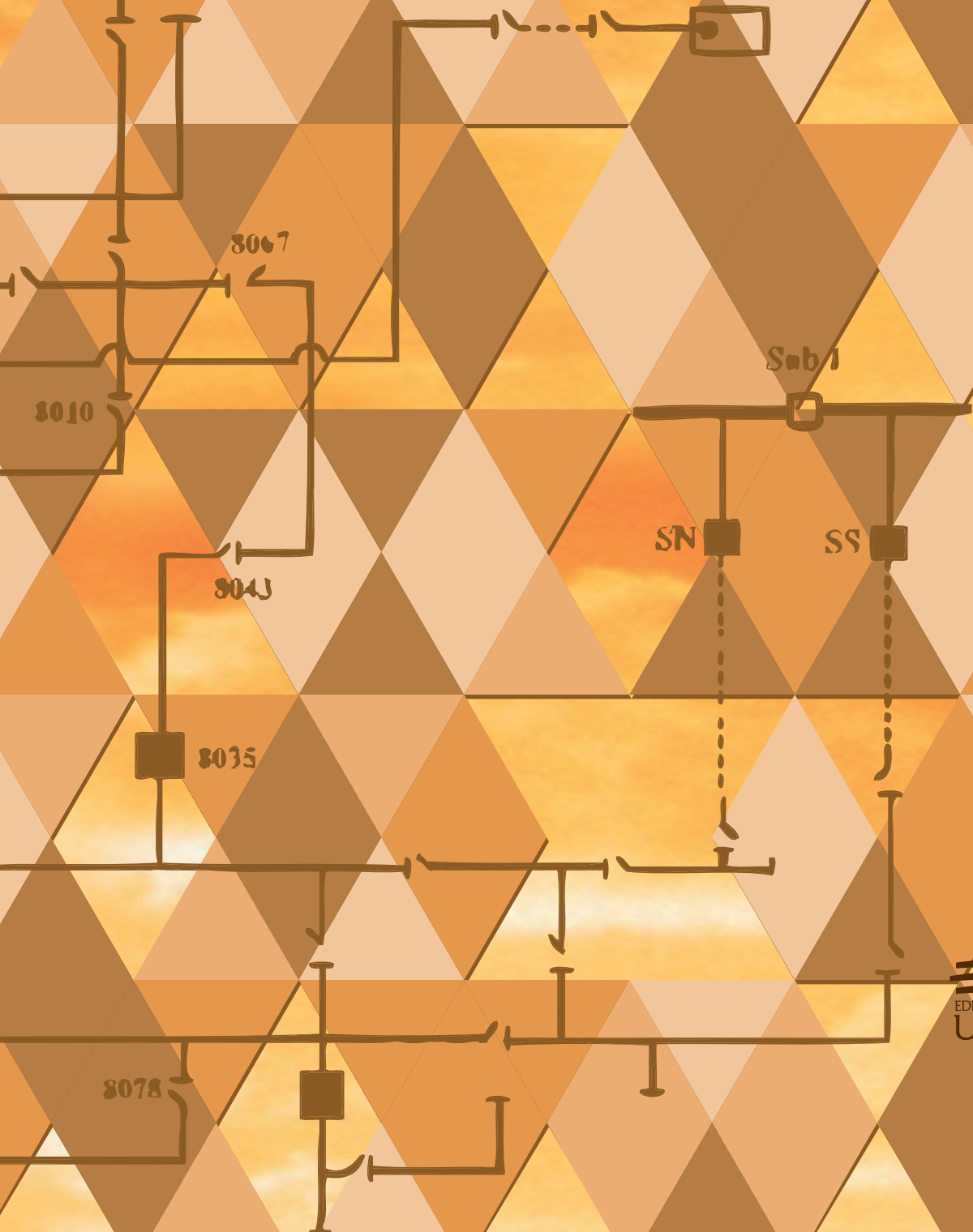


Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica
FEBRERO/AGOSTO 2014 - VOLUMEN 24 Número (1)



Notas técnicas

LA INGENIERÍA NUCLEAR Y EL DESARROLLO DE MECANISMOS DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

Eduardo Calderón Obaldía

Resumen

La fusión nuclear es el proceso mediante el cual los núcleos ligeros se unen para formar núcleos más pesados, y es el proceso que genera la energía del sol y las estrellas (estas reacciones de fusión se producen a temperaturas del orden de los 150 millones de grados Celsius). Densidades del orden de 10^{20} m^{-3} y temperaturas iónicas en torno a 10 keV son características claves que garantizan un estado estable de ionización de la materia llamado "plasma". El proceso de fusión más accesible experimentalmente es aquel en que reaccionan núcleos de deuterio y tritio generando una partícula alfa y un neutrón. De la energía cinética generada en la fusión de los núcleos de deuterio y tritio, el 80% reside en las partículas neutras (neutrones) mientras que el 20% restante lo hace en los núcleos de He (partículas α). La espectroscopia visible, la dispersión Thomson, la interferometría de microondas, las sondas de iones pesados, y las sondas de Langmuir, son algunos de los sistemas de diagnóstico utilizados para caracterizar la materia en este estado. El reto de la fusión es reproducir en la Tierra las reacciones que se producen en el interior de las estrellas; por lo tanto la densidad en un dispositivo de fusión nuclear experimental deberá ser de 15 órdenes de magnitud superior a la presente en el gas interestelar y alrededor de 15 órdenes de magnitud inferior al que se encuentra en el interior de algunas estrellas. Estas características técnicas deben reunirse en un reactor capaz de satisfacer una parte sustancial de las necesidades energéticas del planeta a corto plazo.

Palabras claves: fusión nuclear, Stellarator, Tokamak, átomo, plasma, espectroscopia, interferometría, iones pesados, sondas de Langmuir

Abstract

Nuclear fusion is the process by which light nuclei combine to form heavier nuclei, and is the process that generates energy from the sun and stars (these fusion reactions occur at temperatures of the order of 150 million Celsius). Densities of the order of 10^{20} m^{-3} and ion temperatures of about 10 keV are key features which ensure a stable state of ionization of matter called "plasma". The fusion process is one in experimentally accessible reactive deuterium and tritium nuclei generating an alpha particle and neutron. From the kinetic energy generated in the fusion of deuterium and tritium nuclei, 80% reside in neutral particles (neutrons) while 20% use in the nuclei of He (α particles). Visible spectroscopy, Thomson scattering, Interferometry microwave, Probes heavy ions, and Langmuir probes are some diagnostic systems used to characterize the material in this state. The challenge of the fusion is duplicated on Earth reactions occurring inside the star; therefore density in experimental nuclear fusion devices must be 15 orders of magnitude higher than the gas present in the interstellar and about 15 orders of magnitude lower than that found in the interior of some stars. These specifications should meet in a reactor capable of meeting a substantial portion of the world's energy needs in the short term.

Keywords: nuclear fusion, Stellarator, Tokamak, atom, plasma, spectroscopy, interferometry, heavy ions, Langmuir probes

Recibido: 13 de marzo, 2011 • **Aprovado:** 13 de Febrero, 2014

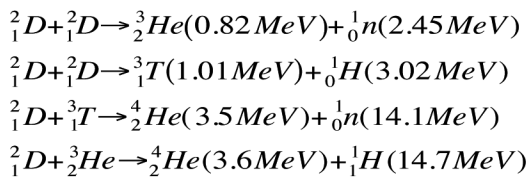
1. CONCEPTOS BÁSICOS DE LA FUSIÓN NUCLEAR

La generación de procesos de fusión nuclear por confinamiento magnético en

un laboratorio requiere condiciones de densidad y temperatura iónica que difieren muy notablemente de las que se dan en otros procesos de fusión presentes en el universo, en estas condiciones la materia se encuentra

en el estado conocido como plasma (Chen, 1984; Golston, 1995; Sturrock, 1996) .

Como es conocido por la ingeniería nuclear, la energía de ligadura que mantiene los nucleones unidos varía dependiendo del tamaño (masa) del núcleo en cuestión, siendo mayor para núcleos de tamaño intermedio ($A \approx 50$) que para núcleos muy pesados o muy ligeros (ver Figura 1). Debido a esta particularidad de la materia, es posible obtener energía por medio de reacciones nucleares, bien disociando núcleos pesados en otros más ligeros (fisión), o bien uniendo núcleos ligeros para formar otros más pesados (fusión). Entre las reacciones de fusión posibles (T. Dolan, 2000) las candidatas más probables para ser utilizadas en un ciclo industrial de fusión para producción de energía, por tener mayores secciones eficaces de reacción para temperaturas/energías relativamente bajas, son las siguientes:



Para que estas reacciones ocurran es fundamental que se cumplan una serie de condiciones. Entre ellas es necesario que los núcleos ligeros con carga positiva que interactúan tengan una energía cinética lo suficientemente alta como para superar la barrera de Coulomb que los repele. Para ello se requiere incrementar la energía de dichas partículas en el rango de los 20-30 keV. Por otra parte, siempre que se alcance una densidad y una temperatura suficientemente elevadas, el tiempo de confinamiento de las partículas α puede llegar a ser el requerido para que el calentamiento inducido por estas partículas compense y exceda las continuas pérdidas de energía que se producen en la reacción. El criterio de Lawson traduce estas exigencias en la siguiente expresión, siempre que el combustible sea una mezcla de deuterio y tritio:

$$n_i \times \tau_E \times T \geq 5 \times 10^{21} (\text{keV} \times \text{s} \times \text{m}^{-3})$$

Donde n_i es la densidad iónica en unidades de (m^{-3}), τ_E (s) se define como tiempo de confinamiento de la energía y es la razón entre la energía contenida en el plasma y la potencia inyectada, y T_i (keV) es la temperatura de los iones.

Las condiciones requeridas por la expresión anterior se pueden conseguir al menos de dos formas: manteniendo los núcleos a densidades muy elevadas (del orden de 10^{26} m^{-3}) durante tiempos muy cortos (10^{-6} s), o bien manteniendo los núcleos a densidades no tan elevadas (10^{20} m^{-3}) durante tiempos más largos (del orden de 1 s). La fusión por confinamiento inercial se basa en la primera vía mientras que la fusión por confinamiento magnético se adapta a la segunda.

1.1 Caracterización física del plasma

En el orden de los 10^4 eV de temperatura la materia se encuentra ionizada, en el estado que se conoce como plasma, o cuarto estado de la materia, que es básicamente un gas ionizado en el que coexisten partículas cargadas positivamente (iones), negativamente (electrones) y neutras, conformando en total un sistema eléctricamente *quasi-neutro*.

Existe una gran variedad de plasmas, dependiendo de su comportamiento y de las condiciones de densidad y temperatura a las que se encuentre. Así, se tienen plasmas desde densidades del orden de 10^{12} m^{-3} y temperatura 10^1 eV en la ionosfera, a plasmas con densidades del orden de 10^{20} m^{-3} y temperaturas del orden de 10^4 eV en los plasmas de fusión, lo que supone muchos órdenes de magnitud de variación en la densidad y temperatura de unos casos a otros. Dado el largo alcance de las interacciones entre las partículas cargadas y la tendencia a la neutralidad, el plasma exhibe comportamientos colectivos de muy variada naturaleza, lo que hace que su estudio sea complejo.

Debido a la relativa libertad de movimiento de las partículas en el plasma, cuando se introduce una carga externa en su seno, esta es apantallada de modo que su efecto decae rápidamente con la distancia. La distancia a la que el efecto de la carga ha decaído en un factor $1/e$ se conoce como longitud de Debye y es un parámetro característico del plasma:

$$\lambda_D = \sqrt{\epsilon_0 T_e / n_e e^2} \quad (1)$$

Donde ϵ_0 es la permitividad eléctrica del vacío, “ e ” es la carga del electrón, T_e es la temperatura electrónica en electrón-voltio ($1 \text{ eV} = 11600$ grados Kelvin) y n_e es la densidad de electrones.

Cuando el plasma se encuentra inmerso en un campo magnético, sus constituyentes cargados (iones y electrones) se mueven en torno a las líneas de campo magnético siguiendo trayectorias helicoidales, resultado de la superposición de una traslación a lo largo de las líneas de campo y una rotación en torno a ellas. La rotación de las partículas en torno a las líneas de campo magnético se realiza con un radio de giro, conocido como radio de Larmor, cuyo valor viene dado por:

$$\rho_L = \frac{mv_{\perp}}{|q|B} \quad (2)$$

Donde v_{\perp} es la componente de la velocidad de la partícula en el plano perpendicular al campo magnético B , q es la carga de la partícula en cuestión y m su masa. La frecuencia de giro de las partículas en torno a las líneas de campo magnético, conocida como frecuencia ciclotrónica, viene dada por:

$$\omega_c = |q| B/m \quad (3)$$

2. LA FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

La solución al problema de confinar el plasma con tiempos de confinamiento de la energía del orden de 1 s, temperaturas en el rango de los 10 keV y densidades alrededor de 10^{20} m^{-3} , es crucial para la viabilidad de un reactor de fusión nuclear. Los plasmas contienen partículas cargadas cuyo comportamiento está influenciado y controlado por campos magnéticos. De ahí nacen las primeras ideas de fusión nuclear por confinamiento magnético: se puede crear una *botella magnética* en la que las partículas cargadas permanezcan confinadas el tiempo necesario para que el plasma alcance el estado de ignición. A la vez, las partículas que forman el plasma se mantienen lejos de la pared material de la *botella magnética*, evitando la contaminación del plasma y el daño en los materiales estructurales. El confinamiento magnético consiste pues en la creación de una

configuración de campos magnéticos capaces de contener el plasma con las condiciones de densidad y temperatura requeridas para alcanzar la fusión nuclear. Existen varios tipos de dispositivos de confinamiento magnético, entre ellos el *Tokamak*¹ y el *Stellarator*² son los que han alcanzado el mayor nivel de desarrollo en los últimos años. La mayor parte del esfuerzo internacional dirigido a conseguir la fusión se ha concentrado en el confinamiento magnético en dispositivos de geometría toroidal y en particular en el concepto *Tokamak*.

2.1 Calentamiento y confinamiento

Dada la capacidad de los dispositivos de fusión nuclear para confinar energía y partículas, los parámetros del plasma tales como la temperatura y densidad, decrecen gradualmente cuando nos desplazamos radialmente desde el centro del plasma a la periferia del mismo. Uno de los principales problemas del confinamiento en plasmas es encontrar las reglas que determinan la forma y las inhomogeneidades de los parámetros del plasma. Las elevadas temperaturas (del orden de millones de grados) características de los plasmas de fusión nuclear se pueden mantener mediante inyección de energía por medio de una fuente externa, denominados sistemas de calentamiento. En dispositivos Tokamak el calentamiento óhmico no permite alcanzar parámetros del plasma relevantes para reactores nucleares, mientras que en dispositivos Stellarator (dispositivos sin corriente eléctrica) este mecanismo de calentamiento es irrelevante. Por este motivo, se han desarrollado métodos de calentamiento auxiliar en base a la inyección de haces de partículas neutras energéticas e inyección de radio-frecuencia.

Los haces de partículas neutras (*NBI*), generados a partir de iones positivos y negativos, con energías en el rango de los 100 keV y con potencias totales de hasta 40MW pueden atravesar la “botella magnética” que confina el plasma, colisionar con las partículas y finalmente ionizarse y confinarse transfiriendo su energía a las partículas del plasma. Durante los últimos años ha tenido lugar un significativo avance en el desarrollo de las fuentes de iones negativos. Este esfuerzo tecnológico está motivado por

las necesidades de calentamiento del plasma en dispositivos de grandes dimensiones y plasmas de alta densidad y elevada temperatura, características de los futuros reactores de fusión nuclear. En estas condiciones se necesitarían iones positivos en el rango de energías de 300 keV para alcanzar un grado de penetración adecuada en el plasma. Sin embargo, en este rango de energías la sección eficaz de neutralización de iones positivos no es lo suficientemente efectiva.

El calentamiento del plasma con ondas de radio-frecuencia (RF) tiene lugar a través de una amplia gama de procesos de absorción resonantes en el plasma. En particular, el calentamiento a la frecuencia ciclotrónica de los iones opera en el rango de frecuencia de los 30-120 MHz mientras que los procesos de absorción a la frecuencia resonante de los electrones tiene lugar en el rango de los 30-140 GHz. En la actualidad existen sistemas de calentamiento RF capaces de liberar 20 MW de potencia.

La energía depositada en el interior del plasma fluye a las regiones más frías (periféricas) en un determinado tiempo que se denomina *tiempo de confinamiento de la energía* τ_E . Este tiempo característico del plasma, tiene una importancia clave para la fusión nuclear, al ser uno de los factores que intervienen en el criterio de Lawson. Como ya se ha indicado anteriormente la fusión nuclear por confinamiento magnético tiene lugar si el tiempo de confinamiento de la energía es suficientemente elevado (1 segundo) en plasmas de elevada temperatura (10 keV) y suficiente densidad (10^{20} partículas/m³). El tiempo de confinamiento se define mediante la Ecuación de balance de energía:

$$\frac{d}{dt} W_{plasma} = P_{calentamiento} - \frac{W_{plasma}}{\tau_E} \quad (4)$$

Donde W_{plasma} es la energía total del plasma (es decir, la integral de volumen de la energía interna del plasma) y $P_{calentamiento}$ es la potencia de calentamiento suministrada al plasma.

2.2 Transporte y campos eléctricos

El mecanismo físico responsable del impacto de los campos eléctricos en transporte se puede entender cualitativamente de la siguiente manera: la presencia de campos

eléctricos radiales con cizalla (*shear*) produce gradientes radiales en la velocidad de deriva de las partículas que se mueven en presencia de campos eléctricos (E_r) y magnéticos (B) perpendiculares entre sí. Esta deriva viene dada por $v = E_r / B$ y no depende ni de la masa ni de la carga de las partículas, lo cual garantiza su carácter universal. Cuando el cambio de velocidad alcanza un cierto valor crítico las estructuras generadas por la presencia de inestabilidades en el plasma pueden fragmentarse produciéndose una reducción del nivel de turbulencia. Este efecto se puede expresar mediante un tiempo de decorrelación que es proporcional al inverso del gradiente radial del campo eléctrico:

$$\tau_c = \left[\frac{1}{B} \frac{dE_r}{dr} \right]^{-1} \quad (5)$$

Por otra parte, el tiempo de decorrelación debido a los procesos de difusión inducidos por la turbulencia ambiental del plasma se puede expresar como:

$$\tau_d = \Delta^2 / D \quad (6)$$

Donde Δ es la escala radial del transporte turbulento y D es el coeficiente de difusión.

Cuando se verifica la condición $\tau_c < \tau_d$ hay una reducción en la escala radial del transporte turbulento y como consecuencia el nivel de transporte de naturaleza turbulenta disminuye.

Dado el papel crucial que los campos eléctricos desempeñan en transporte es importante identificar los factores que lo determinan. De la ecuación de balance radial de fuerzas se puede demostrar que en estado estacionario se verifica [11]:

$$\frac{E_r}{B} = -V_\theta + V_\phi \frac{B_\theta}{B} + \frac{1}{ZeBn} \frac{dP}{dr} \quad (7)$$

Esta expresión muestra que los campos eléctricos radiales se pueden generar mediante rotación poloidal V_θ y toroidal V_ϕ y mediante la acción de gradientes de presión. Clarificar los mecanismos físicos que modifican la rotación del plasma y los gradientes de presión es por tanto la clave para configurar la estructura de campos eléctricos.

3. SISTEMAS DE DIAGNÓSTICO

El control de la reacción de fusión, su optimización y los estudios científicos necesarios para entender y predecir el comportamiento de los plasmas requieren el conocimiento de multitud de parámetros de los mismos. Debido a las dificultades que esto conlleva, es necesario recurrir a una gran variedad de técnicas, abarcando un amplio rango de tecnologías: alto vacío, espectroscopia activa/pasiva (en un espectro que va desde la radiofrecuencia hasta los rayos X), emisión y recepción de partículas, bobinas magnéticas y sondas eléctricas. Algunas de estas técnicas o métodos de diagnóstico se emplean para medir un mismo parámetro por vías diferentes y así establecer una mayor fiabilidad en la medida.

A continuación se resumen las características básicas de algunos de los sistemas básicos de diagnóstico empleados:

- La *espectroscopia visible* aprovecha la radiación emitida en el visible por distintas especies atómicas (H, C, O,...) para obtener información de la temperatura del plasma. En algunos casos estudiando el corrimiento Doppler de la radiación emitida, se puede obtener información de la velocidad de las partículas, así como de la distribución espacial de impurezas.
- La dispersión *Thomson* consiste en inyectar un haz láser en el plasma que por interacción con éste, se dispersa. La onda dispersada tiene una frecuencia ligeramente diferente de la frecuencia de la onda incidente, y este cambio en frecuencia está relacionado con la velocidad de las partículas del plasma y por tanto con la temperatura de éste. La intensidad del haz dispersado está relacionada con la densidad local del plasma en la zona de interacción. La técnica permite obtener perfiles radiales de densidad y temperatura, constituyendo en muchos dispositivos uno de los diagnósticos básicos del plasma.
- El diagnóstico de *interferometría de microondas* se basa en la medida del desfase que una onda electromagnética sufre cuando se propaga en el plasma. El índice de refracción está determinado por la densidad electrónica. Midiendo la diferencia de fase entre un haz

de microondas que atraviesa una cuerda de plasma y otro (de la misma frecuencia) que viaja por el aire o vacío, se obtiene información de la densidad del plasma. La medida no tiene resolución espacial, puesto que proporciona la densidad integrada a lo largo de la cuerda recorrida por el haz de microondas (densidad de línea), sin embargo esta medida resulta muy útil y es éste uno de los diagnósticos básicos en muchos dispositivos de fusión, proporcionando información del comportamiento global de la densidad del plasma.

- La *sonda de iones pesados (HIBP)* permite obtener información de la densidad y el potencial del plasma con buena resolución espacial y temporal. Se basa en la inyección de iones pesados (normalmente Cs⁺) que por interacción con el plasma se ionizan nuevamente pasando a Cs⁺⁺. Debido al campo magnético en el seno del plasma, la trayectoria de estos iones secundarios se desvía de la dirección inicial. El flujo de iones secundarios está relacionado con la densidad electrónica del plasma en la zona donde se produjo la ionización, y la energía de estos iones tiene relación con el potencial en el punto de ionización.
- *Radiometría de emisión electrónica ciclotrónica (ECE³)*. Debido a su movimiento de rotación en torno al campo magnético, los electrones en el plasma emiten radiación a la frecuencia ciclotrónica, así como en algunos de sus armónicos. La intensidad de la radiación emitida está directamente relacionada con la temperatura electrónica, estando la frecuencia de esta radiación determinada por la intensidad del campo magnético en la zona de emisión.

4. DISPOSITIVOS TOKAMAK

El *Tokamak* es un sistema toroidal en donde el plasma es confinado mediante campos magnéticos. El campo magnético principal es el toroidal, producido por la corriente que circula en bobinas externas dispuestas en secciones transversales del toro (Figura 2 a), sin embargo éste no es el único que hace posible el confinamiento del plasma. Para 20

Optimizar los valores del cociente entre la presión del plasma y la presión magnética (β) en el plasma para alcanzar los valores requeridos en un reactor de fusión es uno de los objetivos prioritarios del programa internacional de fusión nuclear por confinamiento magnético. Dado que la potencia de fusión termonuclear (P_{th}) viene dada por $P_{th} \approx \beta^2 \beta^4$, donde B es el campo magnético confinante, se precisa un valor de β en el rango del 10% en plasmas de fusión nuclear para asegurar su viabilidad económica. Tal objetivo requiere un cuidadoso modelado de las configuraciones magnéticas y de los perfiles del plasma para evitar la presencia de inestabilidades. En particular, las inestabilidades generadas por gradientes de presión son consideradas como uno de los procesos determinantes que limitan el valor máximo de beta alcanzable.

Una importante pregunta a responder en los programas de investigación en curso es la dependencia del confinamiento con la transformada rotacional, ι , que es el parámetro que mide el grado de retorcimiento de las líneas de campo magnético, y se define a partir del denominado factor de seguridad “ q ” de la siguiente manera:

$$\iota \approx 2\pi/q \quad (8)$$

El factor de seguridad se define como el número de vueltas toroidales que da una línea de campo en una vuelta poloidal. Se puede aproximar por el siguiente valor:

$$q = \frac{rB_\phi}{R_o B_\theta} \quad (9)$$

Donde r es el radio menor, R_o el radio mayor, B_ϕ el campo magnético toroidal y B_θ el campo magnético poloidal en la superficie de radio menor “ r ”. Si el valor de “ q ” es racional, la línea de campo se cerrará sobre sí misma después de algunas vueltas toroidales, con lo que en ese radio no habrá una superficie magnética completa, trayendo consigo importantes implicaciones en la estabilidad del plasma.

Con la actual tecnología, el campo magnético toroidal máximo producido por las bobinas podría

estar limitado alrededor de 12 T, sin embargo utilizando conductores de mejores características se podrían alcanzar hasta 16 T (Wesson, 1997). Este valor máximo en el campo magnético toroidal se obtiene en la parte interna de la bobina; dado que el campo toroidal es inversamente proporcional al radio mayor, el campo resultante en el centro del plasma sería alrededor de 6-8 T. Valores algo inferiores a estos están presentes en los actuales grandes Tokamak.

El campo magnético poloidal es típicamente un orden de magnitud inferior que el campo toroidal. Corrientes alrededor de varios mega amperios son utilizadas en los Tokamak, como ejemplo los 7 MA que se han alcanzado en el Tokamak *JET* (*Joint European Torus*). Un posible reactor de fusión basado en el concepto Tokamak requeriría corrientes del orden de 20-30 MA.

El control de la forma y posicionamiento del plasma requiere de corrientes toroidales adicionales. Estas corrientes se logran con bobinas estratégicamente colocadas alrededor de la cámara de vacío como se muestra en la Figura 3.

Los procesos que limitan el confinamiento del plasma en Tokamak no están aún bien comprendidos. Sin embargo, se ha encontrado experimentalmente una relación entre la mejora de confinamiento esperada y el tamaño del dispositivo. Típicamente los mejores tiempos de confinamiento de energía para los Tokamak existentes van en relación a $(r_p^2/2)$ (Wesson, 1997) donde r_p es el radio medio menor del plasma. Tiempos de confinamiento de la energía mayores a un segundo han sido obtenidos en el Tokamak *JET*.

Las temperaturas que se alcanzan en plasmas producidos en Tokamak son del orden de algunos keV por medio del calentamiento óhmico del plasma. Las temperaturas requeridas mayores que 10 keV son alcanzadas por calentamiento adicional empleando haces de partículas neutras u ondas electromagnéticas. La densidad de partículas típica está en el rango de 10^{19} - 10^{20} m⁻³, un factor 10^6 más bajo que en la atmósfera. Como se mencionó anteriormente, el plasma se encuentra confinado dentro de la cámara de vacío y se deben minimizar al máximo la presencia de impurezas, dado que estas producen pérdidas por radiación y diluyen el material ionizado. La restricción de la entrada de impurezas al plasma juega un papel

fundamental para el éxito de la operación, para ello, dos técnicas son comúnmente utilizadas: la primera es definir una barrera externa con un material limitador, y la segunda es mantener las partículas alejadas de la cámara de vacío por medio de la modificación del campo magnético para producir un divertorⁱ magnético.

5. ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REACTOR)

El principal objetivo del programa *ITER* (ITER, 1988) fue diseñar un Tokamak que pudiera demostrar la ignición controlada en plasmas de deuterio-tritio. Para la construcción de este Tokamak se requiere desarrollar tecnologías apropiadas que permitan altas tasas de transferencia de calor y flujo de neutrones hacia sus componentes. El campo magnético toroidal de 13 T, será producido por 20 bobinas superconductoras de Niobio-Estaño (Nb₃-Sn).

Para limitar el calentamiento nuclear y la degradación del aislamiento en las bobinas el espesor mínimo de la cámara de vacío debe ser aproximadamente de 1.3 m. La Tabla 1 resume los parámetros de diseño de ITER y en la Figura 4 se muestra un esquema del dispositivo. Para la ignición del plasma se requiere una temperatura media de 10 keV y una densidad de 10²⁰ m⁻³. Será necesario diseñar un divertor con capacidad para reducir a menos de 5 MW m⁻² el flujo de energía del plasma de manera que al propagarse fuera de la última superficie cerrada de flujo hacia las superficies sólidas termine por convertirse en un plasma denso y frío.

6. DISPOSITIVOS STELLARATOR

El concepto Stellarator se debe a Lyman Spitzer (Spitzer, 1958). En principio la geometría Stellarator es similar a la del Tokamak, aproximadamente toroidal, si bien en general no son axisimétricos (Alejaldre, 1990). La diferencia más importante entre el Tokamak y el Stellarator radica en la forma de generar el campo magnético encargado de confinar el plasma. Como ya se ha mencionado, en el dispositivo Tokamak se genera

un campo magnético toroidal por medio de bobinas externas por las que se hace circular corriente, mientras que la componente poloidal del campo magnético se genera induciendo una corriente que circula a través del propio plasma. En el caso del Stellarator, tanto la componente toroidal del campo magnético como la componente poloidal se generan por medio de bobinas externas.

La Figura 5 muestra esquemas correspondientes a los Stellarator TJ-II y W7-X y sus características principales se resumen en la Tabla 2.

El hecho de que en un Tokamak el campo magnético poloidal se genere por medio de una corriente inducida, impone limitaciones al funcionamiento de la máquina. Por un lado, dado que no se puede estar incrementando la corriente en el primario por tiempo indefinido, el funcionamiento ha de ser pulsado, lo cual no es conveniente para un reactor, debido a los problemas que un funcionamiento de este tipo supone en cuanto a tensiones en materiales y cambios bruscos de temperatura. Este problema no se presenta en el Stellarator puesto que no hay una inducción de corriente, y en principio se podría mantener un funcionamiento continuo.

Por otra parte, el campo magnético está íntimamente acoplado al plasma, esto es, el propio plasma contribuye a definir la topología magnética encargada de confinarlo, lo cual da lugar a problemas para su control. En el caso del Stellarator, el plasma y la estructura magnética que lo confina están esencialmente desacoplados.

El propio diseño y la construcción de un Stellarator es una tarea difícil y constituyen en sí mismas un reto tecnológico (Carreras, 1988), puesto que pequeños errores en el cálculo o la fabricación de las bobinas externas pueden suponer errores de campo magnético importantes (Figura 6); quizá sea esta una de las razones por la que esta línea de confinamiento tardó más en desarrollarse y de que actualmente esté más avanzado el modelo Tokamak, siendo en este tipo de máquinas donde se han conseguido mejores resultados en cuanto a parámetros globales del plasma como densidad, temperatura o tiempos de confinamiento. La geometría de los Stellarators es más compleja que la de los Tokamaks, no teniendo en general simetría respecto al eje, por lo que tanto la componente toroidal como la poloidal del campo magnético dependen de la posición y varían poloidalmente. También las superficies de

flujo tienen una geometría más complicada que en los Tokamak. Dos parámetros característicos de un Stellarator son el número de períodos toroidales (M) y el orden multipolar (l), número de bobinas con que se crea el campo poloidal.

Un parámetro importante tanto en Stellarator como en Tokamak, es la variación con el radio de la transformada rotacional: cizalladura magnética. Cuando se tiene una variación muy grande con el radio de la transformada rotacional, en la región de confinamiento del plasma hay muchos puntos en los que ι toma un valor racional, lo que puede originar la formación de islas magnéticas que afectan al transporte de partículas y energía. La extensión radial de estas islas está relacionada inversamente con la variación radial de ι . Además de la cizalladura magnética, es importante para la estabilidad magnetohidrodinámica del plasma el perfil radial del volumen específico que viene dado por:

$$V'(\psi) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \int \frac{dl}{B} \quad (10)$$

El súper índice denota la derivada con respecto al flujo magnético (Ψ) y N es el número de tránsitos toroidales en los que se realiza el cálculo.

Donde $V''(\Psi) < 0$ se dice que la configuración tiene un pozo magnético, y donde $V''(\Psi) > 0$ se dice que existe una colina.

Actualmente, la investigación en fusión nuclear por confinamiento magnético se ha concentrado fundamentalmente en dispositivos *Stellarator* y *Tokamak*, siendo la mayoría de los dispositivos en funcionamiento del tipo Tokamak. Sin embargo, hay que considerar que el dispositivo tipo *Stellarator* es apropiado para una operación de funcionamiento continuo mientras que el *Tokamak* sin la implementación de componentes auxiliares sólo puede trabajar en modo pulsado. Por otro lado, en los *Stellarator* el campo magnético se produce únicamente por medio de bobinas externas, lo que supone otra ventaja sobre los *Tokamaks*.

8. DISPOSITIVOS LINEALES

Indudablemente, los dispositivos precursores de los complejos Tokamaks y Stellarators fueron las máquinas lineales de plasmas fríos. Estos dispositivos generan un campo magnético que varía

linealmente sobre el eje Z y que produce fuerzas capaces de contener a las partículas atrapadas en esa botella magnética que se forma (Ley de Gauss para el magnetismo). Debido a que las líneas de fuerza convergen y divergen en determinadas zonas, aparece también una componente radial del campo magnético B_r , que se deduce a partir de $\nabla \cdot B = 0$, de la siguiente manera:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r B_r) + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

Si se considera $\partial B_z / \partial z = \text{constante}$, entonces integrando la ecuación se obtiene aproximadamente:

$$B_r = -\frac{1}{2} r \left[\frac{\partial B_z}{\partial z} \right]_{r=0} \quad (12)$$

La variación de $|B|$ con el radio causa un gradiente en el campo magnético el cual conduce a la aparición de una deriva de las partículas sobre el eje de simetría de la máquina, sin embargo no se produce una deriva radial puesto que el campo magnético en la dirección poloidal se mantiene invariable ($\partial B / \partial \theta = 0$).

En este caso, las componentes de la fuerza de Lorentz son:

$$F_r = q(v_\theta B_z - v_z B_\theta) \quad (1)$$

$$F_\theta = q(-v_r B_z + v_z B_r) \quad (2) \quad (3)$$

$$F_z = q(v_r B_\theta - v_\theta B_r) \quad (4) \quad (13)$$

De las anteriores ecuaciones (Chen, 1984), dos términos desaparecerán si $B_\theta = 0$, mientras que los términos 1 y 2 producirán el usual giro de Larmor de las partículas de radio $r = r_L$. El término 3 corresponde a una fuerza azimutal que causa una deriva de las partículas en la dirección radial que se anula en el eje ($r = 0$), esta deriva hace que los centros de giro de las partículas sigan las líneas de fuerza del campo magnético. Fijando la atención en el término 4, utilizando la Ecuación 12 obtenemos:

$$F_z = \frac{1}{2} q v_\theta r (\partial B_z / \partial z) \quad (14)$$

Promediando su valor sobre una vuelta alrededor del eje del dispositivo (considerando que el centro guía de la partícula cae sobre el eje), con lo que v_θ se mantendrá constante y dependiendo del signo de la carga q , v_θ será $\pm v_\perp$ (velocidad de las partículas perpendicular al eje del dispositivo). Dado que $r=r_L$ la fuerza promedio sobre el eje Z viene dada por:

$$\bar{F} = \pm \frac{1}{2} q v_\perp r_L \frac{\partial B_z}{\partial z} = \pm \frac{1}{2} q \frac{v_\perp^2}{\omega_c} \frac{\partial B_z}{\partial z} = -\frac{1}{2} \frac{m v_\perp^2}{B} \frac{\partial B_z}{\partial z} = -\mu \frac{dB_z}{dz} \quad (15)$$

Se define el momento magnético de una partícula como:

$$\mu \equiv \frac{1}{2} m v_\perp^2 / B \quad (16)$$

Considerando el eje z en la dirección paralela al campo magnético se deduce de la Ecuación 15 que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m v_{||}^2}{2} \right) = -\mu \frac{dB}{dz} \frac{dz}{dt} = -\mu \frac{dB}{dt} \quad (17)$$

Considerando la conservación de la energía (en un campo magnético estático) se tiene que:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m v_{||}^2}{2} + \frac{m v_\perp^2}{2} \right) = \frac{d}{dt} \left(\frac{m v_{||}^2}{2} + \mu B \right) = 0 \quad (18)$$

De la Ecuación 17 y 18 se deduce que:

$$\begin{aligned} -\mu \frac{dB}{dt} + \frac{d}{dt} (\mu B) &= 0 \\ -\mu \frac{dB}{dt} + \mu \frac{dB}{dt} + B \frac{d\mu}{dt} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Donde $\mu = \text{constante}$.

La invarianza de μ es la base de los esquemas más fundamentales del confinamiento magnético de los plasmas. Cuando una partícula se mueve de una región de bajo campo magnético a otra de alto campo, su velocidad perpendicular v_\perp aumentará con el fin de mantener el momento magnético

constante. Dado que la energía total debe mantenerse constante, la velocidad paralela de las partículas debe disminuir. Si el campo magnético es lo suficientemente alto en el “cuello” de la botella magnética, la velocidad paralela de las partículas eventualmente caerá a cero y las partículas serán reflejadas a las zonas de bajo campo magnético, dando lugar al efecto del *espejo magnético*, cuyo principio se muestra en la Figura 7.

Básicamente los dispositivos lineales se construyen siguiendo las pautas teóricas mencionadas anteriormente. Entre sus propósitos están los estudios del comportamiento de los plasmas fríos (plasmas con temperaturas inferiores a 10 eV) y sus interacciones con la cámara de vacío, la simulación de posibles escenarios que ocurrirían en máquinas más grandes como Tokamak o Stellarators, y toda clase de estudios de transporte de partículas a bajas energías. Actualmente el concepto del dispositivo lineal de plasma se ha extendido de tal forma que existen máquinas cuyo fin no es la búsqueda del confinamiento del plasma, sino la expulsión a altas temperaturas de partículas cargadas eléctricamente a través de una tobera magnética logrando así una fuerza de empuje.

CONCLUSIONES

1. Experimentalmente se ha demostrado que la manipulación del átomo por medio de la fusión y fisión nuclear, trae consigo la generación de grandes cantidades de energía, esto debido a que al vencer las fuerzas que mantienen unidas a las partículas subatómicas del átomo, la relación de energía desprendida está gobernada por la relación matemática descubierta por Albert Einstein (1879-1955), en donde la energía que se le extrae a la materia está directamente relacionada con la masa de ésta multiplicada por una constante, fórmula reconocida mundialmente como $E=mc^2$.
2. El comportamiento de la materia a altas temperaturas queda bajo la tutela de los campos magnéticos, donde la morfología de estos estará determinado por un diseño adecuado de bobinas eléctricas capaces de generar valores de campo lo suficientemente altos (del orden de 1

Tesla) para que logren confinar en botellas magnéticas el gas ionizado.

3. El desarrollo de los sistemas de calentamiento para gases a evolucionado enormemente, incluso hoy en días nos beneficiamos diariamente de la tecnología de radio frecuencia por medio de los hornos tradicionales de microondas (Pozar, 1993), a los cuales podríamos llamar “pequeños reactores de ionización” que debido a su baja potencia, no logran simular reacciones de fusión, sin embargo, cumplen su objetivo con los alimentos basados en mecanismos de estimulación cinética de las moléculas al igual que los hacen los girotrones en los reactores de fusión nuclear.
4. El Stellarator y el Tokamak son las dos grandes corrientes tecnológicas que han surgido con el fin de simular condiciones de ignición termonuclear en una “vasija” magnética. La diferencia radica en la generación de sus campos magnéticos. A nivel mundial cientos de laboratorios se inclinan por una u otra tecnología, sin embargo al día de hoy, ningún reactor nuclear de fusión por confinamiento magnético a logrado controlar la temperatura, densidad y tiempo de confinamiento de un gas altamente ionizado, con tal de garantizar un encendido constante del plasma para extraerle energía eléctrica por medio del calor que se desprende: este es el gran reto, y la gran alianza de cooperación internacional unificada en el ITER busca darle respuesta a este enorme desafío energético, pues los medios tradicionales de energía se agotan y se busca urgentemente una salida eficiente a la crisis energética que se avecina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Weller, A. D. Cheetham, (1987). *Joint European Torus Joint Undertaking, Physics Review Letters*, 2303-2306
- Alejaldre, C., Alonso, J. J. y Botija, J. (1990). *Fusion Technology*. Vol. 17, p. 131.
- Carreras, B. A. (1997). *IEEE Transactions in Plasma Science*. Vol. 25, 1281.
- Carreras, B. A., Grieger, G. (1988). *Nuclear Fusion*. Vol. 28, p. 1613
- Chen, F. F. (1984). *Plasma Physics and Controlled Fusion*. *Plenum Press*. p. 3-17.
- Golston, R. J. y Rutherford, P. H. (1995). *Introduction to Plasma Physics*. IOP Publishing Ltd. p. 12-22.
- International Thermonuclear Experimental Reactor –ITER– (1988). The ITER Organization (www.iter.org)
- Pozar, David M. (1993). *Microwave Engineering* Addison, Wesley Publishing Company .
- T. Dolan, (2000). *Fusion Research: Principles, Experiments and Technology*. Pergamon Press.
- Wesson, J. (1997). *Tokamaks Second Edition*. Oxford Engineering Science Series. 15-30.

SOBRE EL AUTOR

Ing. Eduardo Calderón Obaldía, Ph.D, Profesor de la Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica. Investigador del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONICIT), Ministerio de Ciencia y Tecnología (MICIT).
Teléfono: 83389907 Fax: 25115610
Correo electrónico: eduardo.calderon@ucr.ac.cr

