

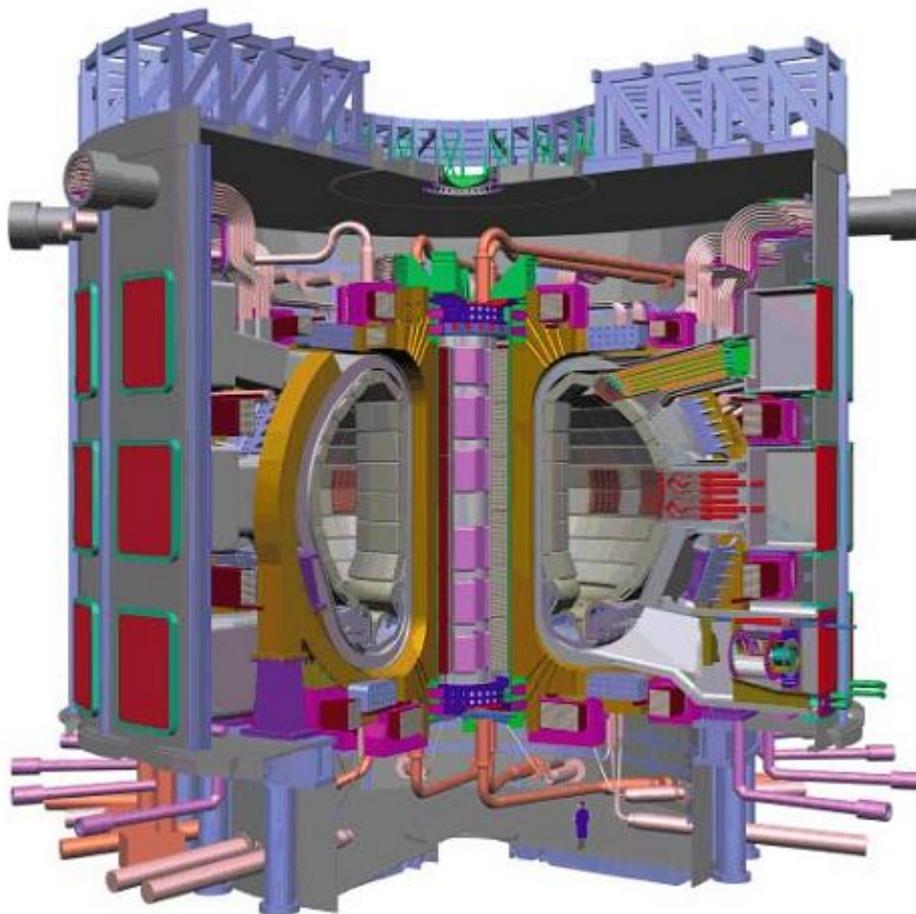
ITER

Crónica de un desastre anunciado

Jean-Pierre Petit

**Ex-director de investigaciones en el CNRS
Físico de plasmas, especialista en MHD**

ITER es la primera etapa de un megaproyecto valorado en 19 mil millones de euros a la espera de financiación para su debut.



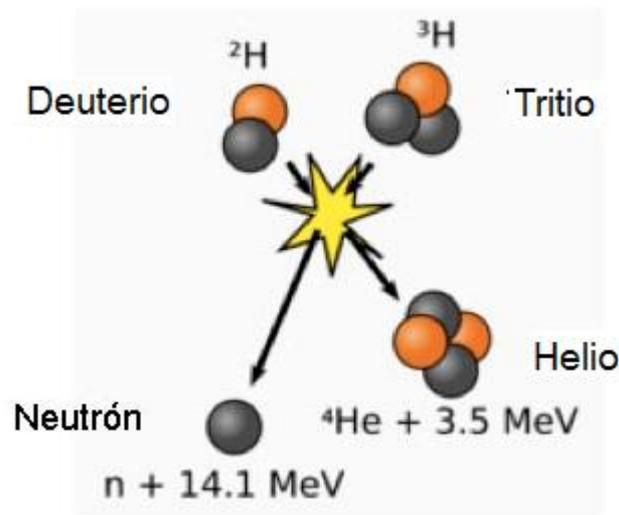
Esquema seccional de ITER (fuente: organización ITER)

Citado de la pág. 14 de Andrew Thornton, PhD, (ene. 2011), quien trabaja en el tokamak MAST, Culham :

Las consecuencias de las interrupciones en la siguiente generación de tokamaks son graves, y las consecuencias de una interrupción en una planta generadora tokamak serían catastróficas.

Pocas personas conocen los principios básicos de las máquinas que, partiendo de esta primera máquina ITER, se espera desemboquen en la generación de electricidad usando la fusión como fuente de energía.

La imagen más arriba representa dicho generador de energía térmica que deberá, luego de 50 años de “Investigación y Desarrollo”, convertirse en un generador nuclear de electricidad por medio del uso de la energía resultante de la fusión de dos isótopos del hidrógeno, el deuterio y el tritio. El esquema de esta fusión es el siguiente:

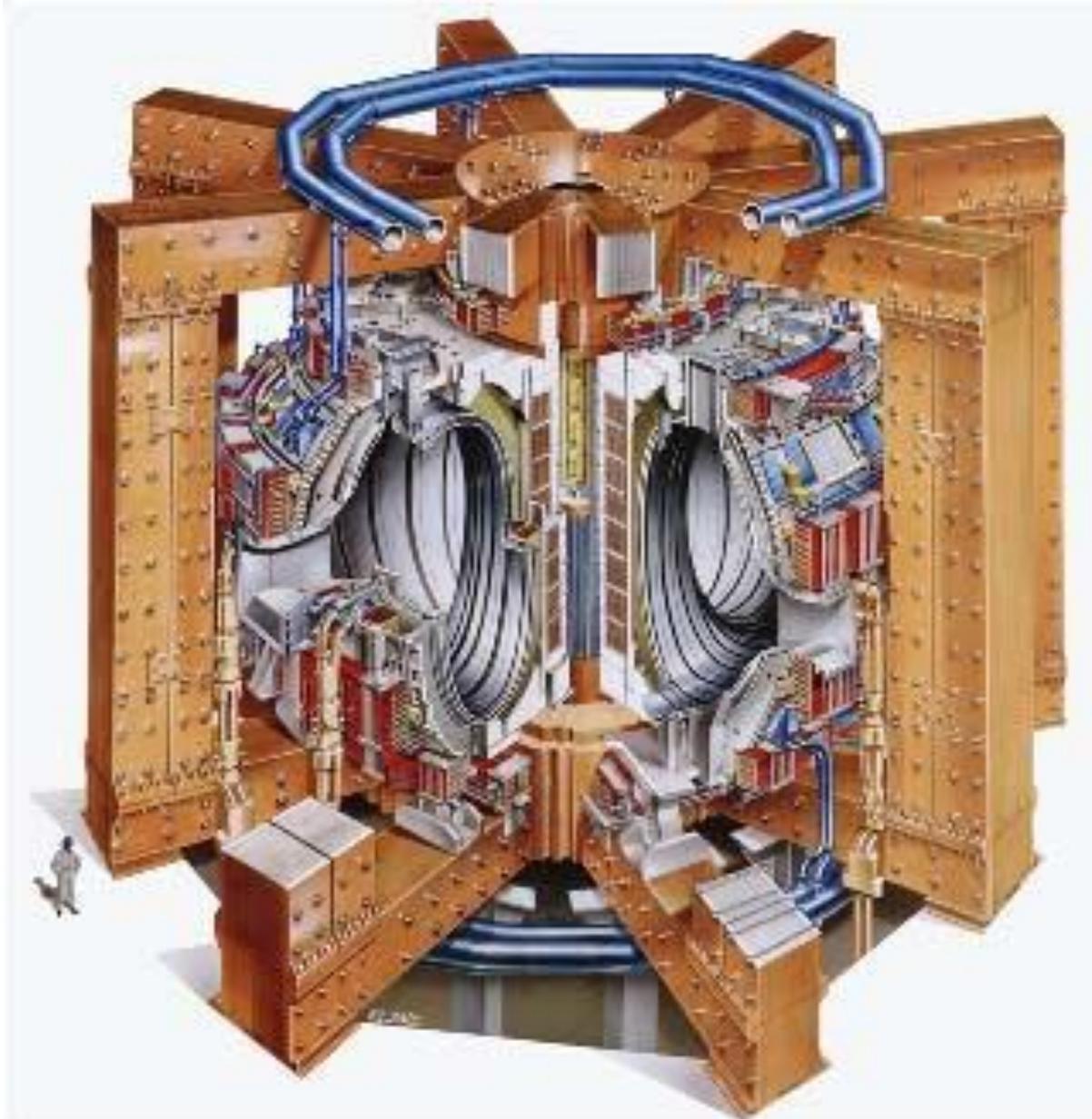


Para que esta reacción nuclear ocurra se requieren temperaturas de 100 millones de grados, lo que quiere decir que la velocidad de agitación térmica de los núcleos de los isótopos del hidrógeno debe alcanzar los

1000 km/s. Un medio llevado a dicha temperatura no puede contenerse en una pared material. Por esta razón, a partir de los años 1950, se comenzó a pensar en un *confinamiento magnético* de todo el plasma ionizado, mezcla de electrones libres y de iones de hidrógeno, con la ayuda de un campo magnético.

La “botella magnética” conteniendo el plasma de fusión fue ideada en 1950 por el ruso Andrei Sakharov, y se llama tokamak. La máquina consiste en una recámara con la forma de un toro llena con una mezcla de deuterio y tritio a baja presión. El deuterio es inofensivo y se encuentra en cantidades ilimitadas en la naturaleza, en el agua. El tritio, en cambio, es radiotóxico y se descompone por radioactividad beta en 12,3 años. Las cantidades que de él se crean en la alta atmósfera por acción de los rayos cósmicos sobre los núcleos de nitrógeno son tan pequeñas que se puede afirmar que “prácticamente no existe en estado natural”: se estima en 3,6 kg. todo el tritio creado de ese modo presente en la Tierra.

En 1997 los ingleses se las arreglaron para obtener energía por fusión durante un segundo, usando la reacción mencionada en el reactor de la máquina JET (Joint European Torus).



La máquina británica JET. La persona a la izquierda da la escala.

En la figura se pueden observar ocho enormes viguetas de acero alrededor de la máquina. ¿Por qué tienen secciones tan grandes? Porque el campo magnético creado por la máquina, 3,85 Teslas, engendra fuerzas considerables que tienden a hacer explotar los solenoides que las crean y deben ser en consecuencia mantenidos firmemente en su sitio.

Más adelante veremos cómo trabajan estas máquinas. En el caso de JET, el campo magnético es suministrado mediante solenoides no superconductores. El campo no puede, por lo tanto, mantenerse más que

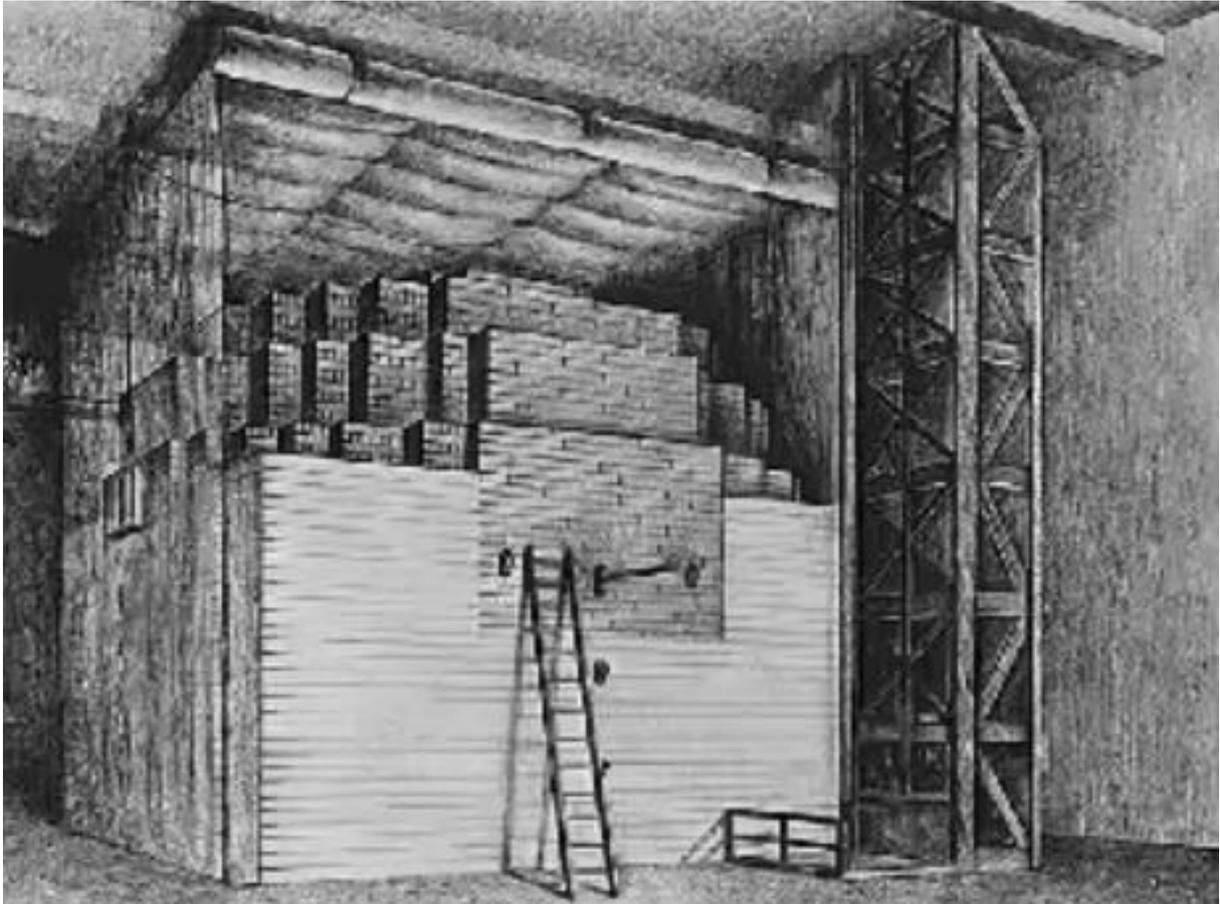
unas cuantas decenas de segundos a causa de la emisión de calor resultante debida a efecto Joule.

Los franceses construyeron una máquina similar en la que el campo magnético alcanza el mismo valor pero puede mantenerse sin límite de tiempo puesto que es producido por solenoides superconductores. Para hacerlo basta con enfriarlos a muy baja temperatura por medio de helio líquido. Tal como en el JET, esta máquina, llamada Tore-Supra, debe ser sostenida fuertemente mediante un sistema de viguetas de acero. El aspecto general de Tore-Supra es similar al de JET, aunque más pequeño, como se muestra mucho más adelante en este documento.

De la fisión a la fusión

Antes de desarrollar el tema de la producción de energía por fusión es interesante presentar unas cuantas imágenes que sirvan para ilustrar el abismo de complejidad que separa la tecnología de fisión de la denominada fusión “controlada”. Antes de la Segunda Guerra Mundial los científicos entrevieron la posibilidad de crear una reacción en cadena a partir de átomos como el de Uranio 235. Después se mostró que era posible usar esta operación para la creación de bombas con Plutonio 239, el cual no existe en la naturaleza y tiene una muy corta vida media de 24.000 años comparada con los 4.500 millones de años del Uranio 235.

En 1942, el italiano Enrico Fermi construyó el primer reactor nuclear en una antigua cancha de squash bajo las graderías del estadio de la universidad de Chicago. La construcción era muy simple. Sólo se requería colocar barras de uranio dentro de una masa de bloques de grafito que jugaba el papel de moderador y de retardador de los neutrones. Frenando los neutrones emitidos en las reacciones de fisión se incrementaban las chances de crear nuevas fisiones en los átomos de Uranio 235 aledaños.



El primer reactor nuclear, construido en Chicago por Fermi en 1942

Un recuento de la tecnociencia nuclear se puede consultar en el cómic científico disponible en el sitio web de la asociación Saber sin Fronteras (Savoir sans Frontières, <http://www.savoir-sans-frontieres.com>) titulado:

“Energéticamente vuestro”

Telecargable en español en la dirección:

http://www.savoir-sans-frontieres.com/JPP/telechargeables/ESPANOL/energeticamente_vuestros.htm

Como se explica allí, un reactor nuclear se completa con barras de cadmio, absorbedor de neutrones que permite controlar el ritmo al cual procede la fisión e inclusive detener el reactor. Aquí abajo se pueden apreciar las barras de control del primer reactor construido por Fermi.



Control del reactor mediante barras de cadmio

Al construir estas “pilas atómicas”, como fueron llamadas en su tiempo, los científicos no estaban tratando de producir energía en forma de calor sino de producir Plutonio 239 al bombardear con neutrones el Uranio 238, siempre con el fin de crear bombas. Sobre este tema, ver el cómic citado anteriormente.

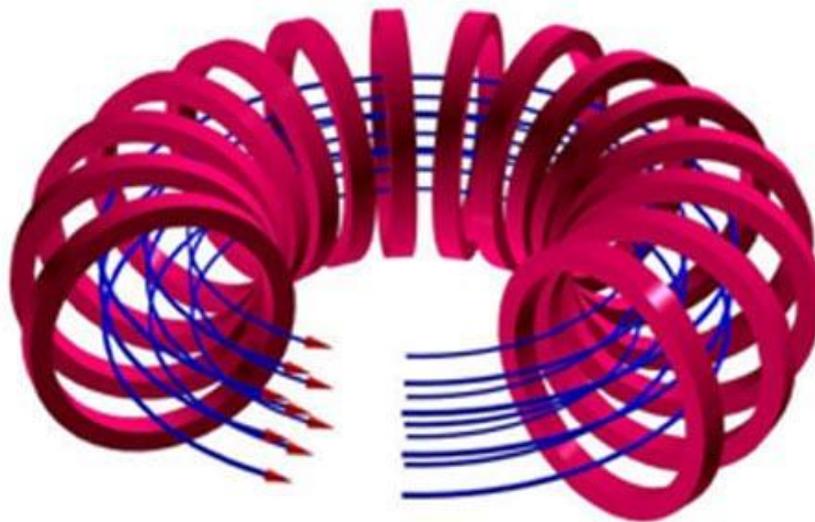
Este primer reactor no requería de un sistema de enfriamiento puesto que sólo emitía 240 vatios de calor. En su época, todos los fenómenos eran cabalmente comprendidos y dominados, tanto así que en Harford se pasó pronto a un reactor que emitía *un millón de veces más energía*. En este nuevo caso, los 240 megavatios de energía térmica eran evacuados mediante un circuito de agua que se descargaba al río Columbia.

No fue sino hasta mucho después que se pensó en usar los reactores nucleares para producir energía y luego convertirla en electricidad mediante un conjunto de turbinas de vapor y alternadores. Queda claro, sin embargo, que si ese hubiese sido el fin perseguido, habrían bastado unos pocos meses para crear una central generadora de centenares de megavatios de electricidad.

La fusión es infinitamente más compleja y problemática. De hecho, se requirió más de medio siglo para que otro reactor, el británico JET, pudiera producir energía durante un segundo.

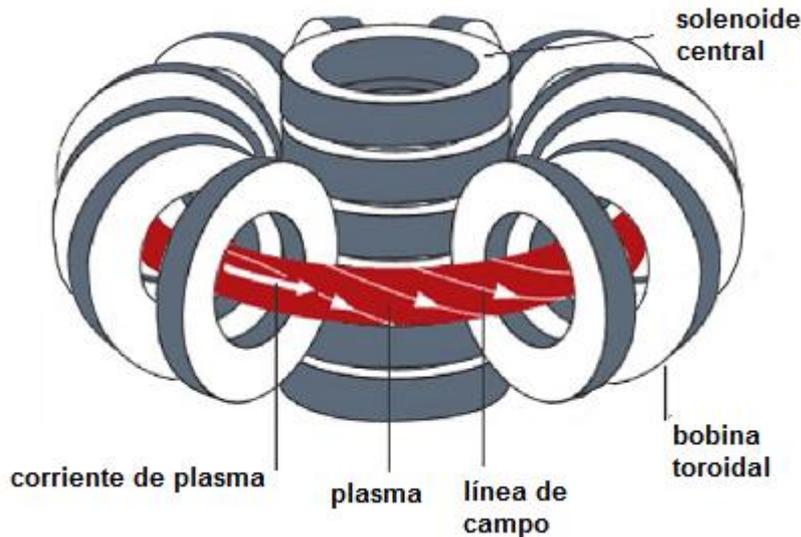
¿Cómo funciona un tokamak?

Se introduce una mezcla de fusión a baja presión en una recámara toroidal. Se crea, con la ayuda de un grupo primario de bobinas, un campo magnético denominado “toroidal”. En un reactor de tipo industrial estas bobinas están hechas de elementos superconductores.



En rojo: bobinas superconductoras.
En azul: campo magnético toroidal

Luego se ioniza el contenido de la recámara toroidal usando hiperfrecuencias. Finalmente, se crea una corriente de plasma por inducción, reforzando el campo magnético creado por un solenoide dispuesto según el eje de la máquina.

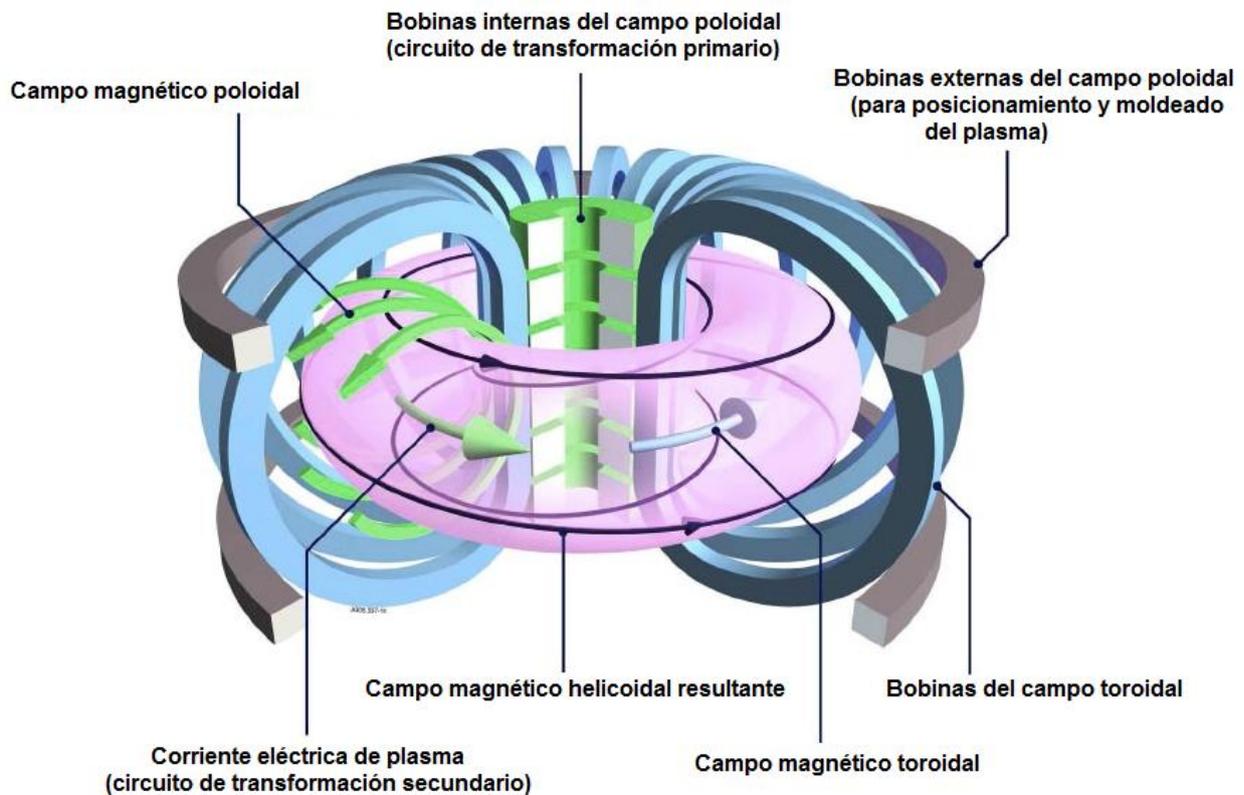


El plasma se indica en rojo. La corriente de plasma crea su propio campo magnético, el cual se une al producido por las bobinas, produciendo líneas de campo dispuestas en espiral.

Cuando la temperatura del plasma alcanza 10 millones de grados, los electrones se mueven tan rápidamente en ese medio poco denso que dejan de interactuar con los iones. El efecto Joule que resulta de las colisiones entre electrones e iones desaparece. Se puede suponer entonces que el medio se vuelve superconductor. De hecho, es necesario mantener la corriente de plasma por medio de ondas progresivas, de manera análoga a cómo se hace en los aceleradores de partículas. Estos impulsos dados a los electrones compensan las pérdidas que, en ausencia de esta transmisión de corriente, harían que el valor de la corriente de plasma cayera hasta cero en un milisegundo.

Un detalle: no sabemos cómo modelar estas pérdidas.

Un sistema adicional de solenoides, cuya corriente es gobernada por computador, permite controlar la posición del plasma en la dirección arriba-abajo. El esquema completo del tokamak se muestra en la figura siguiente (tomada de la tesis de Thornton, página 3):



Este sistema no permite alcanzar la temperatura mínima, de 100 millones de grados, necesaria para la instauración de reacciones de fusión autosostenidas. Por lo tanto, se requieren métodos adicionales de calentamiento: hiperfrecuencias e inyección de partículas neutras. En la máquina JET las reacciones de fusión durante un segundo se obtuvieron por este método. Primero se usó una mezcla de deuterio-deuterio, aumentando la temperatura a 150 millones de grados. Unos cuantos experimentos se realizaron con una mezcla de deuterio-tritio, pero en poca cantidad. En efecto, el tritio, radiotóxico, tiene la propiedad de infiltrarse por doquier, lo cual hace imposible cualquier inspección de la recámara por los técnicos, dado su carácter radioactivo.

El soporte experimental

Los experimentos realizados en el JET fueron muy cortos y no permitieron obtener datos sobre el comportamiento del material que forma la primera pared, la que está frente al plasma. En la máquina francesa Tore Supra se puso a prueba un revestimiento de carbono análogo al usado en los transbordadores espaciales.

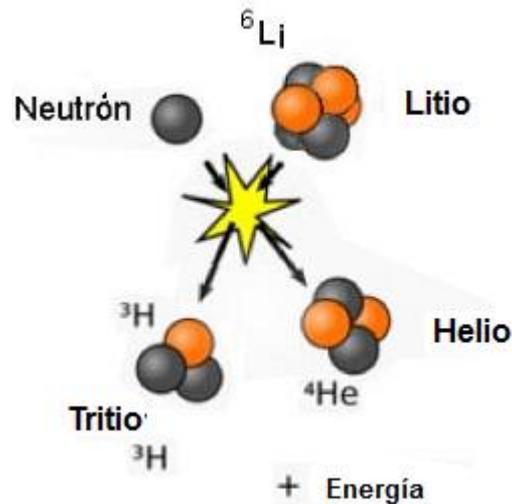
El carbono es a priori un buen candidato. Se sublima a 2500°C y ofrece una buena conductividad térmica. También se probaron sistemas de agua presurizada que, ubicados del otro lado de los elementos del revestimiento, servían para colectar calorías.

Un fenómeno inesperado, llamado *sputtering*, fue observado. Los choques de los iones de hidrógeno contra las paredes y la abrasión de los fotones hicieron que numerosos átomos de carbono invadieran la recámara experimental.

Al combinarse con el hidrógeno, formaron carburos que se redepusieron enseguida sobre el revestimiento, reduciendo su conductividad calorífica. Peor aún, si la máquina hubiese operado con tritio, las placas de carbono se habrían convertido rápidamente en desechos radiactivos. Por esta razón el carbono fue abandonado.

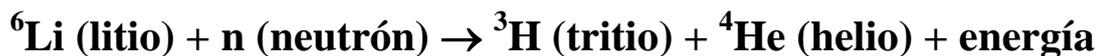
Celdas tritiogénicas

No existiendo el tritio en estado natural más que en cantidades ínfimas, se pensó usar las reservas de los canadienses, que lo fabrican con un tipo especial de reactores nucleares, los reactores CANDU. Pero se descartó que ITER (y sus sucesores) fuesen alimentados de esa forma. Se previó entonces que la máquina regenere su propio combustible a partir de litio mediante la reacción:

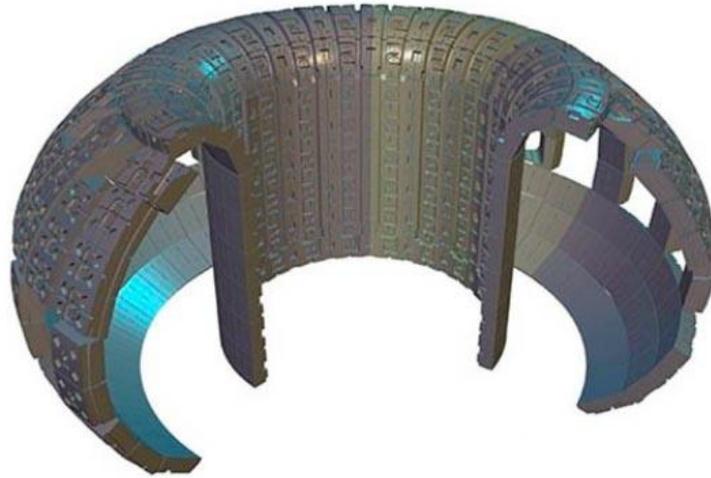


La reacción que permite la regeneración del tritio

Debe notarse que para volver a crear un átomo de tritio, que sería entonces recuperado y reinyectado a la recámara, se requiere de un neutrón emitido a partir de la reacción de fusión anteriormente presentada. En suma, el funcionamiento del reactor equivale a:



Para que el reactor funcione se requiere que estos módulos tritiogénicos (re-generadores de tritio) que recubren las paredes estén en capacidad de capturar el 100% de los neutrones emitidos, lo que es imposible. Estas celdas tritiogénicas no cubren totalidad de la pared.



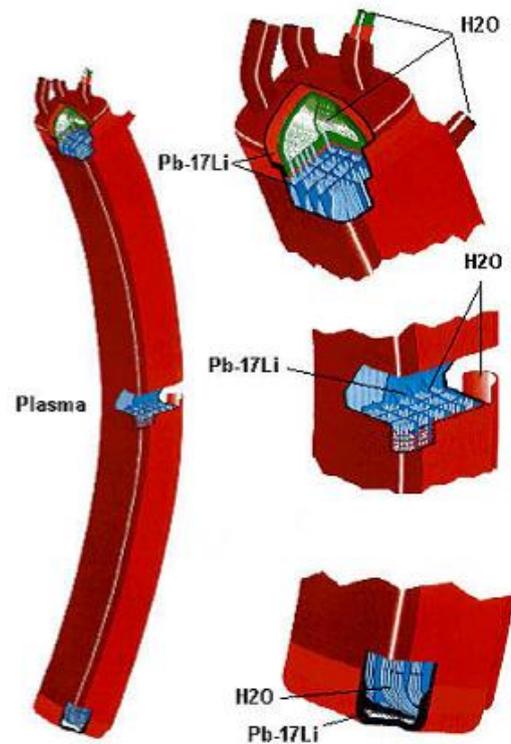
Disposición de los elementos regeneradores de tritio en la pared de ITER.

La parte inferior corresponde al emplazamiento del *desviador* (*divertor*), o sistema de bombeo, y las diferentes ventanas a orificios por los que la energía es inyectada o que posibilitan la realización de mediciones.

Montones de neutrones se fijarán entonces a la pared, convirtiendo el material en radioactivo, por radioactividad inducida, y produciendo *desechos*.

Para asegurar la regeneración de tritio debe emplearse una sustancia que juegue el papel de *multiplicador de neutrones*. Puede ser plomo. Se consideraron entonces módulos tritiogénicos en forma de banana en los que una mezcla de litio y plomo en estado líquido circulaba en tubos cerca de un segundo circuito de agua a una presión de 75 bars para coleccionar calorías.

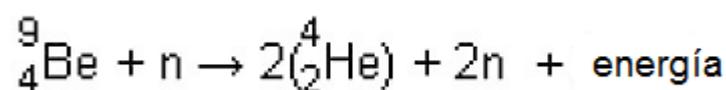
El diseño WCLL (Water Cooled Lithium Lead, Litio Plomo Enfriado por Agua) desarrollado bajo la dirección de la CEA, usa un metal líquido (LiPb) como material tritogénico, y agua como enfriador.



Módulos tritogénicos estudiados por la Comisión de Energía Atómica francesa¹

Esta solución es extremadamente peligrosa, como se verá más adelante. En la eventualidad de un accidente grave, el litio explotaría (como el sodio) al contacto con el agua.

Una segunda fórmula consiste en mantener el litio en una cerámica. En este caso los módulos tienen que ser recubiertos con un material que actúa como *duplicador de neutrones*, el berilio, el cual sirve como primera pared y se fusiona a 1280°C. La reacción de multiplicación neutrónica es como sigue:



¹ <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/cea/next/couvertures/blk.htm>

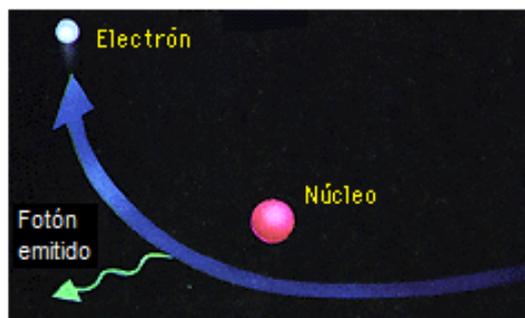
Al chocar un neutrón con un átomo de berilio se producen dos neutrones, dos núcleos de helio y energía. El helio no se adhiere a nada. Estos átomos de helio se comportan entonces, donde quiera que sean creados por transmutación, como impurezas, y terminan por debilitar las estructuras. La elección de ITER es usar una primera pared en berilio de un centímetro de espesor.

El problema de la polución del plasma

El plasma resulta constantemente contaminado por la extracción de átomos de la estructura, y pierde energía debido a la denominada radiación de frenado (en alemán, *bremstrahlung*).

Cuando un electrón pasa cerca de un ión cargado positivamente, su trayectoria es desviada y emite un fotón, es decir un cuanto de radiación. Esta pérdida es proporcional al cuadrado de la carga eléctrica Z transportada por el ión. Para los iones de hidrógeno, $Z = 1$.

El carbono era interesante debido a que, ionizado, sólo tiene cuatro cargas eléctricas. Todos los elementos en contacto con el plasma son posibles causas de polución debido a los iones altamente cargados, causando pérdidas radiativas que pueden llevar a la extinción del reactor.



Pérdida por radiación de frenado, *bremstrahlung*

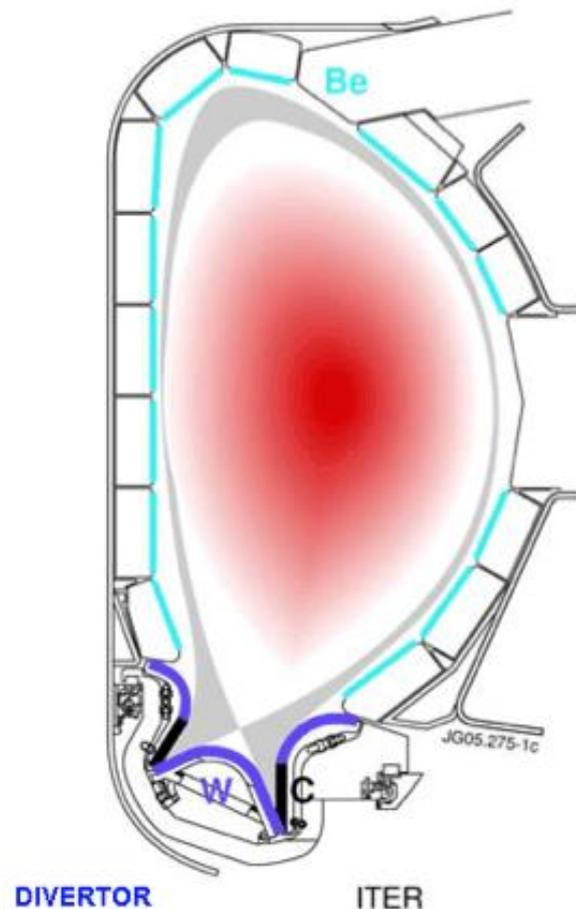
Para garantizar el funcionamiento de un tokamak en el que se pretenda operar de manera continua reacciones de fusión, las “cenizas”, es decir el helio, debe ser evacuado, lo que constituye aún un problema sin solución. En Tore-Supra se instaló un dispositivo llamado “limitador”, debajo del cual se hizo un bombeo. Este dispositivo, saliente hacia la recámara, es el más expuesto a los choques de partículas.



El limitador de Tore Supra recubierto con placas de carbono

En JET, y en el proyecto ITER, los diseñadores optaron por un sistema llamado “desviador” (en inglés, *divertor*; to divert = desviar). Este sistema está asociado con una modificación local de la geometría magnética para favorecer la captura de iones pesados.

Pero esta parte de la recámara queda así expuesta a un muy elevado flujo de calor. Se decidió entonces recubrirla, como en JET, con tungsteno, el cual tiene una temperatura de fusión de 3000°C . Los filamentos de las lámparas incandescentes están hechos de este material.



Sección de la recámara de ITER.

En violeta, revestimiento de tungsteno. En negro, placas de carbón

La presencia de tungsteno en el revestimiento es problemática porque los iones de tungsteno pegados a la pared pueden portar 60 cargas eléctricas. Por lo tanto, un ión de tungsteno acarreará por radiación de frenado una pérdida equivalente a 3600 iones de hidrógeno. Se pretendía que una instalación piloto, denominada IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) fuera construida en Japón, la cual habría permitido al material ser expuesto a una irradiación neutrónica con una energía cercana a la de los neutrones de fusión (14 MeV). En la actualidad no existen planes para una instalación de ese tipo, en la que una película de litio líquido sería bombardeada por iones de deuterio acelerados en dos aceleradores lineales. Las planchas artísticas disponibles muestran una instalación de 240 metros de longitud, y se estima que su costo sería un tercio del de ITER, tomando 5 años su

construcción. En toda lógica, antes de diseñar los planos de ITER se debió haber hecho investigación de materiales que pudiesen resistir a una irradiación de neutrones con una energía siete veces mayor que la de los neutrones de fisión (2 MeV). Pero no se hizo. Motojima, director actual del proyecto, dijo:

- *No por carecer de dicho material mágico vamos a dejar de lanzar el proyecto...*

Agreguemos que no existen datos sobre la resistencia del berilio a la fotoabrasión y a la abrasión por choques. Los diseñadores de ITER responden:

- *El reactor servirá como banco de pruebas para los materiales (...)*

Estado del conocimiento teórico sobre los tokamaks

El 4 de noviembre de 2010 se defendió en Francia una tesis doctoral a cargo de Cédric Roux del IRFM, Instituto de Investigación sobre Fusión por Confinamiento Magnético, el cual es una dependencia de la Comisión de Energía Atómica (CEA). Los elementos que figuran en la tesis cuentan entonces con el aval de instituciones francesas como la ORGANIZACIÓN ITER, la cual participa en la gestión del proyecto ITER en Cadarache, sur de Francia. La tesis puede ser descargada en:

<http://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00599210/en/>

o en:

http://www-fusion-magnetique.cea.fr/en_savoir_plus/articles/disruptions/these_c_reux.pdf

Una segunda tesis fue publicada en Inglaterra, en enero de 2011, por el investigador Andrew Thornton, vinculado al MAST (Mega Ampere

Spherical Tokamak), en Culham. Este documento puede ser descargado en:

http://etheses.whiterose.ac.uk/1509/1/AT_thesis_FINAL.pdf

Hay accesos directos a estos documentos en:

<http://www.savoir-sans-frontieres.com>

(sitio de la asociación “Saber sin Fronteras”). Esta tesis contiene un apartado sobre el estado actual del conocimiento sobre la denominada fusión controlada. Se sabe desde los comienzos de la investigación en este tema, en 1950, que los plasmas a alta temperatura que se tratan de confinar usando campos magnéticos son terriblemente inestables y están sujetos a “inestabilidades magnetohidrodinámicas (MHD)”. Se trata, en efecto, de mecanismos disipativos por medio de los cuales un sistema trata de expulsar la energía que contiene, facilitando su *transporte*. Las corrientes de convección en una olla de agua calentada, la formación de corrientes ascendentes, los torbellinos marginales en la punta de las alas de los aviones y la turbulencia son fenómenos de naturaleza similar.

En los plasmas los problemas se vuelve tremendamente complejos por el hecho que regiones distantes quedan instantáneamente acopladas por el campo electromagnético. En la mecánica de fluidos, cuando se crea turbulencia en alguna parte de un avión, ésta no se propaga automáticamente al resto del medio ambiente gaseoso del aparato.

Adicionalmente, para cada partícula deben tomarse en cuenta seis parámetros, tres para la posición y tres para la velocidad. Dichas partículas, en consecuencia, “viven en un espacio de seis dimensiones”. El sistema debe ser descrito mediante un sistema de ecuaciones integro-diferenciales de Boltzmann acopladas por el campo electromagnético. Todo un horror desde un punto de vista matemático, que conozco bien y al que contribuí en mi tesis de 1972².

² Para este tema, ver “The mathematical theory of non uniform gases” de S. Chapman y T.G.Cowling, Cambridge Mathematical Library.

Se consideró usar *simulaciones numéricas* pero de inmediato se vio que la posibilidad de hacer interactuar un número tan grande de partículas entre sí era completamente descabellada. Los teóricos se dieron entonces a la tarea de esquematizar el medio, pero todos sus intentos fracasaron. Cuando los experimentalistas son testigos de fenómenos cuyas mediciones son difíciles de llevar a cabo, los teóricos no saben cómo interpretarlos. No existe ningún modelo teórico confiable del funcionamiento de un tokamak, y en particular ninguno que permita realizar extrapolaciones.

En breve, los experimentos realizados en tokamaks han sido fruto del empirismo puro.

Como confirmación, el público francés puede referirse a:

http://www-fusion.magnetique.cea.fr/fusion/physique/une_journee_ordinaire.htm

¿Cómo pudo concebirse el proyecto ITER?

Para muchos, esto es un misterio. Incluso ahora ITER no tiene una real dirección científica. *Es un ente acéfalo*. Su servicio de relaciones públicas es extremadamente activo y en todo espacio público vende la idea de:

- *El sol en probeta.*
- *Energía ilimitada.*
- *La “última máquina”.*
- *Etc.*

La comparación con el Sol tiene algún sentido.

- *La temperatura obtenida en los tokamaks (150 millones de grados en JET) excede en un factor de diez al de la pequeña caldera central del astro.*

- *La potencia en vatios por metro cuadrado irradiados desde la superficie del Sol, y aquella hacia la cara interna de la cubierta de ITER, son del mismo orden de magnitud.*
- *Los dos componentes del “combustible de fusión”, deuterio y litio (que sirve para crear el tritio que interviene en la reacción termonuclear), son muy abundantes en la naturaleza.*

En numerosos sitios de internet imágenes computarizadas muestran un plasma rosado confinado sólidamente por el campo magnético del aparato. Eso es *completamente mentiroso*. Lean el recuento de un experimento realizado con Tore-Supra en el enlace citado más arriba, haciendo clic en el enlace que muestra la reconstrucción de las oscilaciones del plasma en JET antes de que ocurra una *disrupción*.

<http://www-fusion-magnetique.cea.fr/fusion/physique/equilibremagnetique.htm#disruption>

Todo comenzó en 1985, después de un encuentro entre Gorbachov y Reagan, quienes buscaban un tema de investigación a desarrollar en el que el átomo estuviese asociado con la paz. Estas dos “mentes brillantes” decidieron que la investigación en energía controlada por fusión era la respuesta a su inquietud.



Reagan y Gorbachov en Ginebra en 1985

Los físicos nucleares comenzaron a trabajar para hacer realidad esa fantasía a pesar del hecho de que desde su aparición en 1950 los tokamaks habían sido siempre máquinas caprichosas y problemáticas. Los avances representados, de un lado, por la fusión obtenida durante un segundo; y por el otro la demostración de los franceses de que era posible crear un campo magnético de varios teslas en un volumen de 25 metros cúbicos sirvió para enmascarar una interminable lista de problemas técnicos y científicos no resueltos.

¿A quién entonces se le ocurrió la idea de que las cosas podían resolverse construyendo una máquina aún mayor?

Esta idea es parte de una nueva quimera, *producir más energía de la que se suministra*, a sabiendas de que calentar un plasma es costoso energéticamente. En JET, los ingleses se las arreglaron para recobrar, en forma de energía térmica bruta, un 65% de la energía suministrada. El cociente potencia térmica producida/potencia suministrada se designa por la letra Q. Para JET:

$$Q = 0,65$$

De manera un tanto esquemática podríamos decir que una máquina de este tipo produce una energía proporcional a su volumen mientras que sus pérdidas, transmitidas a través de su superficie, aumentan proporcionalmente a ésta.

Al hacer el cociente volumen/superficie se obtiene el factor de escala. Duplicando el tamaño de la máquina podría esperarse duplicar el valor de Q. Los diseñadores de ITER anuncian un valor entre 5 y 10.

Una observación de paso:

La distribución del campo de temperatura en la recámara de un tokamak es asegurada por dispositivos de calentamiento adicional en él instalados. Cuando se tiene un funcionamiento con un factor Q mucho mayor que la unidad, la producción de energía por fusión toma el mando. El plasma quedará “librado a sí mismo” y será *térmicamente incontrolable*.

A un medio así los anglosajones lo denominan “plasma ardiente”. Nadie sabe cómo se comportará el plasma en una máquina en la que se den esas condiciones.

Considérese el fenómeno de combustión en el cilindro de un motor diesel. El pistón comprime una mezcla de hidrocarburos y de aire. La compresión hace aumentar la temperatura. Cuando se alcanzan las condiciones de ignición, la combustión se produce. Pero se sabe desde hace mucho tiempo que esta combustión es todo menos homogénea. Es una *combustión turbulenta*. Las mediciones, de acuerdo con simulaciones por computador, muestran que las reacciones de combustión operan de manera instantánea en pequeñas regiones calientes y no en la totalidad del medio, es decir no de manera homogénea.

Todas las combustiones de fase gaseosa son fuertemente turbulentas. ¿Qué decir de la “fusión turbulenta” en un tokamak en el que el plasma de repente se encuentra “librado a sí mismo”? Si la temperatura aumenta en una región, eso hará aumentar el ritmo de la fusión. Es imposible decir lo que sucederá entonces por la presencia del campo magnético, que complica las cosas y las vuelve intratables para el teórico.

Obviemos el problema y supongamos por unos momentos que ITER es construida y que ensayos comparables a los de JET son llevados a cabo.

- *Se obtendrá la fusión de deuterio-tritio.*
- *La máquina produciría más de energía de la que consume.*

¿Y entonces?

La idea de que el problema del comportamiento de los materiales empleados se va a resolver es un simple acto de fe. Pero hay un problema aún más grave, descrito por Cédric Reux y Andrew Thornton en sus tesis. Problema que no es nuevo dado que los tokamaks demostraron ser muy inestables desde las primeras pruebas en 1950.

El grave problema de la disrupción

Todos los tokamaks presentan problemas, llamados disrupciones. Pero *nunca* encontrarán esta palabra mencionada en los documentos que describen el proyecto, que no son más que pura propaganda, a pesar de que el problema es bien conocido por todos los especialistas en tokamaks.

¿Qué son las disrupciones?

Cuando un tokamak es llevado a su régimen de funcionamiento, una corriente de plasma (del orden de 1 millón de amperios en MAST, 1,5 millones en Tore-Supra y 4,8 en JET) se enrolla sobre sí misma, formando líneas de corriente dispuestas en círculos que tienen como eje de simetría de la propia máquina.

Cuando ocurre una disrupción, *la temperatura del plasma cae extremadamente rápido, en pocas milésimas de segundo, hasta en un factor de 10.000*, pasando de 100 millones de grados a sólo unas decenas de miles de grados. La energía se disipa por conducción térmica turbulenta en las paredes y por radiación.

Citado de Thornton, página 12 :

Una disrupción en un tokamak es una repentina y no controlada pérdida de confinamiento del plasma. Las causas de las disrupciones son muchas y variadas, consistiendo a menudo en una secuencia de eventos tales como incremento de la densidad, crecimiento de modos o fallas en la planta, todas las cuales llevan en últimas a una disrupción.

Thornton, página 13 :

La motivación principal para estudiar las disrupciones y su mitigación es el efecto dañino que pueden tener sobre los componentes del tokamak.

La pérdida de confinamiento durante una disrupción causa que toda la energía almacenada en el plasma, tanto térmica como magnética, se pierda.

Típicamente, la energía se deposita en el desviador y en la primera pared del tokamak, lo que puede originar grandes flujos de energía sobre estas superficies, pudiendo llegar a derretirse o evaporarse.

La magnitud de los flujos de calor y la comparación con el comienzo de la fusión/vaporización del material desviador de ITER puede hacerse usando la convención definida en [23] de la potencia dividida por el producto del área húmeda del desviador y la escala de tiempo en la que la energía es depositada.

La carga de energía esperada para ITER está entre $144 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ y $446 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ ([23], tabla 6), dependiendo de la duración actual de la deposición de energía.

Los límites de fusión y evaporación de los diferentes materiales del desviador y la primera pared son significativamente menores que eso; para el carbono y tungsteno el límite es $40\text{-}60 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ ([23], tabla 5) , y para el berilio es de $15 \text{ MJ m}^{-2} \text{ s}^{-0.5}$ [23].

La energía almacenada en el plasma de un tokamak se ha visto que escala como R^5 [24], donde R es el radio mayor del plasma.

Queda claro a partir de esta escala que la carga de energía del desviador en DEMO y futuros reactores comerciales supondrá un enorme desafío.

La pérdida de confinamiento lleva a una rápida pérdida de la corriente de plasma. La rápida supresión de la corriente produce corrientes inducidas en el recinto de vacío del tokamak.

La interacción de estas corrientes con el campo toroidal magnético (que es generado externamente, y por lo tanto no cambia) produce fuertes fuerzas que actúan sobre el recinto de vacío. Además de la corriente inducida en el recinto del tokamak, si hay contacto entre el plasma y las paredes del recinto entonces la corriente que fluye en el plasma circulará a través de las paredes conductoras del recinto.

Las corrientes que fluyen en las paredes, conocidas como corrientes en halo, interactúan con el campo toroidal y dan lugar a esfuerzos estructurales. La velocidad de la supresión de la corriente en ITER [23] está proyectada para ser de 35

milisegundos, produciendo tasas de supresión que exceden los $400 \text{ MA}^{-2} \text{ s}^{-1}$ para una corriente de plasma de 15 MA.

Finalmente, la rápida supresión de la corriente genera una fuerte fuerza electromotriz que puede servir para acelerar los electrones en el plasma hasta energías relativistas [25]. Estos electrones de alta energía, conocidos como 'runaway electrons' ('electrones fugitivos'), pueden llevar a la producción de rayos X cuando el haz de 'runaway electrons' (RE) interactúa con los componentes dentro del tokamak.

Estos rayos X pueden afectar la sensibilidad a la radiación, además del daño localizado por calentamiento producido por la interacción del haz de electrones fugitivos con el tokamak.

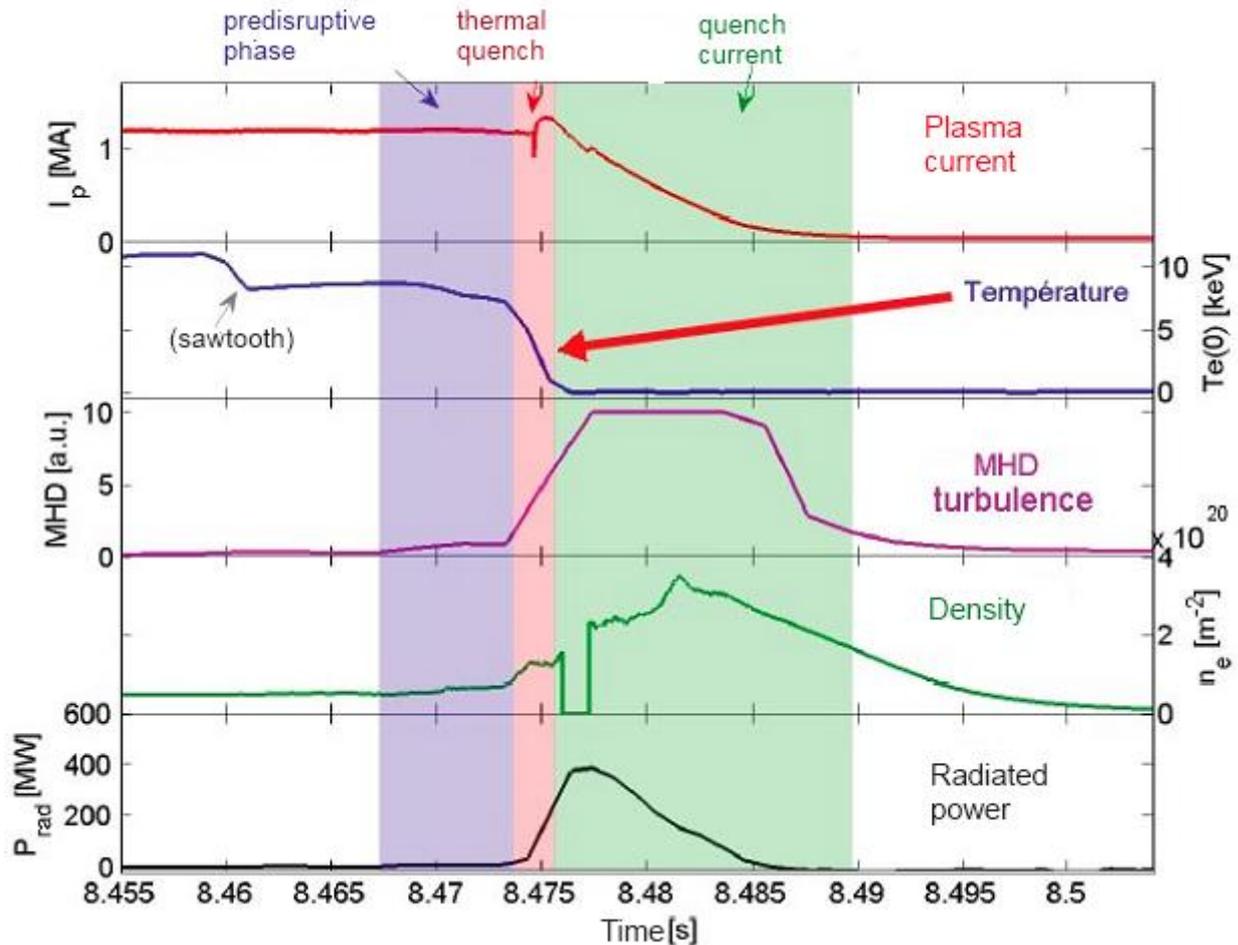
En ITER [23] está proyectado que cerca del 70% de la corriente inicial del plasma sería convertida a RE, y esto correspondería a una corriente de electrones fugitivos cercana a los 11 MA.

Thornton, página 14 :

Las consecuencias de las interrupciones en la siguiente generación de tokamaks son graves, y las consecuencias de una interrupción en una planta generadora de tipo tokamak serían catastróficas.

Está claro que se requiere un medio de mitigación que permita atenuar los efectos catastróficos. Uno de dichos métodos es la inyección de una gran cantidad (aproximadamente 10-100 veces el repositorio de plasma original, ver capítulo 2) de partículas neutrales, típicamente gases nobles con gran Z (carga eléctrica de iones) debido a su capacidad para irradiar energía hacia afuera mediante radiación de línea.

Aabajo están las curvas extraídas de la tesis de Cédric Reux, las cuales ilustran la violencia del fenómeno:

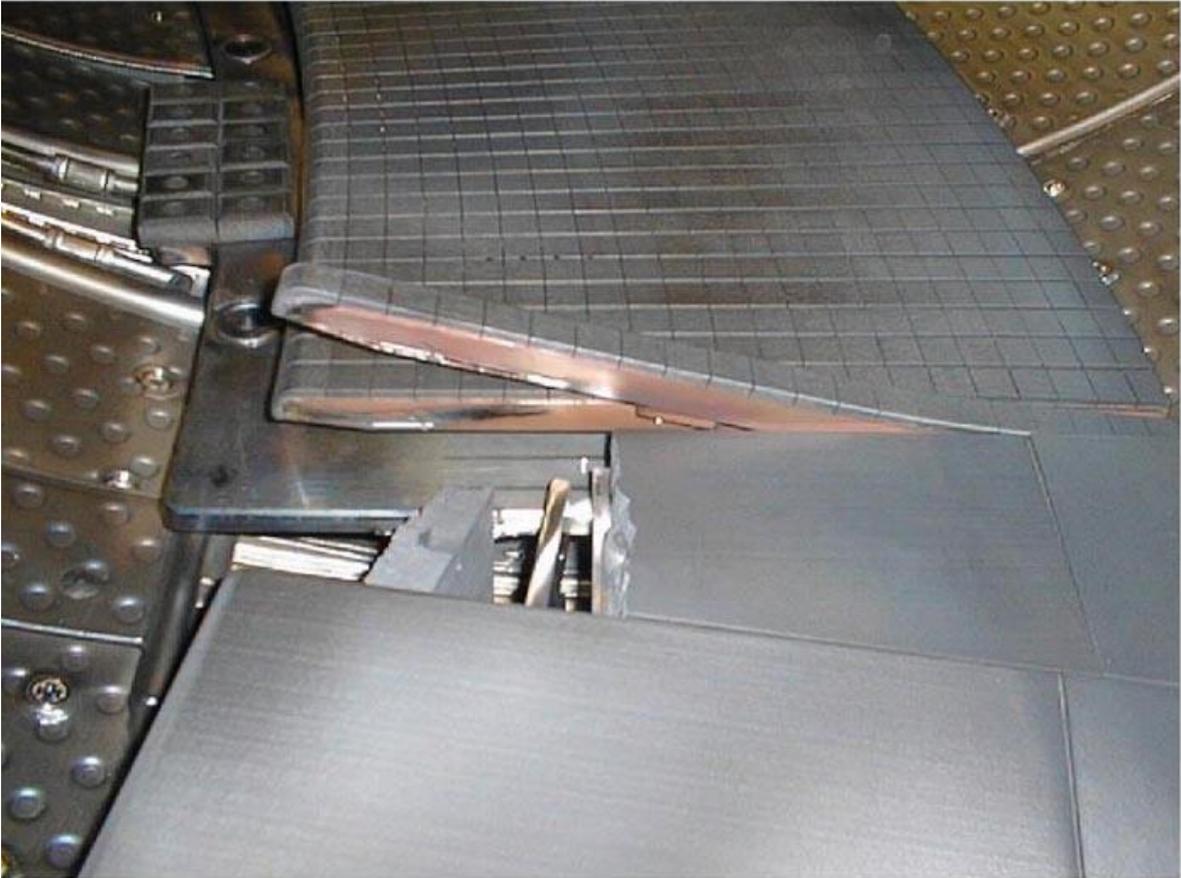


Desarrollo de una disrupción

Tal como lo anota Reux en su tesis: **nadie sabe, hoy día, explicar el fenómeno, predecirlo con certidumbre o controlarlo (...)**. Nadie comprende el mecanismo de esta “*extinción*” térmica.

El fenómeno induce un drástico cambio de régimen. Mientras que unos cuantos milisegundos antes la geometría de la máquina presentaba una perfecta regularidad en la que las líneas de campo magnético formaban armoniosas líneas espirales, y el plasma confinado en un volumen en forma de toro era mantenido a distancia de las paredes por medio de un potente campo magnético, ahora todo ese orden es destruido al instante. El campo deja de poder confinar y mantener al plasma en su lugar, y la estructura del mismo se torna *completamente caótica*. Debido a una temperatura tan baja, el plasma se vuelve resistivo. El efecto Joule reaparece. Después la corriente eléctrica que circula en el plasma, al

colapsar, se convierte en una fuente de poderosas *corrientes inducidas* que circulan en todas las estructuras de la máquina, las cuales, combinadas con el campo magnético del ambiente, engendran fuerzas de centenares de toneladas capaces de torcer y deformar las estructuras de las paredes de la máquina como si fuesen espigas.



Las fuerzas de Laplace torcieron este elemento del limitador de Tore-Supra y arrancaron la cubierta de carbono

Thornton, página 27 :

Se ha encontrado que la sección eficaz del haz fugitivo es pequeña, alrededor de 10 cm [50], lo que conlleva un daño significativo a las componentes frente al plasma o de diagnóstico con las que el haz llegara a interactuar.

La carga de potencia estimada debida a interacción del haz

fugitivo en ITER está entre 15 y 65 MJ m⁻², con un umbral para ablación del grafito de aproximadamente 35 MJ m⁻² [23].

Se crea un jet de electrones *relativistas* de alta energía (de 10 a 30 MeV) cuya intensidad es del mismo orden de la corriente de plasma, equivalente a un relámpago que cayera en toda la cara interna del recinto de vacío, volatizando el material en la zona afectada, tal como lo muestran las fotografías siguientes, extraídas de la tesis de Roux, sobre Tore-Supra y la máquina inglesa JET.

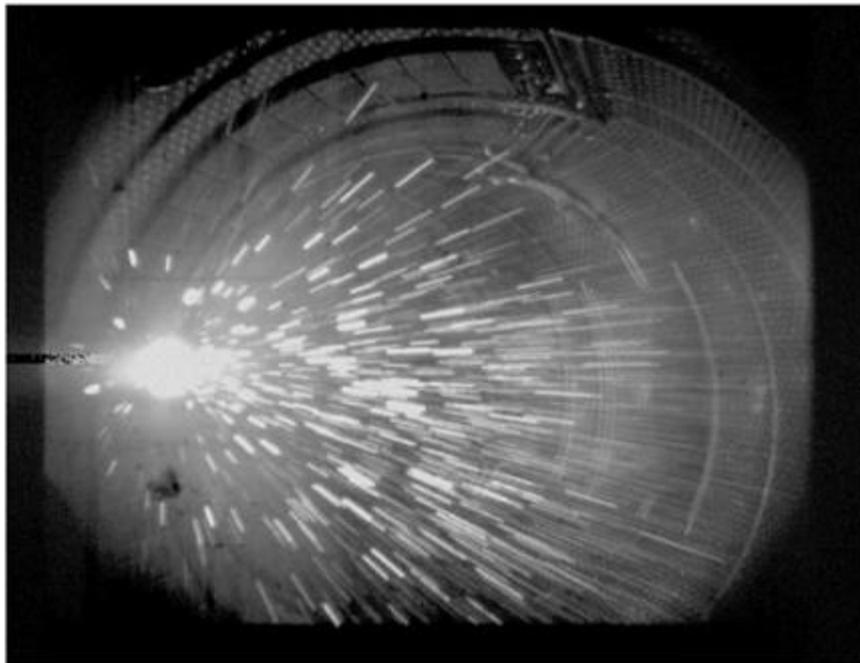


Figura 2.22 – Electrones desacoplados: impacto en un limitador de carbono en Tore-Supra.

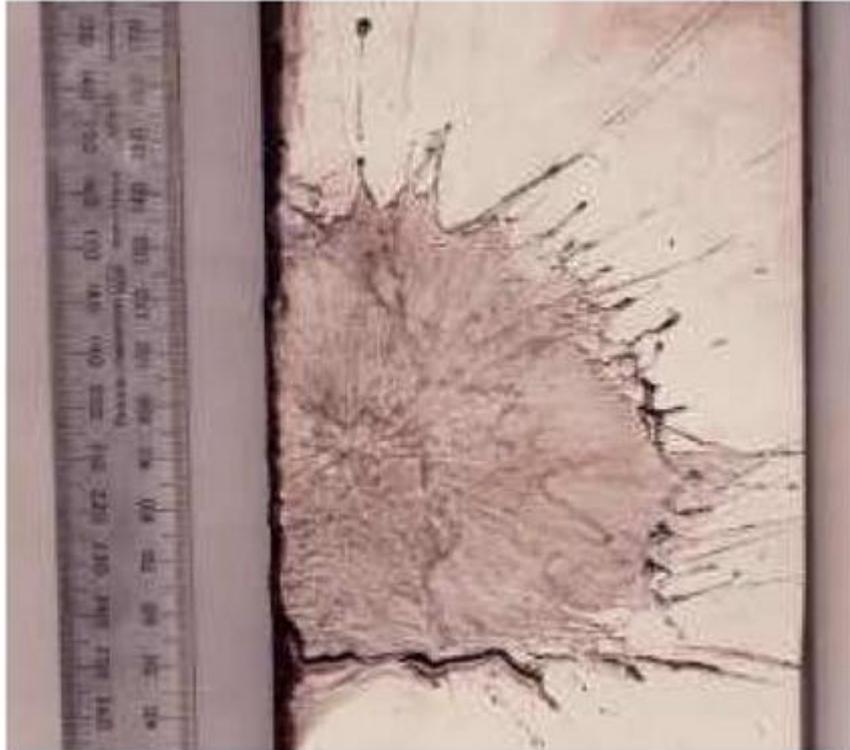
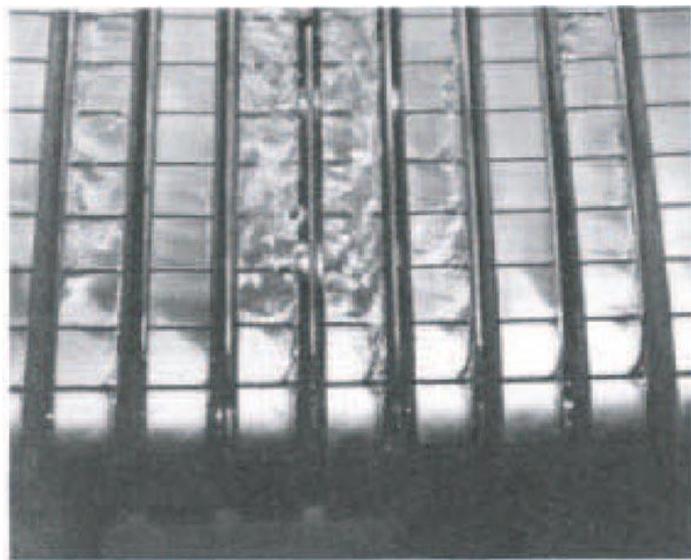


Figura 2.23 – Limitador interno de JET derretido por un haz de electrones desacoplados



Recubrimiento de berilio de JET afectado por una disrupción

Tal como lo hace notar Cédric Roux, y estamos de acuerdo, **lo que era manejable hasta ahora en los tokamaks como Tore-Supra y JET no**

lo será en una máquina como ITER, que contendrá mil veces más energía (y aún más para sus sucesoras).

Los diseñadores de la máquina prevén que los “relámpagos” que inevitablemente se van a producir podrán alcanzar los 11 millones de amperios (y 150 millones en el caso de su sucesor, DEMO).

Semejantes impactos perforarán la envoltura de vacío. La capa de berilio, de un centímetro de espesor, constituyente de la primera pared, la que está “frente al plasma”, será volatilizada y dispersará el material del que está hecha, un contaminante altamente tóxico y cancerígeno, al igual que el tritio, radiotóxico, contenido en la recámara.

Si los módulos tritiogénicos (regeneradores de tritio), situados inmediatamente detrás de la primera pared de berilio, son diseñados sobre la base de una circulación de una mezcla en estado líquido de litio y plomo enfriada con agua (solución CEA), habrá emisión de vapores tóxicos de plomo y de litio. Puesto que el litio es inflamable y explota al contacto con el agua, estas sustancias se añadirán a los contaminantes citados anteriormente, y la combustión del litio, imposible de extinguir, podría llevar a la destrucción total de la máquina.

Las fuerzas de Laplace, que se medirían en miles de toneladas, podrían deformar las estructuras de la máquina, obligando a su reparación *o incluso a la reparación total de la instalación.*

La consecuencia más importante tiene que ver con cualquier tipo de uso comercial futuro de este tipo de máquina. Nadie pensaría nunca en basar la producción de electricidad en generadores que podrían, infaltablemente y de modo imprevisible, quedar fuera de servicio durante meses e incluso años.

El problemático pilotaje del un tokamak

Este aspecto queda claro en el recuento de los ensayos con el Tore-Supra, el cual puede ser consultado a través del enlace de la página 20, extraído del sitio oficial de la Comisión de Energía Atómica (CEA).

Puesto que nadie entiende cómo funciona un tokamak, y nadie puede establecer con certidumbre su régimen de operación, la solución empírica ha sido registrar la evolución de los valores de los parámetros que llevan a la disrupción en la memoria del computador de control. Estos elementos conforman una *base de datos* que posibilita el control de la máquina.

Cuando este tipo de escenario aparece en un ensayo, el computador lo detiene automáticamente. La detención de un experimento no es simplemente cuestión de cortar el suministro de energía. En efecto, una disminución muy fuerte de la corriente de plasma podría generar efectos de inducción equivalentes a una disrupción.

El comportamiento de un tokamak es controlado por un cierto número de instrumentos de medida cuyo tiempo de respuesta es a menudo demasiado largo, y tal como hace notar Reux, cuando se decide intervenir (o el computador decide la parada), es demasiado tarde. La solución actualmente recomendada consiste en inundar la recámara inyectando un gas frío a alta presión mediante tubos (tesis de Reux). Pero este uso de un “extinguidor” puede no ser lo suficientemente rápido. Otra solución consiste en inyectar cubos de hielo con la ayuda de cerbatanas (que es así mismo la solución clásica propuesta para alimentar el aparato con carburante fresco).

Recurriendo a una imagen, podríamos decir que el plasma de un tokamak puede compararse con un dragón en forma de serpentina circulando a alta velocidad mientras sostiene firmemente la punta de su

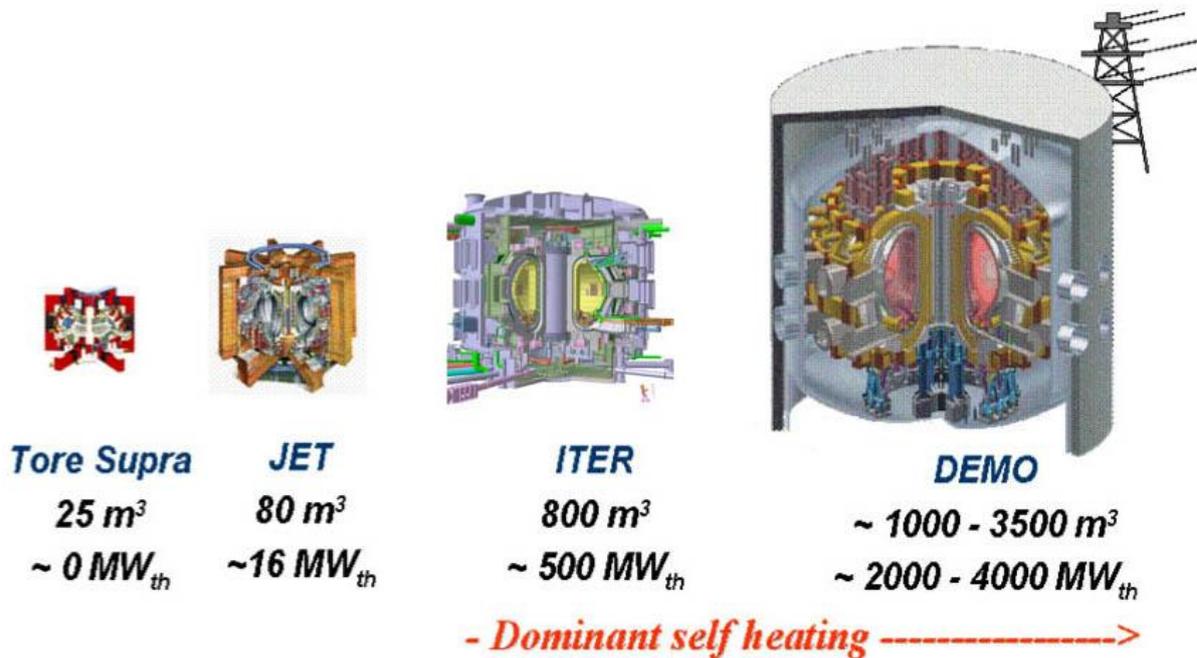
cola con sus mandíbulas. Si deja de hacerlo, se vuelve como loco, se mueve en todas direcciones y morderá el primer elemento de la pared que se le presente ante sus fauces. Como todos los dragones, su aliento es de fuego. La forma de sus grandes fauces abiertas evoca el gradiente del campo magnético que acelera los electrones de la descarga disruptiva hasta una velocidad que alcanza 99% de la de la luz. Electrones con esta energía podrían no sólo dañar la cara interior de su prisión sino también lo que está más allá de ella.

En cuanto al pilotaje de un tokamak, imaginen a un maquinista que se encuentra frente a la caldera de su máquina. El hollín y la extracción de contaminantes es difícil. Para alimentar dicha caldera dispone de una cerbatana con la que puede disparar cubos de hielo de tamaño milimétrico. Observa los diferentes medidores con las mediciones realizadas en su caldera. Si los parámetros están en rojo, dispara lo más rápido que puede con una manguera.

¡Y es con este tipo de máquinas que se espera estar algún día en capacidad de generar electricidad explotando la energía de la fusión!

Añádase que los problemas aumentan con el tamaño de la máquina. La imagen siguiente muestra una comparación de estos generadores, desde Tore-Supra hasta DEMO.

ITER is the Next Step Toward a Solution based on Tokamaks



**El monstruoso DEMO suministraría únicamente
700 megawattios de electricidad**

Un riesgo industrial inmanejable

ITER no es un dispositivo destinado a la investigación fundamental. Es vista como la prefiguración de una familia de máquinas cada vez más grandes, la última de las cuales, **PROTO**, representaría el modelo de futuros generadores “que explotan energía ilimitada metiendo el Sol en una caja”.

Podemos ver que a escalas pequeñas (Tore-Supra, JET y otras similares instaladas en diferentes países), el control de estas máquinas es ya extremadamente problemático. A estas escalas los incidentes se traducen en rupturas y daños materiales que ponen el aparato fuera de servicio durante meses. A la escala de máquinas como ITER, las fuertes

disrupciones, imprevisibles e incontrolables, podrían requerir la reconstrucción completa de la máquina. Puesto que no conocemos los mecanismos y no sabemos cómo describirlos, cualquier extrapolación y cualquier “escalamiento” resulta imposible. Abajo hay un extracto de las conclusiones de la tesis de Reux.

Inicio de las conclusiones de la tesis de Reux

Para poder operar futuros tokamaks en buenas condiciones de confiabilidad, seguridad, integridad y desempeño, se hace cada vez más necesario controlar las disrupciones del plasma. Estos violentos fenómenos, correspondientes a una pérdida en el confinamiento del plasma, son la causa de tres tipos de efectos nefastos. Los efectos electromagnéticos, incluyendo las corrientes inducidas, las corrientes en halo y las fuerzas de Laplace resultantes, los cuales pueden afectar el recinto de vacío del tokamak y los elementos de la estructura. Los efectos térmicos provocados por la pérdida de energía contenida en el plasma también son susceptibles de dañar de manera irreversible los elementos de la pared que están en contacto con el plasma. Finalmente, los haces de electrones relativistas, acelerados durante la disrupción, pueden perforar el recinto de vacío.

Si bien las disrupciones han sido estudiadas desde los primeros tiempos de los tokamaks en los años 1950, sólo hasta hace poco tiempo representaban un problema menor para la operación de la máquina. Fue cuando aparecieron los tokamaks de gran tamaño que los peligros comenzaron a estar más y más presentes.

Puesto que el contenido energético de los futuros tokamaks y reactores es varios órdenes de magnitud mayor que el de las máquinas actuales, las consecuencias de las disrupciones serán mucho más graves. Evitarlas o controlarlas se hace indispensable, a sabiendas de que no siempre es posible evitarlas.

Cuanto más potentes sean las máquinas, más inestables serán y más rápidos, inmanejables, violentos y destructivos serán estos fenómenos.

¿Por qué se trata de problemas sin solución?

Los tokamaks son máquinas que funcionan de una manera antinatural pues con ellas se pretende operar un aparato usando un fluido, un plasma, *tratando de obviar todos los fenómenos disipativos*. Las

inestabilidades que se desarrollan en los tokamaks no son otra cosa que fenómenos de *turbulencia MHD*.

La turbulencia existe por doquier en la naturaleza. Es ella quien anima nuestra meteorología. Es ella quien asegura la combustión en los cilindros de los automóviles y la cocción de alimentos en nuestras ollas. Pretender operar un tokamak sin turbulencia es equivalente a intentar evaporar el agua de un recipiente a través de su superficie libre calentándola desde abajo pero tratando de suprimir las corrientes ascendentes, sinónimo de convección.

Para lograrlo se tendrían que colocar sofisticados sistemas de medición de la velocidad de los elementos del fluido, introduciendo una contra-reacción de disminución del calentamiento, de manera que se pudieran impedir los potenciales ascensos.

Un tokamak estable sería como una atmósfera sin ascensos de aire, sin viento, sin nubes.

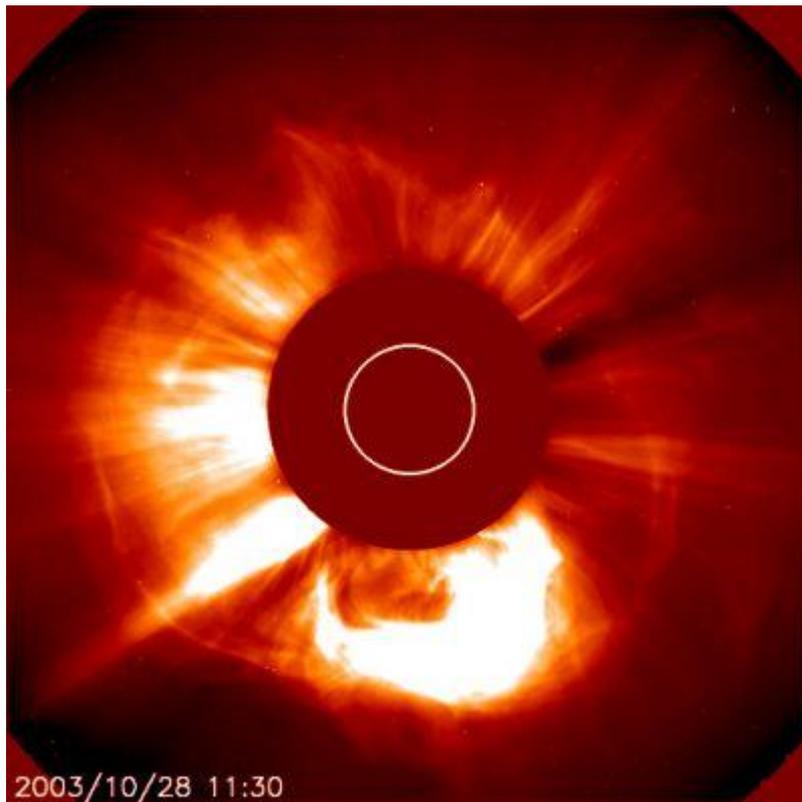
Los promotores de ITER comparan sin cesar su máquina con el “Sol en una probeta”. Hemos visto que esta imagen no carece de sentido. El sol es una “olla con simetría esférica”. La energía es producida en su centro en una pequeña caldera en la que la temperatura es de quince millones de grados. Los fenómenos de convección se manifiestan y favorecen el ascenso de energía térmica hacia la superficie. Esta turbulencia es visible en la superficie, que está a 6000°C , y se ve en fotografías como “granos de arroz”.

En este aspecto, al ayudar a la energía a alcanzar la superficie, la turbulencia no parece ser motivo para preocuparse. Un dios que tuviera poderes ilimitados y que hubiese decidido suministrar calor de manera democrática a todos los planetas del sistema solar en lugar de dejar que los habitantes de Mercurio se calcinaran y los de Plutón se congelaran, podría decidir encerrar al sol en un cascarón ubicado a una distancia

razonable de su superficie, la que no irradiaría más energía por metro cuadrado que una máquina como JET.

Lo único que necesitaría serían tubos llenos con agua presurizada movida por bombas de dimensión... astronómica, para esparcir dichas calorías por todo el sistema solar. Este sería un buen problema para estudiantes de termodinámica.

Pero con la primera *erupción solar*, dicha envoltura volaría en pedazos.



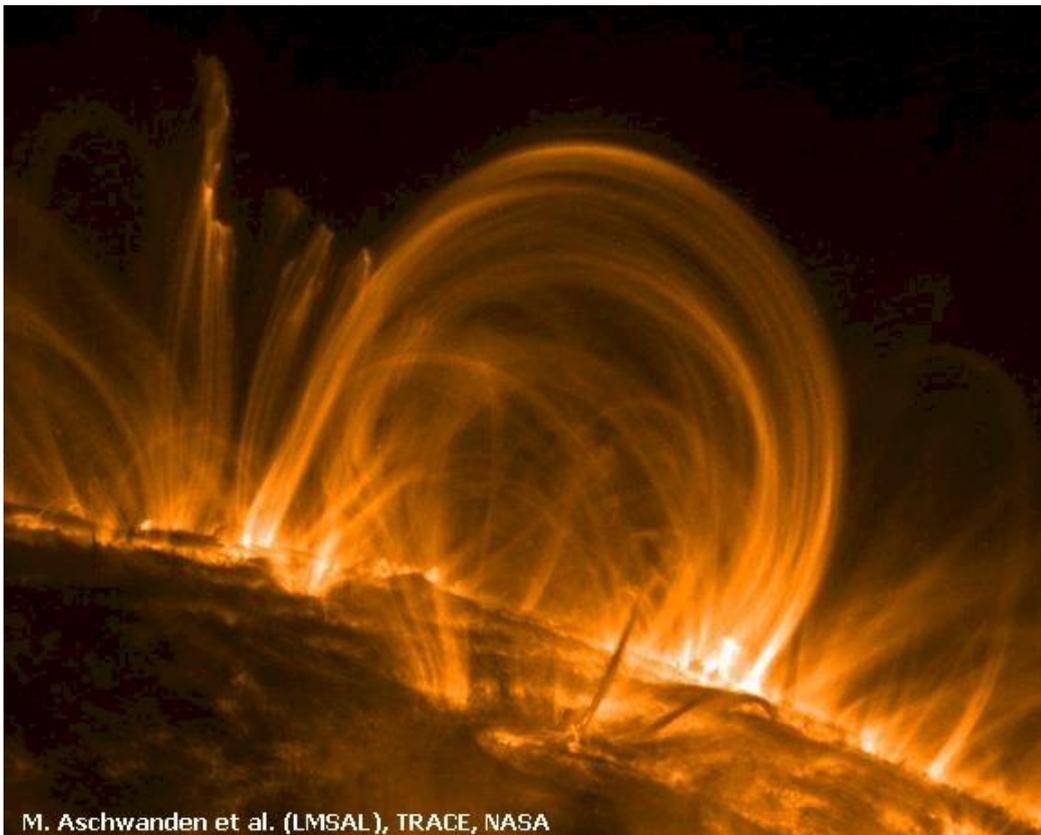
El medio solar, oculto por un disco coronográfico

En el siguiente enlace hay un video de una gran erupción solar:

http://www.spaceweather.com/images2011/22oct11/cme_c2.gif?PHPSESSID=03262a82v19dq6g9u4oat16hh1om/images2011/22oct11/cme_c2.gif?PHPSESSID=03262a82v19dq6g9u4oat16hh1

Las erupciones solares son la manifestación de inestabilidades MHD comparables con las disrupciones en los tokamaks. Comienzan, al igual que las disrupciones, como especies de “protuberancias”. Se trata de regiones próximas a la superficie del Sol en las que la presión magnética no alcanza a contrarrestar la presión del plasma.

Si alguna vez han inflado un neumático de bicicleta sabrán que si tratan de hacerlo en exceso, en alguna parte del neumático el caucho no podrá soportar la presión. Se formará una protuberancia, y si se insiste, explotará.



M. Aschwanden et al. (LMSAL), TRACE, NASA

Erupción solar

Cuando los arcos de plasma se rompen, se comportan como aceleradores de partículas cargados naturalmente y expelen bocanadas de plasma muy caliente lejos del Sol, el así llamado *viento solar*. Esto no es más que una forma diferente de fenómeno disipativo que trata de mandar la energía a gran distancia, de *disiparla*.

Fenómenos similares crean las disrupciones en los tokamaks, manifestándose con la emisión de jets de energía de un poder fenomenal. Querer estabilizar un tokamak es como esperar observar el Sol durante un día sin que haya erupciones.

Conjetura acerca del colapso térmico

Este fenómeno es el punto de partida de disrupciones y nadie sabe la causa. Pretendo, sin embargo, ofrecer aquí una hipótesis. En el 2006 mi colega y amigo Malcolm Haines logró explicar un fenómeno de resistividad anormal en los filamentos de plasma de las máquinas Z (Z-machines).



Malcolm Haines, Imperial College, Londres

Las temperaturas obtenidas eran demasiado altas. Fue imposible invocar el efecto Joule para justificar este aporte de energía, los electrones circulaban demasiado rápido en el cordón de denso plasma.

Como se anotó antes, cuando la velocidad de los electrones alcanza cierto umbral, estos pasan junto a los iones tan rápidamente que dejan de

interactuar con aquellos “blancos” eléctricamente cargados. Es lo que ocurre cuando la temperatura del plasma en un tokamak sobrepasa los diez millones de grados. El efecto Joule se vuelve despreciable.

Haines mostró que la turbulencia MHD puede crear especies de grumos similares a iones, produciendo lo que se denomina “plasmoide autoconfinado” (por su propio campo magnético), y que los rusos llaman *esferomaks*. Estos objetos, de una micra de diámetro, se observan en las descargas de *pinch* y son llamados “puntos calientes”. En el filamento de una máquina Z, los “blancos” que encuentran los electrones ya no son iones aislados sino conglomerados de iones con una carga eléctrica importante. De ahí el aumento en la interacción entre “el gas de electrones” y el “gas de iones”, y la manifestación de *resistividad anormal*.

Un fenómeno análogo podría producirse en los tokamaks. En esas condiciones habría un comienzo de efecto Joule que se puede leer en la curva de temperatura reportada anteriormente. Pero un fuerte enfriamiento radiativo por radiación de frenado conllevaría a la caída de la temperatura del plasma en unos cuantos milisegundos. Sencillamente porque la potencia disipada crece como el cuadrado de la carga eléctrica.

La forma de la curva de temperatura corresponde a la evolución del fenómeno.

- *En una primera etapa, el inicio de la formación de conglomerados de iones provoca un exceso de temperatura en el gas de iones, por efecto Joule.*
- *Pero a medida que las aglomeraciones de iones aumentan de tamaño, el efecto dominante será la hemorragia de energía por radiación de frenado.*

En conclusión, si bien por un lado las microinestabilidades MHD permiten incrementar las temperaturas de plasmas densos, por el otro condenan el uso de los tokamaks como generadores de energía.

Lo que resulta bueno por un lado es malo por el otro.

Entonces... ¿existe una solución?

No logro imaginar ninguna para los tokamaks. Creo firmemente que el proyecto ITER terminaría en un completo desastre y tal vez con fuego en el aparato, provocando una catástrofe ecológica de gran magnitud.

En el 2006, en el compresor MHD de la máquina Z instalada en los laboratorios Sandia, se alcanzó una temperatura de más de tres mil millones de grados en un cordón de plasma denso del diámetro y tamaño de una mina de lápiz. Se obtuvo introduciendo una corriente de 18 millones de amperios en una celda hecha de 240 alambres de metal con el diámetro de un cabello. La regularidad de la compresión fue posible gracias a la brevedad de la descarga, 100 nanosegundos, esencial en el experimento. En efecto, una descarga eléctrica con una velocidad de ascenso (cuasi-lineal) de 100 nanosegundos es equivalente a un impulso de 10 megaHertz.

Sin embargo, sabemos que las corrientes de alta frecuencia no penetran *al interior* de los conductores sino que sólo penetran hasta cierta profundidad. Debido a eso, los alambres, cada uno de los cuales transporta 70.000 amperios, no se volatilizan al instante, preservando la simetría axial y previniendo el desarrollo de inestabilidades MHD y la distorsión total de lo que se ha convertido en una cortina de plasma.

Véase el artículo de Malcolm Haines:

Ion Viscous Heating in a Magneto-hydrodynamically Unstable Z Pinch at Over 2×10^9 KelvinM. G. Haines,^{1,*} P. D. LePell,² C. A. Coverdale,³ B. Jones,³ C. Deeney,³ and J. P. Apruzese⁴¹*Physics Department, Imperial College, London SW7 2BW, United Kingdom*²*Ktech Corporation, Albuquerque, New Mexico, USA*³*Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, USA*⁴*Plasma Physics Division, Naval Research Laboratory, Washington, District of Columbia, USA*

(Received 13 May 2005; revised manuscript received 17 October 2005; published 23 February 2006)

Pulsed power driven metallic wire-array Z pinches are the most powerful and efficient laboratory x-ray sources. Furthermore, under certain conditions the soft x-ray energy radiated in a 5 ns pulse at stagnation can exceed the estimated kinetic energy of the radial implosion phase by a factor of 3 to 4. A theoretical model is developed here to explain this, allowing the rapid conversion of magnetic energy to a very high ion temperature plasma through the generation of fine scale, fast-growing $m = 0$ interchange MHD instabilities at stagnation. These saturate nonlinearly and provide associated ion viscous heating. Next the ion energy is transferred by equipartition to the electrons and thus to soft x-ray radiation. Recent time-resolved iron spectra at Sandia confirm an ion temperature T_i of over 200 keV (2×10^9 degrees), as predicted by theory. These are believed to be record temperatures for a magnetically confined plasma.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.96.075003

PACS numbers: 52.59.Qy, 52.35.-g

There has been some difficulty in understanding how the radiated energy in a wire-array Z pinch implosion could be up to 4 times the kinetic energy [1–4], and also how the plasma pressure could be sufficient to balance the magnetic pressure at stagnation if the ion and electron temperatures were equal. In fact, theoretically the excess magnetic pressure should continue to compress the plasma leading to a radiative collapse. Some theories [5,6] have been devel-

not appear to be significant at the time of the main 5 ns FWHM soft x-ray radiation pulse where mainly long wavelength $m = 0$ modes can be and are observed. There is evidence from other wire-array experiments [8] that not all the mass and perhaps not all the current arrives on axis to the main pinch but resides in the trailing mass arising from axially nonuniform erosion and ablation of the wire cores. However, while we assume that 30% of the initial mass is

Para aprender más sobre la máquina-Z:

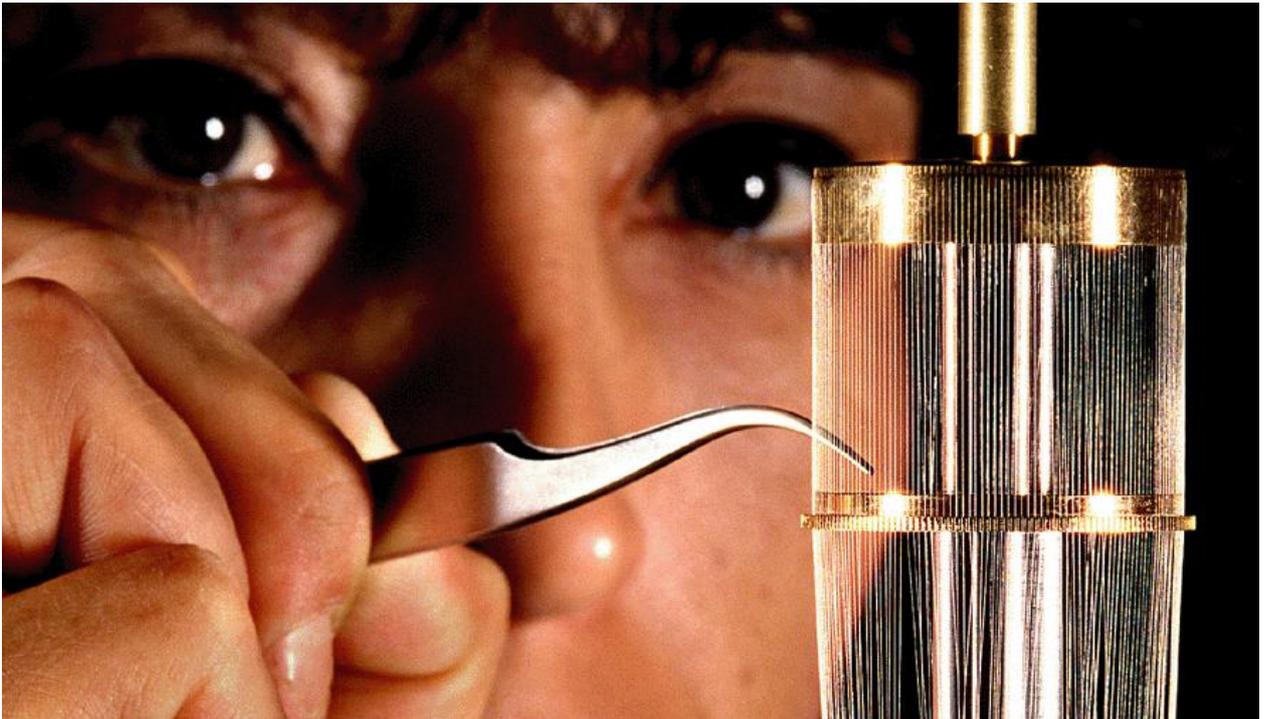
http://www.jp-petit.org/Site_Anglais/Z_machine/Z_machine.htm

En breve:



Laboratorios Sandia: Gerold Yonas trabajando en la máquina Z
(viñeta: “Hey, ¿qué está usted haciendo con eso?”)

En el 2009, la intensidad de la máquina de Sandia llegó hasta 26 millones de grados y la teoría (bien establecida, en este caso) prevé que la temperatura obtenida debería estar cercana a los 7 mil millones de grados.

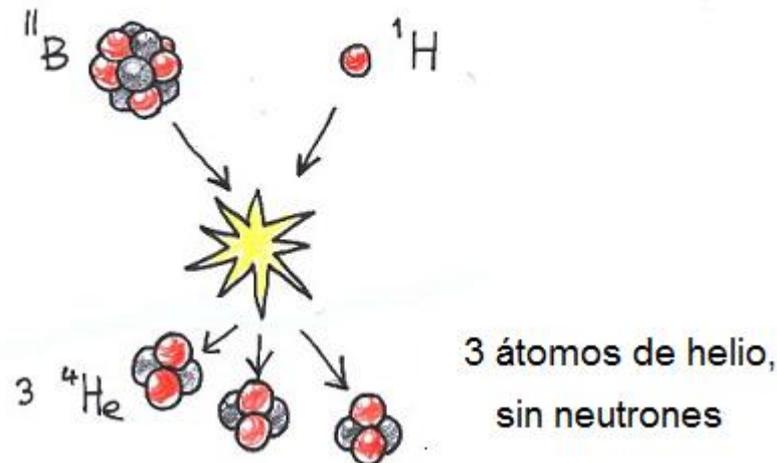


El “liner cilíndrico” de alambres de Sandia

En Rusia, Smirnov, inventor de esta “celda de alambre” que los especialistas llaman *liner*, dirige la construcción de una máquina Z en capacidad de producir 50 millones de amperios con un tiempo de ascenso de 150 nanosegundos.

Su desempeño fue mejorado con la invención debida a Zakharov, colaborador de Smirnov, de un *liner* en el que los alambres se disponen siguiendo los meridianos de una esfera, produciendo en consecuencia una concentración mayor de energía cinética en el centro geométrico del sistema.

Detrás de estos experimentos está la posibilidad de obtener fusión por compresión MHD. Puesto que las temperaturas exceden de lejos los mil millones de grados (lo que en un tokamak nunca sería posible), la *fusión aneutrónica* se vuelve posible:



Si se cumplen las “condiciones de Lawson” en este medio hiperdenso entonces la fusión producirá energía, la cual será transportada únicamente por núcleos cargados de helio y no por neutrones. Se hace así posible recuperar esta energía “por conversión directa”, haciendo de modo que la expansión del plasma tenga lugar dentro de un campo magnético. Así, en las espiras que crean el campo, aparece una corriente inducida que permite que la energía sea recobrada con un rendimiento del 70%.

Esto no es nuevo. En los años 1950, bajo el liderazgo de Andrei Sakharov, los rusos se las arreglaron para detonar una carga explosiva dopada con cesio, la sustancia más fácilmente ionizable de toda la tabla periódica de Mendeleiev. Efectuando esta expansión en el campo magnético creado por una bobina, la corriente inducida produjo la conversión directa buscada, con dicho rendimiento.

Vemos aquí emerger el tema de la “fusión de dos tiempos”. Sólo hay que almacenar parte de la energía en un “volante”, que sería entonces un... condensador, menos complicado de lo que parecería en la medida en que esta energía es de hecho almacenada en el dieléctrico de aquél. Con un dieléctrico líquido (como el agua de la máquina Z de Sandia) se obtienen tiempos de carga-descarga extremadamente rápidos.

Pero como habría dicho Kipling, esa es otra historia, que contaré en otro dossier consagrado a este tipo de máquinas MHD.

Allen Boozer, en un congreso internacional

En noviembre de 2011, Allen Boozer, de la universidad de Columbia, autoridad en el campo de plasmas calientes y tokamaks, presentó este artículo.

Referencia:

Bulletin of the American Physical Society
53rd Annual Meeting of the APS Division of Plasma Physics
Volume 56, Number 16

“Física de las simulaciones de disrupción en un tokamak”

Resumen :

Las simulaciones de disrupción buscan responder dos preguntas fundamentales:

(1) ¿Cuándo está un tokamak operando en un estado metaestable en el que es plausible su pérdida de control (cuestión sobre impedimentos)?

(2) ¿Cuál es el peor nivel de efectos destructivos cuando se pierde control del plasma y cómo pueden ser sus efectos mitigados (cuestión sobre efectos)?

El éxito de ITER y el futuro de los tokamaks como sistemas de fusión dependen de la precisión con la que estas preguntas sean respondidas.

Las capacidades existentes están lejos de lo deseado.

Sin embargo, se pueden imponer restricciones físicas a las respuestas y restricciones aún más importantes pueden ser obtenidas mediante limitadas consideraciones teóricas relacionadas con los experimentos en curso.

Se discutirá la naturaleza las restricciones físicas y los procedimientos para obtener nuevas restricciones. Por medio de una disrupción el plasma evoluciona a través de un balance de fuerzas en equilibrio.

La escala de tiempo más rápida, del orden de un milisegundo, es aproximadamente mil veces mayor que el tiempo de Alfvén, y la más larga es del orden de un segundo.

Los efectos disruptivos incluyen fuerzas y cargas de calor sobre las estructuras circundantes, así como la producción de electrones relativistas que pueden perforar las estructuras.

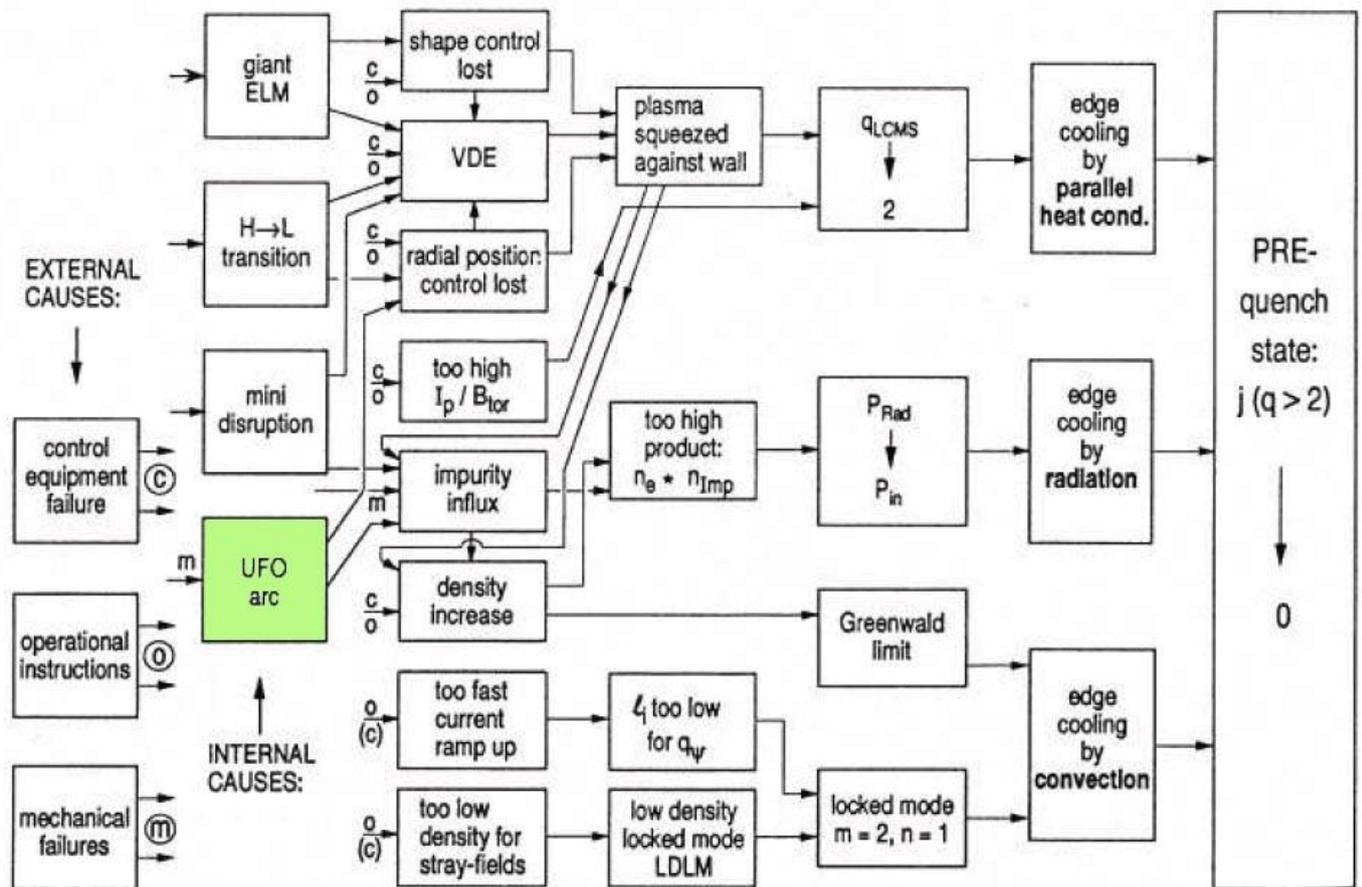
A pesar de que el promedio espacial de la fuerza que puede ser ejercida por una disrupción puede ser fácilmente estimada, la determinación de su localización, duración y cargas de calor es más complicada.

Se discutirán la física y aspectos críticos que restringen estas cargas.

El peligro impuesto por los electrones relativistas depende de la calidad de las superficies magnéticas en el momento en que aparecen grandes voltajes en el desarrollo de la disrupción. Se discutirán tópicos y métodos de mitigación para estos electrones relativistas.

¿OVNIS en los tokamaks?

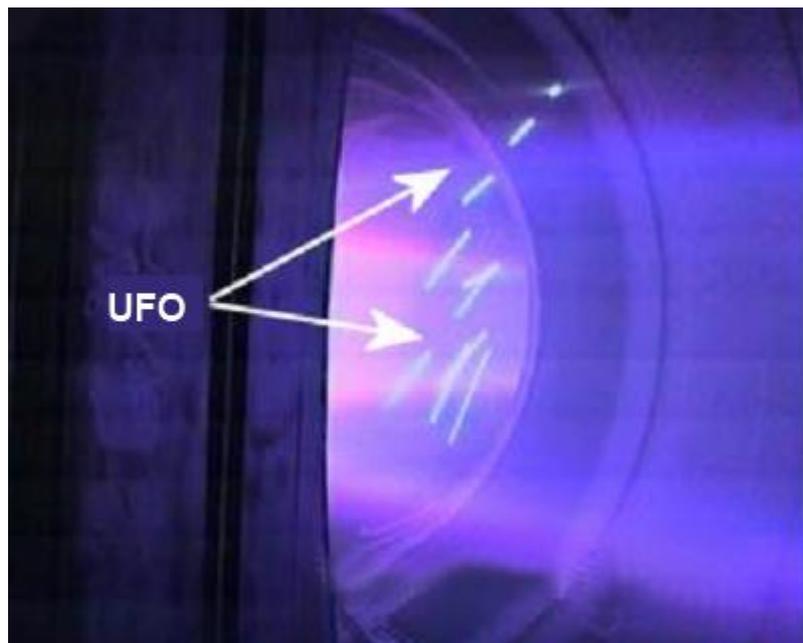
Al final de la tesis de Reux hay un diagrama surrealista que evoca todas las posibles causas de interrupciones. Son... bastantes.



Esquema de causas posibles de interrupciones

En este diagrama hay una sigla extraña: “UFO” (OVNI). Es el término empleado para indicar objetos no identificados circulando en la recámara del tokamak, relacionados con detritos varios arrancados de las paredes debido al contacto no controlado de éstas con el plasma. Así se menciona en el recuento del experimento accesible en el enlace en la página 20 que apunta hacia el sitio de CEA.

Aquí está la imagen *exacta*, tomada de la página del sitio de CEA:



junto con su comentario, en el mismo sitio web:

En el siguiente choque, aumento de las impurezas a los 16 segundos: disrupción. Un OVNI, como son llamados en la jerga de Tore-Supra, ha pasado frente a las cámaras en el visible. Los espectroscopios detectaron hierro, níquel y cobre en el plasma... ¡no son buenas noticias! Probablemente debido al sobrecalentamiento de un componente frente al plasma. El plasma se apoya sobre la primera pared interna: la cámara infrarroja no detectó problemas con los ladrillos de carbono, pero no puede ver toda la recámara. Los protectores de antena también están comprometidos, pero en su caso, una vez más, las cámaras infrarrojas de monitoreo no detectaron nada anormal. Discusiones para decidir la continuación del programa. Mientras tanto, se utilizarán descargas de limpieza para recuperación de la disrupción. Finalmente, con el acuerdo del controlador, volvemos a empezar poniendo todo de nuestra parte: para salvaguardar las antenas FCI usamos 2 de las 3 al mismo tiempo, alternándolas cada 4 segundos, de manera bastante acrobática... Adicionalmente, añadimos modulación a la posición vertical del plasma para mover el punto de impacto del plasma sobre la pared y evitar el calentamiento excesivo.

El problema del plasma ardiente

En ITER la gente espera obtener un Q entre 5 y 10. Esto quiere decir que la energía térmica producida por fusión sobrepasará de lejos la energía inyectada (microondas, inyección de rayos neutrales).

Los inyectores de energía rodean la recámara. Cuando $Q < 1$, controlan el campo de la temperatura. Eso dejará ser así si $Q \gg 1$, cuando la fusión sea auto sostenida. Entonces el plasma en la recámara tendrá vida propia sin que haya modo de controlarlo.

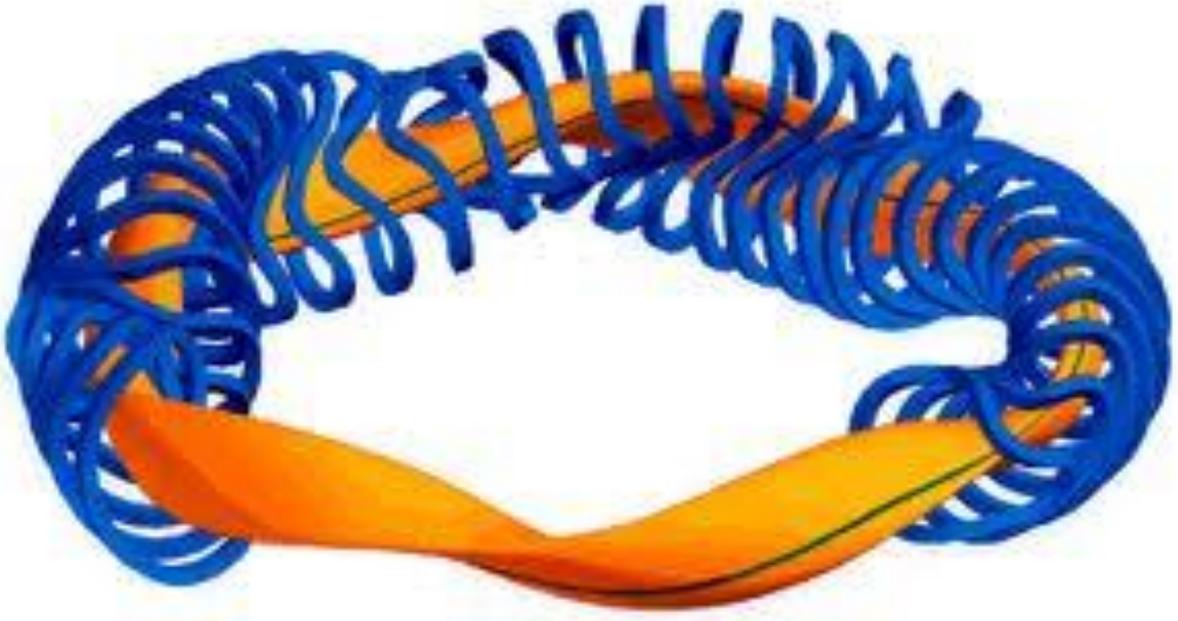
Todas las reacciones exotérmicas en los gases son bien turbulentas. Por lo tanto, es de esperarse turbulencia de fusión, con aumentos locales en la temperatura del plasma y en la tasa de la reacción de fusión.

El confinamiento depende del balance de la presión de plasma debido a la presión magnética. Si una región se calienta, la presión local sube y el plasma escapa de su presión magnética, poniéndose en contacto con la pared.

Un problema más.

Algunos consideran que el problema de las disrupciones es el principal. Está ligado a la existencia de la corriente de plasma, necesaria para asegurar la estabilidad del mismo.

Otra solución es el así llamado “Stellerator”, que no requiere de corriente eléctrica de plasma.



“Stellerator”



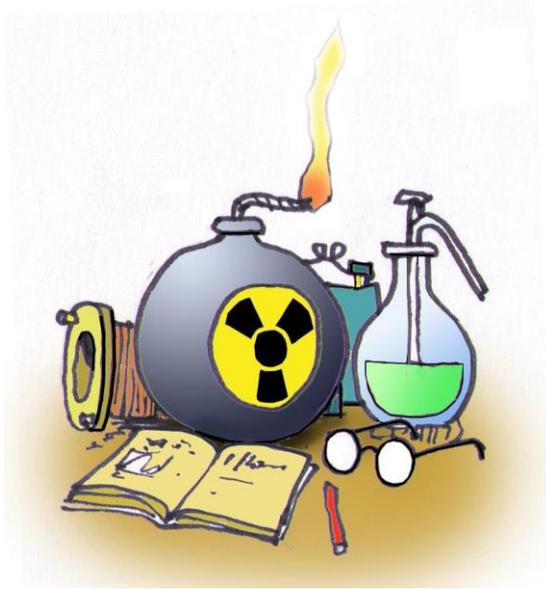
Wendelstein 7-X Stellarator magnets are complex

Entonces la gente exclama: “sin corriente de plasma, cero disrupciones”.

Sí, pero... ¿y qué de la turbulencia de fusión?

Para resumir

- **L**os tokamaks no parecen ser una buena alternativa para producir electricidad, incluso en un futuro lejano. Sería muy razonable abandonar de inmediato ese loco y costoso proyecto llamado ITER.
- **E**n su lugar, sugerimos crear un centro dedicado al estudio de grandes plantas de energía renovable.
- **J**unto con él, una máquina Z dedicada exclusivamente a la investigación civil y a la producción de energía. Su costo sería dos órdenes de magnitud menor que el de ITER.
- **M**uy factible. Se trataría de un nuevo campo de investigación, con condiciones de no-equilibrio inversas: la temperatura iónica 100 veces mayor que la electrónica.
- **P**ero se trata a la vez de un gran problema en vista de que la “fusión pura” provee de astutas bombas termonucleares que pueden ser replicadas a pequeña escala y que no requieren de una bomba-A para ser detonadas.
- **S**i se usa una mezcla de boro e hidrógeno, entonces se tendrían *Bombas Verdes*.
- **S**urge entonces una cuestión:



¿Queremos energía, o bombas?