

La fusión nuclear controlada

Por Ricardo Farengo, Centro Atómico Bariloche

La fusión nuclear es el proceso inverso al de la fisión nuclear y produce la energía del sol y demás estrellas. El interés en desarrollar la fusión nuclear controlada como fuente de energía se debe a la existencia de cantidades prácticamente ilimitadas de combustible y a las ventajas que ésta posee respecto de la fisión nuclear en lo referente a seguridad y producción de desechos radioactivos. Las investigaciones sobre fusión nuclear comenzaron hace más de 40 años y, si bien se ha avanzado mucho, todavía no contamos con centrales comerciales que produzcan electricidad utilizando este proceso. Las dificultades para producir energía por fusión controlada se deben, fundamentalmente, a las condiciones extremas en que debe mantenerse el combustible dentro del reactor.

Ricardo Farengo es Doctor en Física de la Universidad de Buenos Aires (1984) y "Special Advanced Student" de la Universidad de Maryland, Estados Unidos (1981/83). Su actividad profesional comenzó en 1979 como Investigador en la División Fusión Nuclear de la Comisión Nacional de Energía Atómica, siendo Jefe de la sección Física de Plasmas (1987/88); "Post Doctoral Research Associate" (1988/91) y "Research Assistant Professor" (1991/92) en el Departamento de Ingeniería Nuclear de la Universidad de Washington, Seattle, Estados Unidos; Jefe de la sección Física de Plasmas de la División Fusión Nuclear (1992/94) y de la Gerencia de Desarrollo (1994/95) de la CNEA; Científico Visitante, Joint European Torus (JET), Abingdon, Inglaterra (1995/96). Actualmente es Investigador en el Centro Atómico Bariloche.

Reacciones de fusión y combustibles

Cuando se fusionan (unen) dos núcleos livianos (con menos de 60 nucleones), la masa de los productos resulta menor que la suma de las masas de los núcleos originales. La masa "perdida" se transforma en energía cinética de los productos de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein: $E = \Delta m c^2$, donde Δm es la diferencia de masa y c la velocidad de la luz.

La reacción de fusión más fácil de producir, que requiere menor temperatura (ver más adelante), es la fusión de un núcleo de deuterio (D) con uno de tritio (T). Esto produce un neutrón y un núcleo de helio (partícula α). La energía liberada en la reacción de fusión se transfiere al neutrón y a la partícula alfa, que adquieren grandes

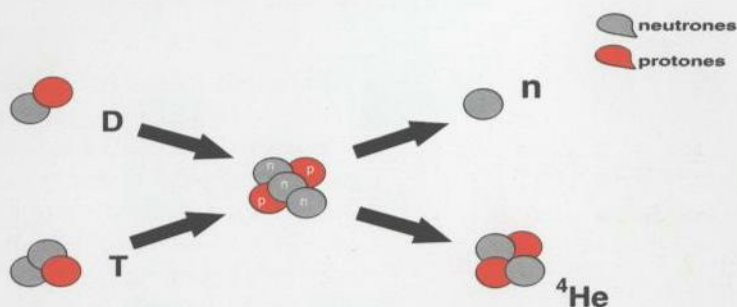


Ricardo Farengo

velocidades. El neutrón producido en la reacción D-T puede activar (volver radioactiva) la estructura del reactor y el moderador por lo que es importante el desarrollo de materiales que sufran poca activación y que, una vez activados, la pierdan rápidamente.

El deuterio puede extraerse del agua, donde hay un átomo de deuterio por cada 6700 átomos de hidrógeno. El tritio no existe naturalmente pero puede producirse dentro del reactor de fusión bombardeando litio con neutrones. Para dar una idea de las energías involucradas y de la abundancia de combustible basta mencionar que, fusionando los núcleos de deuterio contenidos en 1 g de agua con igual cantidad de núcleos de tritio, se liberan 7,8 kWh de ener-

F.1 La fusión de deuterio (D) con tritio (T) produce un núcleo de helio (^4He) y un neutrón.



gía. Las reservas de litio, necesario para producir tritio, son suficientes para varios miles de años.

Existen otras reacciones de fusión que requieren mayores temperaturas pero que son más favorables desde el punto del vista del impacto ambiental. La fusión de núcleos de deuterio produce menos neutrones que la fusión de deuterio con tritio, mientras que la fusión de deuterio con ^3He (un isótopo del helio) o la de protones con ^{11}B (un isótopo de boro) no produce neutrones. En estos casos, desaparece el problema de los desechos radioactivos. Es importante destacar, además, que las reacciones de fusión mencionadas no producen elementos que puedan ser utilizados para la fabricación de armas nucleares.

Fusión termonuclear, plasmas

Las reacciones de fusión están controladas por dos clases de fuerzas: la fuerza eléctrica y la fuerza nuclear. La fuerza eléctrica actúa hasta grandes distancias y hace que los núcleos, que tienen carga positiva, se repelan. La fuerza nuclear actúa a distancias extremadamente cortas y hace que los núcleos se fusionen. Para que ocurra la fusión es necesario vencer la repulsión eléctrica y acercar los núcleos lo suficiente como para que la fuerza nuclear comience a actuar. Esto se consigue haciendo "chocar" los núcleos a gran velocidad. Una forma de alcanzar estas velocidades es calentando los núcleos a muy

altas temperaturas. Se habla entonces de **fusión termonuclear**.

Para que el deuterio y el tritio se fusionen en cantidades significativas, se requieren temperaturas de aproximadamente 100 millones de grados centígrados (y temperaturas aún mayores para las otras reacciones indicadas). A estas temperaturas, los átomos chocan con tanta fuerza que se rompen, separándose el núcleo (positivo) de los electrones (negativos). Una mezcla de partículas cargadas en cantidades aproximadamente iguales se denomina un **plasma**. El estado de plasma constituye el cuarto estado de la materia.

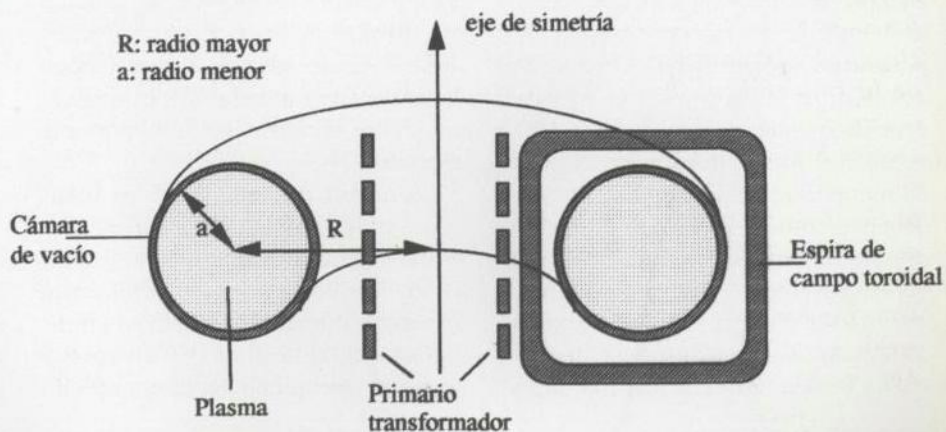
La necesidad de mantener el plasma a altísimas temperaturas hace que sea imposible almacenarlo (confinarlo) dentro de un recipiente sólido, ya que al entrar en contacto con las paredes del mismo el plasma se enfriaría y el recipiente se dañaría. Se plantea

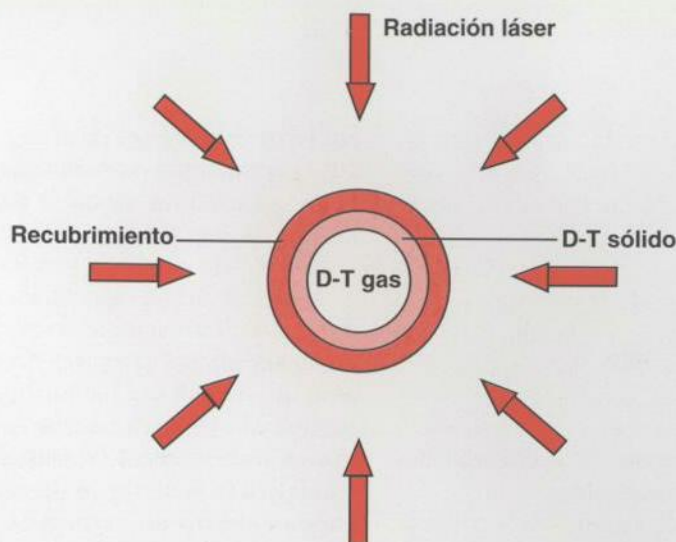
entonces el problema de cómo confinar el plasma durante suficiente tiempo a temperaturas elevadas para generar más energía por fusión que la utilizada para producir y calentar el plasma. Las altas temperaturas requeridas complican significativamente el desarrollo de los reactores de fusión pero los hacen más seguros. Para comprender esto es necesario saber que en todo momento la cantidad de combustible (en estado de plasma) presente dentro del reactor es extremadamente pequeña. Por ejemplo, en un reactor del tamaño de ITER (ver más adelante), se utiliza aproximadamente 1 g de combustible. Por lo tanto, pese a su alta temperatura, la cantidad de calor contenida en el plasma es muy pequeña. Si algún problema técnico hiciera perder el control del plasma, éste tocaría las paredes del reactor y se enfriaría rápidamente, con lo que cesarían las reacciones de fusión y la producción de energía. No existe en este caso el peligro de que la escape del control y se produzca un "meltdown".

Confinamiento

En las estrellas, la enorme atracción gravitatoria evita que el plasma caliente se expanda y enfríe. A escala terrestre, la atracción gravitatoria del

Corte esquemático de un tokamak mostrando una de las espiras de campo toroidal (se utilizan suficientes para que el campo resulte homogéneo).





propio plasma es extremadamente débil y no puede mantenerlo confinado. Se han propuesto dos métodos para confinar el plasma en un reactor de fusión. Estos se conocen como **confinamiento magnético** y **confinamiento inercial**.

En el método de confinamiento magnético se utiliza la fuerza que un campo magnético ejerce sobre las partículas cargadas que constituyen el plasma. De esta forma, utilizando electroimanes para generar un campo magnético con la geometría apropiada, es posible evitar que el plasma se acerque a la pared del reactor. El combustible contenido dentro de una "botella magnética" es calentado haciendo circular una corriente eléctrica y/o utilizando haces de partículas de gran energía u ondas electromagnéticas.

En el método de confinamiento inercial se irradia una pequeña pastilla de combustible con haces de radiación láser o haces de partículas de muy alta energía. Esto hace que la capa externa de la pastilla se evapore y expanda rápidamente comprimiendo el resto del combustible (acción y reacción) hasta densidades que pueden llegar a 1000 veces la densidad del sólido. El pulso de partículas o radiación es extremadamente corto y, finalizado el mismo, el combustible se expande con una velocidad limitada por su propia inercia. Al ser comprimida y calentada, cada pastilla se transforma en una pequeña bomba termonuclear (de hidró-

geno). Debido a esto, y al interés militar de los láseres de muy alta potencia, el acceso a la información existente en esta línea de trabajo se encuentra más restringido.

Confinamiento magnético

El concepto más avanzado dentro de la línea de confinamiento magnético es el conocido como **tokamak**. Las principales componentes de un tokamak son un recipiente de forma toroidal (semejante a una cámara de automóvil), que almacena el plasma y una serie de electroimanes. El plasma actúa como secundario de un transformador y el campo magnético que lo confina tiene geometría helicoidal. La componente toroidal (siguiendo la circunferencia mayor del toroide) de dicho campo es producida por conductores externos mientras que la componente poloidal (siguiendo la circunferencia menor del toroide) es producida por la corriente que circula por el plasma. El plasma se calienta por disipación óhmica pero es necesario inyectar, además, haces neutros de alta energía u ondas electromagnéticas para alcanzar las temperaturas requeridas.

La mayor desventaja de los tokamaks es la limitada densidad de potencia a la que pueden operar. Debido a esto, las proyecciones indican que un reactor comercial basado en un tokamak resultará grande y costoso y no podrá operar con las reacciones de

fusión más interesantes. Recientemente se ha propuesto una variante, conocida como **tokamak esférico**, que se caracteriza por poseer una relación de aspecto (cociente entre el radio mayor y el menor del toroide) de aproximadamente 1,5 en lugar de 3 ó 4 como en los tokamaks tradicionales. Esto permitiría aumentar significativamente la densidad de potencia y reducir el tamaño de los reactores.

Además de los tokamaks esféricos, varios conceptos alternativos están siendo estudiados dentro de la línea de confinamiento magnético. Entre estos, el más avanzado es el conocido como **stellarator**, que también posee geometría toroidal y se diferencia del tokamak en que ambas componentes del campo magnético son producidas por conductores externos. Otros conceptos interesantes son el **pinch de campo invertido** (RFP) y los **tiroides compactos**.

Confinamiento inercial

En el método de confinamiento inercial existen distintas opciones dependiendo del tipo de láser/haz de partículas utilizado y del método empleado para irradiar el blanco. Los láseres más utilizados son los de estado sólido (por ejemplo neodimio: vidrio) y los gaseosos de fluoruro de kriptón (KrF). Los haces pueden ser de iones livianos o pesados. La irradiación del blanco puede hacerse en forma directa o indirecta. En el método de irradiación directa, el haz del láser (o de partículas) se enfoca directamente sobre el blanco, produciendo la evaporación del recubrimiento externo y la implosión del combustible. En este proceso, entre un 5% y un 15% de la energía total absorbida se transfiere al combustible.

En el método de irradiación indirecta la radiación incidente es absorbida en una cavidad (*hohlraum*) de alto número atómico que rodea al blanco. El *hohlraum* emite luego radiación X que produce la implosión del

blanco. El proceso de conversión de radiación incidente a radiación X puede alcanzar una eficiencia de 70-80%. La irradiación directa es más eficiente para depositar la energía en el blanco pero es más sensible a problemas de no-uniformidad en la radiación incidente. La irradiación indirecta es más susceptible a la aparición de inestabilidades en el plasma.

Break-even e ignición

Un reactor de fusión debe satisfacer determinadas condiciones para resultar económicamente atractivo. Estas condiciones están relacionadas con la necesidad de producir potencia neta con una ganancia suficientemente grande respecto de la potencia que deba inyectarse para mantener el plasma. El parámetro que mejor resume estos requerimientos se conoce como triple producto de fusión, $nT\tau_E$, donde τ_E es el tiempo de confinamiento de la energía que mide la capacidad del plasma para retener su energía.

En un reactor que utilice la reacción D-T, los neutrones se llevan el 80% de la energía producida en cada reacción de fusión y las partículas α , el 20% restante. Los neutrones atraviesan el plasma sin perder energía y son frenados en una camisa moderadora (ver más adelante). Las partículas α entregan su energía al plasma y ayudan a mantener su temperatura. Desde el punto de vista de balance energético, es posible entonces plantear dos objetivos, cada uno con un dado valor del triple producto de fusión.

El primer objetivo es producir tanta potencia por fusión como la que debe gastarse para mantener el plasma. Esta condición se conoce como **break-even** y requiere que el triple producto de fusión alcance un valor de aproximadamente 10^{21} keV sec m^{-3} , donde 1 keV equivale a aproximadamente 11,6 millones de grados centígrados. El segundo objetivo consiste

en alcanzar la **ignición** del combustible. En este caso, la energía depositada por las partículas α es suficiente para mantener la temperatura del plasma. Es decir, la energía depositada compensa todas las pérdidas debidas a conducción, radiación, etc. Para que se produzca la ignición se requiere que el triple producto de fusión alcance un valor de aproximadamente 7×10^{21} keV sec m^{-3} .

El confinamiento inercial τ_E es proporcional al radio final de la pastilla de combustible (τ) y, en general, se utiliza el producto $\rho\tau$ (ρ : densidad final del combustible) en lugar de $\tau\tau_E$ para indicar cuán cerca de la ignición se encuentra el combustible. A una temperatura de 200 millones de grados centígrados, se requiere $\rho\tau \geq 0,3$ g/cm² para alcanzar la ignición. La baja eficiencia del proceso de transferencia de energía al blanco indicada más arriba (5-15%), unida a la relativamente baja eficiencia de los láseres o haces de partículas (5-30%) hace que en confinamiento inercial alcanzar la ignición no sea suficiente. Es necesario además que la ganancia, cociente entre la energía absorbida y la producida por fusión, sea suficientemente grande como para compensar esas pérdidas. Por ejemplo, un reactor que utilice un láser de estado sólido

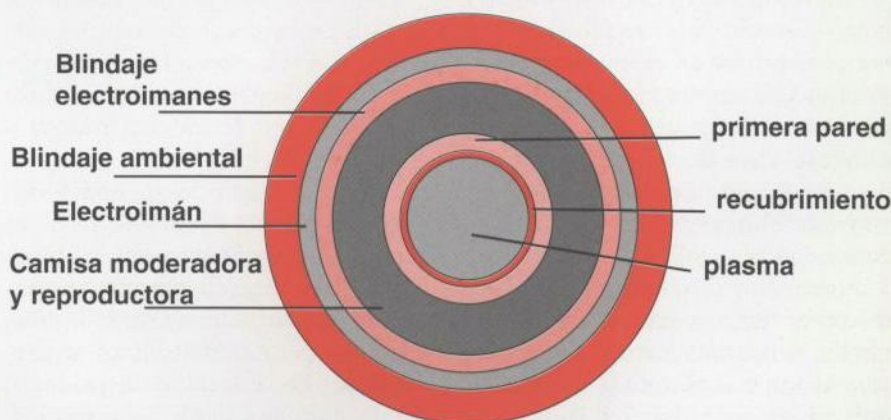
necesitará una ganancia mayor a 70-100 mientras que uno que utilice un acelerador de iones pesados requerirá una ganancia superior a 20-30.

Reactores de fusión

No existen por el momento centrales comerciales que produzcan electricidad a partir de la fusión. Sin embargo, los conocimientos adquiridos en la operación de grandes dispositivos experimentales y los estudios teóricos realizados permiten tener una idea bastante clara de cómo serán los reactores comerciales de fusión. Como ocurre con la centrales de fisión, pueden distinguirse dos áreas claramente diferenciadas. Por un lado está el reactor de fusión propiamente dicho, donde se producen las reacciones de fusión que generan calor y por el otro, los intercambiadores de calor, turbinas y generadores, que producen la electricidad como en cualquier central térmica.

Uno de los problemas fundamentales para el desarrollo de los reactores de fusión es la producción de materiales apropiados para los distintos componentes del reactor. La identificación de dichos componentes y los requisitos que estos deben satisfacer se encuentran íntimamente ligados a

Corte esquemático de un reactor de fusión **F.4**



Parámetro	Valor
Radio mayor	8,14 m
Radio menor	2,80 m
Elongación	1,6
Volumen del plasma	2000 m ³
Campo magnético	5,7 T (R=8,14 m)
Corriente	21 MA
Potencia de fusión	1,5 GW
Flujo sobre la pared	1 MW/m ²

las características de las reacciones de fusión empleadas. A continuación se describen los componentes fundamentales de un reactor por confinamiento magnético, que utilice la reacción deuterio-tritio.

La **cámara de reacción** contiene el combustible en estado de plasma y en ella tienen lugar las reacciones de fusión. Su cara interna se halla en contacto con las partículas de plasma que escapan al confinamiento, por lo que debe ser recubierta con materiales especiales que la protejan y eviten que el plasma se contamine. Se trata además de que estos materiales reten gan la menor cantidad posible de tritio, que es radiactivo y constituye el mayor peligro en caso de accidentes. Por el momento, los materiales más utilizados para el recubrimiento de la cara interna son grafito, berilio y tungsteno.

La **camisa moderadora y reproductora** rodea la cámara de reacción y tiene dos funciones. La primera es extraer la energía de los neutrones para que pueda ser aprovechada para generar vapor. La segunda es producir tritio a partir de litio. El tritio es luego extraído para ser utilizado como combustible en el mismo reactor. Rodeando la camisa moderadora y reproductora se encuentra una capa de **blindaje**, cuya función es impedir el paso de los neutrones que consiguen atravesar el moderador y de la radiación gamma.

Finalmente, encontramos los **inductores** (electroimanes), que generan los campos magnéticos necesarios para confinar el plasma y la corriente que circula por el mismo. Para minimizar la cantidad de energía consumi-

da para producir los campos magnéticos se usarán materiales superconductores. Los inductores superconductores son los componentes más costosos de un reactor de fusión.

Estado de las investigaciones

En la línea de confinamiento magnético, los mejores resultados han sido obtenidos en el Joint European Torus (JET). JET es un tokamak construido y operado por la Comunidad Europea cerca de Oxford, Inglaterra. El radio mayor es de 3 m y la sección transversal, en forma de "D", tiene un ancho de 2,5 m y una altura de 4,2 m. El campo magnético en el centro de la sección transversal puede alcanzar valores de hasta 3,5 T. Operando solamente con deuterio JET alcanzó valores del triple producto de fusión correspondientes al break-even. En 1991, JET fue el primer experimento en utilizar pequeñas cantidades de tritio (11%), produciendo 1,7 MW de potencia. En 1997, JET realizó una extensa campaña con deuterio-tritio y alcanzó un valor récord de 16 MW de potencia máxima de fusión, lo que corresponde a una relación entre potencia inyectada y potencia producida del 65%.

Los experimentos más importantes en la línea de confinamiento inercial son NOVA (Lawrence Livermore, Estados Unidos), OMEGA (Universidad de Rochester, Estados Unidos) y GEKKO XII (ILE, Japón). Los láseres utilizados son de neodimio (vidrio) y la energía y potencia máximas depositadas en el blanco son 40 kJoule y 60 TW respectivamente. Las experiencias realizadas en estos dispositivos han permitido alcanzar, separadamente, los valores de densidad y temperatura necesarios para ignición. Para conseguir el valor necesario de

ρ hacen falta láseres de mayor energía (al menos 1 Mjoule).

Próximo paso

En la línea de confinamiento magnético, el próximo paso propuesto es la construcción de un gran tokamak conocido como **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor). El objetivo de ITER es alcanzar la ignición, producir 1500 MW de potencia de fusión y operar en forma continua o con pulsos de al menos 1000 sec. ITER deberá incorporar todas las tecnologías relevantes para un reactor comercial, imanes superconductores, manejo de tritio, mantenimiento remoto, etc. El proyecto se encuentra actualmente en la etapa de ingeniería de diseño, que debe concluir en 1998 con un diseño completo, detallado e integrado de todas las componentes de ITER.

Debido al elevado costo, 10.000 millones de dólares durante un período de 10 años, la Comunidad Europea, Japón, Estados Unidos y Rusia se han unido para llevar adelante este proyecto. Los principales parámetros propuestos para ITER se encuentran indicados en la tabla de esta página.

El proyecto más ambicioso en la línea de confinamiento inercial es el conocido como NIF (National Ignition Facility), cuya construcción ha comenzado recientemente en Estados Unidos. NIF utilizará un láser de estado sólido de 192 haces, que entregará 1,8 MJoules de energía con una potencia de 500 TW. El objetivo principal de NIF es alcanzar la ignición del combustible con pequeñas ganancias (aprox. 10). El costo de NIF se calcula en 1000 millones de dólares y se espera que comience a operar en el año 2002. Francia también planea construir un experimento de características similares a NIF.