unidad J6 Acuerdos de Asociación de Fusión*

*Contacto: Hugues Desmedt*

*Comisión Europea*

*Oficina CDMA 05/36*

*B-1049 Bruselas*

*Tel. (32-2) 29-98987*

*Fax (32-2) 29-64252*

*Correo-e: [hugues.desmedt@cec.eu.int](mailto:hugues.desmedt@cec.eu.int)*

Comisión europea

# **LA INVESTIGACIÓN EN FUSIÓN**

**Una Opción Energética  
para el Futuro de Europa**

***Europa Directo es un servicio que ayuda a responder  
tus dudas sobre la Unión Europea***

***Teléfono gratuito:  
00 800 6 7 8 9 10 11***

#### AVISO LEGAL

Ni la Comisión Europea ni cualquier otra persona actuando en su nombre es responsable del uso que se pudiera dar a la información aquí contenida.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de la exclusiva responsabilidad de su autor, y no reflejan necesariamente el parecer de la Comisión Europea.

Gran cantidad de información adicional sobre la Unión Europea se encuentra disponible en Internet.

Se puede acceder a la misma a través del servidor Europa (<http://europa.eu.int>).

Los datos bibliográficos se pueden encontrar al final de esta publicación.

Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, 2005

ISBN 92-894-7710-9

© Comunidades Europeas, 2004

Se autoriza la reproducción citando la fuente.

Impreso en Bélgica

IMPRESO EN PAPEL BLANQUEADO SIN CLORO

# Contenidos

INTRODUCCIÓN A LA FUSIÓN	
La necesidad de una energía segura y sostenible	9
La fuente de energía de las estrellas	10
Fusión para la producción de energía	11
Seguridad	12
Impacto en el medio ambiente	13
Avances en la investigación en fusión por confinamiento magnético	14
EL PROGRAMA DE FUSIÓN EUROPEO	
ITER y la estrategia europea de fusión	16
El Área Europea de Investigación en Fusión	18
¿CÓMO FUNCIONA LA FUSIÓN?	
Fusión por confinamiento magnético	20
Principales componentes de un tokamak	22
Calentamiento del plasma	24
Diagnóstico y modelado del plasma	25
ITER, el camino hacia la energía de fusión	26
Actividades tecnológicas a largo plazo	28
Actividades de divulgación en Europa	30
EIROforum	32
Actividades educativas y de formación en Europa	33
Aplicaciones de los productos I+D de fusión («Spin-offs») en otras áreas de alta tecnología	34
Referencias	35
«Starmakers» (Los fabricantes de estrellas)	38
DVD	39





## La necesidad de una energía segura y sostenible

La economía de la Unión Europea (UE) depende de que se disponga de suministros de energía seguros y suficientes. Hoy en día, esta demanda se satisface principalmente con combustibles fósiles (petróleo, carbón y gas natural), que dan cuenta del 80% del total de la energía consumida. Casi el 67% del combustible fósil empleado es importado. En términos generales, podría decirse que, actualmente, los combustibles fósiles importados cubren alrededor del 50% de las necesidades energéticas de la UE y que para el 2030, se prevé que alcancen el 70%, especialmente el petróleo.

Se requieren fuentes de energía seguras y sostenibles para mantener nuestro nivel de vida. Los investigadores europeos están desarrollando diferentes tecnologías energéticas, medioambientalmente aceptables, seguras y sostenibles. La fusión es una de ellas.

A largo plazo, la fusión proporcionará la posibilidad de disponer de una fuente de energía a gran escala que tenga bajo impacto en el medio ambiente y sea segura, con enormes reservas de combustible distribuidas por toda la Tierra.

Las centrales de energía de fusión serán especialmente adecuadas para suministrar la carga energética básica que cubra las necesidades de las áreas densamente pobladas y las zonas industriales. También podrán producir el hidrógeno para una economía basada en el hidrógeno.

Este folleto describe el trabajo que los investigadores europeos están llevando a cabo para conseguir que la energía de fusión esté disponible para el beneficio de la sociedad.



## La fuente de energía de las estrellas

La fusión es el proceso que proporciona la energía del sol y, en general, de las estrellas. Los núcleos de los átomos de masa pequeña se fusionan y liberan energía. En el núcleo del sol, la enorme presión gravitatoria permite que este proceso se produzca a temperaturas del orden de 10 millones de grados Celsius.

El gas calentado a esta temperatura se convierte en un «plasma», donde los electrones están completamente separados de los núcleos atómicos (iones). El plasma es el cuarto estado de la materia y presenta un conjunto de propiedades específicas. El estudio de estas propiedades es el objetivo de la investigación en física del plasma. Aunque el plasma es un estado raro en la Tierra, más del 99% del universo está constituido por plasmas.

A presiones mucho más bajas (10.000 millones de veces menores que las del sol), que son las que podemos conseguir en la Tierra, se requieren temperaturas por encima de 100 millones de grados Celsius para obtener ritmos adecuados de producción de energía de fusión. Para llegar a estas temperaturas es necesario calentar intensamente el plasma y evitar las pérdidas de calor manteniendo el plasma caliente lejos de las paredes de la vasija que lo contiene. Esto se consigue colocando el plasma en una «jaula» toroidal, construida con campos magnéticos muy intensos, que impiden que escapen las partículas, eléctricamente cargadas, del plasma: ésta es la tecnología más avanzada disponible actualmente y es la base del programa europeo de fusión.

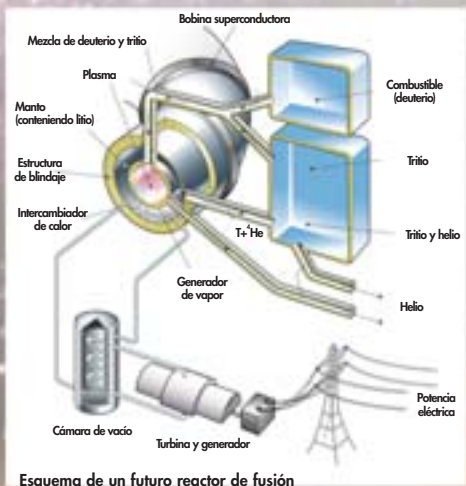




# Fusión para la producción de energía



Las reacciones de fusión entre dos isótopos del hidrógeno – deuterio (D) y tritio (T) – constituyen la base para el desarrollo de un reactor de fusión de primera generación, puesto que otras reacciones de fusión requieren temperaturas aún más elevadas. El deuterio es un isótopo existente en la naturaleza, no radioactivo, que se puede extraer del agua (como media hay 35 g de deuterio por metro cúbico de agua). No hay tritio presente de forma natural en la Tierra, pero se generará en el reactor de fusión a partir de litio (un metal ligero y abundante). Cada reacción de fusión produce una partícula alfa (o sea, un núcleo de helio) y un neutrón de alta energía.



Los neutrones se escapan del plasma y son frenados en una capa o envoltura («manto fértil») que rodea el plasma. En este manto el litio se transforma en tritio, que se recupera y se inyecta de nuevo en la cámara de vacío como combustible, y el calor generado por los neutrones se puede utilizar para generar vapor que mueva turbinas para producir electricidad. La cantidad de combustible que necesitaría una central de fusión para suministrar electricidad durante un año a una ciudad de un millón de habitantes sería la carga de un camión pequeño.

Esquema de un futuro reactor de fusión



# Seguridad



Instalaciones para el tratamiento del tritio.

Un reactor de fusión es como un quemador de gas: el combustible que se inyecta en el sistema se quema. En todo momento hay muy poca cantidad de combustible en la cámara de reacción (cerca de 1g de D-T en un volumen de 1000 m<sup>3</sup>) y, si se interrumpe el suministro de combustible, sólo hay reacciones de fusión durante unos pocos segundos. Cualquier fallo de la instalación provocaría que el plasma se enfríe y las reacciones paren.

Tanto los combustibles básicos para la fusión, deuterio y litio, como el producto de la reacción, el helio, son no radiactivos. El combustible radiactivo intermedio, el tritio, se desintegra razonablemente deprisa (tiene una vida media de 12,6 años) y su desintegración produce un electrón (radiación beta) de muy baja energía. En el aire, este electrón puede viajar solamente unos pocos milímetros y ni siquiera puede penetrar en una hoja de papel. Sin embargo, el tritio es dañino si entra en el cuerpo, de modo que para controlarlo se diseñan e implementan elementos de seguridad en la instalación.

Ya que el tritio se produce a medida que se va necesitando para mantener los procesos de fusión en la cámara del reactor, no se necesita un transporte frecuente de combustible radiactivo a la central eléctrica de fusión.



## Impacto en el medio ambiente

La energía generada por las reacciones de fusión se usará del mismo modo en que se hace hoy día, por ejemplo, para la producción de electricidad, como calor para uso industrial, o posiblemente para la producción de hidrógeno.

El consumo de combustible de una central eléctrica de fusión será extremadamente bajo. Una central de fusión de 1 GW (eléctrico) necesitará cerca de 100 kg de deuterio y 3 toneladas de litio natural para operar durante un año entero, produciendo cerca de 7 billones de kWh. Una central eléctrica de carbón, sin secuestro de carbono, requiere cerca de 1,5 millones de toneladas de combustible para generar la misma energía.

Los reactores de fusión no producen gases de efecto invernadero ni otros contaminantes que puedan dañar el medio ambiente y/o causar cambio climático.



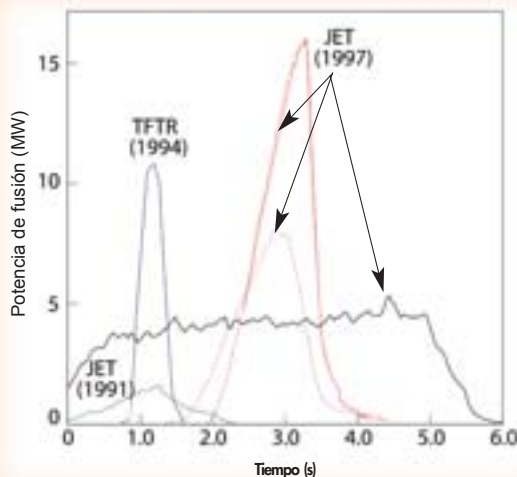
Los neutrones generados por la reacción de fusión activan los componentes situados alrededor del plasma. Una elección cuidadosa de los materiales de estos componentes permitirá que puedan ser liberados del control del organismo regulador competente (y posiblemente reciclados) unos 100 años después de la parada de la planta. Por estas razones, los residuos de las plantas de fusión no supondrán una carga para las generaciones futuras.

Instalaciones del tokamak europeo JET  
(Culham-Reino Unido)



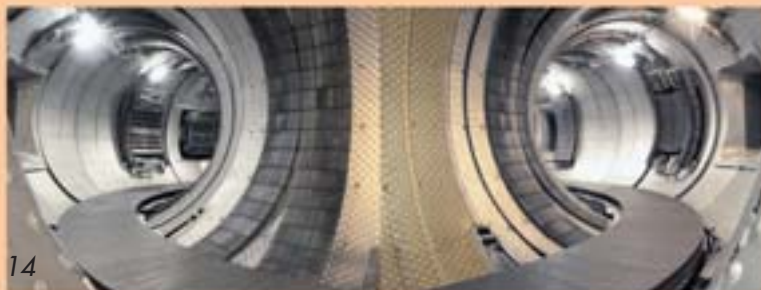
# Avances en la investigación en fusión por confinamiento magnético

El tokamak europeo JET (Joint European Torus) ubicado en Culham (Reino Unido) es la instalación de fusión más grande del mundo y es la única en la actualidad capaz de trabajar con una mezcla de combustible de D-T. JET ha alcanzado todos sus objetivos originales, y en algunos casos los ha sobrepasado. En 1997 consiguió un récord mundial de producción de potencia de fusión con 16 MW.



Récords alcanzados de potencia de fusión

Hay un gran número de importantes instalaciones experimentales en Europa que contribuyen a crear la base de conocimientos necesaria para el avance de la investigación en fusión. Por ejemplo, se ha alcanzado recientemente un récord en el gran tokamak TORE SUPRA en Francia, que estudia la operación en estado cuasi-estacionario de los dispositivos de fusión. En el año 2003 produjo una descarga de plasma de alto rendimiento de una duración récord: 6 minutos y medio. La energía total inyectada para mantener el plasma durante este tiempo, y que también tuvo que ser extraída como calor, fue más de un giga-julio (GJ) (mil millones de julios, suficiente para hervir tres toneladas de agua).



Tore Supra (Cadarache, Francia) récord de duración de una descarga de plasma.



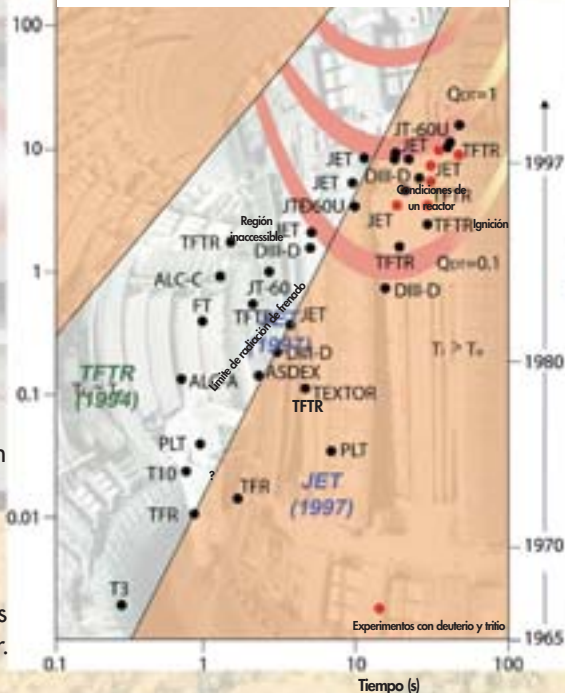
Una medida sencilla del rendimiento de las máquinas de fusión la proporciona la ganancia de potencia  $Q$ , que expresa la relación entre la potencia resultante de las reacciones de fusión y la potencia de calentamiento aplicada externamente al plasma.

Un plasma de fusión alcanza la condición de auto-mantenimiento o ignición ( $Q = \infty$ ) cuando las pérdidas de energía se equilibran con la energía producida en las reacciones de fusión. Cuando se alcanza esta condición, ya no se requiere calentamiento externo para mantener las condiciones de alta temperatura necesarias para la fusión. Igual que en un fuego, el plasma continuará encendido mientras tenga combustible que lo alimente. En los futuros reactores de fusión no será necesario alcanzar esta situación, bastará con diseñar amplificadores de potencia adecuados.

JET ha generado 16 MW de energía de fusión con  $Q=0,65$ . La siguiente gran máquina, ITER, aspira a alcanzar  $Q = 10$ , mientras que los futuros reactores de fusión podrían alcanzar valores de  $Q$  hasta 40 o 50.

Dado que la mayor parte de los dispositivos experimentales de fusión no usan tritio como combustible, su operación se caracteriza por una combinación adecuada de los parámetros del plasma, que muestra cómo de cerca se encuentra de las condiciones relevantes para la fusión. La figura representa los valores medidos de  $Q$  frente a la temperatura del plasma para un gran número de tokamaks de todo el mundo. Los mejores resultados se han obtenido en máquinas de fusión con parámetros del plasma cercanos a los necesarios para un reactor.

Progresos de la investigación en fusión en todo el mundo



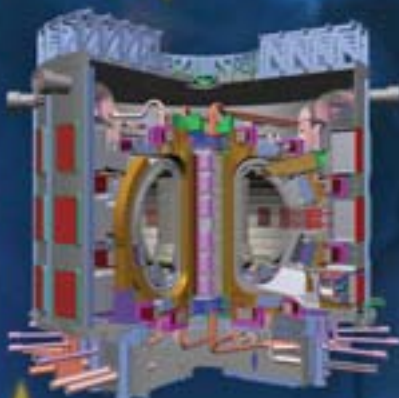


# ITER y la estrategia europea para la fusión

El objetivo a largo plazo de I+D en fusión de los estados miembros de la Unión Europea (más los países asociados al Programa Marco de EURATOM) es «la creación conjunta de prototipos de reactor para centrales de energía que satisfagan las necesidades de la sociedad, como operación segura, compatibilidad medioambiental y viabilidad económica».

La estrategia para lograr este objetivo a largo plazo incluye el desarrollo de un reactor experimental, emprendido dentro de la colaboración internacional «ITER». El objetivo programático global del tokamak ITER es demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la energía de fusión con fines pacíficos. ITER logrará este objetivo demostrando la combustión controlada de plasmas de deuterio-tritio, en estado estacionario como meta final, y poniendo a prueba tecnologías esenciales para un reactor en un sistema integrado.

ITER irá seguido por un reactor de demostración («DEMO»), que, por primera vez, será capaz de generar cantidades significativas de electricidad y será auto-suficiente para producir el tritio que necesite. La construcción de ITER, y después la de DEMO, requerirán una participación importante de la industria europea e irán acompañadas por actividades complementarias de I+D en física y tecnología en los laboratorios de fusión y en la universidad.



Esquema de ITER



La participación en el diseño de ITER (junto con los socios internacionales) ha sido un elemento importante del programa europeo de fusión en los últimos años. El esquema conceptual de este diseño está basado en el de la máquina europea JET (Joint European Torus, Culham, Reino Unido), que logró un record mundial en 1997 al obtener como resultado 16 MW de potencia de fusión. La extrapolación necesaria para el diseño de ITER se ha llevado a cabo mediante modelos, usando la amplia base de datos experimentales obtenida a partir de los experimentos de fusión europeos e internacionales.

La colaboración para el proyecto ITER se realiza bajo los auspicios de la Organización Internacional de Energía Atómica (IAEA, Viena). El objetivo global estratégico de ITER es demostrar la viabilidad científica y tecnológica de la energía de fusión con fines pacíficos.



Visión artística del emplazamiento europeo de ITER en Cadarache

En paralelo a ITER se están desarrollando trabajos a largo plazo sobre distintos temas de I+D para DEMO. Un objetivo importante es el desarrollo de materiales estructurales avanzados (en particular, con características de baja activación), que estén optimizados para las condiciones de un reactor de fusión.



## El Área Europea de Investigación en Fusión

Un aspecto clave del programa europeo de fusión es su singular coordinación, gracias a la cual, en las colaboraciones paneuropeas en los grandes temas de investigación, se consigue un uso intensivo de todos los recursos de I+D. De especial importancia es la colaboración en la explotación de JET y en el programa tecnológico, dentro del Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión (European Fusion Development Agreement, EFDA), que está muy orientado hacia ITER, pero que incluye también otras investigaciones a más largo plazo sobre DEMO.

Este programa de fusión singular y coordinado, con grandes y pequeños laboratorios tratando de alcanzar un objetivo común, es un ejemplo de un Área Europea de Investigación y ha conducido a Europa a una posición dominante en el plano internacional dentro de la investigación en fusión por confinamiento magnético.

Los logros alcanzados en laboratorios europeos asociados han permitido la construcción de JET y el progreso hacia ITER, lo que ninguno de los estados miembros o estados asociados habría sido capaz de lograr en solitario.

Aparte de la importante colaboración internacional en ITER, existen colaboraciones con socios no europeos para reunir lo mejor de la experiencia mundial en temas específicos de interés común, mediante una serie de acuerdos bilaterales y multilaterales entre laboratorios europeos y no europeos.







De acuerdo con el tratado de Euratom, el programa de investigación y desarrollo en fusión en Europa está coordinado por la Comisión Europea e implementado mediante:

- Contratos de Asociación con institutos de investigación o con organizaciones en los estados miembros y en los países asociados al Programa Marco de Euratom (los laboratorios de las Asociaciones Euratom aparecen representados sobre el mapa mediante puntos rojos).
- El acuerdo EFDA, que se ocupa de:
  - Las actividades de las Asociaciones y la industria en tecnología de fusión.
  - El uso colectivo de las instalaciones de JET, y
  - Las contribuciones europeas a colaboraciones internacionales, como ITER.
- Contratos de duración limitada en países sin una «Asociación» de fusión.
- Un acuerdo para promover la movilidad de investigadores y becarios.

En el 6º Programa Marco de la UE (2002 a 2006), la investigación en energía de fusión es un área temática prioritaria dotada de un presupuesto comunitario de 750 millones de € (hasta 200 de los cuales podrían invertirse en comenzar la construcción de ITER).

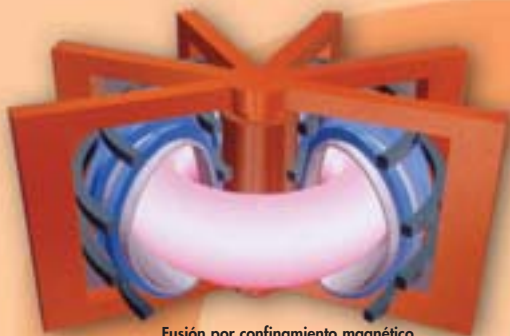
El éxito de la investigación europea en fusión viene respaldado por unos 2000 científicos e ingenieros de los laboratorios y la industria.



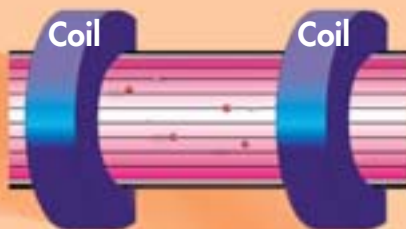


# La fusión por confinamiento magnético

En la fusión por confinamiento magnético se utilizan campos magnéticos intensos para confinar el plasma en un recipiente llamado «cámara de vacío» que lo aísla del aire. En una situación ideal los iones y los electrones eléctricamente cargados que constituyen el plasma no pueden cruzar las líneas de campo magnético. Sin embargo pueden moverse libremente a lo largo de estas líneas.

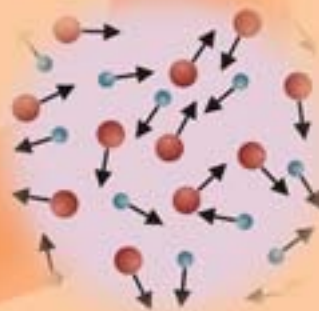


Fusión por confinamiento magnético



Plasma con campo magnético

Si curvamos las líneas de campo para que formen un círculo cerrado, las partículas del plasma quedan en principio confinadas. Las partículas y sus energías correspondientes se quedan así bien aisladas de la pared de la cámara, manteniendo una temperatura alta. Pero en realidad, en un sistema magnético toroidal real, se producen pérdidas de energía por diferentes procesos, como la radiación y las colisiones de las partículas que hacen que éstas escapen del plasma cruzando paulatinamente las líneas de campo magnético.



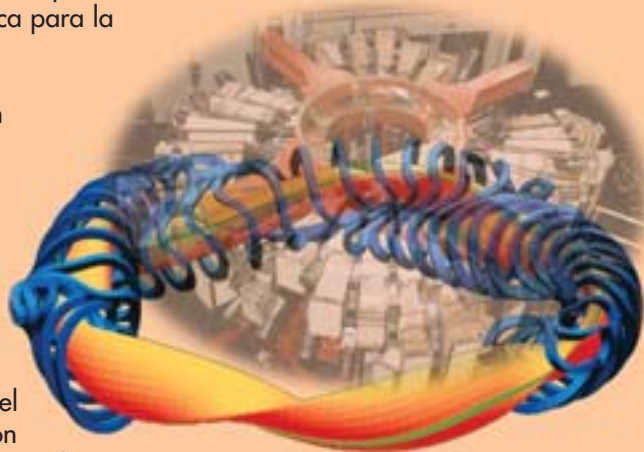
Los campos magnéticos se generan con corrientes eléctricas altas que circulan por bobinas instaladas fuera de la cámara del reactor. A menudo las corrientes generadas en el plasma contribuyen también a formar la jaula magnética.



En los aparatos de tipo «tokamak» el plasma actúa como el secundario de un transformador (el primario es una bobina externa) y un cambio de corriente en el primario induce una corriente en el plasma. La corriente del plasma no sólo produce un campo que contribuye a confinar el plasma, sino que también proporciona calentamiento, debido a la resistencia eléctrica del plasma. Puesto que un transformador no puede generar corriente de manera indefinida en el mismo sentido, el plasma tiene una duración limitada y se requieren otros métodos para mantener el estado estacionario.



Los aparatos de tipo «stellarator» también se basan en el confinamiento magnético, pero usando bobinas externas de complicada geometría y sin recurrir al efecto transformador que crea corriente en el plasma. Por lo tanto, los stellarators tienen potencialmente una capacidad intrínseca para la operación continua. La instalación nueva más grande, actualmente en construcción, es el stellarator W 7-X en Greifswald (Alemania). Otras configuraciones magnéticas relacionadas con los tokamaks y stellarators son el «tokamak compacto» (esférico) y el «dispositivo de estricción magnética de campo invertido» (reversed field pinch).





# Principales componentes de un Tokamak

## Solenoides Central

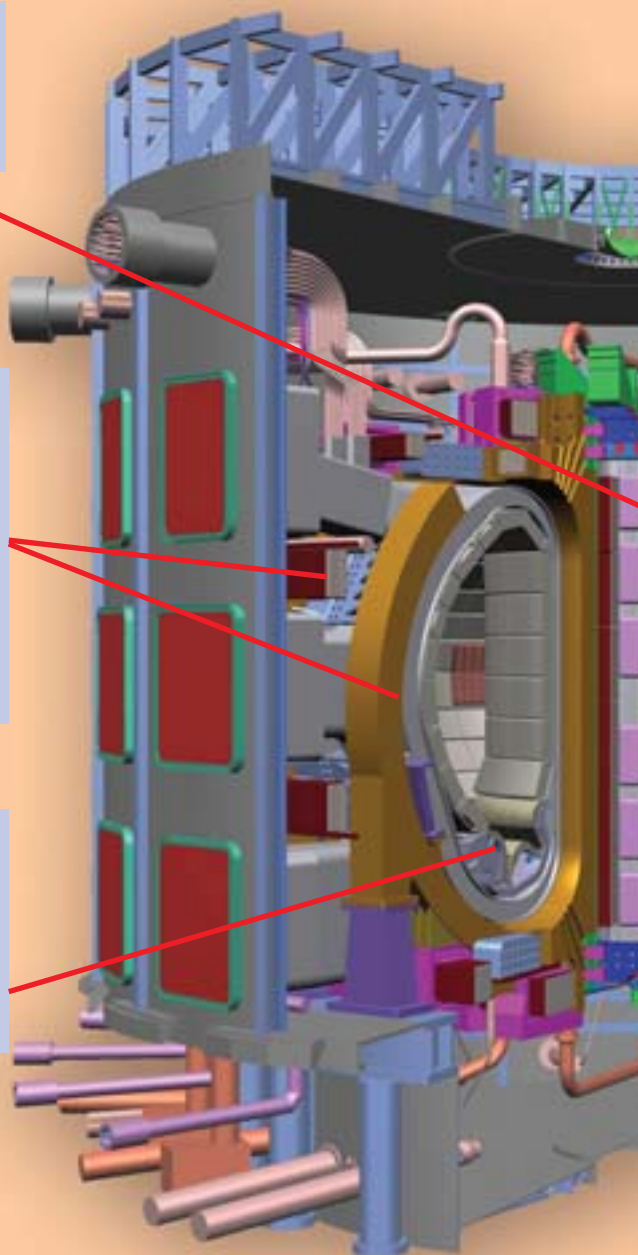
Es el circuito primario del transformador. El plasma constituye el circuito secundario.

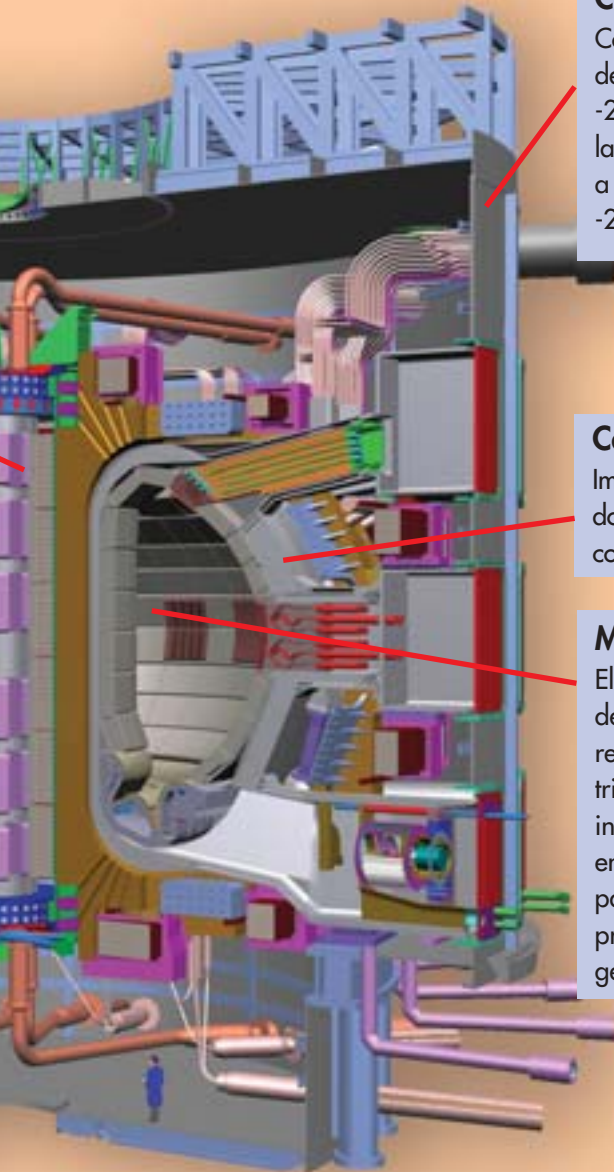
## Bobinas de campo toroidal y bobinas de campo poloidal

Generan un fuerte campo magnético (típicamente de unos 5 Tesla, unas 100.000 veces el campo magnético terrestre) que confina el plasma e impide que toque las paredes de la cámara de vacío.

## Divertor

Extrae las impurezas y el helio de la cámara de vacío y es la única zona donde se permite de forma deliberada que el plasma toque las paredes.





### **Criostato**

Contiene a las bobinas y a la cámara de vacío y está a una temperatura de -200 grados Celsius para mantener las bobinas superconductoras a su temperatura de operación de -269 grados Celsius.

### **Cámara de Vacío**

Impide que el aire entre en la zona donde se encuentra el plasma confinado.

### **Manto**

El litio se encuentra en los módulos del manto. Cuando los neutrones reaccionan con el litio, se produce tritio, que se puede extraer e introducir de nuevo en el plasma. La energía de los neutrones se utiliza para calentar un circuito de agua y producir vapor, que alimentará los generadores eléctricos.



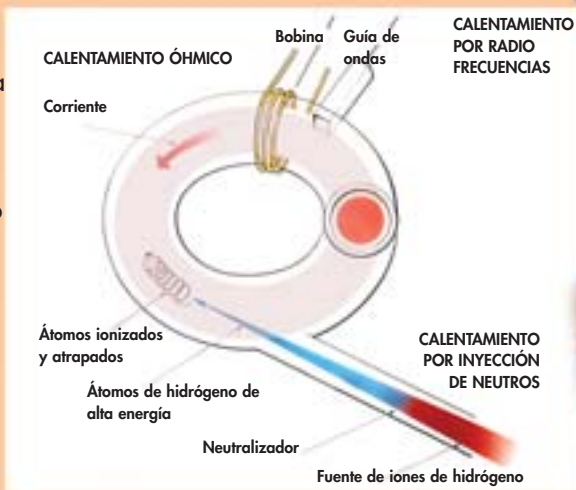
# Calentamiento del plasma

La corriente que fluye a través del plasma en un tokamak contribuye a calentarlo. A medida que la temperatura del plasma sube, este calentamiento óhmico va siendo menos efectivo, de manera que la temperatura sólo llega a alcanzar unos pocos millones de grados, es decir, alrededor de un factor 10 por debajo del valor necesario para que ocurran reacciones de fusión en gran cantidad. Para alcanzar temperaturas más elevadas hay que proporcionar más calentamiento al plasma mediante fuentes externas.

El calentamiento mediante alta frecuencia utiliza ondas electromagnéticas -con alta potencia y a diferentes frecuencias- que transfieren su energía al plasma mediante absorción resonante.

Se están desarrollando tres de estos sistemas: el calentamiento resonante a la frecuencia ciclotrónica de los iones (Ion Cyclotron Resonance Heating, ICRH, a frecuencias entre 20 y 55 MHz), el calentamiento resonante a la frecuencia ciclotrónica de los electrones (Electron Cyclotron Resonance Heating, a frecuencias entre 100 y 200 GHz), y el calentamiento en la frecuencia híbrida inferior (Lower Hybrid Heating, LHH, a frecuencias entre 1 y 8 GHz).

También se inyectan en el plasma haces de partículas neutras energéticas que penetran en su seno y le transfieren su energía cinética mediante colisiones con las partículas que lo componen.



Antena de radio-frecuencia en «Tore Supra» (CEA, Cadarache, Francia)



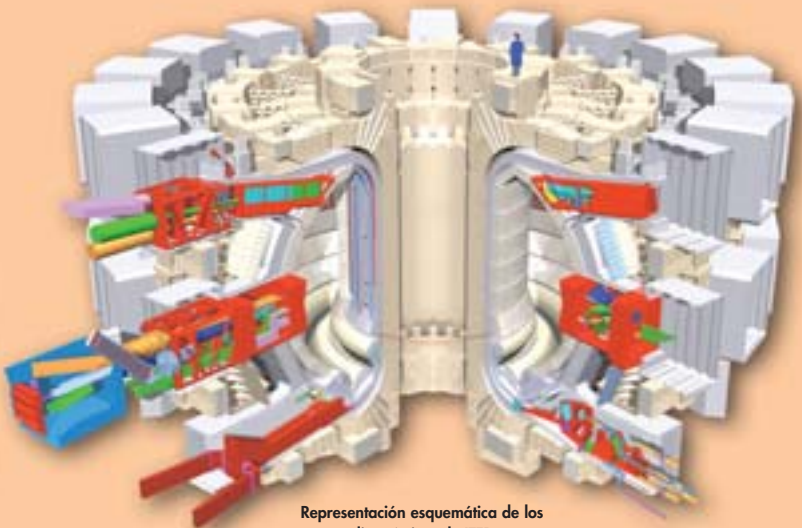


## Diagnos y modelado del plasma

Para saber cómo diseñar un reactor de fusión es necesario entender los procesos que tienen lugar en el plasma. Esto se consigue mediante el uso de sofisticados y complejos sistemas de medida denominados diagnósticos.

Estos diagnósticos, que se desarrollan en los distintos laboratorios europeos, son capaces de monitorizar cada aspecto del plasma, desde la temperatura en el centro del mismo, usando potentes láseres, hasta la cantidad y el origen de las impurezas presentes.

Los datos así obtenidos se usan para el desarrollo de nuevos códigos de ordenador que al final deberán ser capaces de predecir los resultados de la máquina y asegurar que ésta está funcionando según lo previsto.



Representación esquemática de los diagnósticos de ITER




# ITER, el camino hacia la energía de fusión

ITER es el próximo hito en el desarrollo de un reactor nuclear de fusión


El proyecto ITER se basa en una colaboración internacional de gran éxito, a través de una amplia variedad de proyectos de I+D. ITER podrá generar 400 MW de potencia de fusión durante 6 minutos, que se extenderán más adelante hacia el estado estacionario.

La inversión de capital para ITER se eleva a 4600 millones de Euros (con valor del año 2000). Una vez que se llegue a un acuerdo entre los socios internacionales, su construcción durará entre 8 y 10 años y funcionará durante 20 años aproximadamente.


ITER se basa en los resultados científicos de muchas máquinas de todo el mundo.




Prototipo a escala 1:1 del divertor de ITER



Plataforma de prueba para la manipulación remota del divertor de ITER



Girotrón para generar las microondas de alta frecuencia



Ensayo con altos flujos de e





Soldadura mediante láser de alta potencia (11 kW) para los sectores de la cámara de vacío



Pruebas del modelo de bobina de campo toroidal



1MW gyrotron



Calor de las losetas del blindaje de protección



Maqueta 1:1 del blanco vertical del divertor probado en Framatome



Instalación para las pruebas del manto

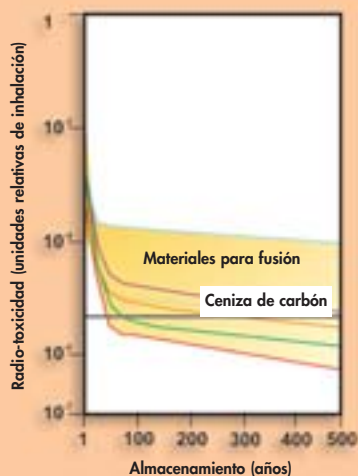


## Actividades tecnológicas a largo plazo

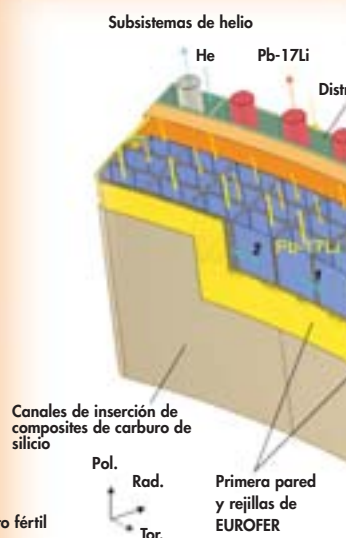
Además de los trabajos para ITER, se está llevando a cabo mucha investigación y desarrollo en tecnología de fusión para DEMO. Los estudios europeos sobre el manto fértil se concentran en dos modelos de manto: el de litio-plomo, y el de bolas cerámicas fértiles, ambos refrigerados por helio. Esta investigación es crucial para el desarrollo del ciclo del tritio en un reactor de fusión.

El desarrollo europeo de materiales estructurales se concentra en los aceros ferríticos y martensíticos de baja activación (EUROFER), y yendo más allá, se están investigando composites de carburo de silicio.

También se abordan los temas de seguridad y medio ambiente. Éstos, concentrados principalmente en diseños mejorados y en minimizar la activación de los materiales, llevan a la muy importante conclusión de que se puede diseñar un reactor de fusión de tal manera que ningún accidente en la planta requiera la evacuación de la población próxima a la misma. Los estudios socioeconómicos analizan los aspectos económicos y los escenarios a largo plazo de la fusión.



Decaimiento de la radio-toxicidad calculado a partir de diferentes modelos de centrales de fusión, comparado con la radio-toxicidad de las cenizas de carbón.



Diseño conceptual para los ensayos del manto fértil



Bomba de extracción de tritio



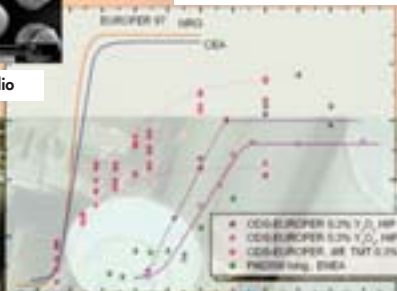
Bolas de berilio



Prueba de corrosión de metales líquidos



Muestras del material EUROFER



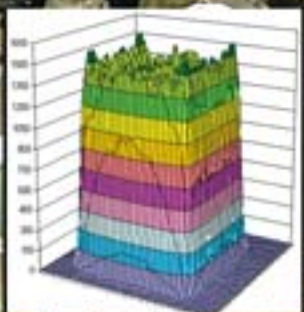
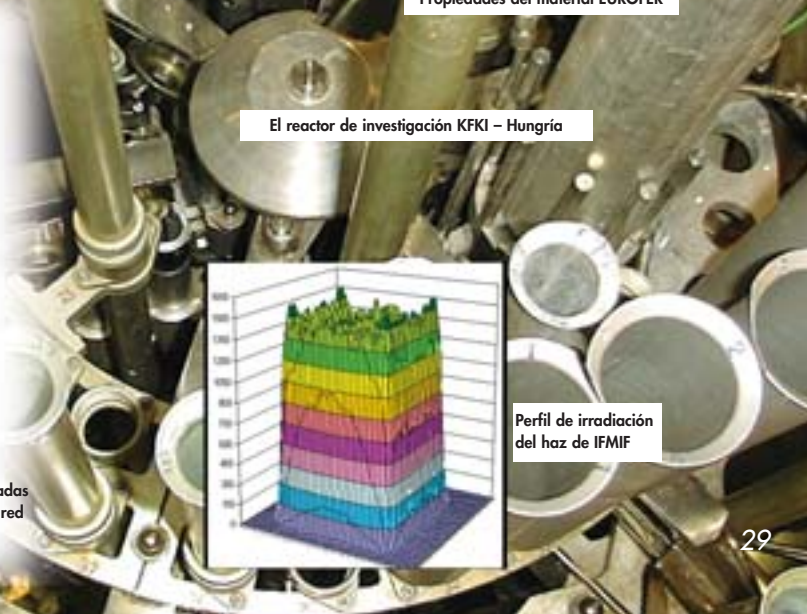
Propiedades del material EUROFER

Distribuidor de líquido refrigerante  
Blindaje caliente  
Blindaje frío  
He



Cubiertas reforzadas de la primera pared

El reactor de investigación KFKI – Hungría



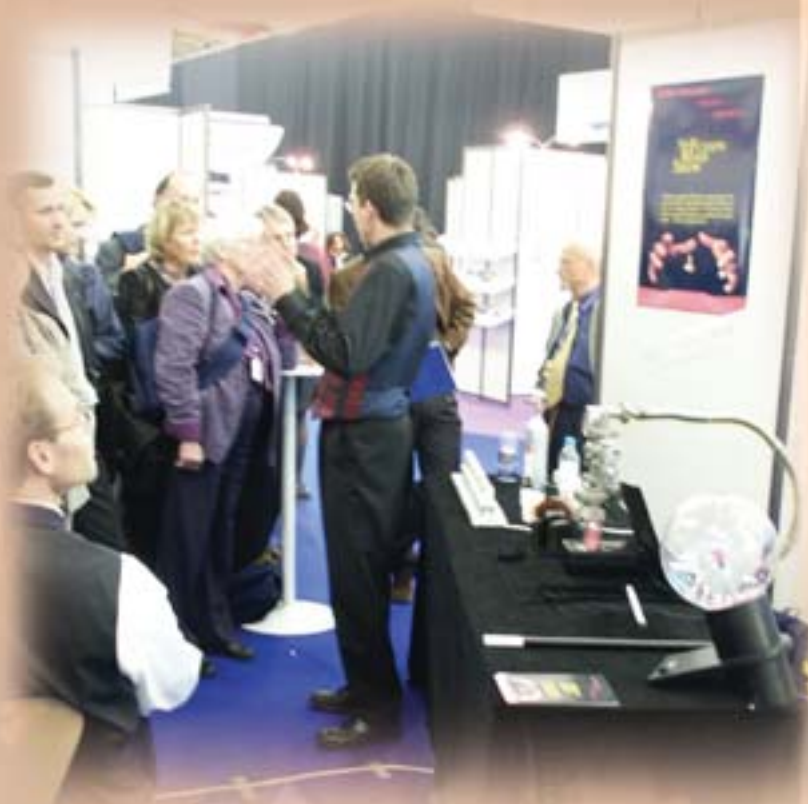
Perfil de irradiación del haz de IFMIF



## Actividades de divulgación en Europa

Para informar al público general y a los estudiantes de las actividades de investigación en fusión, se ha creado la exposición itinerante Fusión Expo, y se ha presentado en muchas ciudades europeas.





«Itinerario por la Fusión»

La muestra «El itinerario por la Fusión», desarrollada por la Asociación EURATOM-FOM (Holanda), proporciona un buen ejemplo de las actividades divulgativas que la comunidad de fusión lleva a cabo con gran éxito. Esta muestra consiste en una serie de experimentos sencillos que explican principios básicos, ensamblados en una función divertida, y que van acompañados de una presentación explicativa.



# EIROforum

El programa de fusión europeo participa a través de EFDA en EIROforum, una colaboración entre siete organizaciones intergubernamentales europeas de investigación científica, responsables de diversas infraestructuras y laboratorios. Un primer objetivo de EIROforum es el de jugar un papel activo y constructivo en promocionar la calidad y el impacto de la investigación europea. Una meta específica es coordinar las actividades divulgativas de las organizaciones, incluyendo la transferencia de tecnología y la información al público.

Los siete miembros de EIROforum son, siguiendo las siglas inglesas correspondientes:

- **CERN** Organización Europea para la Investigación Nuclear (Suiza).
- **EFDA** Acuerdo Europeo para el Desarrollo de la Fusión (Reino Unido, Alemania).
- **EMBL** Laboratorio Europeo de Biología Molecular (Alemania).
- **ESA** Agencia Espacial Europea (Unión Europea).
- **ESO** Observatorio Europeo del Hemisferio Sur (Alemania, Chile)
- **ESRF** Instalación Europea Radiación Síncrotrón (Francia).
- **ILL** Instituto Laue-Langevin (Francia).



Tercer grado de física – Profesores en acción



## Actividades educativas y de formación en Europa

La educación y la formación de jóvenes investigadores son una parte importante del programa de trabajo de las Asociaciones. Muchos miembros del personal profesional de las Asociaciones tienen responsabilidades educativas en instituciones académicas, principalmente universidades, y alrededor de 200 a 250 licenciados y estudiantes de doctorado desarrollan su investigación dentro de los laboratorios de las Asociaciones. Varias Asociaciones organizan cursos de nivel universitario y escuelas de verano sobre fusión y física de plasmas para estudiantes con titulación universitaria e investigadores recientemente graduados.

Algunas de las escuelas de verano organizadas por las Asociaciones son:

- Escuela de Verano Carlo Magno – Grupo TEC de Asociaciones (Bélgica, Alemania, Holanda),
- Escuela de Verano de Culham – Asociación Euratom-UKAEA (Reino Unido),
- Escuela de Verano de Volos – Asociación Euratom-Grecia (Grecia),
- Escuela de Verano IPP CR – Asociación Euratom-Instituto de Física del Plasma (República Checa).



## Aplicaciones de los productos I+D de fusión («Spin-offs») en otras áreas de alta tecnología

La industria ha jugado un importante papel a la hora de construir los dispositivos y desarrollar las tecnologías necesarias para la I+D en fusión y, en contrapartida, se ha beneficiado de esta relación, que le ha permitido acumular experiencia y generar productos comerciales de interés en otras áreas aparte de la fusión. Entre estos "spin-offs" se incluyen: técnicas de procesado por plasma, tratamientos de superficies, sistemas mejorados de alumbrado, pantallas de plasma, tecnología de vacío, electrónica de potencia y metalurgia.



Motor espacial iónico

La transferencia de conocimiento desde fusión se manifiesta también cuando los investigadores de este campo se trasladan a otras áreas de la tecnología, llevando consigo las capacidades adquiridas. Este tipo de fertilización cruzada y su carácter inter-disciplinar constituyen una importante fuerza generadora de progreso científico y tecnológico en Europa.







# Referencias

## Lecturas relacionadas:

Hacia una estrategia europea para la seguridad en el abastecimiento de energía, Libro Verde, Comisión Europea, COM (2000)769  
[http://europa.eu.int/comm/energy\\_transport/en/lpi\\_lv\\_en1.html](http://europa.eu.int/comm/energy_transport/en/lpi_lv_en1.html)

## Enlaces de interés:

[http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_en.html)  
<http://www.efda.org>  
<http://www.jet.efda.org>  
<http://www.iter.org>  
<http://www.fusion-eur.org>  
<http://www.eiroforum.org>

## Contactos para información adicional

C. Ibbott  
European Commission  
Directorate General RTD J6 Fusion Association Agreements  
Rue de la loi, 200  
B-1049 Brussels  
tel: +32 229 86721 - fax: +32 229 64252  
email: christopher.ibbott@cec.eu.int  
[http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu\\_en.html](http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_en.html)

++++  
F. Casci  
EFDA CSU Garching  
Boltzmannstr., 2  
D-85748 Garching bei Muenchen - Germany  
tel: +49 89 3299 4237 - fax: +49 89 3299 4197  
e-mail: federico.casci@efda.org - <http://www.efda.org/>

++++  
M.T. Orlando  
Consorzio RFX,  
Management of Fusion EXPO  
Corso Stati Uniti, 4,  
35127 Padova - Italy  
tel: +39 049 829 5990 - fax: +39 049 829 5051  
e-mail: mariateresa.orlando@igi.cnr.it - <http://www.igi.pd.cnr.it>

**BELGIQUE-BELGIE**

**Jean De Lemmy**  
 Avenue du Roi 200 Ruyssendaal 202  
 B-1190 Evere/Sint-Jans  
 Tel: (32-2) 338 41 20  
 Fax: (32-2) 333 31 61  
 E-mail: jean.de.lemmy@tribunaal.be  
 URL: <http://www.jean-de-lemmy.be>

**La libreria europea del  
 de Europese Boekhandel**

Rue de la Loi 244/Maison 244  
 B-1042 Brussels/Bruksel  
 Tel: (32-2) 286 26 36  
 Fax: (32-2) 730 26 60  
 E-mail: mail@libreria.be  
 URL: <http://www.libreria.be>

**Monteur langbelegelijk Staatelijk**

Rue de Louvain 40-42 Louvain-la-Neuve 40-42  
 B-1000 Brussels/Bruksel  
 Tel: (32-2) 552 21 11  
 Fax: (32-2) 511 91 84  
 E-mail: maestre@pvt.ign.be

**ZAROWSKA**

**J. H. Schulte Information AS**  
 Hestvedsgade 4  
 DK-2620 Albertslund  
 Tel: (45) 43 43 22 00  
 Fax: (45) 43 43 10 00  
 E-mail: schulte@schulte.dk  
 URL: <http://www.schulte.dk>

**DEUTSCHLAND**

**Bundesregierung Verlag GmbH**

Vertriebsabteilung  
 Am Spiegelgrund Straße 140  
 D-10772 Berlin  
 Tel: (49-30) 97 96 80  
 Fax: (49-30) 97 96 82 78  
 E-mail: vertrieb@bundesregierung.de  
 URL: <http://www.bundesregierung.de>

**TAIWAN-RESECE**

**B. C. Theodoridis SA**  
 International Bookstore  
 Panagiotou 13  
 GR-1054 Athens  
 Tel: (30-21) 23 24 40  
 Fax: (30-21) 23 24 40  
 E-mail: bctheodor@books.gr  
 URL: [www.books.gr](http://www.books.gr)

**ESPAÑA**

**Boletín Oficial del Estado**  
 2-28077 Madrid  
 Tel: (34) 913 38 21 11 (Spain), 913 38 17 12  
 (Australia)  
 Fax: (34) 913 38 21 21 (Spain), 913 38 17 14  
 (Australia)  
 E-mail: boe@boe.es  
 URL: <http://www.boe.es>

**Mundt France Librairie, SA**

Caseville 37  
 E-28041 Madrid  
 Tel: (34) 914 36 37 00  
 Fax: (34) 914 36 39 00  
 E-mail: libreria@mundtfrance.com  
 URL: <http://www.mundtfrance.com>

**FRANCE**

**Journal officiel**  
 Service des publications des CE  
 rue Cassin  
 F-75277 Paris Cedex 16  
 Tel: (33 1) 40 56 77 31  
 Fax: (33 1) 40 56 77 36  
 E-mail: journalofficiel@journal-off.  
 gouv.fr  
 URL: <http://www.journal-officiel.gouv.fr>

**IRELAND**

**Alan Hanna's Bookshop**  
 271 Lower Palmerston Road  
 Dublin 8  
 Tel: (353 1) 496 73 88  
 Fax: (353 1) 496 52 28  
 E-mail: alan@hanna.ie

**ITALIA**

**Libreria SpA**  
 Via Dante di Colonna, 1/1  
 Casella postale 952  
 I-10125 Firenze  
 Tel: (39) 55 38 48 31  
 Fax: (39) 55 34 12 57  
 E-mail: libreria@libreria.com  
 URL: <http://www.libreria.com>

**LUXEMBOURG**

**Mezengesellschaft des Livre SAFL**  
 5, rue Hoffmann  
 L-12611 Luxembourg  
 Tel: (352) 46 10 20  
 Fax: (352) 49 56 61  
 E-mail: mail@mls.lu  
 URL: <http://www.mls.lu>

**NEDERLAND**

**NIN Servicecenter Uitgevers**  
 Chausse de Philippeville 2  
 Postbus 20074  
 2000 EA Den Haag  
 Tel: (31-70) 378 98 60  
 Fax: (31-70) 378 98 63  
 E-mail: nin@nin.nl  
 URL: <http://www.nin.nl>

**PORTUGAL**

**Distribuidora de Livros Bertrand SA\***  
 Rua do Carmo, 5A  
 Rua dos Terreiros de Vales, A-4  
 Apartado 80077  
 P-2010 Amadora  
 Tel: (351) 214 96 87 87  
 Fax: (351) 214 96 87 88  
 E-mail: ds@bp.pt

**Imprensa Nacional-Casa de Moeda, SA**

Centro de Publicações Odeco  
 Rua de Entre os Pavilhões, 139  
 P-1250-109 Lisboa Codes  
 Tel: (351) 212 94 57 00  
 Fax: (351) 212 94 57 00  
 E-mail: imprensa@inm.pt  
 URL: <http://www.inm.pt>

**SUOMENPILÄ**

**Aaltonen Kirjakauppi/  
 Aaltonen Kirjasto**  
 Aaltonkatu 1  
 PL-70120 Helsinki/Helsingfors  
 P.O. Box 100  
 Tel: (358-9) 121 44 18  
 Fax: (358-9) 121 44 20  
 E-mail: aaltonen@aaltonen.com  
 URL: <http://www.aaltonen.com>

**STAVRO**

**STJ AB**  
 Tegelströms 11-13  
 S-1271 Breda  
 Tel: (46-46) 16 00 00  
 Fax: (46-46) 30 76 47  
 E-mail: stj@stj.se  
 URL: <http://www.stj.se>

**UNITED KINGDOM**

**The Stationery Office Ltd**  
 Customer Services  
 PO Box 26  
 Norwich NR9 1SN  
 Tel: (44-673) 40 05 522  
 Fax: (44-673) 40 05 523  
 E-mail: books.orders@stationery.co.uk  
 URL: <http://www.stationery.co.uk>

**ISLAND**

**Rekjalind Læsing Búðin**  
 Engilíng 11-15  
 IS-103 Reykjavík  
 Tel: (354) 552 50 40  
 Fax: (354) 552 50 80  
 E-mail: rekjalind@rekjalind.is

**NORVE**

**Swets Bookland AS**  
 Hans Nelson Høyem g. 39  
 N-0401 Nydalen  
 Tel: (47) 23 45 00 00  
 Fax: (47) 23 45 00 01  
 E-mail: info@swetsbookland.com

**SCHWEIZ/SUISSE/SVIZZERA**

**Euro Info Center Schweiz**  
 c/o CSCB Baslerweg Switzerland  
 Spycherstrasse 85  
 CH-4002 Zurich  
 Tel: (41-7) 360 52 19  
 Fax: (41-7) 360 52 11  
 E-mail: euro@euro.ch  
 URL: <http://www.euro.ch>

**SÁLGARNA**

**European Europa Ltd**  
 65, Stour Street  
 RG-100E Solihull  
 Tel: (44-21) 960 27 66  
 Fax: (44-21) 960 42 30  
 E-mail: Europa@europa.co.uk  
 URL: <http://www.europa.co.uk>

**CYPRUS**

**Cyprus Chamber of Commerce  
 and Industry**  
 PO Box 21405  
 CY-1024 Nicosia  
 Tel: (357-22) 89 87 82  
 Fax: (357-22) 89 84 14  
 E-mail: ccc@ccci.org.cy  
 URL: <http://www.ccci.org.cy>

**ESTI**

**East Rutherford Publishers**  
 (American Chamber of Commerce and Industry)  
 Toom-Kool 17  
 EE-10124 Tallinn  
 Tel: (372) 666 02 44  
 Fax: (372) 666 02 45  
 E-mail: eston@books.ee  
 URL: <http://www.books.ee>

**HUNGÁRIA**

**Mediatek Ltd**  
 Mediatek Pte 27  
 H-10000 Zagyvaré  
 Tel: (36-1) 662 08 00  
 Fax: (36-1) 662 01 40  
 E-mail: mediatek@mediatek.hu  
 URL: <http://www.mediatek.hu>

**MAOYAROMIA**

**Euro Info Services**  
 Str. Iulian 41 12  
 B-10000 Bucharest  
 Tel: (40-1) 99 44 68  
 Fax: (40-1) 97 67 89  
 E-mail: info@euroinfo.ro  
 URL: <http://www.euroinfo.ro>

**MALTA**

**Miler Distributors Ltd**  
 Malta International Airport  
 PO Box 25  
 Luqa L24 05  
 Tel: (356) 44 44 68  
 Fax: (356) 44 44 68  
 E-mail: info@mildistributors.com

**POLSKA**

**Arca Polska**  
 Krakowska Przemysłowa 7  
 Staj. Główna, 100  
 PL-00-950 Warszawa  
 Tel: (48-22) 626 12 24  
 Fax: (48-22) 626 62 63  
 E-mail: books@arcapolska.com.pl

**ROMÂNIA**

**Burmecia**  
 Str. Charles Lutz nr. 65, sector 1  
 RO-70136 Bucuresti  
 Tel: (40-21) 262 28 82  
 Fax: (40-21) 262 27 88  
 E-mail: burmecia@burmecia.com

**SLOVENIA**

**Centrum VTS SR**  
 Narmenska Stobalova 18  
 SI-61000 Škofljica  
 Tel: (382-2) 54 61 83 88  
 Fax: (382-2) 54 61 91 84  
 E-mail: knjige@vts.si  
 URL: <http://www.vts.si>

**SLOVENIA**

**GV Zvezka d.o.o.**  
 Dunajska cesta 5  
 SI-1000 Ljubljana  
 Tel: (386) 13 09 1900  
 Fax: (386) 13 09 1905  
 E-mail: knjige@gvzvezka.si  
 URL: <http://www.gvzvezka.si>

**TURKEY**

**Daşın ARAŞTI A.Ş.**  
 Ceylan Ceylan Business  
 100, Y1 Mahallesi 34440  
 TR-80500 Başpaşa-İstanbul  
 Tel: (90-212) 840 22 27  
 Fax: (90-212) 840 23 47  
 E-mail: arastir@daşın.com.tr

**ARGENTINA**

**World Publications SA**  
 Av. Corrientes 1877  
 C-1200 AAA Buenos Aires  
 Tel: (54-1) 48 15 81 98  
 Fax: (54-1) 48 15 81 98  
 E-mail: export@worldpub.com.ar  
 URL: <http://www.worldpub.com.ar>

**AUSTRIA**

**Huber Publishers**  
 PO Box 404  
 A-6000 Wien  
 Tel: (43-1) 292 47 76  
 Fax: (43-1) 292 47 76  
 E-mail: admin@huberpub.com.at  
 URL: <http://www.huberpub.com.at>

**BRASIL**

**Libreria Candides**  
 Rua Silveira de Sá, 12 C  
 CEP  
 20042-900 Rio de Janeiro  
 Tel: (55-21) 292 47 76  
 Fax: (55-21) 292 47 76  
 E-mail: export@libreriacandides.com.br  
 URL: <http://www.libreriacandides.com.br>

**CANADA**

**Les Éditions Le Liberté Inc.**  
 3025, chemin Santa-Foy  
 Sainte-Foy, Québec G1X 2V6  
 Tel: (1-418) 658 75 63  
 Fax: (1-400) 567 54 49  
 E-mail: liberte@liberte.com.ca

**Renouf Publishing Co. Ltd**

1369 Chemin Canard Road Unit 1  
 Ottawa, Ontario K1J 6J8  
 Tel: (1-613) 743 26 65  
 Fax: (1-613) 743 75 65  
 E-mail: order\_dept@renoufbooks.com  
 URL: <http://www.renoufbooks.com>

**EGYPT**

**The Middle East Observer**  
 41 Sherif Street  
 11111 Cairo  
 Tel: (20-2) 360 50 10  
 Fax: (20-2) 360 57 32  
 E-mail: mail@middleeast.com.eg  
 URL: <http://www.middleeast.com.eg>

**MALAYSI**

**ERIC Malaysia**  
 Suite 47 21, Level 47  
 Bangunan AmFusion (letter box 47)  
 9 Jalan Yap Kwan Seng  
 50452 Kuala Lumpur  
 Tel: (60-3) 21 62 62 88  
 Fax: (60-3) 21 62 61 88  
 E-mail: eric@eric.net.my

**MEXICO**

**Mundt France Mexico, SA de CV**  
 Rio Pinar, 141  
 Colonia Cuauhtémoc  
 MX-06000 Mexico, DF  
 Tel: (52-5) 550 56 34  
 Fax: (52-5) 54 67 89  
 E-mail: info@mx.mundtfrance.com

**SOUTH KOREA**

**The European Union Chamber of  
 Commerce in Korea**  
 Sullyong Bldg., Kyllio Bldg.  
 1 Cheongju 1-Ga, Cheongju-Si  
 Seoul 170-714  
 Tel: (82-2) 725-3000/5  
 Fax: (82-2) 725-3889  
 E-mail: euca@euca.or.kr  
 URL: <http://www.euca.or.kr>

**SWITZERLAND**

**SVI LANKA**  
**Eric Sri Lanka**  
 Temple Road Hotel  
 111, Sri Chittamparan  
 A. Galleheri Mawatha  
 Colombo 2  
 Tel: (94-1) 252 71 32 79  
 Fax: (94-1) 44 87 79  
 E-mail: eric@erics.lk

**TAIWAN**

**Tycoon Information Inc**  
 PO Box 81-456  
 105 Taipei  
 Tel: (886-2) 87 12 88 88  
 Fax: (886-2) 87 12 87 87  
 E-mail: tycoon@ms21.net.tw

**UNITED STATES OF AMERICA**

**Berman Associates**  
 6511 J. Amersdorf Drive  
 Lehigh Valley, PA 18021  
 Tel: (1-800) 274 44 47 (toll free telephone)  
 Fax: (1-800) 962 24 50 (toll free fax)  
 E-mail: inquiry@berman.com  
 URL: <http://www.berman.com>

**ANDERE LANDEN/OTHER COUNTRIES/  
 AUTRES PAYS**

**Bills werden Sie sich ein ein ein Büro ihrer  
 Wahl/Please contact the sales office of  
 your chosen/veuillez vous adresser au  
 bureau de vente de votre choix**

**Office for Official Publications  
 of the European Communities**  
 2, rue Meeus  
 L-2005 Luxembourg  
 Tel: (352) 49 29 42/81  
 Fax: (352) 49 29 40/70  
 E-mail: inquiry@eur-ops.eu.int  
 URL: <http://publications.eu.int>

Comisión Europea

**La Investigación en Fusión** — Una Opción Energética para el Futuro de Europa

Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas

2005 — 40pp. — *formato A5, 14,8 x 21,0 cm*

ISBN 92-894-7710-9

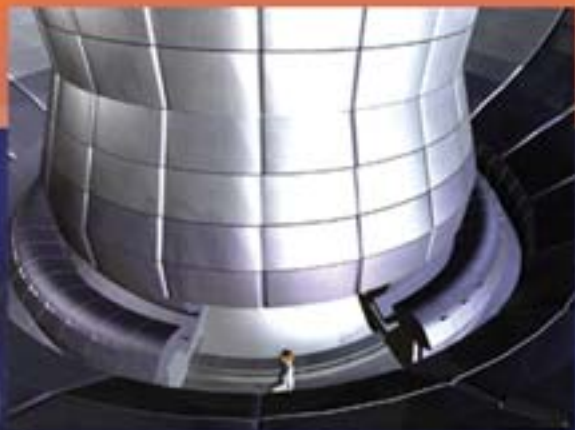
## «Starmakers» (Los fabricantes de estrellas)



La película de 8 minutos «Starmakers» (Los fabricantes de estrellas) describe ITER, una gran máquina experimental que se va a construir mediante una colaboración mundial, como el «siguiente paso» en el camino hacia la energía de fusión. El espectador puede hacerse una idea de este enorme proyecto gracias a una visita mediante realidad virtual. En la Fusión Expo, la película, vista a través de unas gafas pasivas polarizadas, transporta a la audiencia a un espectacular viaje de realidad virtual en 3D. La versión que se distribuye aquí es en 2D y no requiere gafas especiales.

La película ha sido producida por el Centro de Investigaciones en Física de Plasmas, Escuela Politécnica Federal de Lausana (Suiza), con financiación de la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea. Digital Studios SA (Paris, Francia) han creado numéricamente la película, basándose en un diseño de ITER hecho con ordenador.





---

9<sup>th</sup> ENERGY FILM  
FESTIVAL  
LAUSANNE 2001

Grand Prix  
du Festival



Scénario  
et montage  
par Laurent

Monteur

Monteur

Monteur

Coordination

**The Stormmaker**

Laurent Lemaître, Paris, France

Paris-Jedi-Paris, Lausanne, Suisse  
et Nicolas Kadi, Paris, France

Association Énergie-Cinéma-Son  
(ECS), Lausanne, Suisse

*Energy*

LAUSANNE 2001

*Durante la toma de decisión sobre el programa específico de fusión, el Consejo de Ministros europeo declaró lo siguiente:*

*«En la segunda mitad de este siglo, la energía de fusión podría contribuir a gran escala a la producción de electricidad primaria, libre de emisiones. Los avances hechos en la investigación en energía de fusión justifican un esfuerzo continuo hacia el objetivo a largo plazo de construcción de una central de energía de fusión».*

*Este folleto describe la investigación que se realiza en Europa en energía de fusión, así como su coordinación y su gestión. El experimento de fusión de la siguiente generación, ITER, debería allanar el camino de la fusión para que, en la segunda mitad del siglo XXI, esta fuente contribuya de manera significativa a la producción mundial de energía.*

*La información que se ofrece en este folleto es una recopilación de la investigación desarrollada en el programa europeo de fusión.*



Oficina de Publicaciones

*Publications.eu.int*

ISBN 92-894-7710-5



9 789289 477109