

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 930 583**

51 Int. Cl.:

H05H 1/08 (2006.01)

H05H 1/14 (2006.01)

G21B 1/05 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.10.2015 E 19187386 (8)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **24.08.2022 EP 3589083**

54 Título: **Sistemas para la formación y mantenimiento de una FRC de alto rendimiento**

30 Prioridad:

30.10.2014 US 201462072611 P

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

19.12.2022

73 Titular/es:

TAE TECHNOLOGIES, INC. (100.0%)

19631 Pauling

Foothill Ranch, CA 92610, US

72 Inventor/es:

BINDERBAUER, MICHL;

GARATE, EUSEBIO;

PUTVINSKI, SERGEI y

GOTA, HIROSHI

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 930 583 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

Sistemas para la formación y mantenimiento de una FRC de alto rendimiento

Campo

5 Las realizaciones descritas en este documento se refieren generalmente a sistemas de confinamiento de plasma magnético y, más particularmente, a sistemas que facilitan la formación y el mantenimiento de Configuraciones de Campo Invertido con estabilidad superior, así como confinamiento de partículas, energía y flujo.

Información anterior

10 La Configuración de Campo Invertido (FRC) pertenece a la clase de topologías de confinamiento de plasma magnético conocidas como toroides compactos (CT). Exhibe campos magnéticos predominantemente poloidales y no posee ninguno o posee pequeños campos toroidales autogenerados (véase M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Los atractivos de tal configuración son su geometría simple para facilitar la construcción y el mantenimiento, un desviador natural sin estricciones magnéticas para facilitar la extracción de energía y la eliminación de cenizas, y con una β muy alta (β es la relación entre la presión promedio del plasma y la presión promedio del campo magnético dentro de la FRC), es decir, elevada densidad de potencia. La elevada naturaleza de β es ventajosa para la operación económica y para el uso de combustibles aneutrónicos, avanzados tales como D-He³ y p-B¹¹.

15 El método tradicional de formar una FRC utiliza la tecnología de estricción θ - de campo invertido, que produce plasmas calientes de alta densidad (véase A. L. Hoffman y J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Una variación de esto es el método de captura en traslación en el que el plasma creado en una "fuente" de estricción theta se expulsa más o menos inmediatamente por un extremo a una cámara de confinamiento. Luego, el plasmoides en traslación queda atrapado entre dos espejos fuertes en los extremos de la cámara (véase, por ejemplo, H. Himura, S. Okada, S. Sugimoto y S. Goto, Phys. Plasmas 2, 191 (1995)). Una vez en la cámara de confinamiento, se pueden aplicar varios métodos de calentamiento y activación por corriente, tales como inyección de haz (neutro o neutralizado), campos magnéticos giratorios, calentamiento por RF u óhmico, etc. Esta separación de las funciones de fuente y confinamiento ofrece ventajas claves de ingeniería para posibles futuros reactores de fusión. Los de FRC han demostrado ser extremadamente robustos, resistentes a eventos de formación dinámica, traslación y captura violenta. Además, muestran una tendencia a asumir un estado de plasma preferido (véase p. ej., H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller y L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). Se ha logrado un progreso significativo en la última década desarrollando otros métodos de formación de FRC: la fusión de esferomas con helicidades de dirección opuesta (véase, p. ej., Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama y T. Okazaki, Nucl. Fusión 39, 2001 (1999)) y por corriente de activación con campos magnéticos giratorios (RMF) (véase, p. ej., IR Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)) que también proporciona estabilidad adicional.

20 Recientemente, la técnica de *colisión-fusión* técnica, propuesta hace mucho tiempo (véase p. ej., D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)) se ha desarrollado significativamente adicionalmente: dos estricciones theta separadas en extremos opuestos de una cámara de confinamiento generan simultáneamente dos plasmoides y aceleran los plasmoides uno hacia el otro a alta velocidad; luego colisionan en el centro de la cámara de confinamiento y se fusionan para formar una FRC compuesta. En la construcción y operación exitosa de uno de los mayores experimentos de FRC hasta la fecha, se demostró que el método convencional de colisión-fusión produce FRC estables, de larga duración, de alto flujo y alta temperatura (véase, p. ej., M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski y col., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

25 Las FRC consisten en un toroide de líneas de campo cerrado dentro de una separadora y de una capa de borde anular en las líneas de campo abierto justo fuera de la separadora. La capa de borde coalesce en chorros más allá de la longitud de la FRC, proporcionando un desviador natural. La topología de FRC coincide con la de un plasma de Espejo de Campo Invertido. Sin embargo, una diferencia significativa es que el plasma de FRC tiene una β de aproximadamente 10. El campo magnético interno bajo inherente proporciona una cierta población de partículas cinéticas autóctonas, es decir, partículas con radios de Larmor grandes, comparables al radio menor de FRC. Son estos fuertes efectos cinéticos los que parecen contribuir, al menos parcialmente, a la gran estabilidad de las FRC pasadas y presentes, tales como las producidas en el experimento de colisión-fusión.

30 Los experimentos típicos anteriores de FRC han estado dominados por pérdidas de convección con confinamiento de energía determinadas en gran medida por el transporte de partículas. Las partículas se difunden principalmente de forma radial fuera del volumen de la separadora y luego se pierden axialmente en la capa de borde. En consecuencia, el confinamiento de FRC depende de las propiedades tanto de las regiones de líneas de campo cerrado como abierto. El tiempo de difusión de partículas fuera de la separadora escala como $\tau_{\perp} \sim a^2/D_{\perp}$ ($a \sim r_s/4$, donde r_s es el radio central de la separadora), y D_{\perp} es una característica de difusividad de FRC, tal como $D_{\perp} \sim 12.5 \rho_{ie}$, con ρ_{ie} que representa el radio de giro del ion, evaluado en un campo magnético aplicado externamente. El tiempo de confinamiento de partículas de la capa de borde τ_{\parallel} es esencialmente un tiempo de tránsito axial en experimentos anteriores de FRC. En estado estacionario, el equilibrio entre las pérdidas de partículas radiales y axiales produce una longitud $\delta \sim (D_{\perp}\tau_{\parallel})^{1/2}$ de gradiente de densidad de separadora. Las escalas de tiempo de confinamiento de partículas de FRC como

$(\tau_{\perp})^{1/2}$ para FRC anteriores que tienen una densidad sustancial en la separadora (véase, p. ej., M. TUSZEWSKI, "Field Reversed Configurations"), Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)).

Otro inconveniente de los diseños de sistemas de FRC anteriores era la necesidad de utilizar múltiples polos externos para controlar las inestabilidades rotacionales tales como las inestabilidades de intercambio de rápido crecimiento $n=2$. De esta manera, los típicos campos cuadripolares aplicados externamente proporcionaron la presión de restauración magnética requerida para amortiguar el crecimiento de estos modos inestables. Si bien esta técnica es adecuada para el control de estabilidad del plasma térmico a granel, plantea un grave problema para las FRC más cinéticas o las FRC híbridas avanzadas, donde una gran población de partículas de órbita altamente cinética se combina con el plasma térmico habitual. En estos sistemas, las distorsiones del campo magnético simétrico axialmente debidas a tales campos multipolares conducen a pérdidas de partículas rápidas y dramáticas a través de la difusión estocástica sin colisiones, una consecuencia de la pérdida de conservación del momento angular canónico. Una solución novedosa para proporcionar control de estabilidad sin mejorar la difusión de ninguna partícula es, por lo tanto, importante para aprovechar el mayor potencial de rendimiento de estos conceptos avanzados de FRC nunca antes explorados.

A la luz de lo anterior, por lo tanto, es deseable mejorar el confinamiento y la estabilidad de las FRC a fin de utilizar las FRC de estado estacionario como vía para toda una variedad de aplicaciones, incluidas las fuentes de neutrones compactas (para la producción de isótopos médicos, la remediación de desechos nucleares, investigación de materiales, radiografía y tomografía de neutrones), fuentes compactas de fotones (para producción y tratamiento químico), sistemas de separación y enriquecimiento de masas, y núcleos de reactores para la fusión de núcleos ligeros para la futura generación de energía. El documento WO2013/074666-A2 describe un sistema de FRC que tiene un recipiente de confinamiento central rodeado por dos secciones de formación de estricción theta de campo invertido diametralmente opuestas y, más allá de las secciones de formación, dos cámaras desviadoras para controlar la densidad neutra y la contaminación por impurezas. Un sistema magnético que tiene una serie de bobinas cuasi cc se coloca axialmente a lo largo de los componentes del sistema de FRC, bobinas de espejo cuasi cc entre la cámara de confinamiento y las secciones de formación adyacentes, y enchufes de espejo entre las secciones de formación y los desviadores. Las secciones de formación incluyen sistemas modulares de formación de energía pulsada que permiten que las FRC se formen in situ y luego se aceleren e inyecten (formación estática) o se formen y aceleren simultáneamente (formación dinámica). El sistema de FRC incluye además inyectores de haz de átomos neutros, un inyector de gránulos, sistemas de adsorción, cañones de plasma axial y electrodos de polarización de superficie de flujo.

ROGER RAMAN: "Fuelling Requirements for Advanced Tokamak Operation" ("Requisitos de abastecimiento de combustible para la operación avanzada de Tokamak", 32ND EPS CONFERENCE ON PLASMA PHYS, TARRAGONA, vol. 29C, 27 de junio de 2005 (2005-06-27), páginas 1-4, XP55438760, ISBN: 978-0-660-19890-3 da a conocer aspectos relacionados con el funcionamiento de Tokamak.

35 Compendio

La presente solicitud proporciona un sistema para generar y mantener un plasma en un campo magnético con una configuración de campo invertido según las reivindicaciones que siguen.

Los sistemas, características y ventajas de la invención serán o resultarán evidentes para un experto en la técnica tras el examen de las siguientes figuras y la descripción detallada. Se pretende que el alcance de la invención esté definido por las reivindicaciones.

Breve descripción de las figuras

Los dibujos adjuntos, que se incluyen como parte de la presente memoria descriptiva, ilustran una realización y, junto con la descripción general dada anteriormente y la descripción detallada de la realización dada a continuación, sirven para explicar y enseñar los principios de la presente invención.

Figura 1 ilustra el confinamiento de partículas en el presente sistema de FRC bajo un régimen de FRC de alto rendimiento (HPF) frente a un régimen de FRC convencional (CR) y frente a otros experimentos de FRC convencionales.

Figura 2 ilustra los componentes del presente sistema de FRC y la topología magnética de una FRC producible en el presente sistema de FRC.

Figura 3A ilustra el diseño básico del sistema de FRC actual visto desde arriba, que incluye una disposición de haces neutros, electrodos, cañones de plasma, enchufes de espejo e inyector de gránulos.

Figura 3B ilustra el recipiente de confinamiento central visto desde arriba y muestra los haces neutros dispuestos en un ángulo normal al eje principal de simetría en el recipiente de confinamiento central.

Figura 3C ilustra el recipiente de confinamiento central visto desde arriba y muestra los haces neutros dispuestos en un ángulo menor que la normal al eje principal de simetría en el recipiente de confinamiento central y dirigidos para inyectar partículas hacia el plano medio del recipiente de confinamiento central.

5 **Figura 4** ilustra un esquema de los componentes de un sistema de energía pulsada para las secciones de la formación.

Figura 5 ilustra una vista isométrica de un patín de formación de energía pulsada individual.

Figura 6 ilustra una vista isométrica de un conjunto de tubos de formación.

Figura 7 ilustra una vista isométrica en sección parcial del sistema de haz neutro y los componentes clave.

Figura 8 ilustra una vista isométrica de la disposición del haz neutro en la cámara de confinamiento.

10 **Figura 9** ilustra una vista isométrica en sección parcial de una disposición de los sistemas de adsorción de Ti y Li.

Figura 10 ilustra una vista isométrica en sección parcial de un cañón de plasma instalado en la cámara del desviador. También se muestran el enchufe de espejo magnético asociado y un conjunto de electrodo desviador.

15 **Figura 11** ilustra una disposición de un electrodo de polarización anular en el extremo axial de la cámara de confinamiento.

20 **Figura 12** ilustra la evolución del radio de flujo excluido en el sistema de FRC obtenido a partir de una serie de bucles diamagnéticos externos en las dos secciones de formación de estricción-theta de campo invertido y sondas magnéticas integradas dentro de la cámara central de confinamiento de metal. El tiempo se mide desde el instante de la inversión de campo sincronizada en las fuentes de formación, y la distancia z se da en relación con el plano medio axial de la máquina.

25 Las Figuras 13 (a) a (d) ilustran los datos de una descarga no sostenida no HPF representativa en el sistema actual de FRC. Como funciones de tiempo se muestran (a) el radio de flujo excluido en el plano medio, (b) 6 cuerdas de densidad integrada en línea del interferómetro de CO₂ del plano medio, (c) perfiles radiales de densidad invertida de Abel procedentes de los datos del interferómetro de CO₂, y (d) temperatura total del plasma a partir del equilibrio de presión.

Figura 14 ilustra los perfiles axiales de flujo excluidos en instantes seleccionados para la misma descarga del presente sistema de FRC que se muestra en la Figura 13.

30 **Figura 15** ilustra una vista isométrica de las bobinas de asiento montadas fuera de la cámara de confinamiento.

Figura 16 ilustra las correlaciones de la vida útil de la FRC y la longitud del pulso de los haces neutros inyectados. Como se muestra, los pulsos de haz más largos producen las FRC de mayor duración.

Figura 17 ilustra los efectos individuales y combinados de diferentes componentes del sistema de FRC en el rendimiento de la FRC y el logro del régimen HPF.

35 Descripción detallada

40 Las presentes realizaciones proporcionadas en la presente memoria están dirigidas a sistemas que facilitan la formación y el mantenimiento de Configuraciones de Campo Invertido (FRC) de Alto Rendimiento con una estabilidad superior, así como un confinamiento superior de partículas, energía y flujo sobre las FRC convencionales. Dichas FRC de Alto Rendimiento proporcionan un camino hacia una total variedad de aplicaciones que incluyen fuentes compactas de neutrones (para producción de isótopos médicos, remediación de residuos nucleares, investigación de materiales, radiografía y tomografía de neutrones), fuentes compactas de fotones (para producción y tratamiento químico), sistemas de separación y de enriquecimiento de masas y núcleos de reactores para la fusión de núcleos ligeros para la futura generación de energía.

45 Se han explorado varios sistemas auxiliares y modos operativos para evaluar si existe un régimen de confinamiento superior en las FRC. Estos esfuerzos han llevado a descubrimientos revolucionarios y al desarrollo de un paradigma de FRC de Alto Rendimiento descrito en la presente memoria. De acuerdo con este nuevo paradigma, los sistemas y métodos actuales combinan una gran cantidad de ideas y medios novedosos para mejorar drásticamente el confinamiento de FRC como se ilustra en la Figura 1, así como para proporcionar control de estabilidad sin efectos secundarios negativos. Como se analiza con mayor detalle a continuación, la Figura 1 representa el confinamiento de partículas en un sistema 10 de FRC descrito a continuación (véanse las Figuras 2 y 3), que opera de acuerdo con un régimen FRC de Alto Rendimiento (HPF) para formar y mantener una FRC en función de operar de acuerdo con un régimen convencional CR para formar y mantener una FRC, y en función de confinamiento de partículas de acuerdo

con regímenes convencionales para formar y mantener una FRC usada en otros experimentos. La presente descripción esbozará y detallará los componentes individuales innovadores del sistema 10 de FRC y los métodos, así como sus efectos colectivos.

Descripción del Sistema de FRC

5 Sistema de vacío

Las Figuras 2 y 3 representan un esquema del presente sistema 10 de FRC. El sistema 10 de FRC incluye un recipiente central 100 de confinamiento rodeado por dos secciones 200 de formación de estricción theta de campo invertido diametralmente opuestas y, más allá de las secciones 200 de formación, dos cámaras 200 de desviador para controlar la densidad neutra y la contaminación por impurezas. El presente sistema 10 de FRC fue construido para acomodar un vacío ultra-elevado y opera a presiones base típicas de 10^{-8} torr. Dichas presiones de vacío requieren el uso de bridas de acoplamiento de doble bomba entre los componentes de acoplamiento, juntas tóricas de metal, paredes interiores de alta pureza, así como un cuidadoso acondicionamiento superficial inicial de todas las piezas antes del ensamblaje, tal como limpieza física y química seguida de un horneado al vacío de 24 horas a 250 °C y limpieza con descarga luminiscente de hidrógeno.

Las secciones 200 de formación de estricción theta de campo invertido son retracciones magnéticas theta de campo invertido estándar (FRTP), aunque con un sistema avanzado de formación de energía pulsada que se analiza en detalle a continuación (véanse las Figuras 4 a 6). Cada sección 200 de formación está hecha de tubos de cuarzo de grado industrial opacos estándar que cuentan con un revestimiento interior de cuarzo ultra puro de 2 milímetros. La cámara 100 de confinamiento está hecha de acero inoxidable para permitir una multitud de orificios radiales y tangenciales; también sirve como conservador de flujo en la escala de tiempo de los experimentos que se describen a continuación y limita los transitorios magnéticos rápidos. Los vacíos se crean y mantienen dentro del sistema 10 de FRC con un conjunto de bombas secas de desbaste en espiral, bombas turbo moleculares y bombas criogénicas.

Sistema Magnético

El sistema magnético 400 se ilustra en las Figuras 2 y 3. La Figura 2, entre otras características, ilustra un flujo magnético de FRC y contornos de densidad (como funciones de las coordenadas radiales y axiales) pertenecientes a una FRC 450 producible por el sistema 10 de FRC. Estos contornos se obtuvieron mediante una simulación numérica Hall-MHD resistiva de 2-D utilizando código desarrollado para simular sistemas y métodos correspondientes al sistema 10 de FRC, y concuerdan bien con los datos experimentales medidos. Como se ve en la Figura 2, la FRC 450 consta de un toroide de líneas de campo cerradas en el interior 453 de la FRC 450 dentro de una separadora 451, y de una capa 456 de borde anular en las líneas 452 de campo abiertas justo fuera de la separadora 451. La capa 456 de borde coalesce en chorros 454 más allá de la longitud de FRC, proporcionando un desviador natural.

El sistema magnético principal 410 incluye una serie de bobinas cuasi cc 412, 414 y 416 que están situadas en posiciones axiales particulares a lo largo de los componentes, es decir, a lo largo de la cámara 100 de confinamiento, las secciones 200 de formación y los desviadores 300 del sistema 10 de FRC. Las bobinas cuasi-cc 412, 414 y 416 son alimentadas por fuentes de alimentación conmutadas cuasi-cc y producen campos de polarización magnéticos básicos de aproximadamente 0,1 T en la cámara 100 de confinamiento, las secciones 200 de formación y los desviadores 300. Además de las bobinas cuasi cc 412, 414 y 416, el sistema magnético principal 410 incluye bobinas cuasi cc 420 de espejo (alimentadas por suministros de conmutación) entre cualquier extremo de la cámara 100 de confinamiento y las secciones 200 de formación adyacentes. Las bobinas cuasi cc 420 de espejo proporcionan relaciones de espejo magnético de hasta 5 y se puede energizar de forma independiente para el control de la conformación del equilibrio. Además, los enchufes 440 de espejo están colocados entre cada una de las secciones 200 de formación y los desviadores 300. Los enchufes 440 de espejo comprenden bobinas cuasi-cc compactas 430 de espejo y bobinas 444 de enchufe de espejo. Las bobinas cuasi-cc 430 de espejo incluyen tres bobinas 432, 434 y 436 (alimentadas por suministros de conmutación) que producen campos de guía adicionales para enfocar las superficies 455 de flujo magnético hacia el paso 442 de pequeño diámetro que atraviesa las bobinas 444 del enchufe de espejo. Las bobinas 444 del enchufe de espejo, que se enrollan alrededor del paso 442 de pequeño diámetro y son alimentadas por circuitos LC de potencia pulsada, producen fuertes campos de espejo magnético de hasta 4 T. El propósito de esta disposición completa de bobinas es agrupar y guiar firmemente las superficies 455 de flujo magnético y los chorros 454 de plasma de flujo final hacia las cámaras remotas 310 de los desviadores 300. Finalmente, un conjunto de "antenas" 460 de bobina de desviación (véase la Figura 15) están ubicadas fuera de la cámara 100 de confinamiento, dos a cada lado del plano medio, y son alimentadas por fuentes de alimentación. Las antenas 460 de bobina de desviación pueden configurarse para proporcionar un campo magnético dipolar o cuadrupolar casi estático de aproximadamente 0,01 T para controlar inestabilidades rotacionales y/o controlar la corriente de electrones. Las antenas 460 de bobina de desviación pueden proporcionar de manera flexible campos magnéticos que son simétricos o anti-simétricos con respecto al plano medio de la máquina, dependiendo de la dirección de las corrientes aplicadas.

Sistemas de formación de energía pulsada

Los sistemas 210 de formación de energía pulsada funcionan según un principio de estricción theta modificado. Hay dos sistemas, cada uno de los cuales alimenta una de las secciones 200 de formación. Las Figuras 4 a 6 ilustran los

bloques de construcción principales y la disposición de los sistemas 210 de formación. El sistema 210 de formación se compone de una disposición de energía pulsada modular que consiste en unidades individuales (=patines) 220, cada uno de los cuales energiza un subconjunto de bobinas 232 de un conjunto 230 de correas (=correas) que se enrollan alrededor de los tubos 240 de cuarzo de formación. Cada patín 220 está compuesto por condensadores 221, inductores 223, conmutadores rápidos 225 de alta corriente y el disparador 222 y circuitos 224 de descarga asociados. En total, cada sistema 210 de formación almacena entre 350 y 400 kJ de energía capacitiva, que proporciona hasta 35 GW de potencia para formar y acelerar las FRC. La operación coordinada de estos componentes se logra a través de un sistema de activación y control 222 y 224 de última generación que permite la temporización sincronizada entre los sistemas 210 de formación en cada sección 200 de formación y minimiza la fluctuación de conmutación a decenas de nanosegundos. La ventaja de este diseño modular es su operación flexible: las FRC pueden formarse in situ y luego acelerarse e inyectarse (=formación estática) o formarse y acelerarse al mismo tiempo (=formación dinámica).

Inyectores de haz neutro

Los haces 600 de átomos neutros se despliegan en el sistema 10 de FRC para proporcionar calentamiento y accionamiento de corriente, así como para desarrollar una presión de partículas rápida. Como se muestra en las Figuras 3A, 3B y 8, las líneas de haz individuales que comprenden los sistemas 610 y 640 inyectores de haz de átomos neutros están ubicadas alrededor de la cámara 100 de confinamiento central e inyectan partículas rápidas tangencialmente al plasma de FRC (y perpendiculares o en un ángulo normal al eje principal de simetría en el recipiente 100 de confinamiento central) con un parámetro de impacto tal que la zona de captura objetivo se encuentra bien dentro de la separadora 451 (véase la Figura 2). Cada sistema inyector 610 y 640 es capaz de inyectar hasta 1 MW de potencia de haz neutro en el plasma de FRC con energías de partículas de entre 20 y 40 keV. Los sistemas 610 y 640 se basan en fuentes de extracción de múltiples aperturas de iones positivos y utilizan enfoque geométrico, enfriamiento por inercia de las rejillas de extracción de iones y bombeo diferencial. Además de usar diferentes fuentes de plasma, los sistemas 610 y 640 se diferencian principalmente por su diseño físico para cumplir con sus respectivas ubicaciones de montaje, lo que proporciona capacidades de inyección lateral y superior. Los componentes típicos de estos inyectores de haz neutro se ilustran específicamente en la Figura 7 para los sistemas inyectores laterales 610. Como se muestra en la Figura 7, cada sistema individual 610 de haz neutro incluye una fuente 612 de plasma de RF en un extremo de entrada (esto se sustituye por una fuente de arco en los sistemas 640) con una pantalla magnética 614 cubriendo el extremo. Una fuente óptica de iones y rejillas 616 de aceleración están acopladas a la fuente 612 de plasma y una válvula 620 de compuerta está colocada entre la fuente óptica de iones y rejillas 616 de aceleración y un neutralizador 622. Un imán 624 de deflexión y un descargador 628 de iones están ubicados entre el neutralizador 622 y un dispositivo 630 de puntería en el extremo de salida. Un sistema de enfriamiento comprende dos refrigeradores criogénicos 634, dos paneles criogénicos 636 y una cubierta 638 de LN₂. Este diseño flexible permite la operación en una amplia gama de parámetros de FRC.

Una configuración alternativa para los inyectores 600 de haz de átomos neutros es la de inyectar las partículas rápidas tangencialmente al plasma de FRC, pero con un ángulo A inferior a 90° con respecto al eje mayor de simetría en el recipiente 100 de confinamiento central. Estos tipos de orientación de los inyectores 615 de haz se muestran en la Figura 3C. Además, los inyectores 615 de haz pueden orientarse de manera que los inyectores 615 de haz a cada lado del plano medio del recipiente 100 de confinamiento central inyecten sus partículas hacia el plano medio. Finalmente, la posición axial de estos sistemas 600 de haz puede elegirse más cerca del plano medio. Estas realizaciones de inyección alternativas facilitan una opción de abastecimiento de combustible más central, que proporciona un mejor acoplamiento de los haces y una mayor eficiencia de captura de partículas rápidas inyectadas. Además, dependiendo del ángulo y la posición axial, esta disposición de los inyectores 615 de haz permite un control más directo e independiente de la elongación axial y otras características de la FRC 450. Por ejemplo, inyectar los haces en un ángulo A somero con respecto al eje de simetría principal del recipiente creará un plasma de FRC con una extensión axial más larga y una temperatura más baja, mientras que elegir un ángulo A más perpendicular conducirá a un plasma axialmente más corto pero más caliente. De esta manera, el ángulo A de inyección y la ubicación de los inyectores 615 de haz pueden optimizarse para diferentes propósitos. Además, dicho ángulo y posicionamiento de los inyectores 615 de haz puede permitir que se inyecten haces de mayor energía (lo que generalmente es más favorable para depositar más potencia con menos divergencia de haz) en campos magnéticos más bajos de lo que sería necesario de otro modo para capturar tales haces. Esto se debe al hecho de que es el componente azimutal de la energía lo que determina la escala de la órbita iónica rápida (que resulta progresivamente más pequeña a medida que el ángulo de inyección en relación con el eje principal de simetría del recipiente se reduce a una energía constante del haz). Además, la inyección en ángulo hacia el plano medio y con posiciones de haz axial cercanas al plano medio mejora el acoplamiento haz-plasma, incluso cuando el plasma de FRC se contrae o se contrae axialmente de otro modo durante el período de inyección.

Inyector de gránulos

Para proporcionar un medio para inyectar nuevas partículas y controlar mejor el inventario de partículas de FRC, se utiliza un inyector de gránulos de 12 barriles 700 (véase p. ej., I. Vinyar et al., "Pellets Injectors Developed at PELIN for JET, TAE, and HL-2^a" ("Inyectores de gránulos desarrollados en PELIN para JET, TAE y HL-2A", Actas del 26th Fusion Science and Technology Symposium (Simposio de ciencia y tecnología de fusión), 27/09 al 01/10 (2010)) se utiliza en el sistema 10 de FRC. La Figura 3 ilustra la disposición del inyector 700 de gránulos en el sistema 10 de FRC. Los gránulos cilíndricos (D ~ 1 mm, L ~ 1 - 2 mm) se inyectan en la FRC con una velocidad del orden de 150 -

250 km/s. Cada gránulo individual contiene alrededor de 5×10^{19} átomos de hidrógeno, que es comparable al inventario de partículas de FRC.

Sistemas de adsorción

5 Es bien sabido que el gas halo neutro es un problema grave en todos los sistemas de confinamiento. Los procesos de intercambio de carga y reciclaje (liberación de material de impurezas frío de la pared) pueden tener un efecto devastador sobre la energía y el confinamiento de partículas. Además, cualquier densidad significativa de gas neutro en o cerca del borde conducirá a pérdidas inmediatas o al menos reducirá severamente la vida útil de las partículas inyectadas de órbita grande (alta energía) (órbita grande se refiere a partículas que tienen órbitas en la escala de la topología de la FRC o al menos de radios de órbita mucho más grandes que la escala de longitud de gradiente de campo magnético característica), un hecho que es perjudicial para todas las aplicaciones energéticas de plasma, incluida la fusión a través del calentamiento del haz auxiliar.

15 El acondicionamiento de superficies es un medio por el cual los efectos perjudiciales del gas neutro y las impurezas pueden controlarse o reducirse en un sistema de confinamiento. Con este fin, el sistema 10 de FRC proporcionado aquí emplea sistemas 810 y 820 de deposición de titanio y litio que recubren las superficies enfrentadas al plasma de la cámara 100 de confinamiento (o recipiente) y los desviadores 300 con películas (de decenas de micrómetros de grosor) de Ti y/o Li. Los recubrimientos se logran mediante técnicas de deposición de vapor. El Li y/o Ti sólidos se evaporan y/o subliman y se rocían sobre las superficies cercanas para formar los recubrimientos. Las fuentes son hornos atómicos con toberas 822 de guía (en el caso de Li) o esferas 812 calentadas de sólido con envolvente de guía (en el caso de Ti). Los sistemas de evaporación de Li normalmente funcionan en modo continuo, mientras que los sublimadores de Ti funcionan en su mayoría de forma intermitente entre operaciones de plasma. Las temperaturas de funcionamiento de estos sistemas están por encima de los 600 °C para obtener tasas de deposición rápidas. Para lograr una buena cobertura de la pared, se necesitan múltiples sistemas de evaporadores/sublimadores ubicados estratégicamente. La Figura 9 detalla una disposición de los sistemas 810 y 820 de deposición por adsorción en el sistema 10 de FRC. Los revestimientos actúan como superficies adsorbentes y bombean de forma efectiva especies hidrogenadas atómicas y moleculares (H y D). Los recubrimientos también reducen otras impurezas típicas tales como el carbono y el oxígeno a niveles insignificantes.

Enchufes especulares

30 Como se indicó anteriormente, el sistema 10 de FRC emplea conjuntos de bobinas especulares 420, 430 y 444 como se muestra en las Figuras 2 y 3. Un primer conjunto de bobinas 420 de espejo está ubicado en los dos extremos axiales de la cámara 100 de confinamiento y se energiza de forma independiente de las bobinas 412, 414 y 416 de confinamiento del sistema magnético principal 410. El primer conjunto de bobinas especulares 420 ayuda principalmente a dirigir y contener axialmente la FRC 450 durante la fusión y proporciona control de conformación de equilibrio durante el mantenimiento. El primer conjunto de bobinas especulares 420 produce campos magnéticos nominalmente más altos (alrededor de 0,4 a 0,5 T) que el campo de confinamiento central producido por las bobinas centrales 412 de confinamiento. El segundo conjunto de bobinas especulares 430, que incluye tres bobinas especulares 432, 434 y 436 cuasi cc compactas, está ubicado entre las secciones 200 de formación y los desviadores 300 y son accionadas por una fuente de alimentación conmutada común. Las bobinas especulares 432, 434 y 436, junto con las bobinas 444 de enchufe especular pulsado más compactas (alimentadas por una fuente de alimentación capacitiva) y la constricción física 442 forman los enchufes 440 de espejo que proporcionan un trayecto estrecho de baja conductancia de gas con campos magnéticos muy altos (entre 2 a 4 T con tiempos de subida de unos 10 a 20 ms). Las bobinas 444 de espejo pulsado más compactas son de dimensiones radiales compactas, diámetro interior de 20 cm y longitud similar, en comparación con el diseño de panqueque y diámetro interior de más de un metro de escala de las bobinas 412, 414 y 416 de confinamiento. El propósito de los enchufes especulares 440 es múltiple: (1) Las bobinas 432, 434, 436 y 444 agrupan firmemente y guían las superficies 452 de flujo magnético y los chorros 454 de plasma de flujo final hacia las cámaras 300 de desviador remotas. Esto garantiza que las partículas de evacuación lleguen a los desviadores 300 apropiadamente y que hay superficies 455 de flujo continuo que trazan desde la línea 452 de campo abierto la región de la FRC 450 central hasta los desviadores 300. (2) Las constricciones físicas 442 en el sistema 10 de FRC, a través de las cuales las bobinas 432, 434, 436 y 444 permiten el paso de las superficies 452 de flujo magnético y los chorros 454 de plasma, impiden el flujo de gas neutro desde los cañones 350 de plasma que se asientan en los desviadores 300. Del mismo modo, las constricciones 442 evitan el reflujo de gas desde las secciones 200 de formación hasta los desviadores 300, reduciendo así el número de partículas neutras que deben introducirse en todo el sistema 10 de FRC cuando se inicia la puesta en marcha de una FRC. (3) Los fuertes espejos axiales producidos por las bobinas 432, 434, 436 y 444 reducen las pérdidas de partículas axiales y, por lo tanto, reducen la difusividad de partículas paralelas en líneas de campo abierto.

55 Cañones de plasma axiales

60 Los flujos de plasma procedentes de los cañones 350 montados en las cámaras 310 de desviador de los desviadores 300 están destinados a mejorar la estabilidad y el rendimiento del haz neutro. Los cañones 350 están montados sobre un eje dentro de la cámara 310 de los desviadores 300 como se ilustra en las Figuras 3 y 10 y producen plasma que fluye a lo largo de las líneas 452 de flujo abierto en el desviador 300 y hacia el centro de la cámara 100 de confinamiento. Los cañones 350 funcionan en una descarga de gas de alta densidad en un canal de apilamiento de

5 lavado y están diseñados para generar varios kiloamperios de plasma totalmente ionizado durante 5 a 10 ms. Los cañones 350 incluyen una bobina magnética pulsada que hace corresponder el flujo de plasma de salida con el tamaño deseado del plasma en la cámara 100 de confinamiento. Los parámetros técnicos de los cañones 350 se caracterizan por un canal que tiene un diámetro exterior de 5 a 13 cm y hasta aproximadamente 10 cm de diámetro interior y proporciona una corriente de descarga de 10-15 kA a 400-600 V con un campo magnético interno del cañón de entre 0,5 y 2,3 T.

10 Las corrientes de plasma del cañón pueden penetrar los campos magnéticos de los enchufes especulares 440 y fluir hacia la sección 200 de formación y la cámara 100 de confinamiento. La eficiencia de la transferencia de plasma a través del enchufe especular 440 aumenta al disminuir la distancia entre el cañón 350 y el enchufe 440 y haciendo el enchufe 440 más ancho y más corto. En condiciones razonables, los cañones 350 pueden entregar cada uno aproximadamente 10^{22} protones/s a través de los enchufes especulares 440 de 2 a 4 T con altas temperaturas de iones y electrones de alrededor de 150 a 300 eV y alrededor de 40 a 50 eV, respectivamente. Los cañones 350 proporcionan un importante reabastecimiento de combustible de la capa 456 de borde de la FRC y un confinamiento general mejorado de partículas de FRC.

15 Para aumentar aún más la densidad del plasma, podría utilizarse una caja de gas para inyectar gas adicional en la corriente de plasma desde los cañones 350. Esta técnica permite un aumento de varias veces en la densidad del plasma inyectado. En el sistema 10 de FRC, una caja de gas instalada en el lado del desviador 300 de los enchufes especulares 440 mejora el reabastecimiento de combustible de la capa 456 de borde de la FRC, la formación de la FRC 450 y la unión de la línea de plasma.

20 Dados todos los parámetros de ajuste analizados anteriormente y también teniendo en cuenta que es posible la operación con solo uno o ambos cañones, es evidente que se puede acceder a un amplio espectro de modos de operación.

Electrodos de polarización

25 La polarización eléctrica de las superficies de flujo abierto puede proporcionar potenciales radiales que dan lugar a un movimiento $E \times B$ azimutal que proporciona un mecanismo de control, análogo a girar un botón de mando, para controlar la rotación del plasma de línea de campo abierto, así como el núcleo de la FRC 450 real a través de la velocidad de corte. Para lograr este control, el sistema 10 de FRC emplea varios electrodos colocados estratégicamente en varias partes de la máquina. La Figura 3 muestra los electrodos de polarización colocados en ubicaciones dentro del sistema 10 de FRC.

30 En principio, hay 4 clases de electrodos: (1) electrodos puntuales 905 en la cámara 100 de confinamiento que hacen contacto con líneas 452 de campo abierto particulares en el borde de la FRC 450 para proporcionar carga local, (2) electrodos anulares 900 entre la cámara 100 de confinamiento y las secciones 200 de formación para cargar las capas 456 de flujo del borde lejano de manera azimutal simétrica, (3) pilas de electrodos concéntricos 910 en los desviadores 300 para cargar múltiples capas 455 de flujo concéntrico (por lo que la selección de capas es controlable por bobinas 416 de ajuste para ajustar el campo magnético del desviador para terminar las capas 456 de flujo deseadas en los electrodos apropiados 910), y finalmente (4) los ánodos 920 (véase la Figura 10) de los propios cañones 350 de plasma (que interceptan las superficies internas 455 de flujo abierto cerca de la separadora de la FRC 450). Las Figuras 10 y 11 muestran algunos diseños típicos para algunos de estos.

40 En todos los casos, estos electrodos son activados por fuentes de alimentación pulsadas o de CC a tensiones de hasta aproximadamente 800 V. Según el tamaño del electrodo y de qué superficies de flujo se intersecan, pueden extraerse corrientes del orden de kiloamperios.

Operación no sostenida del sistema de FRC - Régimen Convencional

45 La formación de plasma estándar en el sistema 10 de FRC sigue la técnica bien desarrollada de estricción theta de campo invertido. Un proceso típico para poner en marcha una FRC comienza activando las bobinas cuasi cc 412, 414, 416, 420, 432, 434 y 436 a un funcionamiento de estado estacionario. Los circuitos de potencia pulsada de RFTP de los sistemas 210 de formación de potencia pulsada luego activan las bobinas 232 de campo magnético invertido rápido pulsado para crear una polarización invertida temporal de aproximadamente -0,05 T en las secciones 200 de formación. En este punto, una cantidad predeterminada de gas neutro a 9-20 psi se inyecta en los dos volúmenes de formación definidos por las cámaras 240 de tubo de cuarzo de las secciones 200 de formación (norte y sur) a través de un conjunto de válvulas de soplado orientadas de manera azimutal en bridas ubicadas en los extremos exteriores de las secciones 200 de formación. A continuación, se genera un pequeño campo de RF (~ cientos de kilohercios) a partir de un conjunto de antenas en la superficie de los tubos 240 de cuarzo para crear una pre-ionización en forma de regiones de ionización de semillas locales dentro de las columnas de gas neutro. A esto le sigue la aplicación de una modulación de anillo theta en la corriente que activa las bobinas 232 de campo magnético invertido rápido pulsado, lo que conduce a una pre-ionización más global de las columnas de gas. Finalmente, los principales bancos de energía pulsada de los sistemas 210 de formación de energía pulsada se disparan para activar las bobinas 232 de campo magnético invertido rápido pulsado para crear un campo polarizado directo de hasta 0,4 T. Esta etapa puede secuenciarse en el tiempo de manera que el campo polarizado directo se genera uniformemente a lo largo de los tubos

240 de formación (formación estática) o de tal modo que se logra una modulación de campo peristáltico consecutiva a lo largo del eje de los tubos 240 de formación (formación dinámica).

En todo este proceso de formación, la inversión real del campo en el plasma se produce rápidamente, en aproximadamente 5 μ s. La potencia pulsada de varios giga vatios entregada al plasma de formación produce fácilmente FRC calientes que luego se expulsan desde las secciones 200 de formación mediante la aplicación de una modulación secuenciada en el tiempo del campo magnético directo (peristaltismo magnético) o corrientes temporalmente aumentadas en las últimas bobinas de conjuntos 232 de bobinas cerca de los extremos exteriores axiales de los tubos 210 de formación (formando un gradiente de campo magnético axial que apunta axialmente hacia la cámara 100 de confinamiento). Las dos FRC de formación (norte y sur) así formadas y aceleradas luego se expanden hacia la cámara 100 de confinamiento de mayor diámetro, donde las bobinas cuasi cc 412 producen un campo polarizado directo para controlar la expansión radial y proporcionar el flujo magnético externo de equilibrio.

Una vez que las FRC de formación norte y sur llegan cerca del plano medio de la cámara 100 de confinamiento, las FRC chocan. Durante la colisión, las energías cinéticas axiales de las FRC de formación norte y sur se termalizan en gran medida a medida que las FRC se fusionan finalmente en una sola FRC 450. Hay disponible un gran conjunto de diagnósticos de plasma en la cámara 100 de confinamiento para estudiar los equilibrios de la FRC 450. Las condiciones operativas típicas en el sistema 10 de FRC producen FRC compuestas con radios de separación de aproximadamente 0,4 m y una extensión axial de aproximadamente 3 m. Otras características son campos magnéticos externos de aproximadamente 0,1 T, densidades de plasma de aproximadamente $5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}$ y temperatura total del plasma de hasta 1 keV. Sin mantenimiento, es decir, sin calefacción y/o activación de corriente a través de la inyección de haz neutro u otros medios auxiliares, la vida útil de estas FRC se limita a aproximadamente 1 ms, el tiempo de caída de la configuración característica autóctona.

Datos experimentales de operación no sostenida - Régimen Convencional

La Figura 12 muestra una evolución temporal típica del radio $r_{\Delta\Phi}$, de flujo excluido, que se aproxima al radio r_s , de la separadora para ilustrar la dinámica del proceso de fusión de estricción theta de la FRC 450. Los dos plasmoides individuales (norte y sur) se producen simultáneamente y luego se aceleran fuera de las respectivas secciones 200 de formación a una velocidad supersónica, $v_z \sim 250 \text{ km/s}$, y colisionan cerca del plano medio en $z = 0$. Durante la colisión, los plasmoides se comprimen axialmente, seguida de una rápida expansión radial y axial, antes de finalmente fusionarse para formar una FRC 450. Tanto la dinámica radial como axial de la FRC 450 que se fusiona se evidencian mediante mediciones detalladas del perfil de densidad y tomografía basada en bolómetros.

Los datos de una descarga no sostenida representativa del sistema 10 de FRC se muestran como funciones del tiempo en la Figura 13. La FRC se inicia en $t = 0$. El radio de flujo excluido en el plano medio axial de la máquina se muestra en la Figura 13(a). Estos datos se obtienen de una agrupación de sondas magnéticas, ubicadas justo dentro de la pared de acero inoxidable de la cámara de confinamiento, que miden el campo magnético axial. La pared de acero es un buen conservador de flujo en las escalas de tiempo de esta descarga.

Las densidades integradas en línea se muestran en la Figura 13(b), a partir de un interferómetro de $\text{CO}_2/\text{He-Ne}$ de 6 cuerdas ubicado en $z = 0$. Teniendo en cuenta el desplazamiento vertical (y) de FRC, medido por tomografía de bolómetro, la inversión de Abel produce los contornos de densidad de las Figuras 13(c). Después de un chapoteo axial y radial durante los primeros 0,1 ms, la FRC se asienta con un perfil hueco de densidad. Este perfil es bastante plano, con una densidad sustancial en el eje, como requieren los típicos equilibrios 2-D de FRC.

La temperatura total del plasma se muestra en la Figura 13(d), derivada del equilibrio de presión y totalmente consistente con las mediciones de dispersión y espectroscopia de Thomson.

El análisis de toda la matriz de flujo excluido indica que la forma de la separadora FRC (aproximada por los perfiles axiales de flujo excluidos) evoluciona gradualmente desde pista a elíptica. Esta evolución, que se muestra en la Figura 14, es consistente con una reconexión magnética gradual de dos a una sola FRC. De hecho, estimaciones aproximadas sugieren que en este instante en particular alrededor del 10% de los dos flujos magnéticos iniciales de FRC se reconectan durante la colisión.

La longitud de la FRC se contrae constantemente desde 3 a aproximadamente 1 m durante la vida útil de la FRC. Esta contracción, visible en la Figura 14, sugiere que la mayor parte de la pérdida de energía por convección domina el confinamiento de FRC. A medida que la presión del plasma dentro de la separadora disminuye más rápido que la presión magnética externa, la tensión de la línea del campo magnético en las regiones finales comprime la FRC axialmente, restaurando el equilibrio axial y radial. Para la descarga analizada en las Figuras 13 y 14, el flujo magnético de FRC, el inventario de partículas, y la energía térmica (aproximadamente 10 mWb, 7×10^{19} partículas y 7 kJ, respectivamente) disminuyen aproximadamente un orden de magnitud en el primer milisegundo, cuando el equilibrio de FRC parece disminuir.

Operación Sostenida - Régimen HPF

Los ejemplos de las Figuras 12 a 14 son característicos de la desintegración de las FRC sin ningún mantenimiento. Sin embargo, se implementan varias técnicas en el sistema 10 de FRC para mejorar aún más el confinamiento de FRC (núcleo interno y capa de borde) al régimen HPF y mantener la configuración.

5 Haces neutros

En primer lugar, se inyectan los neutros rápidos (H) perpendiculares a B_z en haces procedentes de los ocho inyectores 600 de haz neutro. Los haces de neutros rápidos se inyectan desde el momento en que las FRC de formación norte y sur se fusionan en la cámara 100 de confinamiento en una FRC 450. Los iones rápidos, creados principalmente por intercambio de carga, tienen órbitas de betatrón (con radios primarios en la escala de la topología de FRC o al menos mucho más grandes que la escala de longitud de gradiente de campo magnético característico) que se suman a la corriente azimutal de la FRC 450. Después de una fracción de la descarga (después de 0,5 a 0,8 ms del disparo), una población de iones rápidos lo suficientemente grande mejora significativamente las propiedades de estabilidad y confinamiento internas de la FRC (véase por ej., M. W. Binderbauer y N. Rostoker, Plasma Phys. 56, parte 3, 451 (1996)). Además, desde una perspectiva de mantenimiento, los haces procedentes de los inyectores 600 de haz neutro también son el medio principal para activar la corriente y calentar el plasma de la FRC.

En el régimen de plasma del sistema 10 de FRC, los iones rápidos se ralentizan principalmente en los electrones de plasma. Durante la primera parte de una descarga, los tiempos típicos de desaceleración promedio de la órbita de iones rápidos son de 0,3 a 0,5 ms, lo que da como resultado un calentamiento significativo de la FRC, principalmente de los electrones. Los iones rápidos realizan grandes excursiones radiales fuera de la separadora porque el campo magnético interno de FRC es intrínsecamente bajo (aproximadamente 0,03 T de promedio para un campo axial externo de 0,1 T). Los iones rápidos serían vulnerables a la pérdida de intercambio de carga, si la densidad del gas neutro fuera demasiado alta fuera de la separadora. Por lo tanto, la adsorción de pared y otras técnicas (tales como el cañón 350 de plasma y los enchufes 440 de espejo que contribuyen, entre otras cosas, al control del gas) desplegadas en el sistema 10 de FRC tienden a minimizar los neutros de borde y permiten la acumulación requerida de iones rápidos.

25 Inyección de gránulos

Cuando se acumula una población significativa de iones rápidos dentro de la FRC 450, con temperaturas de electrones más altas y vidas más largas de la FRC, se inyectan gránulos de H o D congelados en la FRC 450 desde el inyector 700 de gránulos para mantener el inventario de partículas de FRC de la FRC 450. Las escalas de tiempo de ablación anticipadas son lo suficientemente cortas para proporcionar una fuente significativa de partículas de FRC. Esta tasa también se puede incrementar aumentando el área de la pieza inyectada rompiendo el gránulo individual en fragmentos más pequeños mientras se encuentra en los barriles o tubos de inyección del inyector 700 de gránulos y antes de entrar en la cámara 100 de confinamiento, una etapa que se puede lograr aumentando la fricción entre el gránulo y las paredes del tubo de inyección ajustando el radio de curvatura del último segmento del tubo de inyección justo antes de entrar en la cámara 100 de confinamiento. Al variar la secuencia de disparo y la tasa de los 12 barriles (tubos de inyección) así como la fragmentación, es posible ajustar el sistema 700 de inyección de gránulos para proporcionar justo el nivel deseado de mantenimiento del inventario de partículas. A su vez, esto ayuda a mantener la presión cinética interna en la FRC 450 y la operación mantenida y la vida útil de la FRC 450.

Una vez que los átomos extirpados encuentran un plasma significativo en la FRC 450, se ionizan por completo. El componente de plasma frío resultante luego se calienta por colisión con el plasma autóctono de FRC. La energía necesaria para mantener una temperatura de FRC deseada es suministrada en última instancia por los inyectores 600 de haz. En este sentido, los inyectores 700 de gránulos junto con los inyectores 600 de haz neutro forman el sistema que mantiene un estado estable y mantiene la FRC 450. El inyector de gránulos no forma parte de la invención.

Inyector CT

Como alternativa al inyector de gránulos, se proporciona un inyector toroidal compacto (CT), principalmente para alimentar plasmas de configuración de campo invertido (FRC). El inyector CT 720 comprende un cañón de plasma coaxial magnetizado (MCPG) que, como se muestra en la Figura 21, incluye electrodos cilíndricos coaxiales interno y externo 722 y 724, una bobina de polarización ubicada en el interior del electrodo interno 726 y una interrupción eléctrica 728 en un extremo opuesto a la descarga del inyector CT 720. El gas se inyecta a través de un orificio 730 de inyección de gas en un espacio entre los electrodos interno y externo 722 y 724 y se genera un plasma similar a Spheromak a partir de allí por descarga y empujado hacia afuera del cañón por fuerza de Lorentz. Como se muestra en las Figuras 22A y 22B, un par de inyectores CT 720 están acoplados al recipiente 100 de confinamiento cerca y en lados opuestos del plano medio del recipiente 100 para inyectar los CT en el plasma central de FRC dentro del recipiente 100 de confinamiento. El extremo de descarga de los inyectores CT 720 se dirige hacia el plano medio del recipiente 100 de confinamiento en un ángulo formado con el eje longitudinal del recipiente 100 de confinamiento similar a los inyectores 615 de haz neutro.

En realizaciones alternativas, el inyector CT 720, como se muestra en las Figuras 23A y 23B, incluye un tubo 740 de deriva que comprende un tubo cilíndrico alargado acoplado al extremo de descarga del inyector CT 720. Como se

muestra, el tubo 740 de deriva incluye bobinas 742 de tubo de deriva colocadas alrededor y espaciadas axialmente a lo largo del tubo. Se representa una pluralidad de orificios 744 de diagnóstico a lo largo del tubo.

Las ventajas del inyector CT 720 son: (1) control y capacidad de ajuste del inventario de partículas por CT inyectado; (2) se deposita plasma tibio (en lugar de gránulos criogénicos); (3) el sistema se puede operar en modo de tasa de repetición para permitir el abastecimiento de combustible continuo; (4) el sistema también puede restaurar algo de flujo magnético ya que los CT inyectados llevan un campo magnético integrado. En una realización para uso experimental, el diámetro interior de un electrodo exterior es de 83,1 mm y el diámetro exterior de un electrodo interior es de 54,0 mm. La superficie del electrodo interior 722 está preferiblemente recubierta con tungsteno para reducir las impurezas que salen del electrodo 722. Como se muestra, la bobina 726 de polarización está montada dentro del electrodo interior 722.

En experimentos recientes, se logró una velocidad de traslación de CT supersónica de hasta ~100 km/s. Otros parámetros típicos del plasma son los siguientes: densidad de electrones $\sim 5 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}$, temperatura de electrones ~30-50 eV e inventario de partículas de $\sim 0,5-1,0 \times 10^{19}$. La alta presión cinética del CT permite que el plasma inyectado penetre profundamente en la FRC y deposite las partículas dentro de la separadora. En experimentos recientes, el abastecimiento de combustible con partículas de FRC ha dado como resultado que ~10-20 % del inventario de partículas de FRC sea proporcionado por los inyectores CT, lo que demuestra con éxito que el abastecimiento de combustible se puede llevar a cabo fácilmente sin interrumpir el plasma de FRC.

Bobinas de desviación

Para lograr un accionamiento de corriente de estado estacionario y mantener la corriente de iones requerida, es deseable impedir o reducir significativamente el espín de electrones debido a la fuerza de fricción electrón-ion (resultante de la transferencia de momento de colisión de electrones con iones). El sistema 10 de FRC utiliza una técnica innovadora para proporcionar la rotura de electrones a través de un campo magnético estático dipolar o cuadrupolar aplicado externamente. Esto se logra a través de las bobinas 460 de desviación externas representadas en la figura 15. El campo magnético radial transversal aplicado desde las bobinas 460 de desviación induce un campo eléctrico axial en el plasma de FRC giratorio. La corriente de electrones axial resultante interactúa con el campo magnético radial para producir una fuerza de interrupción azimutal en los electrones, $F_{\theta} = -\sigma V_{e\theta} \langle |B_r|^2 \rangle$. Para condiciones típicas en el sistema 10 de FRC, el campo dipolar (o cuadrupolar) magnético aplicado requerido dentro del plasma necesita ser sólo del orden de 0,001 T para proporcionar una rotura de electrones adecuada. El campo externo correspondiente de alrededor de 0,015 T es lo suficientemente pequeño como para no causar pérdidas rápidas apreciables de partículas o afectar negativamente el confinamiento. De hecho, el campo magnético dipolar (o cuadrupolar) aplicado contribuye a suprimir inestabilidades. En combinación con la inyección de haz neutro tangencial y la inyección de plasma axial, las bobinas 460 de desviación proporcionan un nivel adicional de control con respecto al mantenimiento y la estabilidad de la corriente.

Enchufes especulares

El diseño de las bobinas pulsadas 444 dentro de los enchufes especulares 440 permite la generación local de campos magnéticos altos (2 a 4 T) con energía capacitiva modesta (aproximadamente 100 kJ). Para la formación de campos magnéticos típicos de la operación actual del sistema 10 de FRC, todas las líneas de campo dentro del volumen de formación pasan a través de los estrechamientos 442 en los enchufes especulares 440, como lo sugieren las líneas de campo magnético en la Figura 2 y el contacto de la pared de plasma no ocurre. Además, los enchufes especulares 440 en tándem con los imanes desviadores 416 cuasi cc se pueden ajustar para guiar las líneas de campo en los electrodos desviadores 910, o ensanchar las líneas de campo en una configuración de cúspide final (no mostrada). Este último mejora la estabilidad y suprime la conducción térmica paralela de electrones.

Los enchufes especulares 440 por sí mismos también contribuyen al control del gas neutro. Los enchufes especulares 440 permiten una mejor utilización del gas de deuterio inyectado en los tubos de cuarzo durante la formación de FRC, ya que la corriente de retorno de gas a los desviadores 300 se reduce significativamente por la pequeña conductancia de gas de los enchufes (apenas 500 L/s). La mayor parte del gas inyectado residual dentro de los tubos 210 de formación se ioniza rápidamente. Además, el plasma de alta densidad que fluye a través de los enchufes especulares 440 proporciona una ionización neutra eficaz y, por lo tanto, una barrera de gas eficaz. Como resultado, la mayoría de los neutros reciclados en los desviadores 300 desde la capa 456 de borde FRC no regresan a la cámara 100 de confinamiento. Además, los neutros asociados con la operación de los cañones 350 de plasma (como se analiza a continuación) serán en su mayoría confinados a los desviadores 300.

Finalmente, los enchufes especulares 440 tienden a mejorar el confinamiento de la capa de borde de FRC. Con relaciones de espejo (enchufe/campos magnéticos de confinamiento) del orden de 20 a 40, y con una longitud de 15 m entre los enchufes especulares 440 norte y sur, el tiempo τ_{\parallel} de confinamiento de partículas de la capa de borde aumenta hasta en un orden de magnitud. Mejorando τ_{\parallel} aumenta fácilmente el confinamiento de partículas de FRC.

Suponiendo que la pérdida de partículas por difusión radial (D) del volumen 453 de la separadora se equilibra con la pérdida axial (τ_{\parallel}) desde la capa 456 de borde, se obtiene $(2\pi r_s L_s)(D n_s / \delta) = (2\pi r_s L_s \delta)(n_s / \tau_{\parallel})$, a partir de lo cual la longitud

del gradiente de densidad de la separadora se puede reescribir como $\delta = (D\tau_{\parallel})^{1/2}$. Aquí r_s , L_s y N_s son el radio de la separadora, la longitud de la separadora y la densidad de la separadora, respectivamente. El tiempo de confinamiento de partículas de la FRC es $\tau_N = [\pi r_s^2 L_s \langle n \rangle] / [(2\pi r_s L_s) (Dn_s / \delta)] = (\langle n \rangle / n_s) (\tau_{\pm\tau_{\parallel}})^{1/2}$, donde $\tau_{\perp} = a^2 / D$ con $a = r_s / 4$. Físicamente, mejorar τ_{\parallel} conduce a un δ incrementado (gradiente de densidad de la separadora y parámetro de deriva reducidos) y, por lo tanto, una pérdida reducida de partículas de la FRC. La mejora general en el confinamiento de partículas de la FRC es generalmente algo menos que cuadrática porque n_s aumenta con τ_{\parallel} .

Una mejora significativa en τ_{\parallel} también requiere que la capa 456 de borde permanezca muy estable (es decir, sin $n = 1$ ondulación, manguera u otra inestabilidad MHD típica de sistemas abiertos). El uso de los cañones 350 de plasma proporciona esta estabilidad de borde preferida. En este sentido, los enchufes especulares 440 y el cañón 350 de plasma forman un sistema de control de borde eficaz.

Cañones de plasma

Los cañones 350 de plasma mejoran la estabilidad de los chorros 454 de evacuación de la FRC por conexión de líneas. Los plasmas de cañón procedentes de los cañones 350 de plasma se generan sin momento angular azimutal, lo que resulta útil para controlar las inestabilidades rotacionales de la FRC. Como tales, los cañones 350 son un medio efectivo para controlar la estabilidad de la FRC sin necesidad de la técnica de estabilización cuadrupolar más antigua. Como resultado, los cañones 350 de plasma hacen posible aprovechar los efectos beneficiosos de las partículas rápidas o acceder al régimen de FRC cinético híbrido avanzado como se esboza en esta descripción. Por lo tanto, los cañones 350 de plasma permiten que el sistema 10 de FRC funcione con corrientes de bobina de derivación adecuadas para la rotura de electrones pero por debajo del umbral que causaría la inestabilidad de la FRC y/o conduciría a una difusión espectacular de partículas rápidas.

Como se menciona en el análisis anterior del *Enchufe especular*, si τ_{\parallel} se puede mejorar significativamente, el plasma del cañón suministrado sería comparable a la tasa de pérdida de partículas de la capa de borde ($\sim 10^{22}$ /s). La vida útil del plasma producido con cañón en el sistema 10 de FRC está en el intervalo de milisegundos. De hecho, se considera el plasma del cañón con densidad $n_e \sim 10^{13}$ cm⁻³ y temperatura de iones de aproximadamente 200 eV, confinado entre los enchufes especulares finales 440. La longitud L de trampa y la relación R de espejo son de aproximadamente 15 m y 20, respectivamente. El trayecto libre medio de los iones debido a las colisiones de Coulomb es $\lambda_{ij} \sim 6 \times 10^3$ cm y, dado que $\lambda_{ij} \ln R / R < L$, los iones están confinados en el régimen dinámico de gas. El tiempo de confinamiento del plasma en este régimen es $\tau_{gd} \sim RL / 2V_s \sim 2$ ms, donde V_s es la velocidad del sonido del ion. A modo de comparación, el tiempo clásico de confinamiento de iones para estos parámetros de plasma sería $\tau_c \sim 0,5\tau_{ii} (\ln R + (\ln R)^{0,5}) \sim 0,7$ ms. La difusión transversal anómala puede, en principio, acortar el tiempo de confinamiento del plasma. Sin embargo, en el sistema 10 de FRC, si asumimos la tasa de difusión de Bohm, el tiempo de confinamiento transversal estimado para el plasma del cañón es $t_{\perp} > \tau_{gd} \sim 2$ ms. Por lo tanto, los cañones proporcionarían un importante reabastecimiento de combustible de la capa 456 de borde de la FRC y un confinamiento general mejorado de partículas de la FRC.

Además, los flujos de plasma del cañón se pueden activar en aproximadamente 150 a 200 microsegundos, lo que permite su uso en el comienzo, traslación y fusión de la FRC en la cámara 100 de confinamiento. Si se activan alrededor de $t \sim 0$ (iniciación del banco principal de la FRC), los plasmas de los cañones ayudan a sostener la actual FRC 450 formada y fusionada dinámicamente. Los inventarios de partículas combinados a partir de las FRC de formación y de los cañones son adecuados para la captura del haz neutro, el calentamiento del plasma y el sostenimiento prolongado. Si se activó en t en el intervalo de -1 a 0 ms, los plasmas de cañón pueden llenar los tubos 210 de cuarzo con plasma o ionizar el gas inyectado en los tubos de cuarzo, permitiendo así la formación de la FRC con u gas soplado reducido o incluso con cero gas. Este último puede requerir plasma de formación suficientemente frío para permitir una rápida difusión del campo magnético de polarización invertida. Si se activó en $t < -2$ ms, las corrientes de plasma podrían llenar el volumen de líneas de campo de aproximadamente 1 a 3 m³ de las regiones de formación y confinamiento de las secciones 200 de formación y de la cámara 100 de confinamiento con una densidad de plasma objetivo de unos pocos 10^{13} cm⁻³, suficiente para permitir la producción del haz neutro antes de la llegada de la FRC. Las FRC de formación podrían luego formarse y trasladarse al plasma del recipiente de confinamiento resultante. De esta forma, los cañones 350 de plasma permiten una amplia variedad de condiciones operativas y de regímenes de parámetros.

Polarización eléctrica

El control del perfil del campo eléctrico radial en la capa 456 de borde es beneficioso de varias formas para la estabilidad y el confinamiento de la FRC. En virtud de los componentes de polarización innovadores desplegados en el sistema 10 de FRC, es posible aplicar una variedad de distribuciones deliberadas de potenciales eléctricos a un grupo de superficies de flujo abierto en toda la máquina desde áreas muy fuera de la región de confinamiento central en la cámara 100 de confinamiento. De esta manera, se pueden generar campos eléctricos radiales a través de la capa 456 de borde justo fuera de la FRC 450. Estos campos eléctricos radiales modifican luego la rotación azimutal de la capa 456 de borde y efectúan su confinamiento a través de una velocidad de cizallamiento ExB. Cualquier rotación diferencial entre la capa 456 de borde y el núcleo 453 de FRC puede entonces transmitirse al interior del plasma de la FRC por cizallamiento. Como resultado, el control de la capa 456 de borde impacta directamente en el núcleo 453 de la FRC. Además, dado que la energía libre en la rotación del plasma también puede ser responsable

de las inestabilidades, esta técnica proporciona un medio directo para controlar la aparición y el crecimiento de las inestabilidades. En el sistema 10 de FRC, la polarización de borde adecuada proporciona un control eficaz del transporte y la rotación de la línea de campo abierto, así como la rotación del núcleo de la FRC. La ubicación y forma de los diversos electrodos previstos 900, 905, 910 y 920 permite el control de diferentes grupos de superficies 455 de flujo y a potenciales diferentes e independientes. De esta manera, se puede realizar una amplia agrupación de diferentes configuraciones e intensidades de campo eléctrico, cada una con un impacto característico diferente en el rendimiento del plasma.

Una ventaja clave de todas estas técnicas innovadoras de polarización es el hecho de que el comportamiento del plasma central y de borde puede efectuarse desde bien fuera del plasma de FRC, es decir, no hay necesidad de poner ningún componente físico en contacto con el plasma caliente central (lo que tendría graves implicaciones para las pérdidas de energía, flujo y partículas). Esto tiene un gran impacto beneficioso en el rendimiento y todas las posibles aplicaciones del concepto HPF.

Datos experimentales - Operación HPF

La inyección de partículas rápidas mediante haces procedentes de los cañones 600 de haz neutro desempeña un papel importante para habilitar el régimen HPF. La Figura 16 ilustra este hecho. Se ha representado un conjunto de curvas que muestran cómo la vida útil de la FRC se correlaciona con la longitud de los pulsos del haz. Todas las demás condiciones de operación se mantienen constantes para todas las descargas que comprenden este estudio. Los datos se promedian sobre muchos disparos y, por lo tanto, representan un comportamiento típico. Es claramente evidente que una mayor duración del haz produce las FRC de mayor duración. Considerando esta evidencia, así como otros diagnósticos durante este estudio, se demuestra que los haces aumentan la estabilidad y reducen las pérdidas. La correlación entre la longitud del pulso del haz y la vida útil de la FRC no es perfecta, ya que el atrapamiento del haz resulta ineficiente por debajo de un determinado tamaño de plasma, es decir, a medida que el tamaño físico de la FRC 450 se contrae, no todos los haces inyectados son interceptados y atrapados. La contracción de la FRC se debe principalmente al hecho de que la pérdida de energía neta (~ 4 MW aproximadamente a la mitad de la descarga) del plasma de la FRC durante la descarga es algo mayor que la potencia total alimentada a la FRC mediante los haces neutros (~ 2,5 MW) para la configuración experimental particular. Ubicar los haces en una ubicación más cercana al plano medio del recipiente 100 tendería a reducir estas pérdidas y prolongaría la vida útil de la FRC.

La Figura 17 ilustra los efectos de diferentes componentes para lograr el régimen HPF. Muestra una familia de curvas típicas que representan la vida útil de la FRC 450 en función del tiempo. En todos los casos, se inyecta una cantidad modesta y constante de potencia del haz (alrededor de 2,5 MW) para toda la duración de cada descarga. Cada curva es representativa de una combinación diferente de componentes. Por ejemplo, hacer funcionar el sistema 10 de FRC sin ningún enchufe especular 440, cañones 350 de plasma o adsorción procedente de los sistemas 800 de adsorción da como resultado un inicio rápido de inestabilidad rotacional y pérdida de la topología de la FRC. Añadir solo los enchufes especulares 440 retrasa el comienzo de inestabilidades y aumenta el confinamiento. Utilizar la combinación de enchufes especulares 440 y un cañón 350 de plasma reduce aún más las inestabilidades y aumenta la vida útil de la FRC. Finalmente, agregar adsorción (Ti en este caso) sobre la parte superior del cañón 350 y los enchufes 440 produce los mejores resultados: la FRC resultante está libre de inestabilidades y exhibe la vida útil más larga. Está claro a partir de esta demostración experimental que la combinación completa de componentes produce el mejor efecto y proporciona a los haces las mejores condiciones objetivo.

Como se muestra en la Figura 1, el régimen HPF recién descubierto muestra un comportamiento de transporte destacablemente mejorado. La Figura 1 ilustra el cambio en el tiempo de confinamiento de partículas en el sistema 10 de FRC entre el régimen convencional y el régimen HPF. Como puede verse, se ha mejorado en un factor de más de 5 en el régimen HPF. Además, la Figura 1 detalla el tiempo de confinamiento de partículas en el sistema 10 de FRC en relación con el tiempo de confinamiento de partículas en experimentos convencionales anteriores de la FRC. Con respecto a estas otras máquinas, el régimen HPF del sistema 10 de FRC ha mejorado el confinamiento en un factor de entre 5 y cerca de 20. Finalmente y lo más importante, la naturaleza del escalado del confinamiento del sistema 10 de FRC en el régimen HPF es destacablemente diferente de todas las mediciones anteriores. Antes del establecimiento del régimen HPF en el sistema 10 de FRC, se derivaron varias leyes empíricas de escalado a partir de datos para predecir los tiempos de confinamiento en experimentos anteriores de la FRC. Todas esas reglas de escalado dependen principalmente de la relación R^2/p_i , donde R es el radio del campo magnético nulo (una medida holgada de la escala física de la máquina) y p_i es el radio de Larmor de iones evaluado en el campo aplicado externamente (una medida holgada del campo magnético aplicado). Está claro en la Figura 1 que el confinamiento prolongado en las FRC convencionales solo es posible con una máquina de gran tamaño y/o un campo magnético alto. Operar el sistema 10 de FRC en el régimen CR de la FRC convencional tiende a seguir esas reglas de escalado, como se indica en la Figura 1. Sin embargo, el régimen HPF es muy superior y muestra que se puede lograr un confinamiento mucho mejor sin una máquina de gran tamaño o campos magnéticos altos. Lo que es más importante, también queda claro en la Figura 1 que el régimen HPF da como resultado un tiempo de confinamiento mejorado con un tamaño de plasma reducido en comparación con el régimen CR. También son visibles tendencias similares para los tiempos de confinamiento de flujo y energía, como se describe a continuación, que también han aumentado en un factor de 3-8 en el sistema 10 de FRC. El logro del régimen HPF, por lo tanto, permite el uso de potencia de haz modesta, campos magnéticos más bajos y tamaño más pequeño para sostener y mantener los equilibrios de la FRC

en el sistema 10 de FRC y futuras máquinas de mayor energía. De la mano de estas mejoras, se encuentran menores costos operativos y de construcción, así como una complejidad de ingeniería reducida.

Para mayor comparación, la Figura 18 muestra datos de una descarga de régimen HPF representativa en el sistema 10 de FRC en función del tiempo. La figura 18(a) representa el radio de flujo excluido en el plano medio. Para estas escalas de tiempo más largas, la pared de acero conductor ya no es un buen conservador del flujo y las sondas magnéticas internas a la pared se aumentan con sondas fuera de la pared para tener en cuenta adecuadamente la difusión del flujo magnético a través del acero. En comparación con el rendimiento típico en el régimen CR convencional, como se muestra en la Figura 13, el modo de funcionamiento del régimen HPF muestra una vida útil de un 400 % superior.

En la Figura 18(b) se muestra una cuerda representativa de la traza de densidad de líneas integrada con su complemento invertido de Abel, los contornos de densidad, en la Figura 18(c). En comparación con el régimen CR de la FRC convencional, como se muestra en la Figura 13, el plasma está más inactivo durante todo el pulso, lo que indica un funcionamiento muy estable. La densidad máxima también es ligeramente inferior en los disparos HPF; esto es una consecuencia de la temperatura total del plasma más alta (hasta un factor de 2), como se muestra en la Figura 18(d).

Para la respectiva descarga ilustrada en la Figura 18, los tiempos de confinamiento de energía, partículas y flujo son 0,5 ms, 1 ms y 1 ms, respectivamente. En un tiempo de referencia de 1 ms en la descarga, la energía de plasma almacenada es de 2 kJ, mientras que las pérdidas son de unos 4 MW, lo que hace que este objetivo sea muy adecuado para el sostenimiento del haz neutro.

La Figura 19 resume todas las ventajas del régimen HPF en forma de una escala de confinamiento de flujo HPF experimental recientemente establecida. Como se puede ver en la Figura 19, con base en las mediciones tomadas antes y después de $t = 0,5$ ms, es decir, $t \leq 0,5$ ms y $t > 0,5$ ms, el confinamiento de flujo (y de manera similar, el confinamiento de partículas y el confinamiento de energía) aumenta aproximadamente con el cuadrado de la temperatura del electrón (T_e) para un radio (r_s) de separadora dado. Este fuerte aumento con una potencia positiva de T_e (y no una potencia negativa) es completamente opuesto al exhibido por los tokomaks convencionales, donde el confinamiento es de manera típica inversamente proporcional a alguna potencia de la temperatura del electrón. La manifestación de esta escala es una consecuencia directa del estado HPF y de la gran población de iones en órbita (es decir, órbitas en la escala de la topología de la FRC y/o al menos la escala de longitud de gradiente de campo magnético característica). Fundamentalmente, este nuevo aumento favorece sustancialmente las altas temperaturas de operación y permite reactores de tamaño relativamente modesto.

Con las ventajas que presenta el régimen HPF, se puede lograr el mantenimiento de la FRC o el estado estacionario activado por haces neutros y el uso de la inyección de gránulos adecuada, lo que significa que los parámetros globales del plasma, tales como la energía térmica del plasma, el número total de partículas, el radio y la longitud del plasma, así como el flujo magnético, son sostenibles a niveles razonables sin degradación sustancial. A modo de comparación, la Figura 20 muestra datos en el gráfico A procedentes de una descarga de régimen HPF representativa en el sistema 10 de FRC en función del tiempo y en el gráfico B para una descarga de régimen HPF representativa proyectada en el sistema 10 de FRC en función del tiempo donde la FRC 450 se mantiene sin degradar para la duración del pulso del haz neutro. Para el gráfico A, se inyectaron haces neutros con una potencia total del orden de aproximadamente 2,5-2,9 MW en la FRC 450 para una longitud de pulso de haz activo de aproximadamente 6 ms. La vida útil diamagnética del plasma representada en el gráfico A fue de aproximadamente 5,2 ms. Datos más recientes muestran que se puede lograr una vida útil diamagnética de plasma de aproximadamente 7,2 ms con una longitud de pulso de haz activo de aproximadamente 7 ms.

Como se señaló anteriormente con respecto a la Figura 16, la correlación entre la longitud del pulso del haz y la vida útil de la FRC no es perfecta, ya que el atrapamiento del haz se vuelve ineficiente por debajo de un determinado tamaño de plasma, es decir, a medida que el tamaño físico de la FRC 450 se contrae, no todos los haces inyectados son interceptados y atrapados. La contracción o degradación de la FRC se debe principalmente al hecho de que la pérdida de energía neta (-4 MW aproximadamente a la mitad de la descarga) del plasma FRC durante la descarga es algo mayor que la potencia total alimentada a la FRC mediante los haces neutros (- 2,5 MW) para la configuración experimental particular. Como se observa con respecto a la Figura 3C, la inyección de haz en ángulo procedente de los cañones 600 de haz neutro hacia el plano medio mejora el acoplamiento haz-plasma, incluso cuando el plasma FRC se contrae o se contrae axialmente durante el período de inyección. Además, el abastecimiento de combustible de gránulos apropiado mantendrá la densidad de plasma requerida.

El gráfico B es el resultado de simulaciones realizadas utilizando una longitud de pulso de haz activo de aproximadamente 6 ms y una potencia de haz total de los cañones 600 de haz neutro de un poco más de aproximadamente 10 MW, donde los haces neutros inyectarán H (o D) neutros con energía de partículas de aproximadamente 15 keV. La corriente equivalente inyectada por cada uno de los haces es de unos 110 A. Para el gráfico B, el ángulo de inyección del haz con respecto al eje del dispositivo era de unos 20°, radio objetivo de 0,19 m. El ángulo de inyección se puede cambiar dentro del intervalo de 15° - 25°. Los haces han de ser inyectados en la dirección paralela a la corriente de manera azimutal. La fuerza lateral neta, así como la fuerza axial neta procedente de la inyección de momento del haz neutro, se minimizarán. Al igual que con el gráfico A, los neutros rápidos (H) se

inyectan desde los inyectores 600 de haz neutro desde el momento en que las FRC de formación norte y sur se fusionan en la cámara 100 de confinamiento en una FRC 450.

5 Las simulaciones que fueron la base para el gráfico B utilizan solucionadores multidimensionales de hall-MHD para el plasma de fondo y el equilibrio, solucionadores completamente cinéticos basados en el método Monte-Carlo para los componentes del haz energético y todos los procesos de dispersión, así como una gran cantidad de ecuaciones de transporte acopladas. para todas las especies de plasma para modelar procesos de pérdida interactivos. Los componentes de transporte se calibran empíricamente y se comparan exhaustivamente con una base de datos experimental.

10 Como se muestra por el gráfico B, la vida útil diamagnética en estado estacionario de la FRC 450 será la longitud del pulso del haz. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el gráfico B de correlación clave muestra que cuando los haces se desactivan, el plasma o la FRC comienza a decaer en ese momento, pero no antes. El decaimiento será similar al que se observa en las descargas que no son asistidas por haz, probablemente del orden de 1 ms más allá del tiempo de desactivación del haz, y es simplemente un reflejo del tiempo de decaimiento característico del plasma activado por los procesos de pérdida intrínseca.

15 Aunque la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, en los dibujos se han mostrado ejemplos específicos de la misma y se han descrito en la presente memoria en detalle. Debe entenderse, sin embargo, que el alcance de la invención no debe limitarse a las formas particulares descritas, sino que está limitado por las reivindicaciones adjuntas.

20 En la descripción anterior, solo con fines explicativos, se establece una nomenclatura específica para proporcionar una comprensión completa de la presente descripción. Sin embargo, será evidente para un experto en la técnica que estos detalles específicos no son necesarios para poner en práctica las enseñanzas de la presente descripción.

25 Se han descrito sistemas para generar y mantener una FRC en régimen HPF. Se entiende que las realizaciones descritas en la presente memoria tienen fines de aclaración. Varias modificaciones, usos, sustituciones, combinaciones, mejoras sin apartarse del alcance de la presente invención como se define en las reivindicaciones adjuntas, serían evidentes para un experto en la técnica.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema para generar y mantener un plasma en un campo magnético con una configuración de campo invertido (FRC) que comprende:
- 5 una cámara (100) de confinamiento que tiene un plano medio,
- una primera y una segunda secciones (200) de formación de FRC diametralmente opuestas acopladas a la cámara de confinamiento,
- un primer y un segundo desviadores (300) acoplados a la primera y segunda secciones de formación,
- una pluralidad de inyectores (600) de haz de átomos neutros acoplados a la cámara de confinamiento y orientados hacia el plano medio de la cámara de confinamiento,
- 10 un sistema magnético (400) acoplado a la cámara de confinamiento, la primera y segunda secciones de formación, y el primer y segundo desviadores, y caracterizado por que el sistema comprende además:
- un primer y segundo inyectores toroidales compactos, CT, (720) acoplados a la cámara de confinamiento en un ángulo hacia el plano medio de la cámara de confinamiento, en donde el primer y segundo inyectores CT están en lados opuestos del plano medio de la cámara de confinamiento.
- 15 2. El sistema de la reivindicación 1, en el que la primera y segunda secciones (200) individuales de formación comprenden cada una un tubo (240) de cuarzo alargado y un sistema (210) de formación de energía pulsada acoplado al tubo de cuarzo alargado.
3. El sistema de la reivindicación 2, en el que los sistemas de formación de energía pulsada comprenden una pluralidad de unidades (220) de control y potencia acopladas a unos conjuntos individuales de una pluralidad de conjuntos (230) de correa para energizar un conjunto de bobinas (232) de los conjuntos individuales de los conjuntos de correa enrollados alrededor del tubo de cuarzo alargado de las primera y segunda secciones de formación.
- 20 4. El sistema de la reivindicación 3, en el que las unidades individuales de la pluralidad de unidades de potencia y control comprenden un disparador (222) y un sistema (224) de control.
5. El sistema de la reivindicación 4, en el que los sistemas de disparo y control de las unidades individuales de la pluralidad de unidades de potencia y control se pueden sincronizar para permitir la formación de FRC estática en la que se forma la FRC y luego se inyecta o la formación de la FRC dinámica en la que la FRC se forma y se traslada simultáneamente.
- 25 6. El sistema de la reivindicación 1 que comprende además uno o más electrodos (900, 905, 910, 920) de polarización para polarizar eléctricamente las superficies (455) de flujo abierto de una FRC generada.
- 30 7. El sistema de la reivindicación 6, en el que uno o más electrodos de polarización incluyen uno o más electrodos puntuales (905) colocados dentro de la cámara de confinamiento para hacer contacto con líneas de campo abierto, un conjunto de electrodos anulares entre la cámara de confinamiento y la primera y segunda secciones de formación para cargar capas de flujo de borde distal de forma azimutal simétrica, una pluralidad de electrodos apilados concéntricos colocados en el primer y segundo desviadores para cargar múltiples capas de flujo concéntricas, y ánodos de cañones de plasma para interceptar el flujo abierto.
- 35 8. El sistema de la reivindicación 1, en el que el sistema magnético incluye una pluralidad de bobinas cuasi-cc (412) espaciadas axialmente en posiciones a lo largo de la cámara de confinamiento, la primera y segunda secciones de formación, y el primer y segundo desviadores, y un primer conjunto de bobinas (420) de espejo cuasi-cc colocadas entre los extremos de la cámara de confinamiento y la primera y segunda secciones de formación.
- 40 9. El sistema de la reivindicación 8, en el que el sistema magnético comprende además un primer y un segundo enchufes (440) de espejo, en donde el espejo comprende un segundo conjunto de bobinas de espejo cuasi-cc entre cada una de la primera y segunda secciones de formación y el primer y segundo desviadores.
10. El sistema de la reivindicación 9, en el que el enchufe de espejo comprende además un conjunto de bobinas compactas de enchufe de espejo pulsadas envueltas alrededor de una constricción en el paso entre cada una de la primera y segunda secciones de formación y el primer y segundo desviadores.
- 45 11. El sistema de la reivindicación 1, en el que la pluralidad de inyectores (600) de haz de átomos neutros están orientados con una trayectoria de inyección tangencial a la FRC con una zona de captura del objetivo dentro de la separadora de la FRC.
- 50 12. El sistema de la reivindicación 1 que comprende además dos o más bobinas (460) de derivación acopladas a la cámara de confinamiento.

13. El sistema de la reivindicación 1 que comprende además un sistema (810, 820) de adsorción configurado para recubrir las superficies enfrentadas al plasma de la cámara de confinamiento y el primer y segundo desviadores con una capa de material de adsorción.
- 5 14. El sistema de la reivindicación 1, en el que el primero y segundo inyectores CT (720) están orientados en un ángulo de aproximadamente 15° a 25° con respecto a la normal al eje longitudinal de la cámara de confinamiento y hacia el plano medio de la cámara de confinamiento.
15. El sistema de la reivindicación 1, en el que el primer y segundo inyectores de CT están configurados para inyectar plasmas de CT en el plasma de FRC en modo de tasa de repetición.
- 10 16. El sistema de la reivindicación 1 que comprende además un primer y segundo cañones (350) de plasma axial acopladas operativamente a los primer y segundo desviadores, a las primera y segunda secciones de formación y a la cámara de confinamiento.

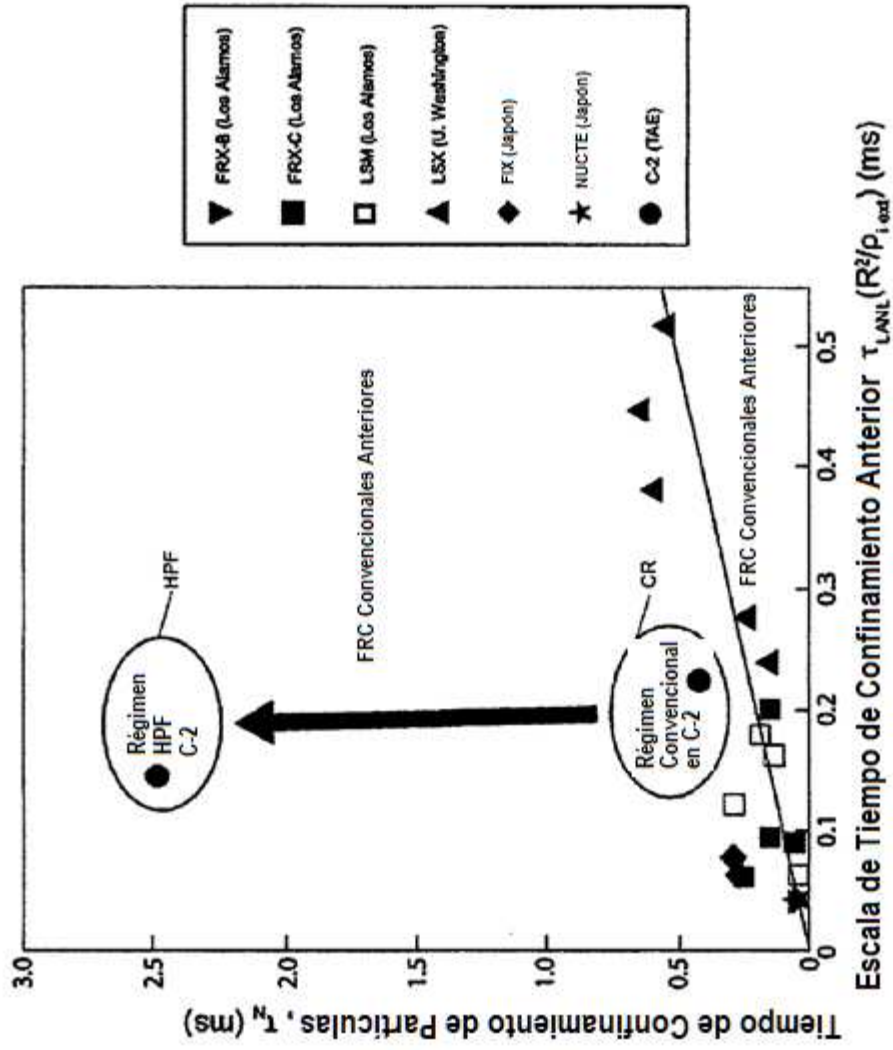


FIGURA 1

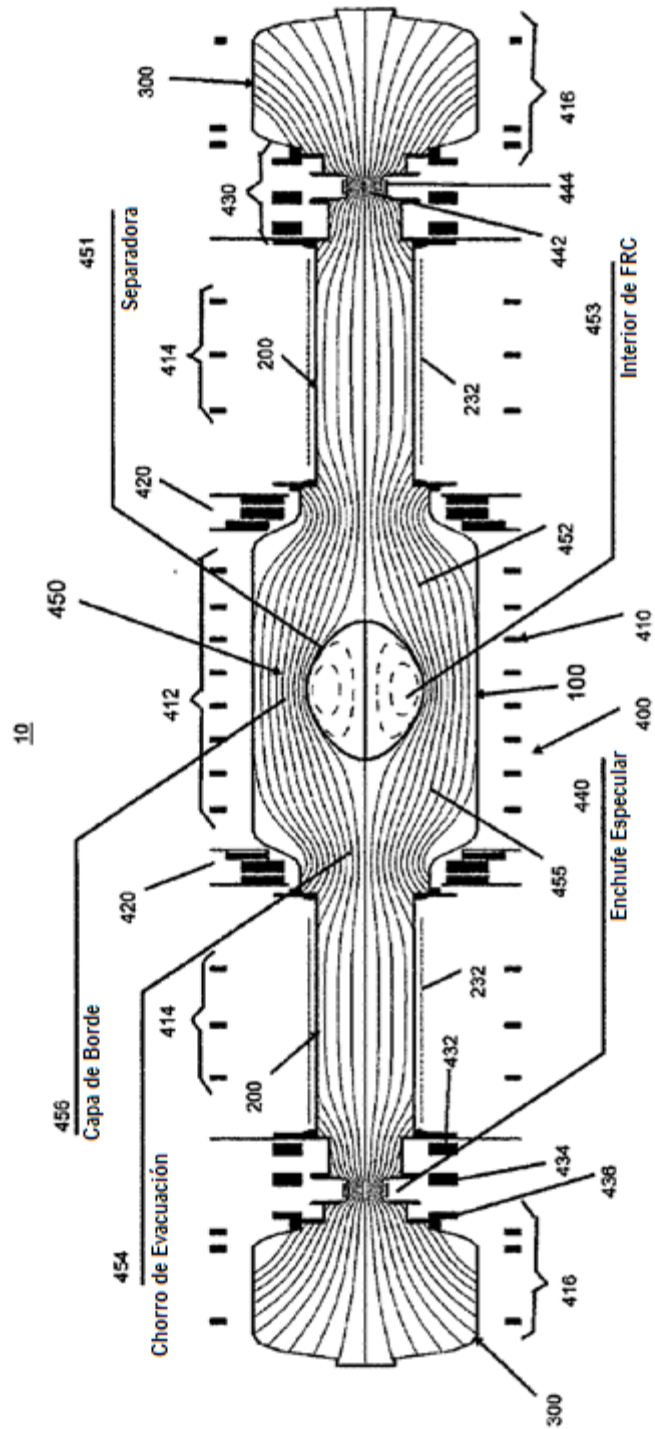


FIGURA 2

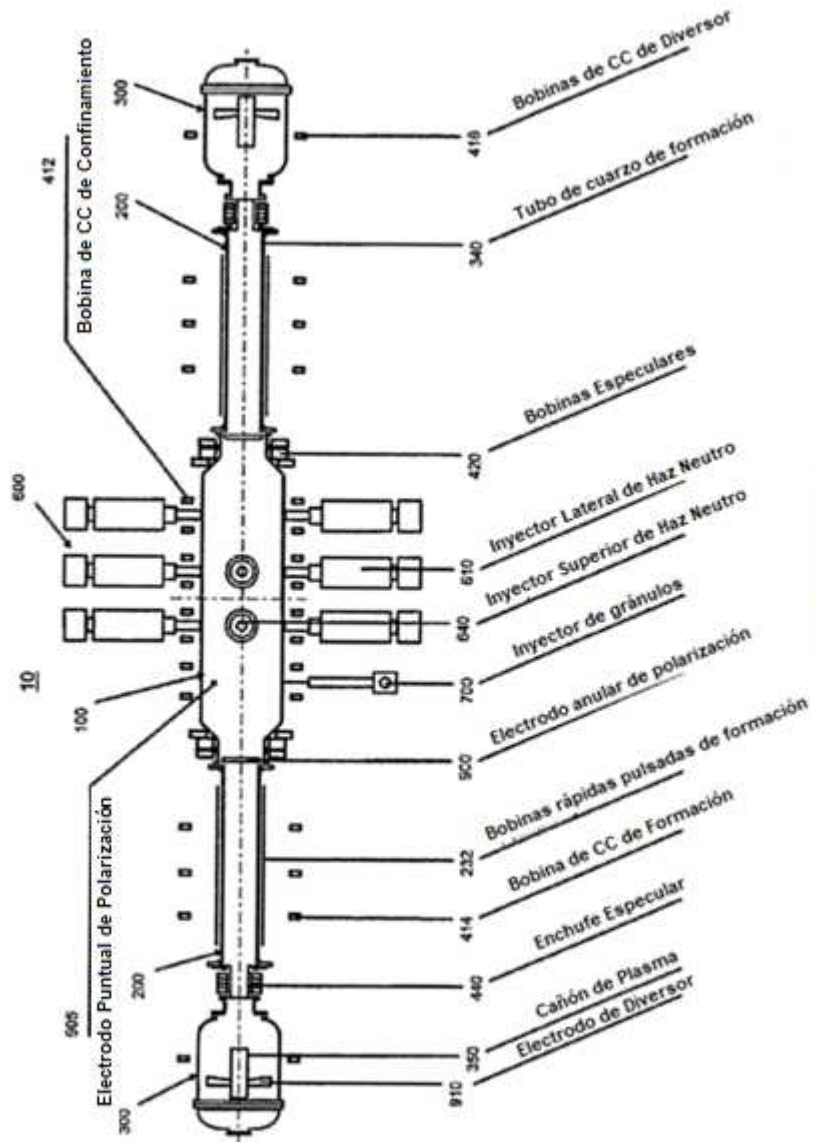


FIGURA 3A

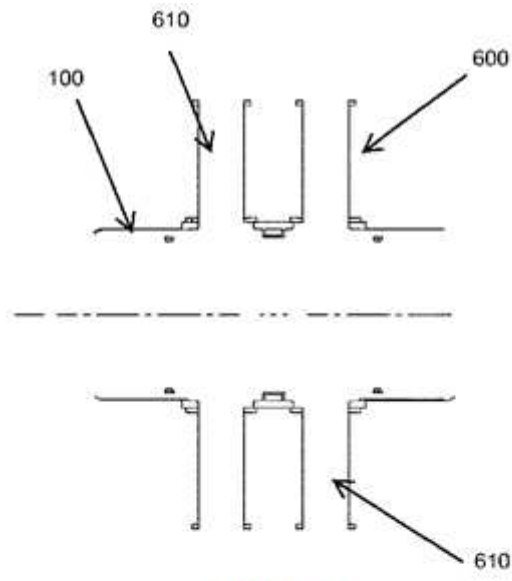


FIGURA 3B

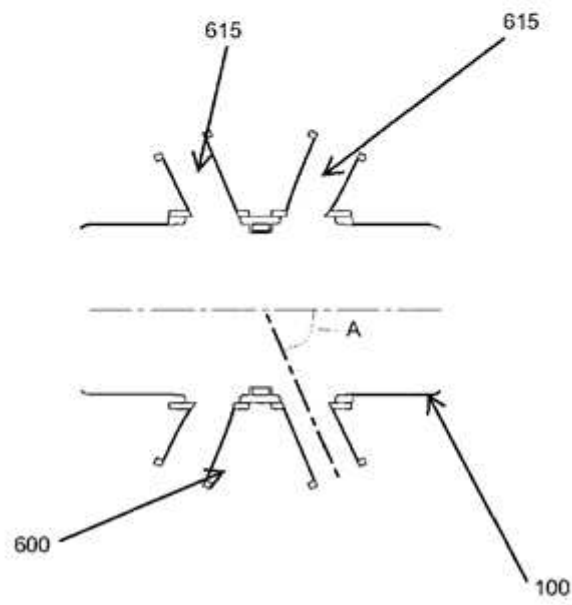


FIGURA 3C

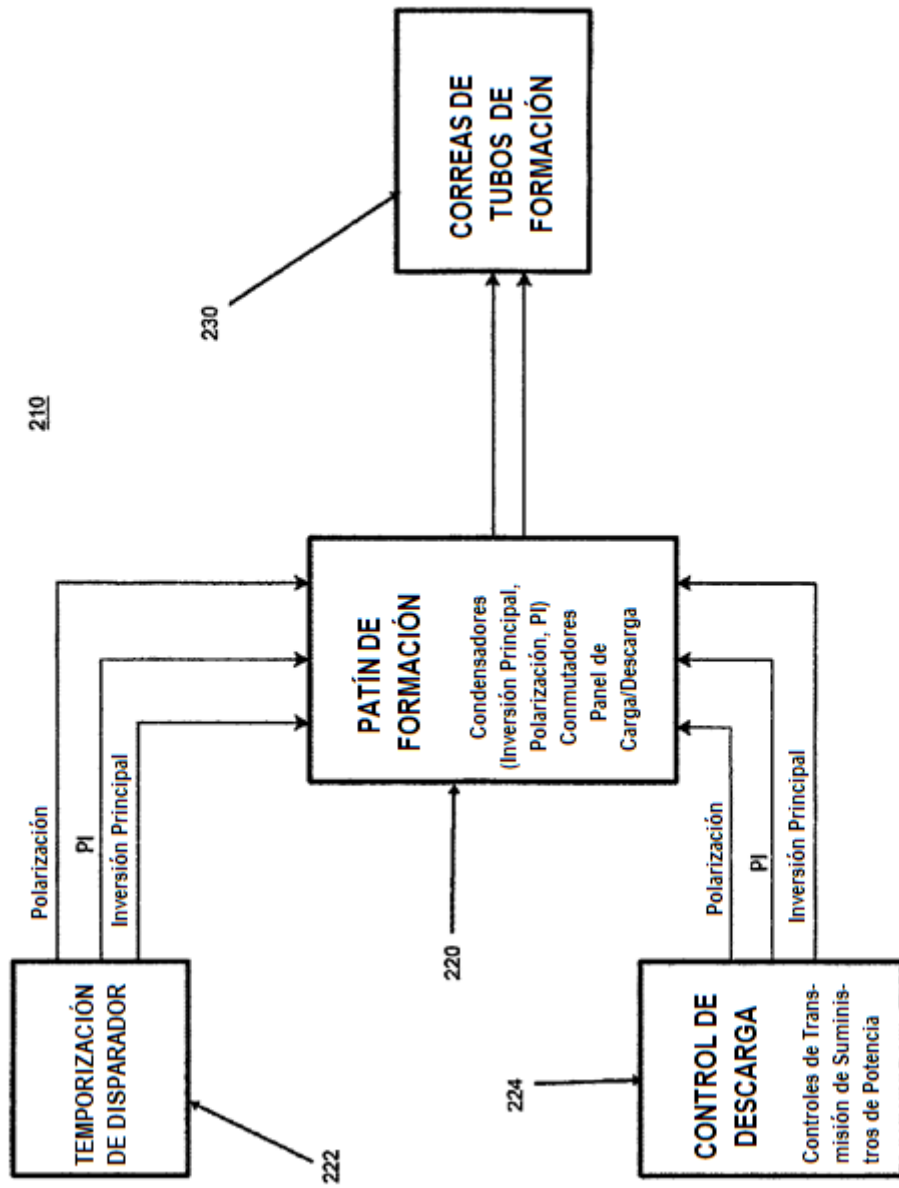


FIGURA 4

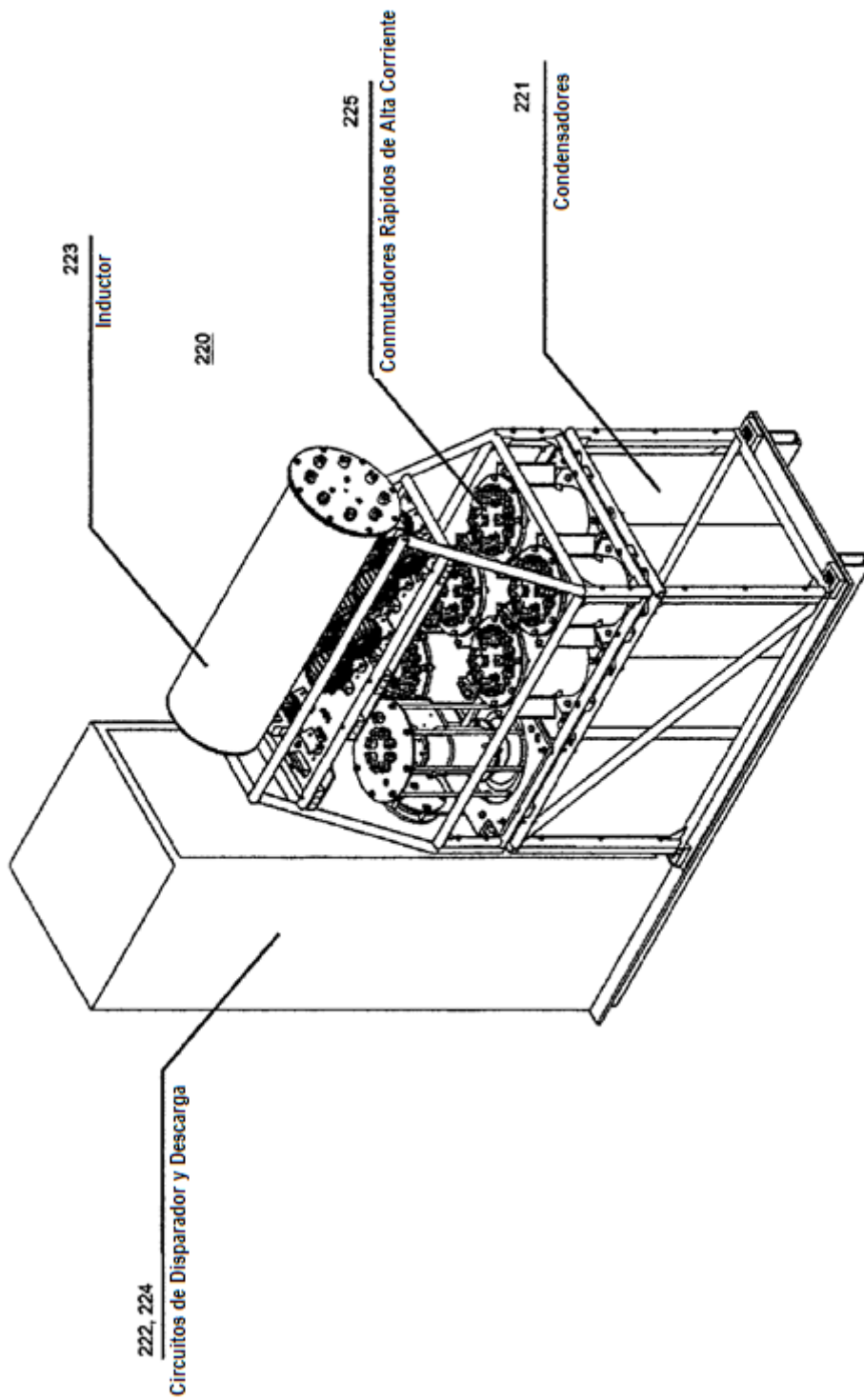


FIGURA 5

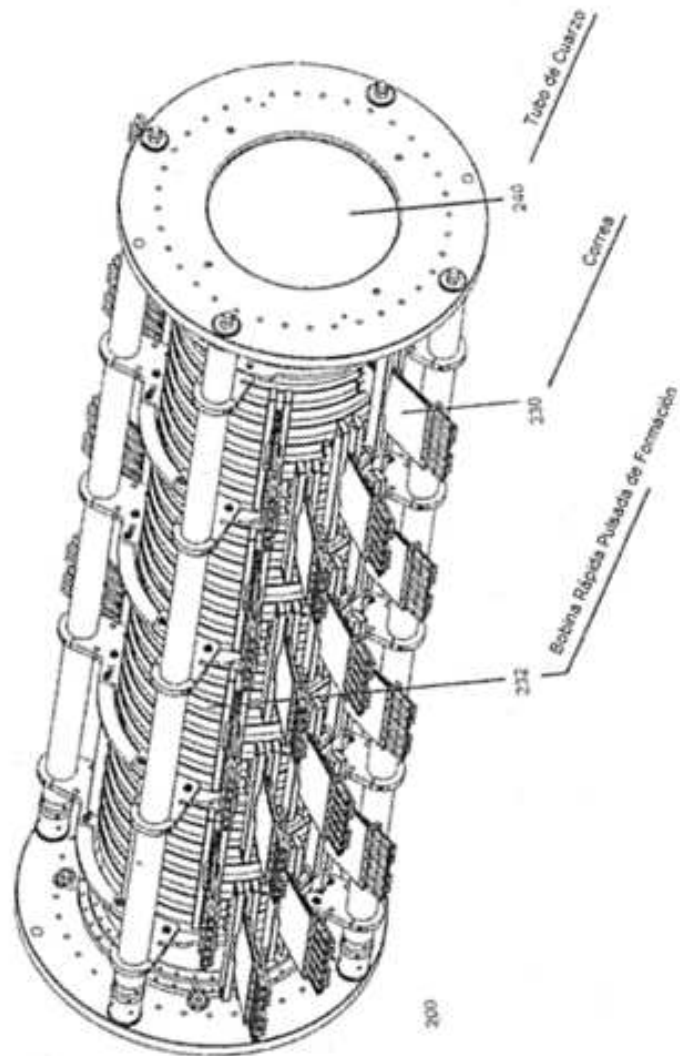


FIGURA 6

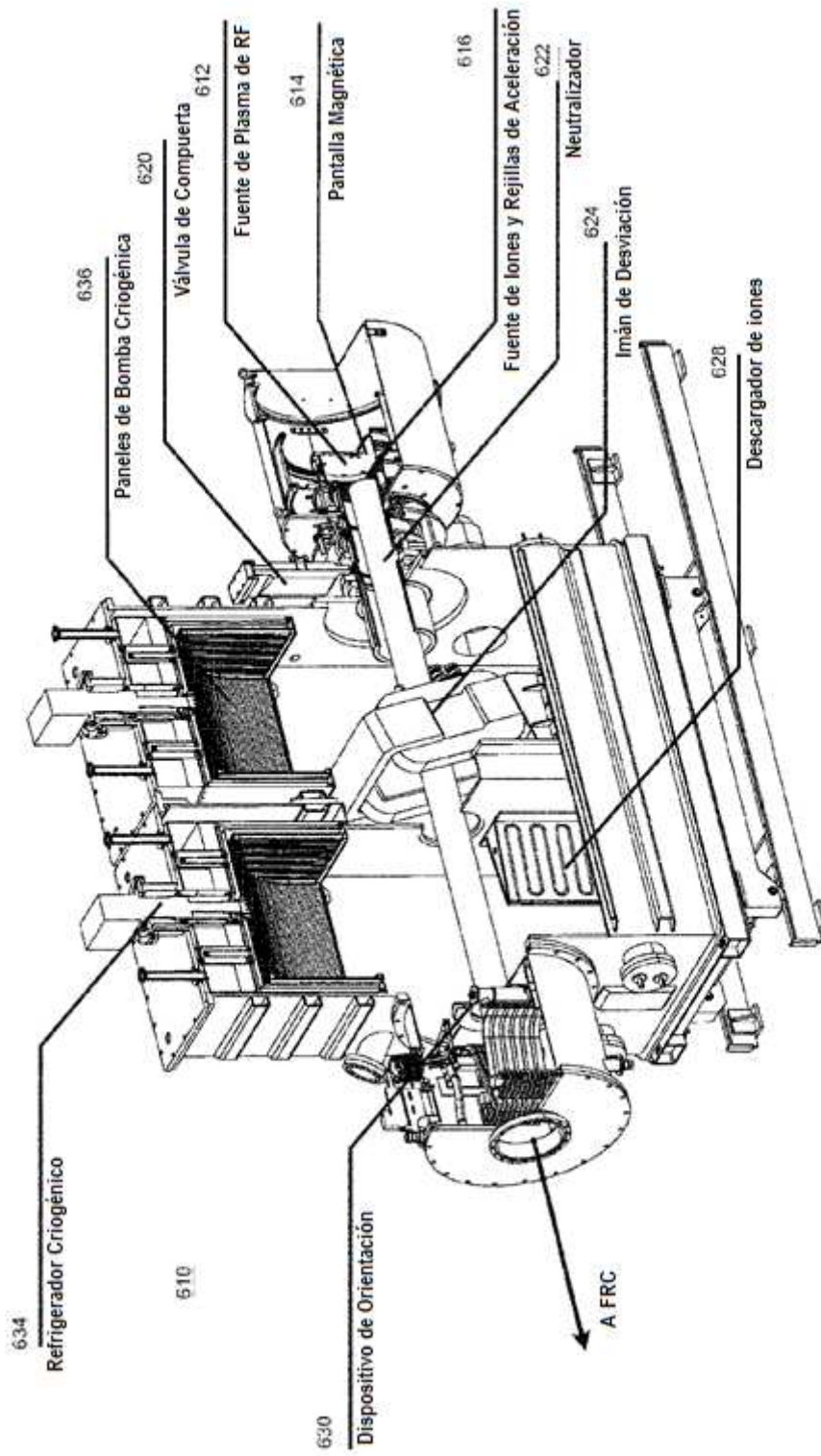


FIGURA 7

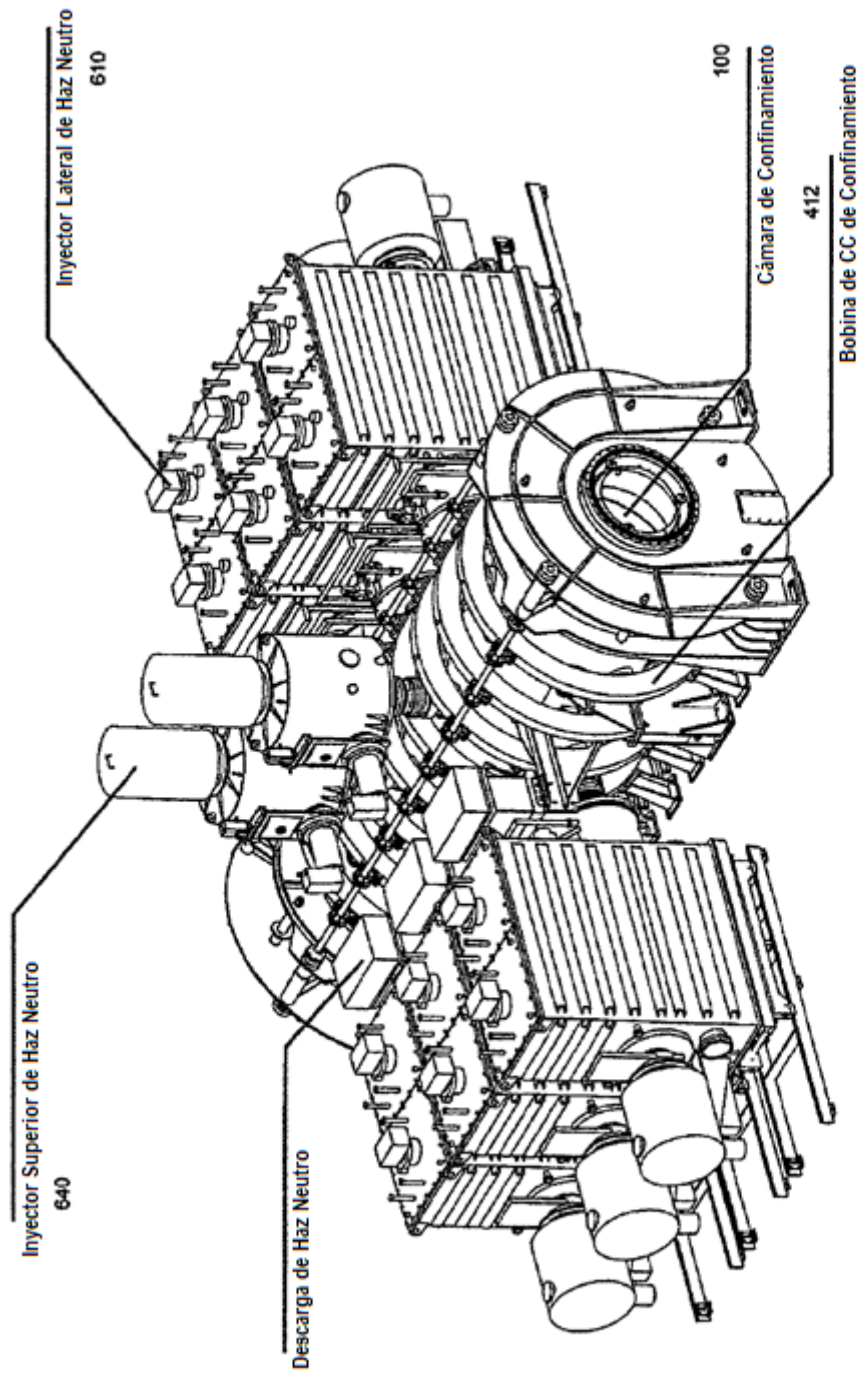


FIGURA 8

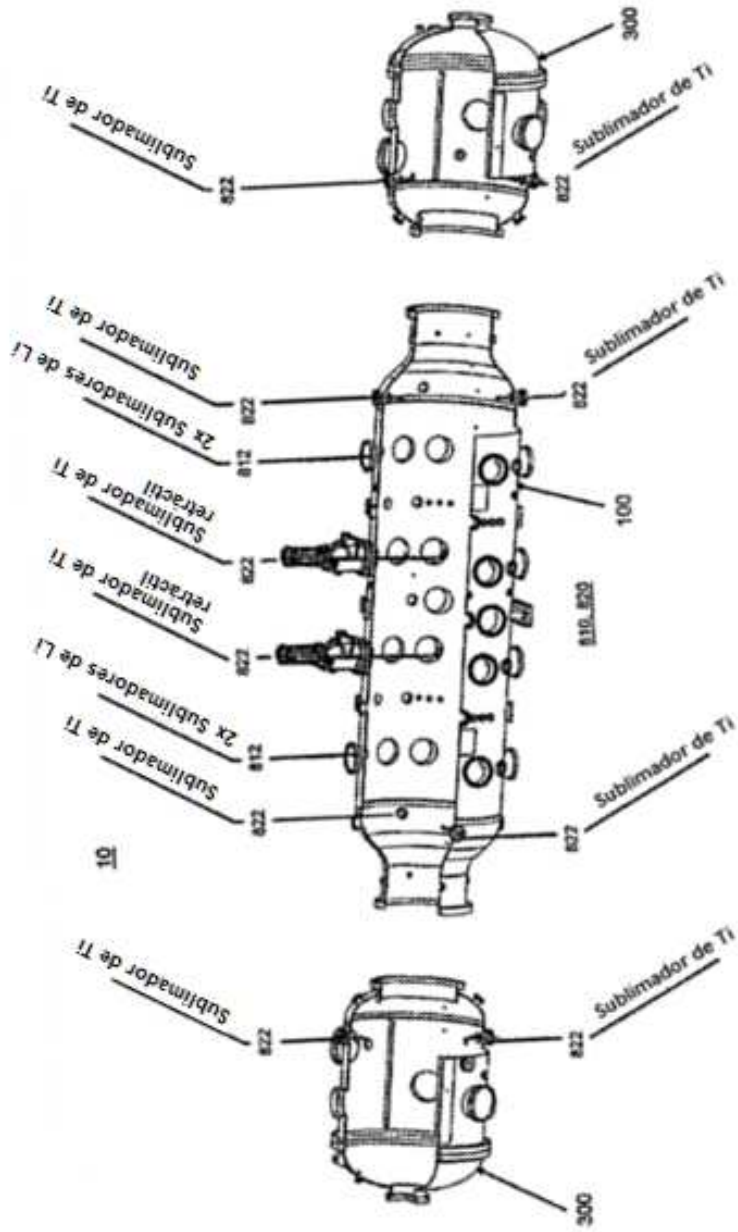


FIGURA 9

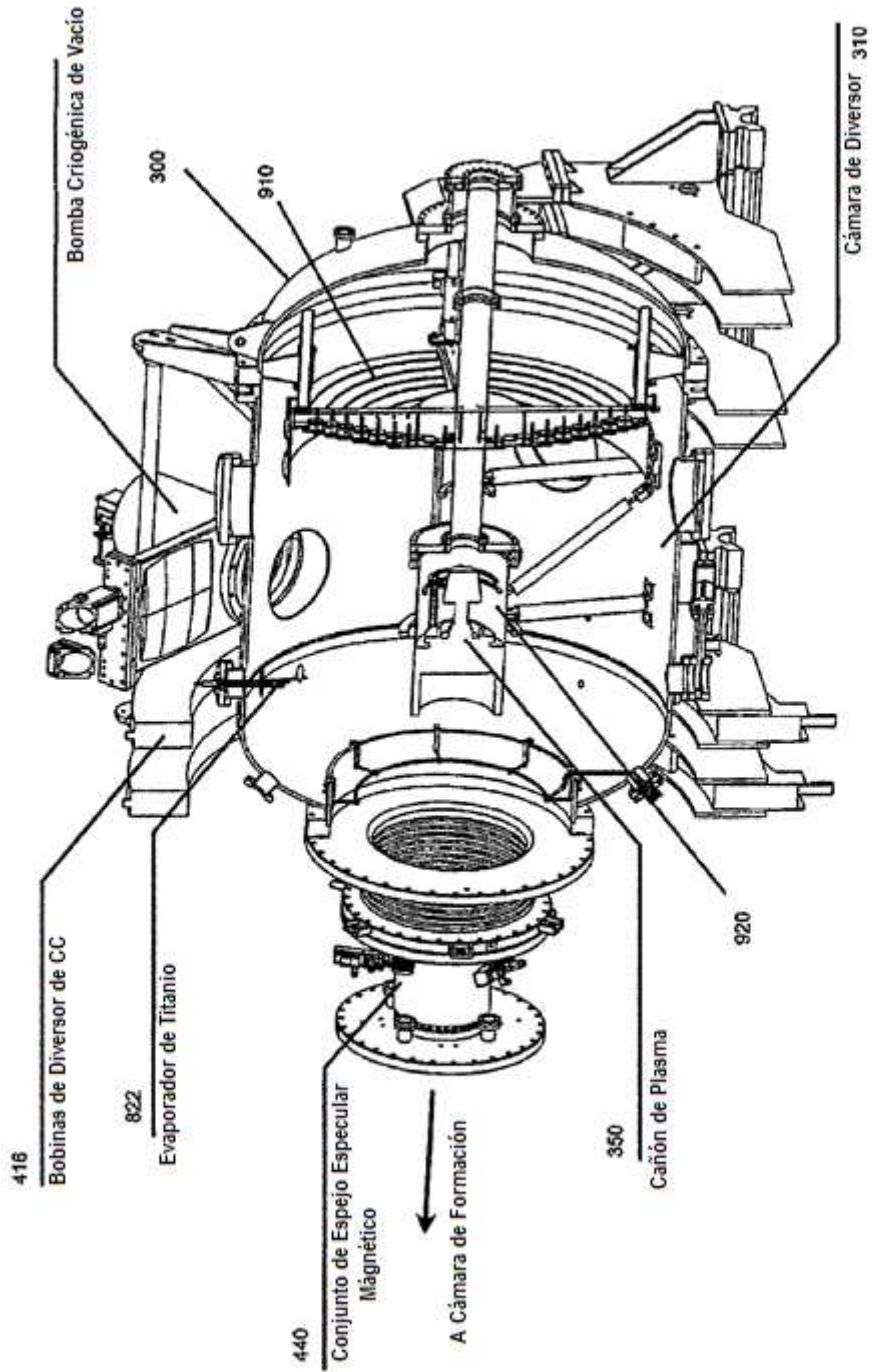


FIGURA 10

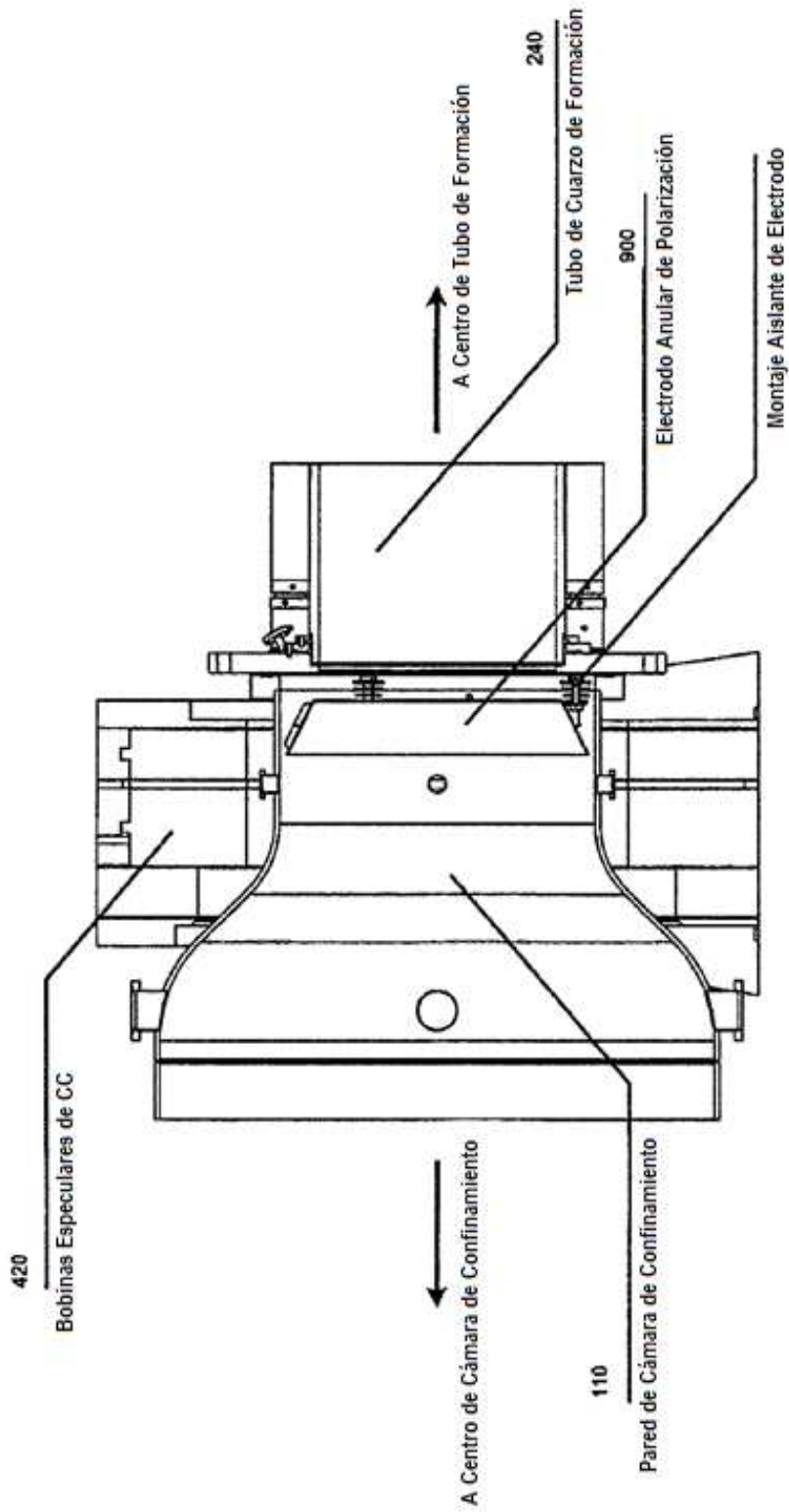


FIGURA 11

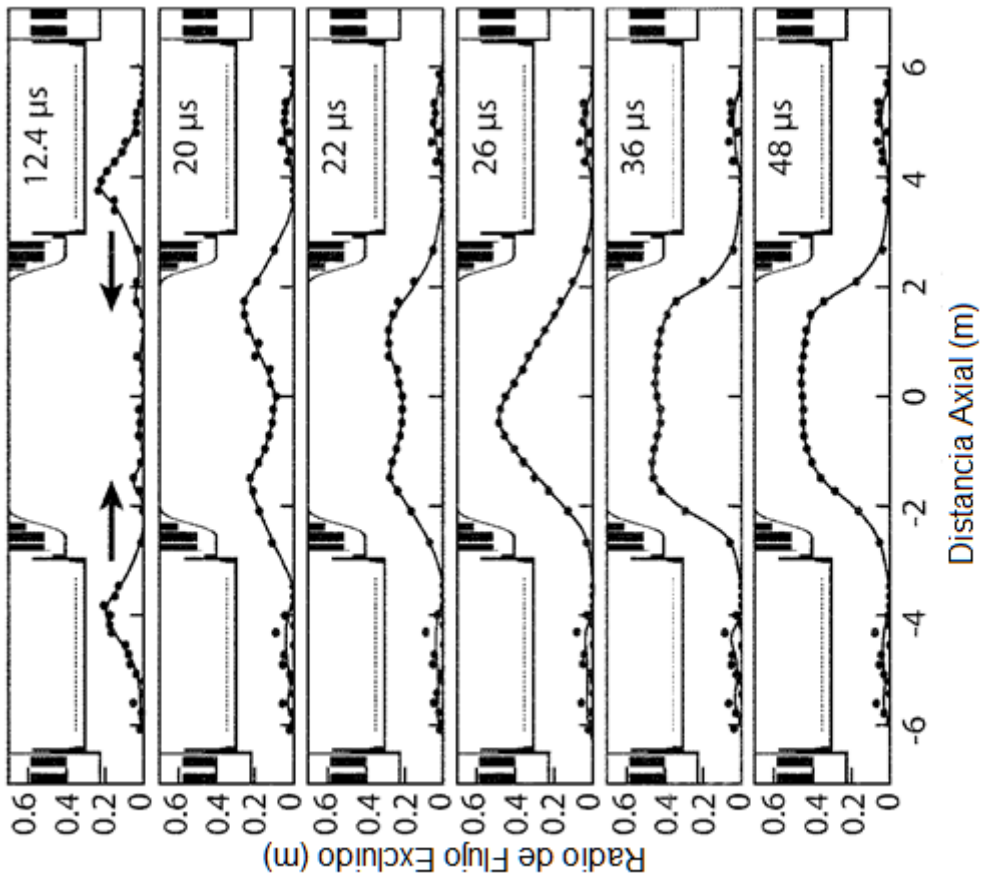


FIGURA 12

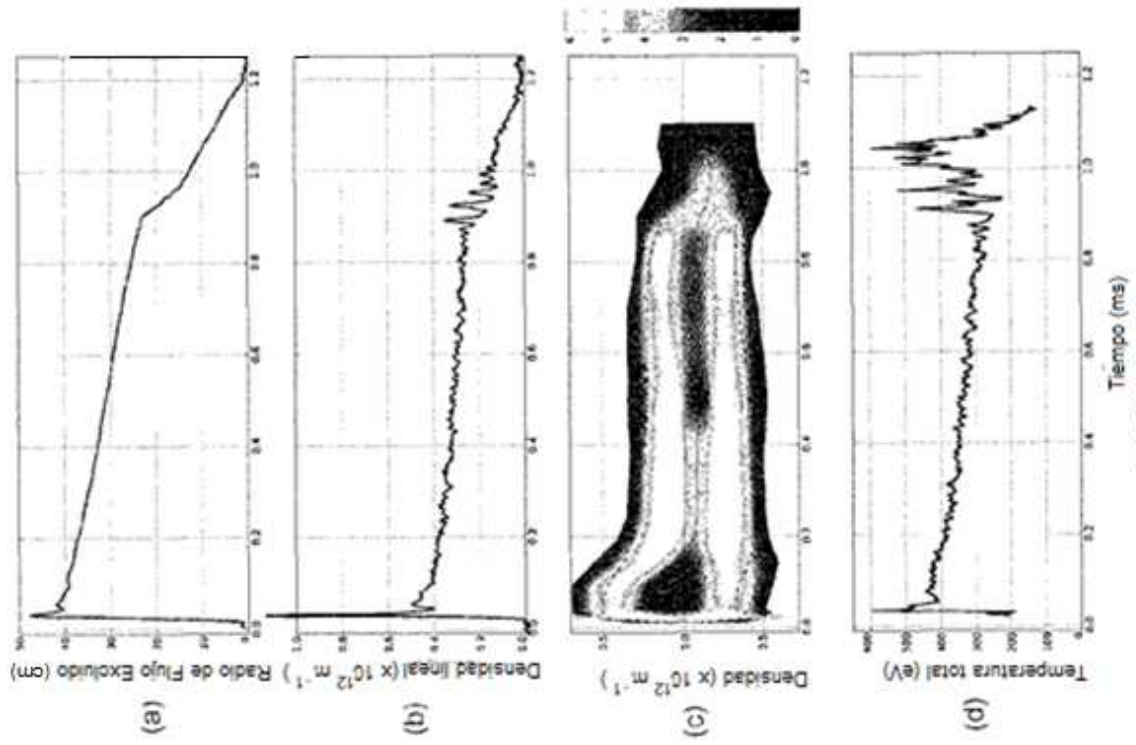
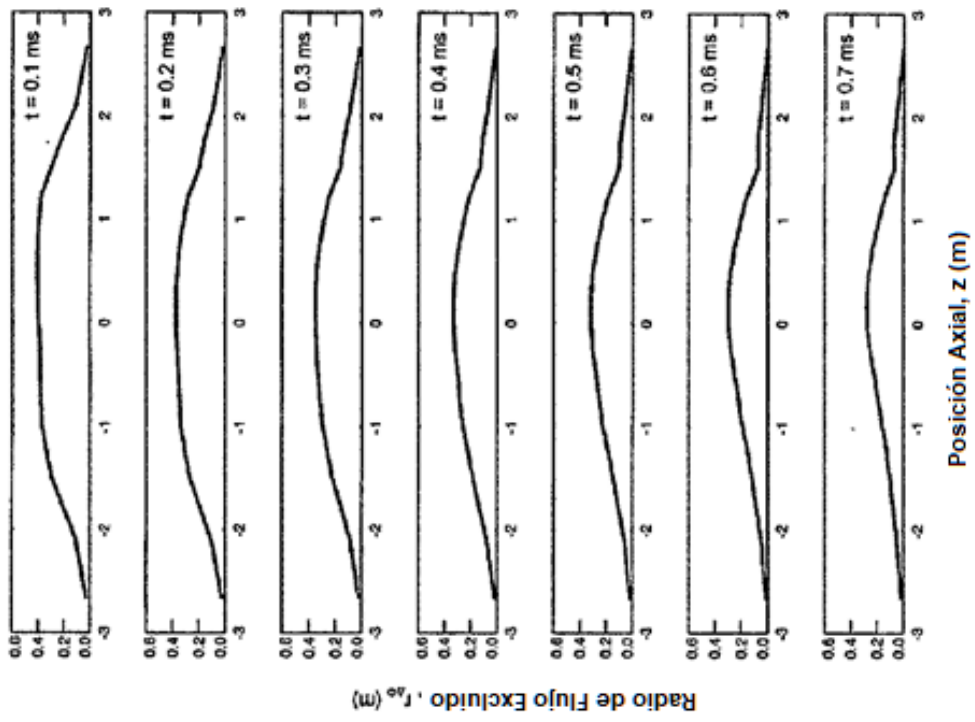


FIGURA 13



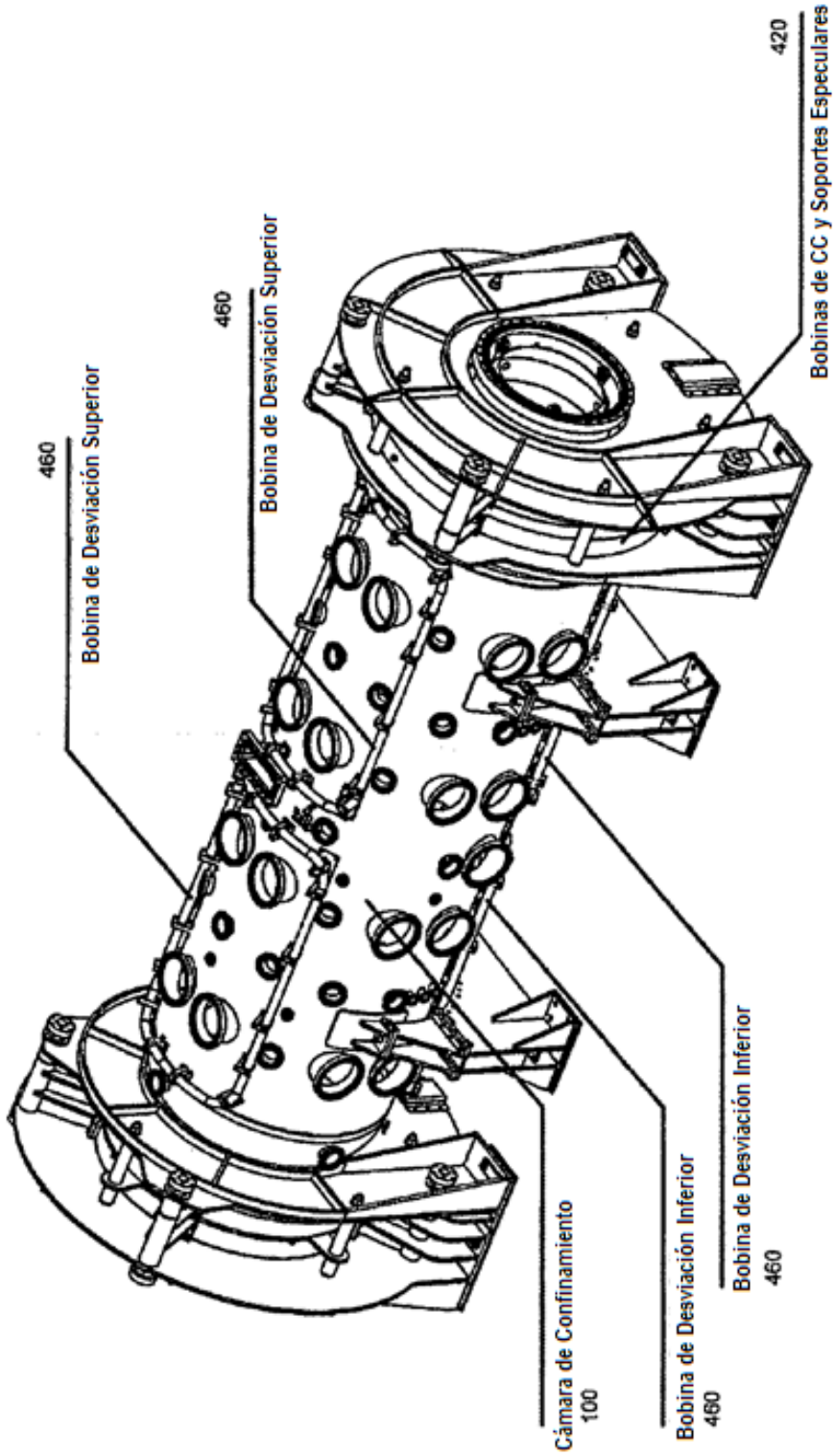


FIGURA 15

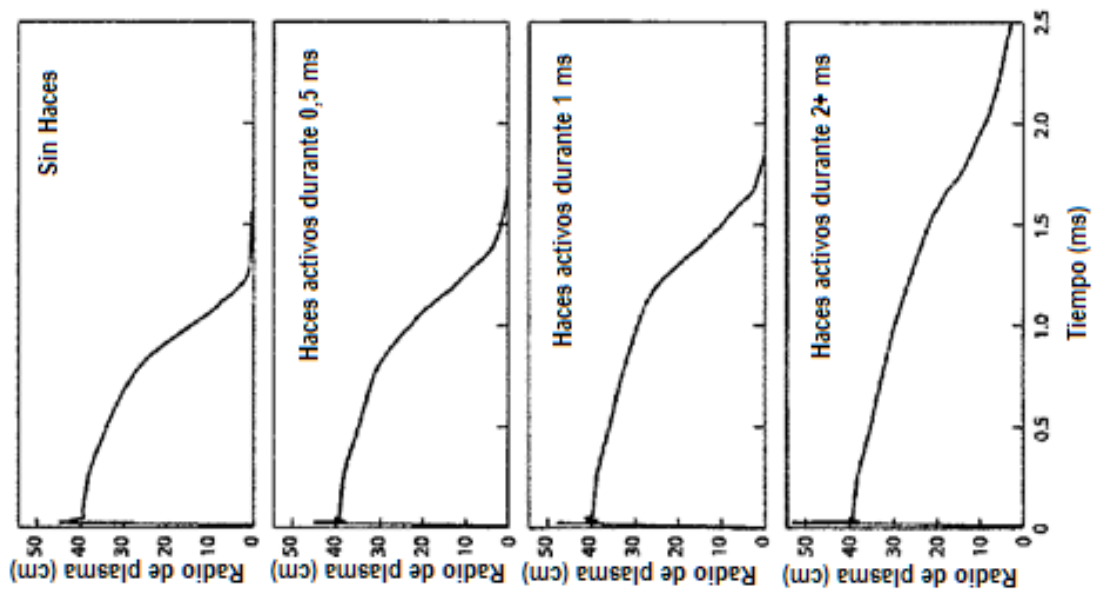


FIGURA 16

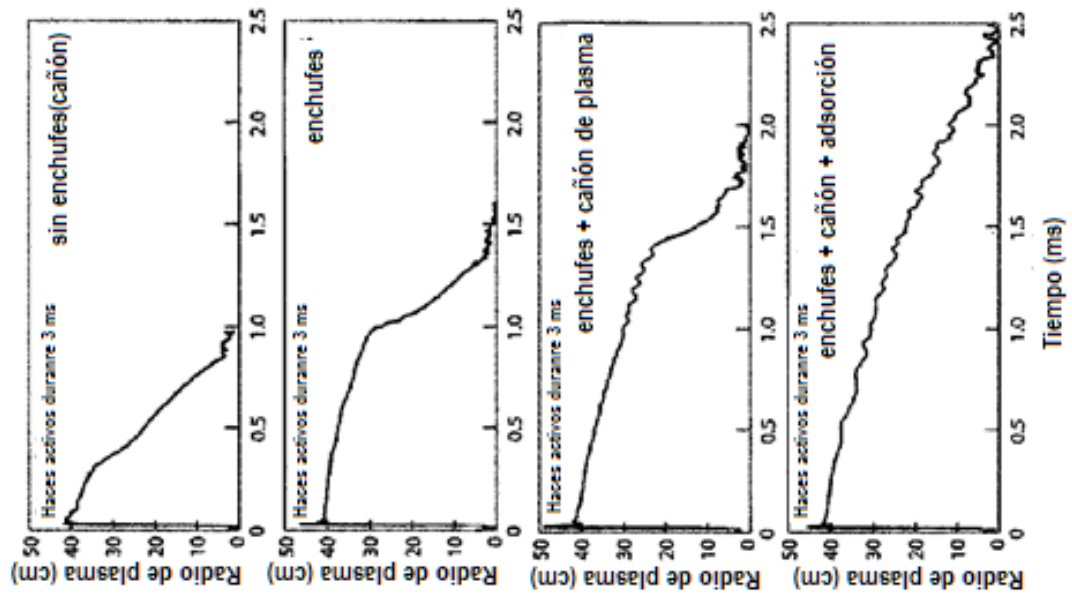


FIGURA 17

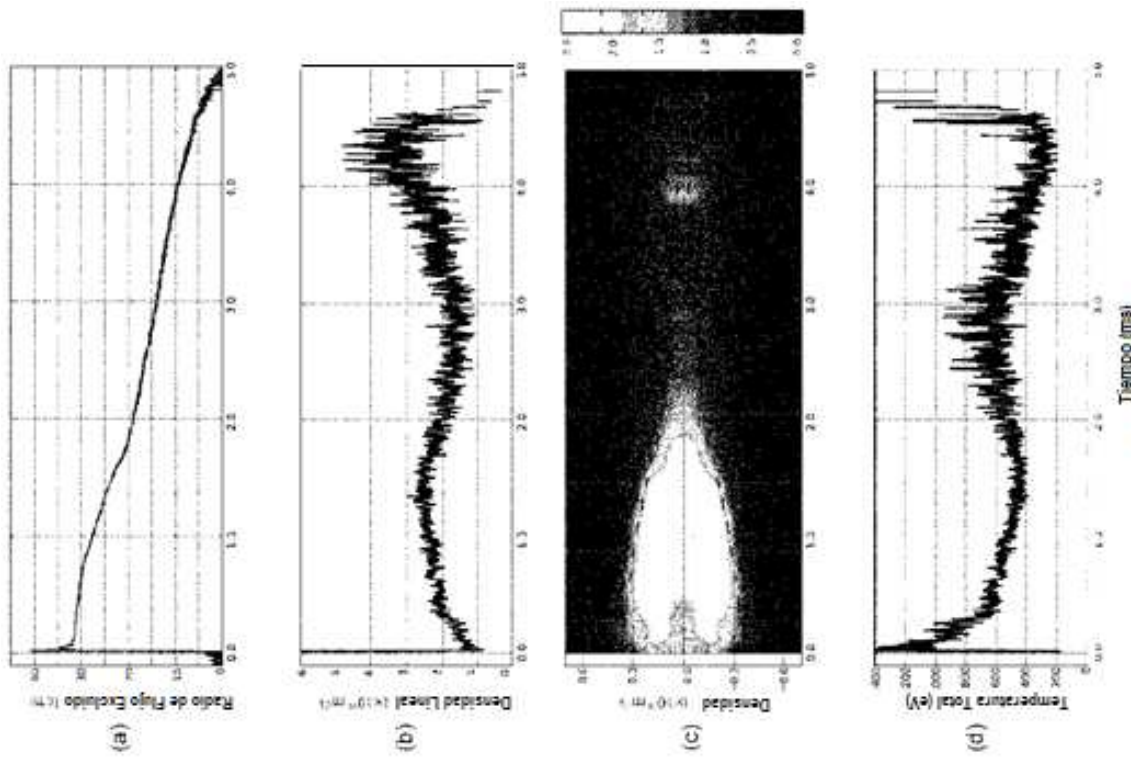


FIGURA 18

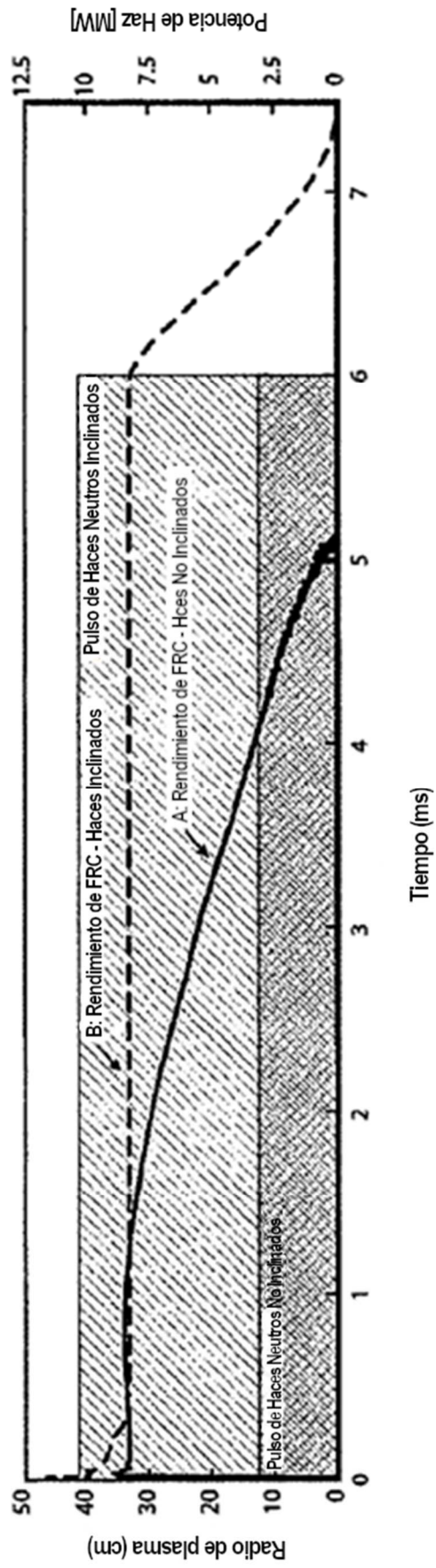


FIGURA 20

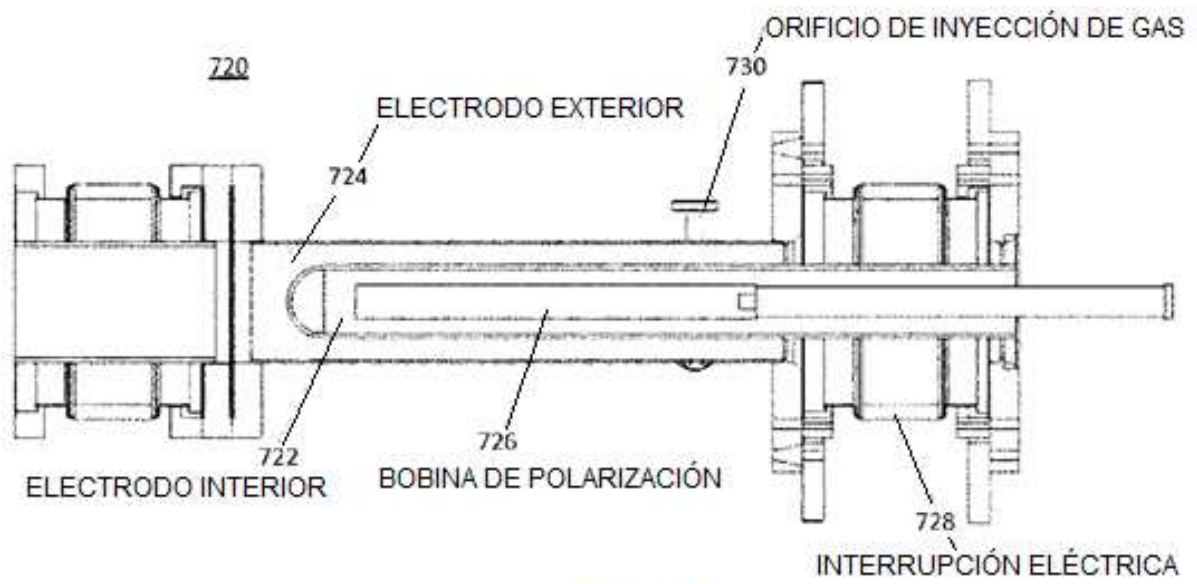


FIGURA 21A

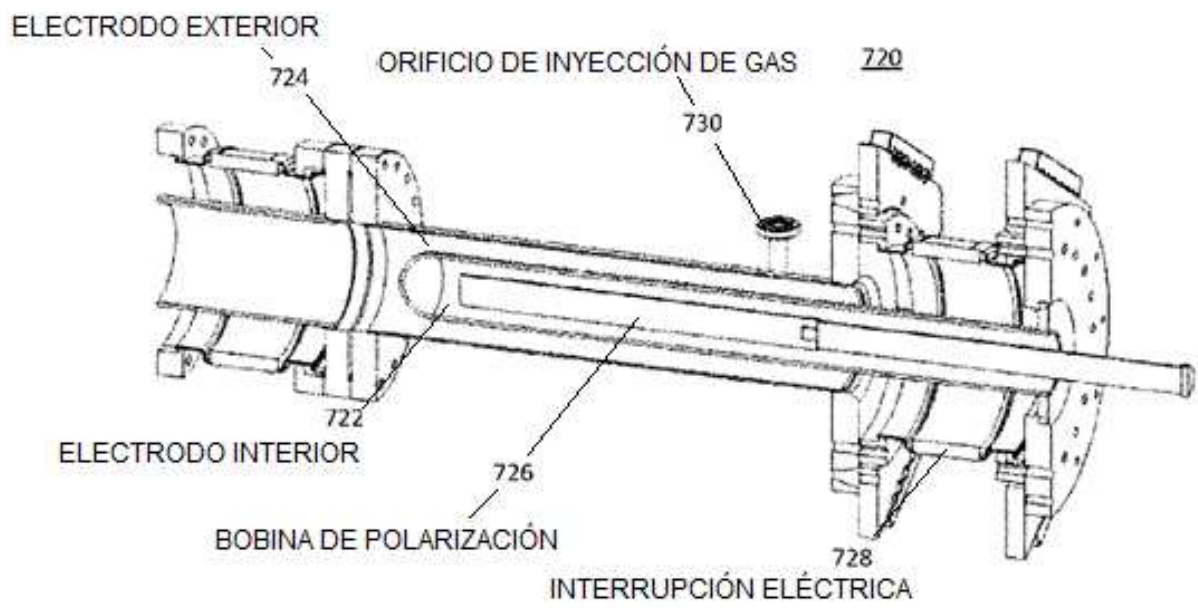


FIGURA 21B

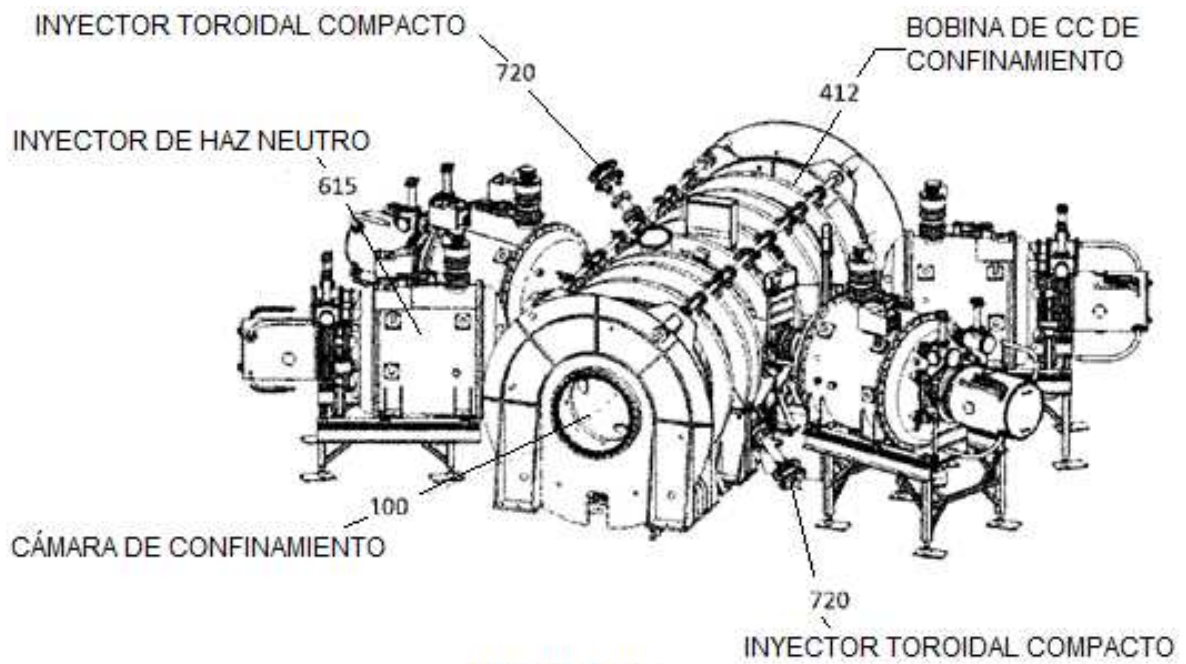


FIGURA 22A

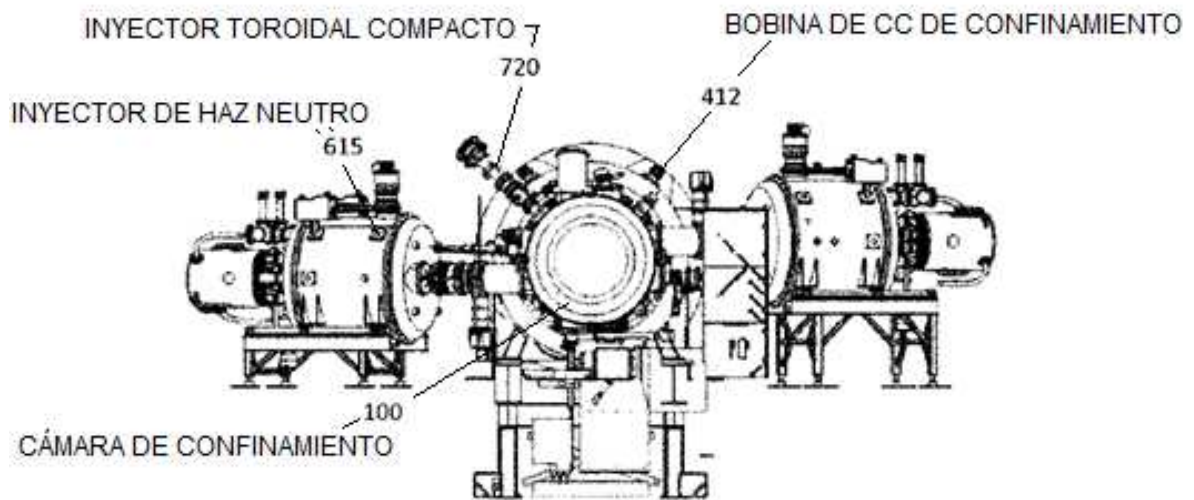


FIGURA 22B

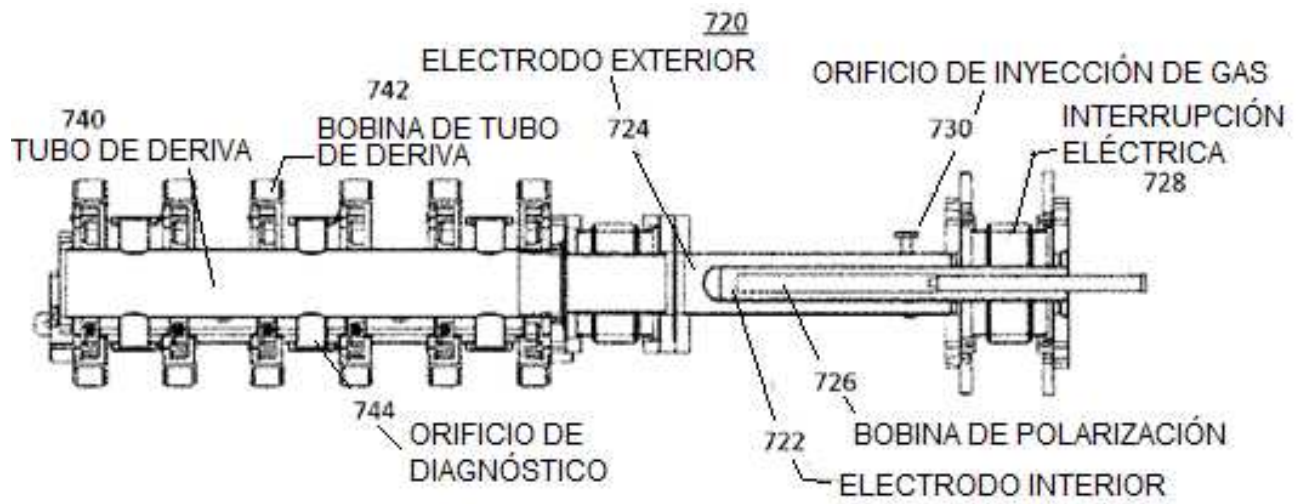


FIGURA 23A

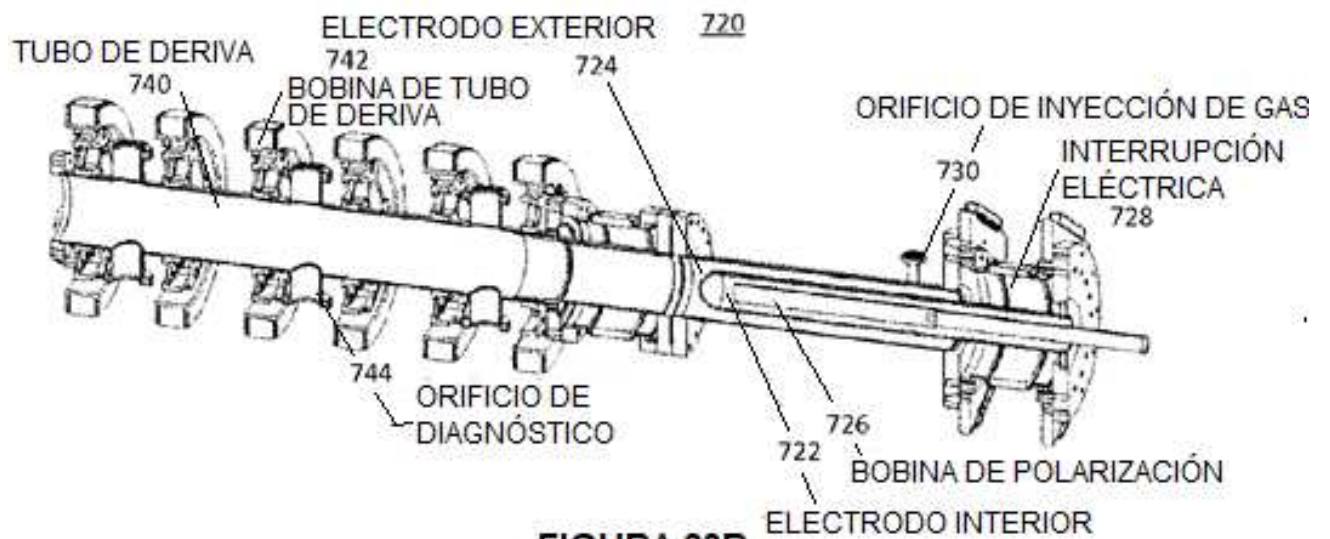


FIGURA 23B