

ASOCIACION ARGENTINA DE
TECNOLOGIA NUCLEAR

Conferencias

IV• REUNION CIENTIFICA
ROSARIO 1975

REACTORES CONCEPTUALES DE
FUSION NUCLEAR

A. B. RODRIGO

BUENOS AIRES
1976

REACTORES CONCEPTUALES DE FUSION NUCLEAR^(*)

A. B. Rodrigo^(**)

(*) El presente trabajo es un resumen parcial de un estudio realizado por el autor bajo contrato con la Comisión Nacional de Energía Atómica.

(**) Miembro de la Carrera del Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y del Grupo Láser del Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas de las FF.AA.

RESUMEN

La fusión nuclear es una de las alternativas más atractivas para satisfacer la demanda energética mundial a largo plazo, en virtud de la disponibilidad de vastas reservas de combustible para los ciclos deuterio-tritio y deuterio-deuterio y de su impacto ambiental potencialmente menor, en comparación con la fisión nuclear.

Cuatro de los conceptos más interesantes para el desarrollo de los futuros reactores de fusión son el theta pinch, el espejo magnético, el tokamak y el confinamiento inercial con calentamiento en base a radiación láser.

Se describen las características generales de estos sistemas y se discuten problemas asociados a su desarrollo.

ABSTRACT

Nuclear fusion is one of the most attractive alternatives to meet the world's long term energy demand, in view of the vast fuel reserves for the deuterium-tritium and deuterium-deuterium combustion cycles and of its potentially smaller environmental impact, as compared with nuclear fission.

Four of the most interesting concepts for the development of the future fusion reactors are the theta pinch, the magnetic mirror, the tokamak and the inertial confinement scheme with laser heating.

The general features of these systems are described and the major problems associated to their development are discussed.

I. FUSION NUCLEAR COMO RECURSO ENERGETICO

El consumo energético mundial es al presente del orden de 0.25 Q/año ($Q=1.05 \times 10^{21}$ J) y se estima que podría alcanzar un valor asintótico de 10 Q/año para una población total estabilizada en 16,000 millones de habitantes -cuatro veces la actual- con un consumo energético per capita de 20 kw_t continuos -dos veces el actual consumo de la sociedad de América del Norte.⁽¹⁾

Al considerar los recursos que poseen un potencial adecuado para satisfacer una demanda permanente de 10 Q/año para la sociedad asintótica considerada, la fusión nuclear emerge como una de las alternativas más atractivas, en virtud de la existencia de vastas reservas de combustible para los ciclos deuterio-tritio y deuterio-deuterio y también, en atención al menor impacto ambiental asociado a la utilización masiva de reactores de fusión como alternativa a los reactores de fisión nuclear.

Considerando las reservas de deuterio en el agua de los océanos (concentración media standard: 35 ppm), se calcula un potencial energético de aproximadamente 10^{10} Q, en caso de ser factible el desarrollo de reactores que operen en el ciclo D-D, en tanto que para el ciclo D-T el potencial energético es del orden de 2×10^7 Q, asumiendo que se dispone de las reservas de litio del agua de mar (concentración natural: 0.12 ppm) para producción de tritio. En ambos casos, por tanto, las reservas disponibles permitirían satisfacer la demanda energética indicada por un espacio de tiempo superior al millón de años.

Los reactores de fusión que operen en base a los ciclos D-T y D-D, considerados como los más factibles tecnológicamente, poseerán un inventario radioactivo volátil (tritio) y no volátil (material estructural activado por los neutrones energéticos de las reacciones de fusión).⁽²⁾ En consecuencia, la explotación en gran escala de la fusión nuclear presentará un innegable problema de riesgo ambiental. No obstante, una elección adecuada de materiales estructurales, de corto período de actividad-vanadio, por ejemplo- permitiría reducir considerablemente los problemas de afterheat y almacenamiento de desechos radioactivos de los reactores de fusión, en comparación con los asociados a los reactores de fisión. En adición, los reactores de fusión serán inherentemente seguros con respecto a la posibilidad de excursiones de potencia, y el hecho de que el tritio sea procesado en el mismo reactor

reducirá considerablemente el riesgo de uso inapropiado de material radioactivo estratégico. Eventualmente, existe la posibilidad de utilizar ciclos combustibles alternativos a los indicados, en base a elementos de mayor número atómico, tales como Li, Be y B. En este caso, las dificultades tecnológicas para el desarrollo del reactor son mayores, si bien la virtual ausencia de neutrones y tritio entre los productos de reacción permitirían eliminar, esencialmente, el problema de radioactividad de los reactores de fusión.

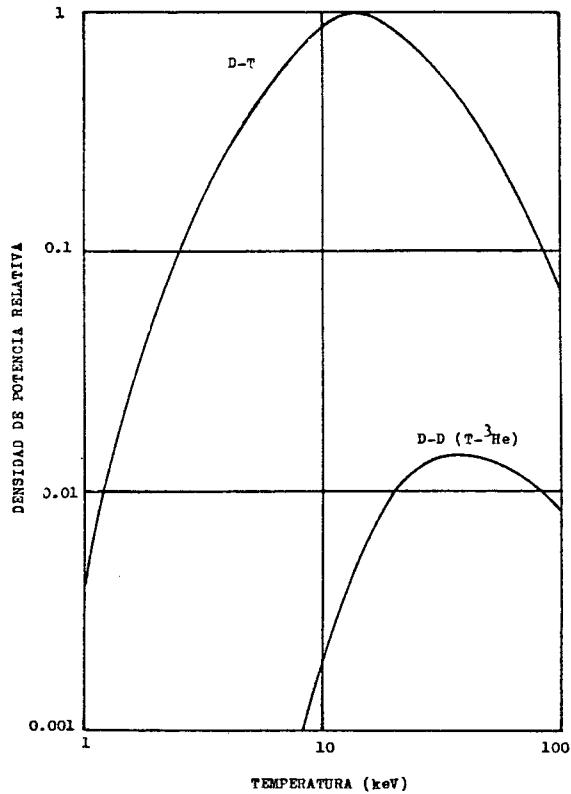
II. GENERACION DE POTENCIA POR MEDIO DE FUSION NUCLEAR

Ciclo Combustible

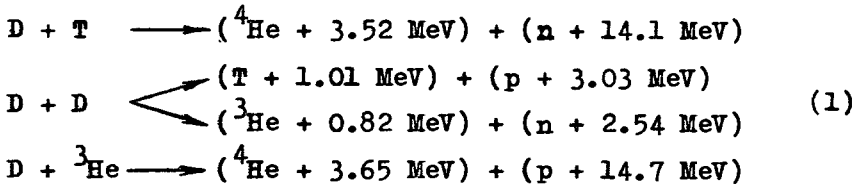
Una reacción de fusión nuclear es un proceso binario, en el que dos núcleos se combinan dando por resultado un nuevo núcleo, más pesado que los originales y nucleones. En las reacciones de interés, parte de la masa de los reactantes se transforma en energía cinética de los productos, la que puede ser recuperada como energía eléctrica en base a un adecuado ciclo de conversión.

Dado que los núcleos reactantes poseen carga eléctrica, se requieren partículas con una energía relativa del orden de 10 a 100 keV, en el caso más favorable, para que la probabilidad de penetración de la barrera repulsiva electrostática sea significativa y se produzcan reacciones de fusión. La energía necesaria es tanto mayor cuanto más alto sea el número de carga de los núcleos reactantes. Como la sección transversal de colisión electrostática es mayor que la sección transversal de fusión en el rango de energías considerado, la condición dinámica del sistema reactante tiende a un equilibrio cinético, caracterizable por una temperatura. Para energías de 10 a 100 keV, la temperatura correspondiente es del orden de 10^8 a 10^9 °K, respectivamente. La naturaleza de la reacción es, por tanto, termomolecular, y el medio reactante consiste de un plasma caliente compuesto por núcleos (iones) y electrones, los que preservan la neutralidad eléctrica del fluido.

Si bien existen numerosas reacciones posibles de fusión, el interés se ha concentrado en aquellas que producen una adecuada densidad de potencia a temperatura relativamente baja, dado que son las más accesibles desde el punto de vista tecnológico. La Fig. 1 ilustra la densidad de potencia relativa producida por reacciones de fusión, en función de la temperatura iónica, para dos de los ciclos combustibles más favorables. (3)



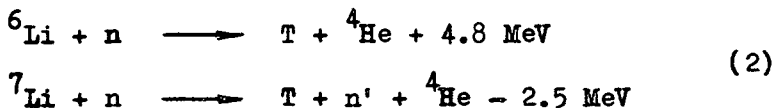
Los ciclos combustibles indicados en la Fig. 1 están basados en las reacciones:



La energía cinética asociada a cada producto está indicada en el paréntesis correspondiente. Las dos ramas de la reacción D-D tienen igual probabilidad, en el rango de temperaturas de interés.

Como puede observarse en la Fig.1, el ciclo D-T produce una densidad de potencia máxima prácticamente dos ordenes de magnitud superior a la de la reacción completa D-D, a una temperatura próxima a 10 keV. Por esta razón, se estima que el ciclo D-T será el utilizado en los primeros reactores de fusión. El tritio necesario para consumo del reactor será producido en base a reacciones de fisión de litio, contenido en una camisa exterior, concéntrica

con la cámara de reacción, utilizando los neutrones generados por la fusión de D-T:

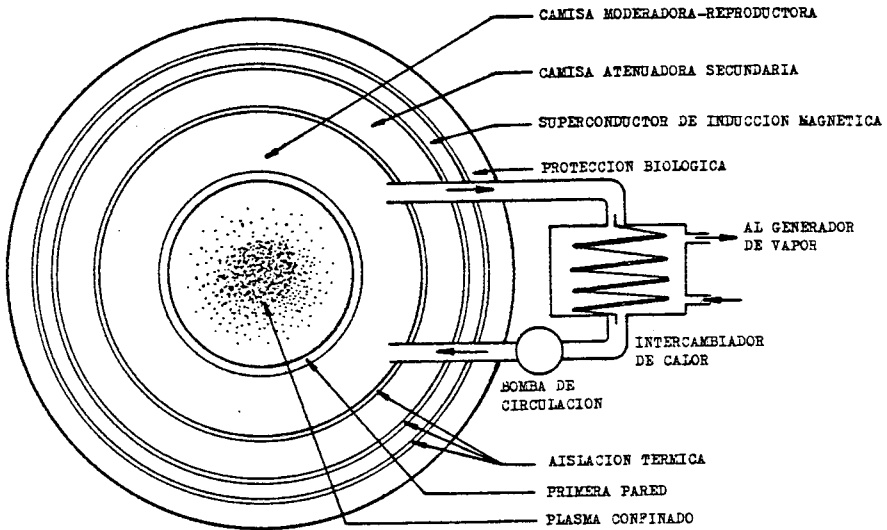


Se estima que en base a un diseño adecuado de la camisa del reactor, será posible alcanzar factores de reproducción suficientemente altos como para doblar el inventario de tritio en un período del orden del mes, de ser necesario. La energía liberada por reacciones en la camisa del reactor se agrega a la energía de fusión.

El ciclo D-D exige una temperatura de reacción del orden de 50 keV. El tritio y el helio-3 producidos pueden reaccionar con el deuterio, dando lugar a la reacción completa D-D-T- ${}^3\text{He}$. En este caso deuterio es el combustible básico y no es necesaria una camisa reproductora de tritio en el reactor. Este ciclo se considera como una alternativa de interés al de D-T, para una etapa tecnológica más avanzada en el desarrollo de los reactores de fusión.

La energía cinética asociada a los productos de reacción puede recuperarse en base a un convertidor directo de alta eficiencia, en el caso de partículas con carga eléctrica, o bien en base a un ciclo térmico convencional, en el caso de los neutrones. En este sentido, para el ciclo D-T, un 80% de la energía de fusión corresponde a los neutrones y tan solo un 20% a partículas cargadas, por lo que la posibilidad de extracción de energía en base a conversión directa no es demasiado atractiva. A los efectos del ciclo térmico convencional para este tipo de reactores, se preve utilizar un moderador (litio, grafito) en la camisa del reactor y un fluido refrigerante (litio, Li_2BeF_4 o "FLIBE") a fin de transportar la energía térmica depositada en la camisa hasta el intercambiador de calor del sistema, según se ilustra en la Fig. 2.

Por el contrario, para el ciclo D-D-T- ${}^3\text{He}$, aproximadamente el 65% de la energía liberada corresponde a partículas con carga eléctrica, lo que ofrece la posibilidad de lograr reactores de fusión de alta eficiencia.



Condiciones de Reacción

A fin de generar potencia en base a un reactor de fusión nuclear, es necesario producir un plasma de densidad adecuada y calentarlo hasta la temperatura óptima de reacción.

El calentamiento puede realizarse de diferentes maneras: por disipación óhmica, haciendo pasar una corriente eléctrica por el plasma; por compresión adiabática de las partículas cargadas eléctricamente utilizando un campo magnético pulsado; por inyección de haces de partículas neutras de alta energía, las que se ionizan en contacto con el plasma; utilizando haces electrónicos relativísticos, o bien por medio de radiación láser de alta potencia. Cada una de estas alternativas presenta un problema tecnológico particular de desarrollo.

Una vez alcanzada la temperatura adecuada, es necesario mantener la reacción durante un tiempo lo suficientemente largo como para que la energía generada por fusión permita alimentar al propio reactor y satisfacer la demanda externa. A tal efecto, es necesario impedir el contacto del plasma con las paredes del reactor, dado que esto produciría una severa pérdida de energía e inmediatamente extinguiría la reacción. Esto es lo que se denomina el problema del confinamiento del plasma y que, juntamente con el problema del calentamiento, constituyen los aspectos centrales de la fusión nuclear.

En virtud de la carga eléctrica de las partículas que forman el medio reactante, se considera factible lograr el confinamiento en base a campos magnéticos de geometría adecuada. Este método, se basa en la propiedad de las partículas cargadas de desplazarse esencialmente en trayectorias helicoidales a lo largo de las líneas de inducción magnética, estando impedido su movimiento en la dirección perpendicular al campo en tanto no se produzcan colisiones que den lugar a un proceso de difusión. Para las temperaturas de interés, las colisiones electrostáticas son relativamente infrecuentes y por tanto, el tiempo característico de difusión es lo suficientemente largo como para permitir confinar el plasma, en principio, por un período adecuado. La superficie magnética de confinamiento ejerce una presión efectiva sobre el plasma, que contrarresta su presión estática y lo mantiene separado de las paredes del reactor. La presión magnética tiene un valor $B^2/2\mu_0$, donde B es la inducción magnética (weber/m²) y μ_0 la permeabilidad magnética del vacío (henry/m). Este método está limitado a utilizar plasmas de densidad relativamente baja, de modo que la presión a contener por la superficie magnética esté dentro de los límites tecnológica y económicamente aceptables para los magnetos a utilizarse.

El principal problema de esta alternativa, en el campo experimental, es el desarrollo de inestabilidades del plasma, que no permiten alcanzar el tiempo de confinamiento calculado en base al proceso de difusión clásica. Las inestabilidades pueden ser de tipo macroscópico y microscópico. Las inestabilidades macroscópicas afectan al plasma en forma global e inducen un movimiento colectivo del fluido que lo expulsa de su confinamiento. A fin de evitar este problema es necesario crear configuraciones de campo magnético tales que el sistema sea estable magnetohidrodinámicamente (MHD). Aun en el caso de un plasma macroscópicamente estable, pueden existir microinestabilidades, consistentes en oscilaciones electrostáticas o electromagnéticas de cargas del plasma, las que pueden llegar a amplificarse y producir una difusión excesiva, reduciendo el tiempo de confinamiento a valores inadecuados para un reactor de fusión.

Los sistemas de confinamiento magnético pueden clasificarse en base a la geometría del campo en cerrados o abiertos. En los sistemas cerrados o toroidales, el plasma se encuentra totalmente rodeado por la superficie magnética de confinamiento y solo puede escapar por difusión. El representante más significativo de este grupo es el tokamak. En los sistemas abiertos, las pérdidas de plasma se pro-

ducen esencialmente por los extremos abiertos de la superficie de confinamiento. Representantes típicos de los sistemas abiertos son el theta pinch lineal y el espejo magnético.

Una alternativa al confinamiento magnético es la de confinamiento inercial. En este caso, se cuenta con producir el calentamiento del plasma y la reacción nuclear en un tiempo corto con respecto al tiempo característico de expansión del fluido caliente, de modo que el plasma esté confinado por la inercia de sus propias partículas. Este tipo de confinamiento es característico de un artefacto explosivo. A fin de calentar el plasma, se considera irradiar simétricamente una pequeña esfera combustible con un pulso láser de alta potencia y energía, o bien proveer la energía en base a un haz electrónico relativístico.

Consideremos a continuación las condiciones del plasma que son de interés para un reactor de fusión nuclear.

La temperatura del plasma debe ser tal que la densidad de potencia producida por reacciones de fusión sea máxima. La energía entregada inicialmente por el sistema calefactor externo fluye preferentemente a una de las dos especies del plasma. Procesos colisionales tienden a termalizar cada especie, como asimismo a establecer un flujo de energía de la especie más caliente a la más fría. De esta manera, los iones y electrones del plasma ganan energía. Al aumentar la temperatura, la energía liberada por fusión asociada a las partículas con carga eléctrica comienza a alimentar al plasma, en adición a la energía externa. La reacción se autosostiene energéticamente cuando la potencia entregada al plasma por los productos cargados de fusión iguala a la energía perdida por el mismo. La temperatura para la cual esto ocurre se denomina temperatura de ignición de la reacción.

La densidad de potencia de fusión para el ciclo D-T (1:1) puede escribirse:

$$P_F = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle_{DT} Q_F \quad (3)$$

donde P_F es la densidad de potencia, n es la concentración iónica ($n_D = n_T = n/2$), σ es la sección transversal de fusión para la reacción D-T, v es la velocidad relativa entre núcleos reactantes y Q_F es la energía liberada por reacción de fusión. El producto σv está promediado sobre la función de distribución de los iones y se denomina parámetro de velocidad de reacción, siendo una función de la temperatura solamente, para la reacción considerada.

La concentración iónica está relacionada con la presión estática del plasma (p) y la temperatura ($T \equiv T_i = T_e$):

$$n = p/2kT \quad (4)$$

en donde se ha despreciado la presión de ^4He .

Luego, resulta:

$$P_F = \text{const.} \times p^2 \langle \sigma v \rangle_{DT} / T^2 \quad (5)$$

La ley de variación de P_F con la temperatura está ilustrada para una presión constante en la Fig. 1, en donde se observa que la temperatura óptima para la reacción es del orden de 10 keV.

En particular, para los reactores de fusión basados en confinamiento magnético, la relación entre la presión estática del plasma y la presión magnética de confinamiento se escribe:

$$\beta = 2\mu_0 p / B^2 \quad (6)$$

La densidad de potencia para este tipo de reactores puede escribirse entonces:

$$P_F = \text{const.} \times \beta^2 B^4 \langle \sigma v \rangle_{DT} / T^2 \quad (7)$$

Desde el punto de vista de diseño del sistema de confinamiento, un valor $\beta \sim 1$ es un sinónimo de alta eficiencia de utilización del campo magnético y considerando el mayor costo de un reactor de alta inducción, el parámetro β tiene por lo tanto relevancia económica.

La densidad de potencia de fusión es proporcional a n^2 . El valor de la concentración iónica debe ser lo suficientemente elevado como para que el reactor pueda generar potencia útil durante el tiempo que el plasma permanece confinado. La relación entre la concentración y el tiempo de confinamiento (τ) fué establecida por el físico inglés J.D.Lawson alrededor de 1957, quien determinó que:

$$n\tau > 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{seg} \quad (8)$$

para un reactor que opere a una temperatura de aproximadamente 10 keV en el ciclo D-T en la condición de umbral, para la cual la potencia eléctrica generada solamente alcanza para mantener la reacción, en tanto que la potencia útil es nula. El producto $n\tau$ se denomina usualmente "número de Lawson" y depende de la temperatura, para una reacción dada. En particular, el número de Lawson es sensible a la fracción de la energía de fusión que contribu-

ye al calentamiento del plasma, como así también a los gradientes de temperatura y concentración del medio reactante. Se estima que valores típicos del producto $n\tau$ umbral serán del orden de 10^{14} - 10^{15} cm^{-3}seg . En el caso de reactores de confinamiento magnético en base al ciclo D-T, se espera tener concentraciones de 10^{14} - 10^{16} cm^{-3} y tiempos de confinamiento de 0.1-10 seg. Para confinamiento inercial, se estima que la concentración deberá ser 10^{26} cm^{-3} , a fin de alcanzar una alta velocidad de reacción, en tanto que el tiempo de confinamiento será del orden de 10^{-9} seg, asumiendo una esfera combustible de 1mm de diámetro.

III. REACTORES CONCEPTUALES DE FUSION NUCLEAR

Existen diferentes conceptos potencialmente interesantes para el desarrollo de reactores de fusión. Cuatro de los sistemas que han alcanzado un mayor grado de progreso son el theta pinch, el espejo magnético, el tokamak y los sistemas de confinamiento inercial con calentamiento por medio de radiación láser.(3),(4)

Al presente, el esfuerzo en el estudio experimental de estos conceptos se concentra en aproximar las condiciones del plasma tanto como sea posible a las condiciones características de umbral propias de cada sistema para el ciclo D-T. Debe aclararse que los equipos actuales están a nivel de cámaras de reacción experimentales para producción del plasma y medida de sus propiedades y carecen de camisa moderadora y reproductora de tritio.

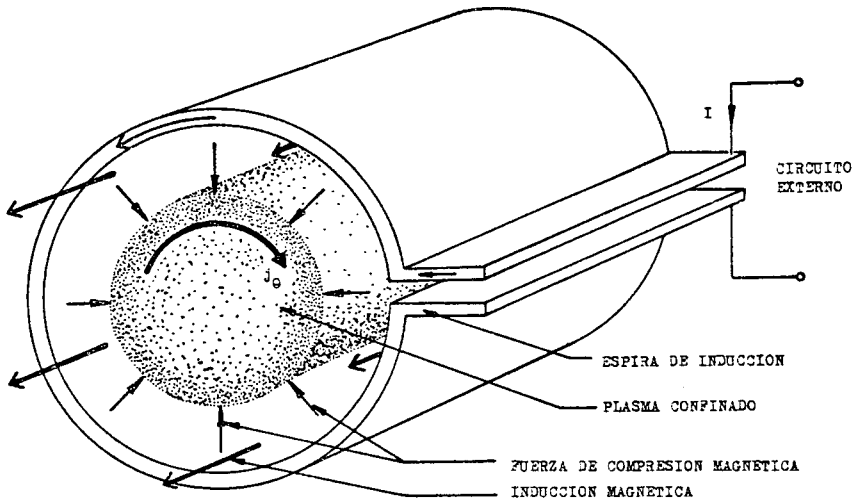
Gran parte de las investigaciones con respecto al plasma apuntan a mejorar los métodos de calentamiento y evaluar la importancia de las microinestabilidades para temperaturas típicas de operación, o bien a eliminarlas, en aquellos casos en que éstas son un impedimento para alcanzar un tiempo de confinamiento adecuado. Al mismo tiempo, se trata de alcanzar máximos valores de la concentración del plasma, de modo de mejorar la potencia producida por fusión y de aumentar el valor del parámetro β .

En el aspecto puramente tecnológico, se trata de desarrollar fuentes de almacenamiento y transferencia de energía magnética de interés para alimentar sistemas pulsados, y sistemas de calentamiento del plasma (láseres de alta potencia y energía, haces neutrales de alta energía y eficiencia, haces de electrones relativísticos). En adición, se ha comenzado a estudiar problemas ya más específicos del reactor, tales como el desarrollo de la camisa, estudio de materiales, problemas estructurales, ciclos de

conversión directa y en general, el estudio y desarrollo de los distintos sistemas asociados al reactor.

a) El Theta Pinch

El principio de operación del theta pinch está ilustrado en la Fig. 3.



El theta pinch consiste de una única espira de un sistema primario de inducción, dispuesta en forma de un largo cilindro (theta pinch lineal) o bien en forma de un toroide (theta pinch toroidal) de gran relación de aspecto (radio toroide/radio sección transversal ~ 100). Dentro de la espira se introduce la mezcla combustible gaseosa a baja presión y se la preioniza, formando un plasma de baja temperatura. La espira de inducción está alimentada por una fuente de poder externa de alta energía ($\sim 100\text{GJ}$, para un reactor de potencia), que se conecta al sistema por medio de un interruptor rápido. Cuando esto ocurre, circula una alta corriente por la espira, la que genera un intenso campo magnético ($\sim 100\text{--}200\text{ kG}$) paralelo al eje del tubo. En estas condiciones, el plasma se convierte en el conductor secundario de un sistema transformador, originándose una corriente en la dirección θ , alrededor del eje del cilindro. La interacción entre el campo magnético axial y la corriente azimutal produce inicialmente una onda de choque implosiva, que calienta el gas, y seguidamente una compresión adiabática (efecto pinch) de la columna de plasma que com-

pleta el calentamiento hasta la temperatura de reacción. Las reacciones de fusión liberan energía que en parte contribuye al calentamiento del plasma y que puede ser recuperada en base a un ciclo de conversión directa. La energía asociada a los neutrones se recupera en base a un ciclo térmico convencional.

Completado el ciclo de combustión, cuya duración típica sería de 0.1 seg, la inducción magnética decrece y el plasma se expande y enfría, extinguiéndose la reacción nuclear. El gas caliente se neutraliza en base a la adición de un flujo de gas a baja temperatura y se elimina luego de la cámara de reacción, con lo que el sistema está listo para un nuevo ciclo de operación. La duración total del ciclo es del orden de 10 seg.

El theta pinch permite alcanzar un valor $\beta \sim 1$ y el calentamiento se logra en forma automática en base al mismo campo magnético de confinamiento, lo que constituye dos características atractivas de este concepto.

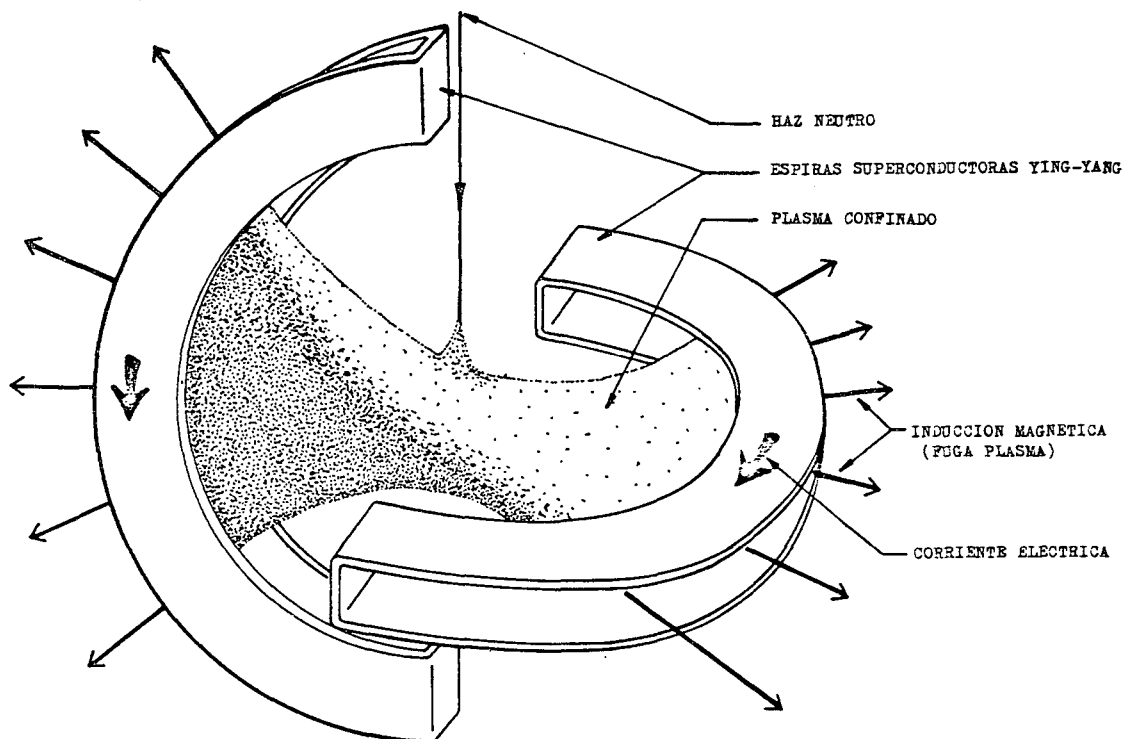
Para un theta pinch lineal, el escape de plasma por los extremos abiertos exige una longitud del cilindro de confinamiento superior a 1 km, en el caso de un reactor de potencia. Por esta razón, el interés se ha concentrado fundamentalmente en los sistemas de tipo toroidal. En este caso, la geometría de confinamiento en base al campo magnético toroidal no es suficiente para lograr un equilibrio MHD y es necesario superponer un campo magnético poloidal helicoidal de estabilización. La atención se concentra actualmente en este aspecto, en lo que hace al comportamiento del plasma.

Un serio problema tecnológico para el desarrollo de un reactor de fusión basado en el concepto del theta pinch es el de la construcción de la fuente de poder para crear el campo magnético toroidal de compresión. De acuerdo a estimaciones actuales, esta fuente deberá proveer típicamente energías del orden de 100 GJ en un pulso de 10^{-3} seg de trepada y 0.1 seg de duración. Se estima que esta energía será de 3-5 veces superior a la liberada por reacciones de fusión, de modo que a fin de lograr un balance energético positivo del reactor, la energía de confinamiento y calentamiento deberá ser transmitida entre la fuente y el reactor con una eficiencia del orden de 95-98% y recuperada al final del ciclo. Deberá utilizarse fuentes de energía reversibles de tipo inductivo. La alta eficiencia de transferencia requerida y el costo de este sistema representan un problema crítico para el futuro de este concepto.

b) Espejo Magnético

Una partícula cargada eléctricamente tiende a reflejarse al aproximarse a una región de inducción magnética creciente. El efecto de espejo magnético puede lograrse en base a una adecuada geometría de campos y utilizarse para evitar la fuga de plasma por los extremos de un sistema abierto. Solamente aquellas partículas cuyo vector de velocidad yace dentro de un cierto cono escapan del confinamiento; esta región, en espacio de velocidades, se denomina cono de pérdida del espejo.

La Fig. 4 ilustra una forma típica de inductor a fin de lograr un confinamiento magnetohidrodinámicamente estable.



El tipo de inductores ilustrado en la Fig. 4 se denomina espiras Yin-Yang y permite obtener un campo magnético que es mínimo en el centro del volumen confinado y que aumenta al alejarse en cualquier dirección. Esta configuración de inducción, llamada de "mínimo B", crea un pozo magnético que confina efectivamente el plasma en forma MHD-estable.

Los espejos magnéticos son sistemas de operación continua, en donde las pérdidas por los extremos se compensan

en base a la inyección de nuevo combustible bajo la forma de un haz neutro de partículas energéticas, que se ionizan en contacto con el plasma. El haz neutro también provee la energía necesaria para calentar inicialmente el plasma y mantener una adecuada temperatura de reacción. Se preve que el plasma necesario para comenzar la operación del reactor será producido en base a un campo magnético pulsado, o bien por medio de un láser, al irradiar una pequeña pastilla combustible.

La energía de fusión se recupera en forma clásica en la camisa del reactor y también en base a un convertidor directo. En el caso de un espejo abierto, la conversión directa es prácticamente mandatoria, a fin de recuperar la energía asociada a las partículas cargadas que escapan por los extremos del sistema. Una alternativa a fin de evitar el problema de la pérdida de plasma es la de utilizar un conjunto de espejos, formando una geometría toroidal.

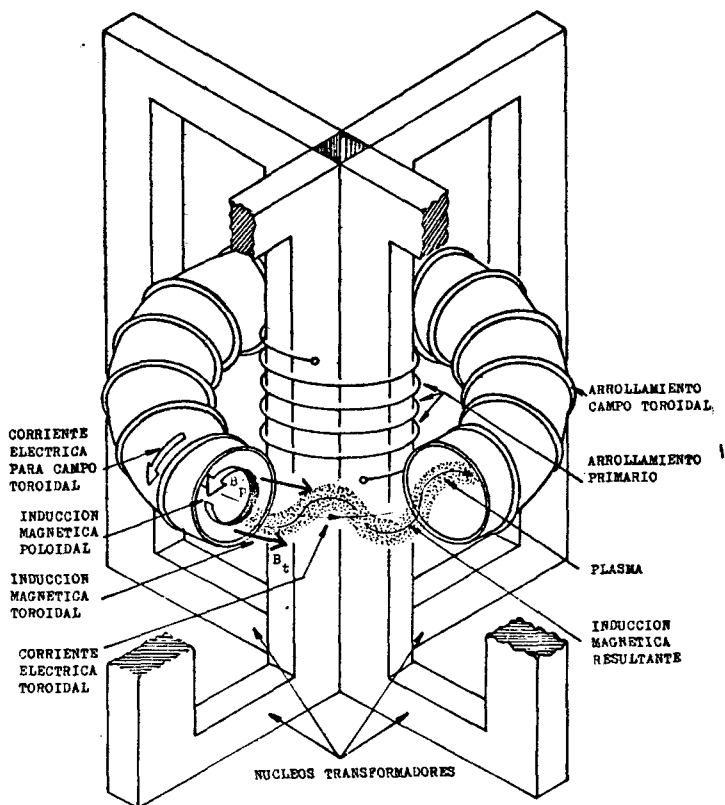
Los espejos magnéticos son sistemas que deberán operar a alta temperatura, a fin de minimizar los efectos de colisiones electrostáticas que incrementan las pérdidas por los extremos. En particular, el tiempo de confinamiento depende de $T^{3/2}$ y solo en forma logarítmica de las dimensiones del sistema y de la intensidad del campo magnético. Para el ciclo D-T, las temperaturas de interés son del orden de 150-300 keV, lo que determina el rango de energías requerido del haz neutro.

Los espejos magnéticos son atractivos por su alto β (~ 0.8), moderada inducción magnética ($B_{\text{central}} \sim 50$ kG, $B_{\text{espejo}} \sim 150$ kG) y operación continua. En adición, dado que el tiempo de confinamiento no depende sensiblemente del tamaño, es posible dimensionar el reactor económicamente de acuerdo a la potencia requerida.

Actualmente, existen microinestabilidades en el plasma que resultan de anomalías en la función de distribución de velocidades, por efecto del cono de pérdida del espejo, que deben ser eliminadas a fin de lograr un tiempo de confinamiento adecuado. En el plano tecnológico, uno de los aspectos dominantes es el desarrollo de un generador de haz neutro de alta eficiencia ($\sim 80\%$) y energía (~ 150 keV). La performance actual de estos sistemas es típicamente de 10-50 keV, con eficiencias del orden de 60%. Otro aspecto importante en el caso de un único espejo magnético es el convertidor directo, que debe poseer una eficiencia de conversión $> 80\%$ a fin de permitir el desarrollo de un reactor con balance energético positivo. La factibilidad técnica y el costo de este sistema son aspectos cruciales para el futuro de este concepto.

c) Tokamak

El tokamak es un sistema toroidal de bajo β (3-5%) y baja relación de aspecto (~ 3), cuyo principio de operación está ilustrado en la Fig. 5.



Un tokamak consiste de un toroide de gran sección y de pequeño radio. Dentro del toroide se introduce el combustible a baja presión y se lo ioniza al aplicar un pulso de corriente a la bobina primaria del sistema. Por efecto transformador, se origina en el plasma una corriente eléctrica toroidal que eleva su temperatura por disipación óhmica y crea a su vez un campo magnético poloidal, B_p (~ 10 kG). La adición de un campo magnético toroidal continuo, B_t ($\sim 40-60$ kG), produce las condiciones adecuadas para lograr un confinamiento MHD-estable. En adición, debe proveerse un campo pulsado transversal, para control de la posición de la columna de plasma.

Dado que la conductividad eléctrica del plasma aumenta con su temperatura, el proceso de calentamiento óhmico se torna ineficiente para temperaturas superiores a ~ 1 keV, por lo que es necesario recurrir a métodos alternativos de calentamiento para llevar al plasma a condiciones de reacción. Una de las alternativas más atractivas en este sentido es la de utilizar haces neutros energéticos (> 200 keV).

La operación del tokamak será presumiblemente cuasi-pulsada, en el sentido que se empleará un largo ciclo de combustión (~ 1000 seg) durante el cual se inyectará combustible a fin de compensar las pérdidas por difusión a través del campo magnético (tiempo de confinamiento ~ 10 seg). A fin de eliminar el plasma que escapa del confinamiento se emplearán trampas magnéticas, denominadas divertores.

La duración del ciclo de combustión estará limitada esencialmente por el período de la corriente axial, o bien por la contaminación y enfriamiento del plasma por acumulación de impurezas de alto Z, liberadas como resultado del contacto del plasma caliente que escapa del confinamiento con la pared interna del reactor. Terminado este ciclo, se evacua la cámara de reacción y se la recarga con nuevo combustible, con lo que el sistema queda nuevamente listo para operación. La energía de fusión se recupera de la forma convencional para el ciclo D-T.

El mayor atractivo del concepto tokamak proviene de su habilidad para alcanzar un largo tiempo de confinamiento sin que se manifiesten serias inestabilidades del plasma. Dado que la máxima temperatura iónica alcanzada al presente es del orden de 1 keV, debe verificarse que estas condiciones se mantengan al aumentar la temperatura a valores típicos de reacción. En adición, la teoría indica que el tiempo de confinamiento aumenta con el cuadrado del diámetro de la sección del toroide. Por tanto, a fin de obtener condiciones realistas de reacción, será necesario aumentar no solamente la temperatura sino también la sección transversal del sistema. Valores típicos actuales del radio de esta sección son del orden de 0.5 m, en tanto que para un reactor de potencia se estima que el radio deberá ser de $2-5$ m.

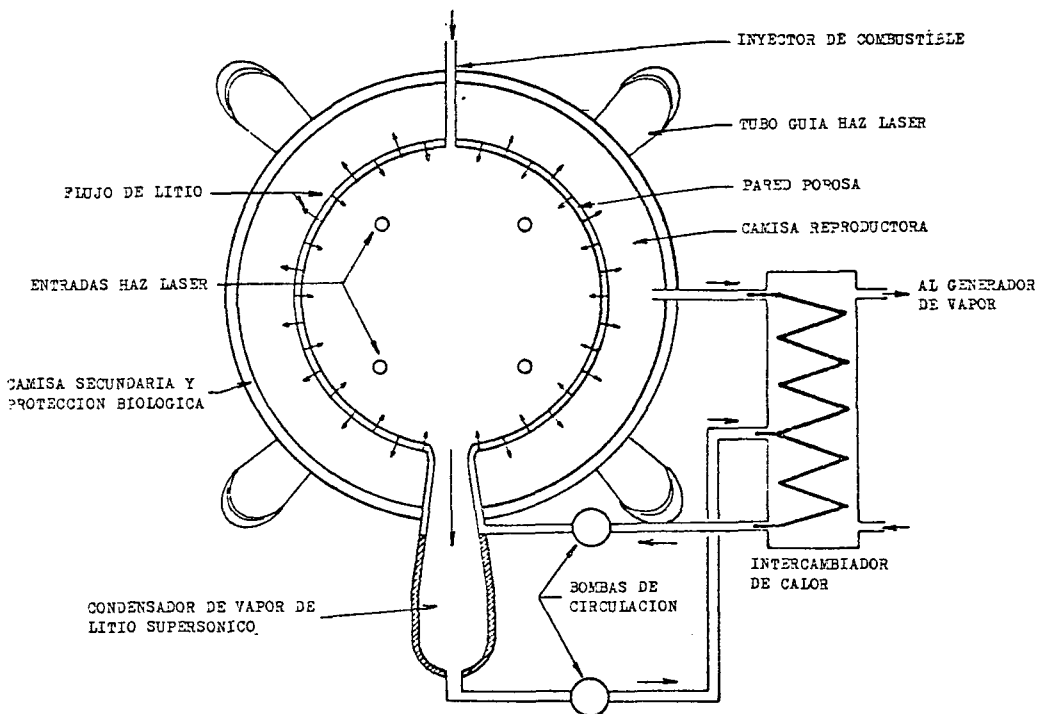
Otro problema de consideración en relación con el plasma es su enfriamiento por efecto de impurezas provenientes de la pared, lo que puede constituir un serio obstáculo para alcanzar largos ciclos de operación. En este sentido, será necesario desarrollar sistemas adecuados para evitar, tanto como sea posible, la interacción plasma-pared.

Si bien existen numerosos problemas tecnológicos a resolver para obtener un reactor de fusión de potencia en base a este concepto, no parecen existir problemas particularmente críticos de los sistemas asociados al reactor que hagan dudar de la factibilidad técnico-económica de su desarrollo. Se estima que los reactores de este tipo serán atractivos económicamente solo como unidades de generación de alta potencia eléctrica ($\sim 1000-5000 \text{ Mw}_e$).

d) Confinamiento Inercial con Calentamiento por Láser.

De acuerdo a este concepto, un pulso láser de gran intensidad y energía se hace incidir con un alto grado de simetría espacial y temporal sobre una pastilla esférica de combustible nuclear (D-T), de modo de calentar el mismo y producir la reacción de fusión en un tiempo más corto que el tiempo de expansión del material. La concentración inicial del combustible es típicamente del orden de 10^{22} cm^{-3} y su diámetro de 1 mm.

La Fig. 6 ilustra esquemáticamente las características de un reactor conceptual de confinamiento inercial y calentamiento por láser, para el ciclo D-T.



La pastilla combustible se introduce a través de un conducto que penetra la pared del reactor y deberá ser guiada con gran precisión al punto de convergencia de los múltiples haces láser de irradiación - que penetran también hasta la cámara de reacción a través de un sistema óptico especial- a fin de asegurar una adecuada uniformidad de iluminación sobre su superficie. La radiación calienta el combustible hasta la temperatura de reacción. La energía de fusión se recupera en la forma convencional, en base a una camisa moderadora y reproductora de tritio externa a la cámara de reacción, cuya pared es porosa y permite la formación de una delgada película de litio líquido sobre su cara interna, la cual absorbe parte de la energía de la microexplosión por ablación y protege la pared de un excesivo calentamiento superficial. La reacción termina cuando el plasma caliente se expande y enfria. El sistema es luego evacuado y comienza un nuevo ciclo.

La frecuencia de repetición será presumiblemente del orden de 1-100 pps. El tiempo entre disparos dependerá en gran parte del tiempo necesario para evacuar la cámara de reacción hasta una presión lo suficientemente baja como para que la radiación láser pueda propagarse sin perturbaciones. En este sentido, de resultar este tiempo excesivamente largo, se considera la posibilidad de utilizar varias cámaras de reacción comandadas en forma sucesiva por el mismo láser.

A fin de lograr un tiempo de reacción adecuado, es necesario producir un plasma con una concentración del orden de 10^{26} cm^{-3} . Esta concentración es típicamente cuatro ordenes de magnitud mayor que la de la materia en el estado líquido y es característica de un cuerpo estelar. La factibilidad del desarrollo de un reactor de confinamiento inercial y calentamiento por láser se basa, fundamentalmente, en la posibilidad de comprimir y calentar adecuadamente la pastilla combustible hasta las condiciones de reacción. En particular, el calentamiento debe realizarse de modo de lograr la temperatura de reacción solamente en un núcleo central del plasma, de modo que sea la energía de fusión liberada en esta región la que lleve a ignición al resto de la masa combustible. Solo en estas condiciones se cree posible lograr un balance energético positivo para un reactor de este tipo. Se estima, en base a cálculos teóricos, que es posible alcanzar las condiciones indicadas en base a un proceso de compresión ablativa isentrópica, utilizando un pulso láser de gran potencia y energía, cuya variación temporal de intensidad esté adecuadamente programada. (5)

Uno de los aspectos atractivos del concepto inercial-láser reside en la eliminación del sistema de generación del campo magnético, lo que confiere mayor simplicidad al reactor desde el punto de vista constructivo y de servicio. Para este tipo de reactores, será posible adaptar la potencia de salida a las necesidades.

Uno de los mayores problemas de este concepto, desde el punto de vista del plasma, es que el proceso de interacción entre la radiación láser y el plasma no está enteramente clarificado, por lo que no es posible calcular en forma precisa la eficiencia de transferencia de energía del láser al plasma y por tanto, calcular exactamente la potencia y energía requeridas del láser para lograr una compresión dada. De acuerdo al actual conocimiento del problema, se estima que será necesario disponer de un láser de 10^6 J por pulso, con una duración de pulso de 10^{-9} - 10^{-10} seg y una eficiencia de aproximadamente 10%, en el caso de un reactor comercial. Dado que la eficiencia de transferencia de energía es sensible a la longitud de onda utilizada, se estima que será necesario disponer de láseres que emitan entre 3000-6000 Å.

Desde el punto de vista tecnológico, el mayor problema es al momento el desarrollo del láser adecuado. Los láseres de la actual generación (CO_2 y vidrio neodimio) permiten al momento obtener energías del orden de 10^3 J en un tiempo de 10^{-9} - 10^{-10} seg, con una eficiencia de 1-0.2%, respectivamente. Si bien sería posible escalar la performance del láser de CO_2 a condiciones de interés para un reactor de potencia, su larga longitud de onda ($10.6 \mu\text{m}$) no es favorable para la interacción con el plasma, a no ser que fuera posible desarrollar pastillas combustibles insensibles al efecto adverso de este tipo de radiación, a un costo razonable ($\ll 0.01$ Dlr/pastilla). Otros láseres de interés en vías de desarrollo son el láser de yodo (presumiblemente con excitación por impacto electrónico o bien fotolítica de alta eficiencia), el láser químico de HF, el de oxígeno atómico y los láseres de excímeros de Xe y óxidos de gases nobles. Otro aspecto tecnológico de gran importancia actualmente, es el desarrollo de pastillas combustibles cuyo diseño favorezca la eficiencia de transferencia de energía en el proceso de interacción, de modo de poder minimizar la potencia y energía del láser, como asimismo reducir las exigencias en cuanto a forma temporal del pulso y longitud de onda de irradiación.

IV. CONCLUSIONES

La investigación teórica y experimental en el campo de la fusión nuclear ha alcanzado un grado de madurez considerable, al punto que es posible hoy día encarar con razonable optimismo el problema del diseño conceptual de los futuros reactores y de sus sistemas asociados.

Al analizar los conceptos más promisorios resulta evidente, no obstante, que todavía queda por delante un considerable esfuerzo de investigación y desarrollo hasta demostrar la factibilidad científica de los distintos sistemas y uno aun mayor hasta alcanzar el nivel de reactor de potencia. Puede concluirse que prácticamente en todos los sistemas considerados, subsisten problemas o interrogantes con respecto a la estabilidad y condiciones del plasma confinado, que deben ser adecuadamente resueltos. Existen además numerosos problemas de ingeniería de sistemas, cuya solución exigirá el desarrollo de nueva tecnología. En particular, deberá demostrarse la factibilidad y aceptabilidad de costo de algunos sistemas críticos, tales como la fuente de almacenamiento y transferencia de energía magnética de alta eficiencia del theta pinch, el sistema de conversión directa del espejo magnético, los generadores de haces neutros y los láseres de alta eficiencia y energía.

La nueva generación de máquinas experimentales que acaban de entrar en operación, o que están próximas a hacerlo -fundamentalmente los tokamaks PLT, DOUBLET III, PDX (U.S.A.) y T-10 (U.R.S.S.), entre otros, y los grandes láseres experimentales en construcción: SHIVA (U.S.A. Laboratorio Lawrence Livermore) y el láser de 100 kJ/l nseg de CO₂ del Laboratorio Los Alamos, programado para 1979 - permitirá aproximar las características del plasma a las condiciones de umbral y aclarar considerablemente el panorama actual.

REFERENCIAS

- 1) A.M.Weinberg, R.P.Hammond, "Global effects of increased use of energy" 4th. International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, trabajo 49/P/420, p.171,(1971)
- 2) W.Häfele, C.Starr, "A perspective on fusion and fission breeders", J. British Nuclear Energy Soc.,vol.13, p.131, (1974)
- 3) D.Steiner,"The technological requirements for power by fusion", Proc. IEEE, vol. 63, p.1568, (1975)
- 4) F.L.Ribe, "Fusion reactor systems", Revs. Mod. Physics, vol. 47, p.7, (1975)
- 5) K.A.Brueckner, S.Jorna, "Laser driven fusion", Revs. Mod. Physics, vol. 46, p.325, (1974)

Títulos de FIGURAS

FIG.1. DENSIDAD DE POTENCIA RELATIVA DE FUSION
EN FUNCION DE LA TEMPERATURA IONICA.

FIG.2. SECCION TRANSVERSAL DE UN REACTOR DE FUSION
Y CICLO DE CONVERSION TERMICA.

FIG.3. DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN THETA PINCH.

FIG.4. ESPEJO MAGNETICO DE MINIMO-B.

FIG.5. PRINCIPIO DE OPERACION DEL TOKAMAK.

FIG.6. REACTOR CONCEPTUAL DE CONFINAMIENTO INERCIAL
Y CALENTAMIENTO CON LASER.

