

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 772 770**

51 Int. Cl.:

G21B 1/05 (2006.01)

H05H 1/54 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **12.10.2015 PCT/US2015/055172**

87 Fecha y número de publicación internacional: **21.04.2016 WO16061001**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **12.10.2015 E 15851349 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **20.11.2019 EP 3187028**

54 Título: **Sistemas y procedimientos para fusión y compresión de toros compactos**

30 Prioridad:

13.10.2014 US 201462063382 P

15.10.2014 US 201462064346 P

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

08.07.2020

73 Titular/es:

TAE TECHNOLOGIES, INC. (100.0%)

19631 Pauling

Foothill Ranch, CA 92610, US

72 Inventor/es:

BINDERBAUER, MICHL;

BYSTRITSKII, VITALY y

TAJIMA, TOSHIKI

74 Agente/Representante:

CURELL SUÑOL, S.L.P.

ES 2 772 770 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 y procedimientos para fusión y compresión de toros compactos.

5 **Campo**

Las formas de realización descritas en la presente memoria generalmente se refieren a sistemas de plasma pulsado y, más particularmente, a sistemas y procedimientos que facilitan la fusión y compresión de toros compactos con una estabilidad superior, además de pérdidas significativamente reducidas y de mayor eficiencia.

10

Información de la técnica anterior

La configuración de campo invertido (FRC) pertenece a la clase de topologías de confinamiento de plasma magnético conocidas como toroides compactos. Predominantemente, muestra campos magnéticos poloidales y presenta cero o pequeños campos toroidales autogenerados (véase M. Tuszewski, Nucl. Fusion 28, 2033 (1988)). Los aspectos atractivos de dicha configuración son su geometría simple para facilitar la construcción y el mantenimiento, un desviador natural sin restricciones para facilitar la extracción de energía y la retirada de cenizas y un promedio muy alto (o externo) β (β es la relación entre el promedio de presión del plasma y el promedio de presión del campo magnético dentro de la FRC), es decir, alta densidad de potencia. El indicador de β también es una muy buena medida de eficiencia magnética. Un valor promedio de β elevado, por ejemplo, próximo a 1, representa el uso eficiente de la energía magnética desarrollada y, por lo tanto, resulta esencial para el funcionamiento más económico. El alto promedio de β también es decisivo para permitir el uso de combustibles aneutrónicos como D-He³ y p-B¹¹.

15

20

25

30

35

40

El procedimiento tradicional de formación de una FRC utiliza la tecnología de campo invertido tipo θ pinch, y produce plasmas calientes de alta densidad (véase A. L. Hoffman y J. T. Slough, Nucl. Fusion 33, 27 (1993)). Una variación es el procedimiento de atrapado de traslación en el que el plasma creado en una "fuente" de efecto tipo theta pinch se expulsa más o menos inmediatamente fuera de la región de formación y dentro de una cámara de confinamiento. A continuación, el plasmoides en traslación queda atrapado entre dos espejos fuertes en los extremos de la cámara de confinamiento (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 procedimientos de calentamiento y transmisión de corriente, como inyección de haz (neutro o neutralizado), campos magnéticos giratorios, calentamiento por RF u óhmico, etc. Esta separación de la fuente y de las funciones de confinamiento ofrece ventajas de ingeniería clave para potenciales reactores de fusión futuros. Las FRC han demostrado ser extremadamente robustas, resilientes a la formación dinámica, la traslación y los eventos de captura violenta. Además, muestran una tendencia a adoptar un estado de plasma preferido (véase, por ejemplo, H. Y. Guo, A. L. Hoffman, K. E. Miller y L. C. Steinhauer, Phys. Rev. Lett. 92, 245001 (2004)). Se ha alcanzado un progreso significativo en la última década con el desarrollo de otros procedimientos de formación de FRC: fusionando esferomaks con helicidades dirigidas de manera opuesta (véase, por ejemplo, Y. Ono, M. Inomoto, Y. Ueda, T. Matsuyama y T. Okazaki, Nucl. Fusion 39, 2001 (1999)) y con transmisión de corriente con campos magnéticos giratorios (RMF) (véase, por ejemplo, I. R. Jones, Phys. Plasmas 6, 1950 (1999)), que también proporciona estabilidad adicional.

45

50

Los FRC consisten en un toro de líneas de campo cerradas en el interior de una separatriz y en una capa de borde anular en las líneas de campo abierto justo fuera de dicha separatriz. La capa del borde coalesce en chorros más allá de la longitud de la FRC, lo que proporciona un desviador natural. La topología de FRC coincide con la de un plasma de tipo de espejo de campo invertido. Sin embargo, una diferencia significativa es que el plasma FRC puede presentar un valor β interno de aproximadamente 10. El campo magnético interno bajo inherente proporciona una población de ciertas partículas cinéticas autóctonas, es decir, partículas con radios de Larmor grandes, comparables a los radios menores de FRC. Son estos fuertes efectos cinéticos los que parecen contribuir, por lo menos en parte, a la gran estabilidad de los FRC pasados y presentes, como por ejemplo los producidos en los experimentos de fusión-colisión recientes.

55

60

La técnica de fusión-colisión, propuesta hace mucho tiempo (véase, por ejemplo, D. R. Wells, Phys. Fluids 9, 1010 (1966)), se ha desarrollado significativamente más: dos theta pinch separados en los extremos opuestos de una cámara de confinamiento generan simultáneamente dos plasmoides (por ejemplo, dos toros compactos) y aceleran dichos plasmoides el uno hacia el otro a velocidad elevada; a continuación, colisionan en el centro de la cámara de confinamiento y se fusionan para formar una FRC compuesta. En la construcción y el funcionamiento exitoso de uno de los experimentos de FRC más importantes hasta la fecha, se mostró que el procedimiento convencional de fusión-colisión produce FRC estables, duraderas, de alto flujo y alta temperatura (véase, por ejemplo, M. Binderbauer, H.Y. Guo, M. Tuszewski et al., Phys. Rev. Lett. 105, 045003 (2010)).

65

En un experimento relacionado, el mismo equipo de investigadores combinó la técnica de fusión-colisión con la aceleración axial simultánea y la compresión radial para producir un plasma transitorio de alta densidad en una cámara de compresión central (véase V. Bystritskii, M. Anderson, M. Binderbauer et al., Paper P1-1, IEEE PPS 2013, San Francisco, CA. (en adelante "Bystritskii")). Este último experimento documentado en Bystritskii utilizó una

pluralidad de etapas de aceleración y compresión antes de la fusión-colisión final y representa un concepto precursor para el sistema objeto de la presente solicitud de patente.

En contraposición con las formas de realización descritas en la presente memoria, el sistema precursor descrito en Bystritskii presentaba compresión y aceleración simultáneas de toros compactos en la misma etapa mediante el uso de bobinas magnéticas rápidas activas. Se desarrollaron cinco de dichas etapas en cada lado de una cámara de compresión central antes de comprimir magnéticamente los toros compactos fusionados. Si bien el experimento precursor logró un rendimiento respetable, mostró las deficiencias siguientes: (1) la compresión y la aceleración simultáneas condujeron a un uso ineficiente de la energía de accionamiento desarrollada para la compresión magnética debido a un desajuste de sincronización; (2) la temperatura y la densidad disminuyeron a medida que el plasma se expandía durante el tránsito entre secciones; (3) las transiciones bruscas entre secciones adyacentes produjeron grandes pérdidas debido al contacto con la pared de plasma y la generación de ondas de choque.

Aparte del desafío fundamental de la estabilidad, los conceptos de fusión pulsada en el régimen de densidad media deberán abordar escalas de tiempo de transporte adecuadas, accionadores eficientes, capacidad de tasa de repetición y condiciones objetivo finales adecuadas. Si bien el sistema precursor ha alcanzado con éxito descargas únicas estables en condiciones objetivo-alentadoras, las pérdidas colectivas entre la formación y los parámetros objetivos finales (actualmente alrededor del 90 % de la energía, el flujo y las partículas), así como la eficiencia de acoplamiento entre el accionador y el plasma (en la actualidad, alrededor del 10-15 %) necesitan ser mejorados sustancialmente.

La solicitud de patente de los Estados Unidos US 2011/293056 A1 describe un procedimiento para calentar plasmoides que comprende: aumentar una energía cinética de por lo menos uno de entre por lo menos dos plasmoides inicialmente separados entre sí en una distancia, cada uno de los plasmoides presenta una energía térmica inicial respectiva; y confinar, por lo menos temporalmente, una interacción de los plasmoides en una cámara de interacción en un estado de densidad de energía más elevada a una energía térmica mayor que la suma de las energías térmicas iniciales de los plasmoides.

Por lo tanto, a la luz de lo anterior, resulta deseable proporcionar sistemas y procedimientos mejorados para conceptos de fusión pulsada que faciliten una reducción significativa de las pérdidas de traslación y compresión y un aumento en la eficiencia del accionador.

Sumario

Las presentes formas de realización proporcionadas en la presente memoria se refieren a sistemas y procedimientos que facilitan la fusión y compresión de toros compactos con una estabilidad superior, así como una reducción significativa de las pérdidas de traslación y compresión y un aumento en la eficiencia de acoplamiento entre los accionadores y el plasma. Dichos sistemas y procedimientos proporcionan un camino hacia una gran variedad de aplicaciones que incluyen fuentes compactas de neutrones (para la producción de isótopos médicos, reconversión de desechos nucleares, investigación de materiales, radiografía y tomografía de neutrones), fuentes compactas de fotones (para producción y procesados químicos), sistemas de enriquecimiento y separación en masa y núcleos de reactor para fusión para la generación de energía futura y para sistemas de propulsión por fusión.

Los sistemas y procedimientos descritos en la presente memoria se basan en la aplicación de etapas sucesivas de aceleración axialmente simétrica y compresión adiabática para acelerar y calentar dos toros compactos entre sí y, finalmente, colisionar y comprimir magnéticamente de forma rápida los toros compactos en el interior de una cámara de compresión central.

En ciertas formas de realización, un sistema para fusionar y comprimir toros compactos comprende una secuencia simétrica escalonada de formación de toros compactos, aceleración axial por medio de bobinas magnéticas activas rápidas, compresión adiabática pasiva por medio de un conservador de flujo de constricción cónica y, finalmente, fusión de los toros compactos y compresión magnética rápida final en una cámara de compresión central. Las etapas intermedias de suficiente aceleración axial seguidas por compresión adiabática se pueden repetir varias veces para lograr condiciones objetivo-adecuadas antes de la fusión y la compresión final. De esta manera, se puede realizar un reactor agregando secciones adicionales al sistema.

Las etapas o secciones de formación y aceleración y la cámara de compresión central preferentemente tienen forma cilíndrica con paredes formadas en material no conductor o aislante, como, por ejemplo, un material cerámico. Las etapas o secciones de compresión preferentemente presentan una forma troncocónica, con paredes formadas en material conductor, como, por ejemplo, un metal.

Además de un campo de magnético de polarización (campo guía de CC) suministrado por bobinas lentas, las secciones de formación, las secciones de aceleración y la cámara de compresión incluyen sistemas modulares de potencia pulsada que accionan bobinas magnéticas activas rápidas. Los sistemas de potencia pulsada permiten formar toros compactos in situ en las secciones de formación y acelerar e inyectar (= formación estática) en las

5 primeras secciones de compresión, acelerar en las secciones de aceleración e inyectar en las siguientes secciones de compresión, y así sucesivamente, y a continuación, comprimirlos magnéticamente en la cámara de compresión. Los sistemas de bobina magnética lenta o DC ubicados por y a lo largo del eje del sistema proporcionan un campo guía magnético axial para centrar el toro compacto de manera apropiada a medida que se traslada a través de la sección hacia el plano medio de la cámara de compresión central.

10 De forma alternativa, los sistemas modulares de potencia pulsada de las secciones de formación también pueden accionar las bobinas magnéticas activas rápidas, de manera que se formen y aceleren simultáneamente toros compactos (=formación dinámica).

15 Los sistemas y procedimientos descritos en la presente memoria desarrollan FRC, entre los plasmas beta más altos conocidos en confinamiento magnético, para proporcionar la configuración inicial. La compresión pasiva y activa adicional se basa en esta topología magnética altamente eficiente. El proceso de utilización de la aceleración axial a través de secciones de imanes rápidos activos seguidos de compresión adiabática en secciones cónicas que conservan el flujo simple proporciona la transferencia de energía más eficiente con los circuitos de potencia pulsada menos complejos. Además, estos bloques de construcción básicos se pueden secuenciar para aprovechar adicionalmente la escala de compresión inherentemente favorable, es decir, $\Delta p \propto R^4$.

20 En otra forma de realización, el sistema se configura para desenrollar esferomaks en lugar de plasmas iniciadores de FRC.

25 En otra forma de realización, el sistema comprende una secuencia asimétrica escalonada desde un solo lado de la cámara de compresión central que comprende formación de toros compactos, aceleración axial por bobinas magnéticas activas rápidas, compresión adiabática pasiva por medio de un conservador de flujo de constricción cónica y, finalmente, fusión del toro compacto y compresión magnética rápida final en la cámara de compresión central. Dicho sistema asimétrico podría incluir un espejo o cono de rebote colocado adyacente al otro lado de la compresión central.

30 En otra forma de realización adicional, el sistema comprende una envuelta o revestimiento cilíndrico delgado compuesto de material conductor, como por ejemplo un metal, para la compresión rápida del revestimiento dentro de la cámara de compresión central.

35 Otros sistemas, procedimientos, características y ventajas de las formas de realización a título de ejemplo se pondrán de manifiesto para un experto en la técnica al examinar las siguientes figuras y la descripción detallada.

Breve descripción de las figuras

40 Los dibujos adjuntos, que se incluyen como parte de la presente especificación, ilustran la forma de realización preferida actualmente y, junto con la descripción general indicada con anterioridad y la descripción detallada de la forma de realización preferida proporcionada a continuación, sirven para mostrar y enseñar los principios de la presente invención.

45 La figura 1 ilustra una disposición básica de un sistema para formar, acelerar, comprimir adiabáticamente, fusionar y, finalmente, comprimir magnéticamente toros compactos.

La figura 2 ilustra un esquema de los componentes de un sistema de potencia pulsada para las secciones de formación y aceleración.

50 La figura 3 ilustra una vista isométrica de una formación de potencia pulsada individual y un patín de aceleración.

La figura 4 ilustra una vista isométrica de un conjunto de tubo de formación y aceleración.

55 La figura 5 ilustra una disposición básica de una forma de realización alternativa de un sistema asimétrico para formar, acelerar, comprimir adiabáticamente, fusionar y, finalmente, comprimir magnéticamente toros compactos.

60 La figura 6 ilustra una vista detallada del sistema que se muestra en la figura 1, modificado para incluir una envuelta o revestimiento posicionado en el interior de la cámara de compresión central para una compresión rápida del revestimiento en el interior de la cámara de compresión central.

65 Se deberá observar que las figuras no están necesariamente dibujadas a escala y que los elementos de estructuras o funciones similares se representan en general con números de referencia similares con fines ilustrativos en todas las figuras. También se deberá tener en cuenta que las figuras únicamente están concebidas para facilitar la descripción de las diversas formas de realización descritas en la presente memoria. Dichas figuras no describen necesariamente todos y cada uno de los aspectos de las enseñanzas descritas en la presente memoria y no limitan

el alcance de las reivindicaciones.

Descripción

5 Las presentes formas de realización proporcionadas en la presente memoria se refieren a sistemas y procedimientos que facilitan la fusión y compresión de toros compactos con una estabilidad superior, así como una reducción significativa de las pérdidas de traslación y compresión y un aumento en la eficiencia de acoplamiento entre los accionadores y el plasma. Dichos sistemas y procedimientos proporcionan un camino hacia una gran variedad de aplicaciones que incluyen fuentes compactas de neutrones (para producción de isótopos médicos, reconversión de desechos nucleares, investigación de materiales, radiografía y tomografía de neutrones), fuentes compactas de fotones (para producción y procesado químico), sistemas de separación y enriquecimiento de masa y núcleos de reactor para fusión para la futura generación de energía y para sistemas de propulsión por fusión.

15 Los sistemas y procedimientos descritos en la presente memoria se basan en la aplicación de etapas sucesivas de aceleración axialmente simétrica y compresión adiabática para acelerar y calentar dos toros compactos entre sí y, finalmente, colisionar y comprimir magnéticamente de forma rápida los toros compactos en el interior de una cámara de compresión central. La figura 1 ilustra la disposición básica de un sistema 10 para formar, acelerar, comprimir adiabáticamente, fusionar y finalmente comprimir magnéticamente los toros compactos.

20 Tal como se muestra, el sistema comprende una secuencia simétrica escalonada de formación de toros compactos en las secciones de formación 12N y 12S, de aceleración axial a través de las secciones 12N, 12S, 16N y 16S mediante bobinas magnéticas activas rápidas 32N, 32S, 36N y 36S, compresión adiabática pasiva mediante un conservador de flujo de constricción cónica en las secciones 14N, 14S, 18N y 18S y, finalmente, la fusión de los toros compactos y la compresión magnética rápida final en una cámara de compresión central 20 mediante bobinas magnéticas activas rápidas 40. Tal como se ilustra, las etapas intermedias de aceleración axial suficiente seguida de una compresión adiabática se pueden repetir varias veces para lograr las condiciones objetivo-adequadas antes de la fusión y la compresión final. De esta manera, se puede realizar un reactor agregando secciones adicionales al sistema representado.

30 Tal como se representa, las etapas o secciones de formación y aceleración 12N, 12S, 16N y 16S y la cámara de compresión central 20 preferentemente tienen forma cilíndrica con paredes formadas por material no conductor o aislante, como, por ejemplo, un material cerámico. Las etapas o secciones de compresión 14N, 14S, 18N y 18S preferentemente tienen forma troncocónica con paredes formadas en material conductor como, por ejemplo, un metal.

35 Además de un campo magnético de polarización (campo guía CC) suministrado por bobinas pasivas lentas 30, las secciones de formación 12N y 12S, las secciones de aceleración 16N y 16S y la cámara de compresión 20 incluyen unos sistemas modulares de potencia pulsada que accionan bobinas magnéticas activas rápidas 32N, 32S, 36N, 36S y 40. Los sistemas de potencia pulsada permiten que se formen toros compactos in situ en el interior de las secciones de formación 12N y 12S y que se aceleren y se inyecten (=formación estática) en las primeras secciones de compresión 14N y 14S, se aceleran en las secciones de aceleración 16N y 16S y se inyectan en las siguientes secciones de compresión 18N y 18S, y así sucesivamente, y luego se comprimen magnéticamente en la cámara de compresión 20. Los sistemas de bobinas magnéticas pasivas lentas 30 ubicadas por y a lo largo del eje del sistema proporcionan un campo guía magnético axial para centrar los toros compactos de manera apropiada.

45 De forma alternativa, los sistemas modulares de potencia pulsada de las secciones de formación también pueden accionar las bobinas magnéticas rápidas, de manera que se formen y aceleren simultáneamente los toros compactos (=formación dinámica).

50 Los sistemas y procedimientos descritos en la presente memoria desarrollan la FRC, entre los plasmas beta más altos conocidos en confinamiento magnético, para proporcionar la configuración inicial. La compresión pasiva y activa adicional se basa en esta topología magnética altamente eficiente. El proceso de utilización de la aceleración axial a través de secciones de imanes rápidos activos seguidos de compresión adiabática en secciones cónicas de conservación de flujo simple proporciona la transferencia de energía más eficiente con los circuitos de potencia pulsada menos complejos. Además, estos bloques de construcción básica se pueden secuenciar para aprovechar adicionalmente la escala de compresión inherentemente favorable, es decir, $\Delta p \propto R^4$.

60 De acuerdo con la investigación experimental y teórica hasta la fecha, un experimento precursor según lo descrito en Bystritskii, que utiliza plasmas iniciadores de FRC, ha logrado densidades aproximadamente entre 10^{17} cm^{-3} y 1 keV. Se estima que las formas de realización propuestas en la presente memoria alcanzan densidades aproximadamente entre 10^{18} cm^{-3} y 1 keV, mientras que la adición de etapas adicionales y actualizaciones apropiadas a la cámara central y a las bobinas magnéticas rápidas puede dar lugar a densidades finales aproximadamente entre 10^{18} cm^{-3} en condiciones completas de Lawson.

65 En otra forma de realización, el sistema se configura para desarrollar esferomaks en lugar de plasmas iniciadores de FRC.

5 En otra forma de realización, el sistema comprende una secuencia asimétrica escalonada desde un solo lado de la cámara de compresión central que comprende la formación de toros compactos, la aceleración axial por bobinas magnéticas activas rápidas, la compresión adiabática pasiva por medio de un conservador de flujo de constricción cónica y, finalmente, la fusión de los toros compactos y la compresión magnética rápida final en la cámara de compresión central. Dicho sistema asimétrico incluiría un espejo o un cono de rebote.

10 En otra forma de realización adicional, el sistema comprende una envuelta o revestimiento cilíndrico delgado compuesto de material conductor, como, por ejemplo, un metal, para la compresión rápida del revestimiento en el interior de la cámara de compresión central.

15 Los conceptos de fusión actuales se centran en regímenes de estado estacionario o pulsados ultracortos. Ambas aproximaciones requieren una gran inversión de capital: en la fusión magnética en estado estacionario, los grandes imanes superconductores y las tecnologías auxiliares de transición de corriente/calor generan gastos elevados; los regímenes de inercia están dominados por el alto coste del accionador debido al gran suministro de energía en escalas de tiempo de nanosegundos. Las formas de realización desarrolladas en la presente memoria se caracterizan por escalas de tiempo de tamaño compacto y de submilisegundos. Esto conduce a un régimen que ha relajado los requisitos de potencia máxima y ha dado lugar a escalas de tiempo intermedio más atractivas.

20 Volviendo en detalle al dibujo, tal como se representa en la figura 1, un sistema 10 para fusionar y comprimir plasma de toros compactos incluye una cámara de compresión central 20 y un par de secciones de formación de toros compactos diametralmente opuestas norte y sur 12N y 12S. La primera y la segunda sección de formación 12N y 12S incluyen unos sistemas modularizados de formación y aceleración 120 (que se exponen a continuación en detalle con respecto a las figuras 2 a 4) para generar primeros y segundos toros compactos de plasma y para
25 acelerar y trasladar axialmente los toros compactos hacia un plano medio de la cámara de compresión 20.

30 Tal como se representa, el sistema 10 incluye además un primer par de secciones de compresión diametralmente opuestas norte y sur 14N y 14S acopladas en un primer extremo a un extremo de salida de las secciones de formación norte y sur 12N y 12S. Dichas secciones de compresión norte y sur 14N y 14S se configuran de manera que compriman adiabáticamente los toros compactos a medida que dichos toros compactos atraviesan las secciones de compresión norte y sur 14N y 14S hacia el plano medio de la cámara de compresión 20.

35 Tal como se muestra, el sistema 10 incluye además un par de secciones de aceleración diametralmente opuestas norte y sur 16N y 16S acopladas en un primer extremo a un segundo extremo del primer par de secciones de compresión norte y sur 14N y 14S. Dichas secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S incluyen unos sistemas de aceleración modularizados (que se exponen a continuación con respecto a las figuras 2 a 4) para acelerar axialmente y trasladar los toros compactos hacia el plano medio de la cámara de compresión 20.

40 Tal como se muestra adicionalmente, el sistema 10 incluye además un segundo par de secciones de compresión diametralmente opuestas norte y sur 18N y 18S acopladas en un primer extremo a un segundo extremo de las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y en un segundo extremo al primer y al segundo extremo diametralmente opuestos de la cámara de compresión, el segundo par de secciones de compresión norte y sur 18N y 18S se configura de manera que comprima adiabáticamente los toros compactos a medida que dichos toros compactos atraviesan el segundo par de secciones de compresión norte y sur 18N y 18S hacia el plano medio de
45 la cámara de compresión 20.

La cámara de compresión incluye unos sistemas de compresión modularizados configurados de manera que compriman magnéticamente los toros compactos en caso de colisión y fusión de los mismos.

50 Tal como se muestra, en las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y la cámara de compresión 20 tienen forma cilíndrica. El diámetro de las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S es menor que el diámetro de las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, mientras que el diámetro de la cámara de compresión 20 es mayor que el diámetro de las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S.

55 El primer y el segundo par de secciones de compresión norte y sur 14N, 14S, 18N y 18S presentan una forma cónica troncocónica con un diámetro mayor en un primer extremo que en un segundo extremo, que permite una transición en el diámetro general del sistema 10 desde las secciones de formación 12N y 12S hasta las secciones de aceleración 16N y 16S y hasta la cámara de compresión 20. Tal como se muestra, las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, el primer par de secciones de compresión norte y sur 14N y 14S, las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y el segundo par de secciones de compresión norte y sur 18N y 18S son axialmente simétricas.

60 Tal como se muestra, están dispuestos unos primeros y segundos conjuntos de una pluralidad de bobinas magnéticas activas 32N y 32 alrededor y axialmente a lo largo de las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, están dispuestos unos terceros y cuartos conjuntos de una pluralidad de bobinas magnéticas activas 36N y
65

36S alrededor y axialmente a lo largo de las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y se dispone un quinto conjunto de una pluralidad de bobinas magnéticas activas 40 alrededor y axialmente a lo largo de la cámara de compresión 20.

5 Las secciones de compresión 14N, 14S, 18N y 18S se forman preferentemente a partir de material conductor, como por ejemplo un metal, mientras que la cámara de compresión central 20 y las secciones de formación y aceleración 12N, 12S, 16N y 16S se forman preferentemente a partir de un material no conductor o aislante como, por ejemplo, un material cerámico.

10 Tal como se muestra, se dispone una pluralidad de bobinas magnéticas de CC 30 alrededor y axialmente a lo largo de la cámara de compresión central 20 y de las secciones de formación, compresión y aceleración 12N, 12S, 14N, 14S, 16N, 16S, 18N y 18S para formar un campo guía de polarización o CC en el interior y que se extiende axialmente por la cámara de compresión central y las secciones de formación, compresión y aceleración.

15 Los sistemas de conmutación y control de disparo 120, que se muestran en las figuras 2 a 4, se configuran de manera que permitan una secuencia simétrica escalonada de formación de toros compactos mediante bobinas magnéticas activas 32N y 32S en las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, de aceleración axial mediante bobinas magnéticas activas 36N y 36S en las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y de compresión mediante bobinas magnéticas activas 40 en la cámara de compresión 20. Dichos sistemas de conmutación y de control de disparo 120 se configuran de manera que sincronicen la formación de los toros compactos y la aceleración en las secciones de formación norte y sur 12N y 12S, la aceleración de los toros compactos en las secciones de aceleración norte y sur 16N y 16S y la fusión y compresión de los toros compactos en la cámara de compresión 20.

25 Haciendo referencia de nuevo a las figuras 2 a 4, se prevé un sistema de energía pulsada 120 individual que se corresponde con y alimenta los sistemas individuales de los primeros, segundos, terceros, cuartos y quintos conjuntos de la pluralidad de imanes activos 32N, 32S, 36N, 36S y 40 de las secciones de formación 12N y 12S, las secciones de aceleración 16N y 16S y la cámara de compresión 20. En las secciones de formación, el sistema de energía de pulso de 120 funciona de acuerdo con un principio modificado de tipo theta pinch para formar los toros compactos. Las figuras 2 a 4 ilustran los bloques de construcción principales y la disposición de los sistemas de energía pulsada 120. El sistema de energía pulsada 120 está compuesto por una disposición modular de energía pulsada que consiste en unidades individuales (=patines) 122 que energizan cada una de ellas un subconjunto de bobinas 132 de un conjunto de tiras 130 (tiras) que envuelven los tubos de sección 140. Cada patín 122 está compuesto por condensadores 121, inductores 123, conmutadores rápidos de alta corriente 125 y disparador 124 asociado y circuitería de descarga 126. El funcionamiento coordinado de estos componentes se consigue mediante un sistema de control y disparado de última generación 124 y 126 que permite la temporización sincronizada entre los sistemas de potencia pulsada 120 en cada una de las secciones de formación 12N y 12S, las secciones de aceleración 16N y 16S y la cámara de compresión 20, y que minimiza la inestabilidad a la conmutación a decenas de nanosegundos. La ventaja de este diseño modular es su funcionamiento flexible. En las secciones de formación 12N y 12S, las FRC se pueden formar in situ y luego acelerarse e inyectarse (=formación estática) o formarse y acelerarse al mismo tiempo (=formación dinámica).

45 En funcionamiento, las bobinas pasivas 30 generan un campo guía de CC en el interior y que se extiende axialmente en la cámara de compresión 20, en las secciones de formación 12N y 12S, en las secciones de aceleración 16N y 16S y en las secciones de compresión 14N, 14S, 18N y 18S. Los toros compactos se forman y se aceleran en una secuencia simétrica escalonada en las secciones de formación 12N y 12S y en las secciones de aceleración 16N y 16S y hacia un plano medio de la cámara central 20, se comprimen adiabáticamente de forma pasiva en las secciones de compresión 14N, 14S, 18N y 18S y se fusionan y se comprimen magnéticamente en la cámara central 20. Dichas etapas de formación, aceleración y compresión de toros compactos dan como resultado que dichos toros compactos choquen y se fusionen en el interior de la cámara central 20.

55 Los toros compactos se forman y se aceleran mediante la energización de bobinas magnéticas activas 32N y 32S que se extienden alrededor y axialmente por las secciones de formación 12N y 12S, que se aceleran aún más mediante la energización bobinas magnéticas activas 35N y 36S que se extienden alrededor y axialmente por las secciones de aceleración 16N y 16S y se comprimen energizando bobinas magnéticas activas 40 que se extienden alrededor y axialmente por la cámara de compresión 20. Las etapas para formar, acelerar y comprimir los toros compactos comprenden además encender de forma sincronizada pares diametralmente opuestos de bobinas magnéticas activas 32N y 32S, y 36N y 36S posicionadas alrededor y a lo largo de las secciones de formación 12N y 12S y de aceleración 16N y 16S y un conjunto de bobinas magnéticas activas 40 posicionadas alrededor y a lo largo de la cámara de compresión 20.

60 A medida que se aceleran los toros compactos hacia el plano medio de la cámara de compresión 20, los toros compactos se comprimen a medida que dichos toros compactos se trasladan por los conservadores de flujo de constricción cónica de las etapas de compresión 14N, 14S, 18N y 18S.

65

Retronando a la figura 5, se ilustra una forma de realización alternativa de un sistema 100 para fusionar y comprimir plasma de toro compacto. Tal como se muestra, el sistema 100 comprende una secuencia asimétrica escalonada desde un solo lado de la cámara de compresión central 20. Dicho sistema 100 incluye una única sección de formación de toroides compactos 12S, una primera sección de compresión 14S acoplada sobre un primer extremo a un extremo de salida de la sección de formación 12S, una sección de aceleración 16N acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la sección de compresión 14S, una segunda sección de compresión 18S acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la sección de aceleración 16S y en un segundo extremo a un primer extremo de la cámara de compresión 20. Un espejo o cono de rebote 50 está posicionado adyacente al otro extremo de la compresión central 20.

En funcionamiento, se forma y se acelera un primer toroide compacto en una secuencia escalonada dentro de la sección de formación 12S y, a continuación, se acelera en una o más etapas de aceleración 16S hacia un plano medio de la cámara central 20 para colisionar y fusionarse con un segundo toroide compacto. El primer toroide compacto se comprime adiabáticamente de forma pasiva en una o más etapas de compresión 14S y 18S y, a continuación, se comprime magnéticamente como un toroide compacto fusionado con el segundo toroide compacto en la cámara central 20.

El segundo toroide compacto se forma y se acelera en una secuencia escalonada dentro de la sección de formación 12S y las una o más etapas de aceleración 16S hacia un plano medio de la cámara central 20, se comprime adiabáticamente de forma pasiva en una o más etapas de compresión y, a continuación, se polariza hacia el plano medio de la cámara central 20 a medida que pasa a través de la cámara central 20 con un espejo o un cono de rebote 50 posicionado adyacente a un extremo de la cámara central 20.

Retornando a la figura 6, se ilustra una forma de realización alternativa de un sistema 200 para fusionar y comprimir plasma toros compactos, en una vista en detalle parcial que muestra la cámara de compresión 20 con una sección de compresión diametralmente opuesta 18N y 18S acoplada a lados opuestos de la cámara 20. Dicho sistema 200 comprende además una envuelta o revestimiento cilíndrico 60 posicionado en el interior de la cámara de compresión central 20 para una compresión rápida del revestimiento.

A pesar de que la invención es susceptible de diversas modificaciones y formas alternativas, en la presente memoria se han mostrado en los dibujos y se han descrito ejemplos específicos de la misma en detalle. Sin embargo, se deberá entender que la invención no se limitará a las formas o procedimientos particulares descritos, sino que, por el contrario, la invención cubre la totalidad de las modificaciones, equivalentes y alternativas que recaen dentro del espíritu y del alcance de las reivindicaciones adjuntas.

En la descripción anterior, únicamente con fines explicativos, se establece una nomenclatura específica para proporcionar una comprensión exhaustiva de la presente divulgación. Sin embargo, para un experto en la materia, se pondrá de manifiesto que dichos detalles específicos no resultan necesarios para poner en práctica las enseñanzas de la presente descripción.

Las diversas características de los ejemplos representativos y las reivindicaciones dependientes se pueden combinar de formas que no se enumeran específica y explícitamente, a fin de proporcionar formas de realización útiles adicionales de las presentes enseñanzas. Asimismo, se señala expresamente que la totalidad de los rangos de valores o indicaciones de grupos de entidades dan a conocer todos los posibles valores intermedios o entidades intermedias con el propósito de revelación original, así como con el propósito de restringir la materia objeto reivindicada.

Se han descrito sistemas y procedimientos para fusionar y comprimir toros compactos. Se entenderá que las formas de realización descritas en la presente memoria tienen el propósito de poner de manifiesto y no se deben considerar limitativas de la materia objeto que se da a conocer. Para el experto en la técnica, se pondrán de manifiesto varias modificaciones, usos, sustituciones, combinaciones, mejoras o procedimientos de producción sin apartarse del alcance o espíritu de la presente invención. Por ejemplo, el lector deberá comprender que el orden específico y la combinación de acciones de proceso descritos en la presente memoria son meramente ilustrativos, a menos que se indique lo contrario, y que la invención se puede llevar a cabo utilizando acciones de proceso diferentes o adicionales, o una combinación u orden diferente de acciones de proceso. Como otro ejemplo, cada característica de una forma de realización se puede mezclar y combinar con otras características mostradas en otras formas de realización. Las características y los procesos conocidos por los expertos en la técnica se pueden incorporar de manera similar según se desee. Además, y obviamente, las características se pueden agregar o reducir según se desee.

REIVINDICACIONES

1. Sistema (100, 200) para fusionar y comprimir plasma de toros compactos que comprende:

5 una cámara de compresión (20) configurada para comprimir magnéticamente un toroide compacto, una sección de formación de toroide compacto (12N, 12S) configurada en una forma cilíndrica con una pluralidad de bobinas magnéticas activas (32N, 32S) que están dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la sección de formación (12N, 12S), que comprende:

10 unas secciones de formación y aceleración modularizadas para generar el toroide compacto y acelerar axialmente dicho toroide compacto y trasladar el toroide compacto hacia un plano medio de la cámara de compresión (20),

15 una primera sección de compresión (14N, 14S) acoplada sobre un primer extremo a un extremo de salida de la sección de formación (12N, 12S), estando la primera sección de compresión (14N, 14S) configurada con un conservador de flujo de constricción cónica para comprimir adiabáticamente de forma pasiva el toroide compacto a medida que el toroide compacto atraviesa la primera sección de compresión (14N, 14S) hacia el plano medio de la cámara de compresión (20),

20 una sección de aceleración (16N, 16S) configurada en una forma cilíndrica con una pluralidad de bobinas magnéticas activas (36N y 36S) que están dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la sección de aceleración (16N, 16S), estando la sección de aceleración (16N, 16S) acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la primera sección de compresión (14N, 14S) y que comprende unos sistemas de aceleración modularizados para acelerar axialmente el toroide compacto y trasladar el toroide compacto hacia

25 el plano medio de la cámara de compresión (20),

30 una segunda sección de compresión (18N, 18S) acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la sección de aceleración (16N, 16S) y sobre un segundo extremo a un primer extremo de la cámara de compresión (20), estando la segunda sección de compresión configurada con un conservador de flujo de constricción cónica para comprimir adiabáticamente de forma pasiva el toroide compacto a medida que el toroide compacto atraviesa la segunda sección de compresión (18N, 18S) hacia el plano medio de la cámara de compresión (20).

35 2. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, en el que la sección de formación (12N, 12S), la sección de aceleración (16N, 16S) y la cámara de compresión (20) tienen forma cilíndrica, siendo el diámetro de la sección de aceleración (16N, 16S) más pequeño que el diámetro de la sección de formación (12N, 12S) y siendo el diámetro de la cámara de compresión (20) más pequeño que el diámetro de la sección de aceleración (16N, 16S).

40 3. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, en el que las primeras (14N, 14S) y las segundas (18N, 18S) secciones de compresión tienen forma troncocónica, siendo el diámetro de las primeras (14N, 14S) y las segundas (18N, 18S) secciones de compresión mayor en el primer extremo que en el segundo extremo.

45 4. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, en el que la sección de formación (12N, 12S), las primeras (14N, 14S) y las segundas (18N, 18S) secciones de compresión, la sección de aceleración (16N, 16S) y la cámara de compresión (20) están alineadas axialmente.

50 5. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, que comprende asimismo unos sistemas de conmutación y control de disparo (120) configurados de manera que permitan una secuencia escalonada de formación de toroide compacto y de aceleración axial por medio de unas bobinas magnéticas activas (32N, 32S, 36N, 36S).

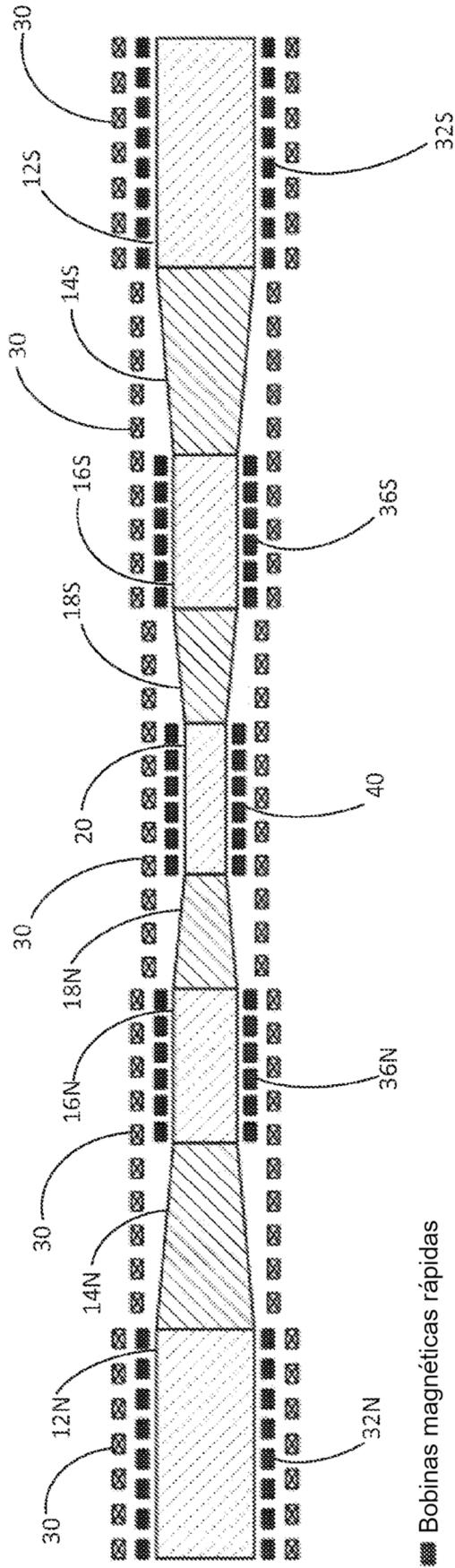
55 6. Sistema (100, 200) según la reivindicación 5, en el que los sistemas de conmutación y control de disparo (120) están configurados asimismo de manera que permitan la compresión magnética del toroide compacto mediante unas bobinas magnéticas activas (32N, 32S, 36N, 36S) en una secuencia escalonada que sigue a la secuencia escalonada de formación del toroide compacto y de aceleración axial por medio de unas bobinas magnéticas activas (32N, 32S, 36N, 36S).

60 7. Sistema (100, 200) según la reivindicación 5, en el que los sistemas de conmutación y control de disparo (120) están configurados para sincronizar la formación y la aceleración del toroide compacto en la sección de formación (12N, 12S) y sincronizar la aceleración del toroide compacto en la sección de aceleración (16N, 16S) con el posicionamiento de un segundo toroide compacto en el plano medio de la cámara de compresión (20).

65 8. Sistema (100, 200) según la reivindicación 6, en el que los sistemas de conmutación y control de disparo (120) están configurados asimismo para sincronizar la compresión del toroide compacto y el segundo toroide compacto con la formación y la aceleración en la sección de formación (12N, 12S), la aceleración del toroide compacto en la sección de aceleración (16N, 16S) y el posicionamiento del segundo toroide compacto en el plano medio de la cámara de compresión (20).

- 5 9. Sistemas (100, 200) según la reivindicación 1 que comprenden asimismo una pluralidad de bobinas magnéticas de CC (30) dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la cámara de compresión central (20) y la formación (12N, 12S), la compresión (14N, 14S, 18N, 18S) y las secciones de aceleración (16N, 16S) para formar un campo guía de polarización o CC en el interior y que se extiende axialmente a través de la cámara de compresión central (20) y las secciones de formación (12N, 12S), de compresión (14N, 14S, 18N, 18S) y de aceleración (16N, 16S).
- 10 10. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, que comprende asimismo una envuelta o revestimiento cilíndrico dispuesto en el interior de la cámara de compresión central (20) para una compresión rápida de revestimiento.
11. Sistema (100, 200) según la reivindicación 1, que comprende asimismo uno de entre un espejo y un cono de rebote (50) acoplado a un segundo extremo de la cámara de compresión central (20).
- 15 12. Sistema (100, 200) según las reivindicaciones 1 a 11 que comprende asimismo
- 20 una segunda sección de formación de toros compactos (12N, 12S) diametralmente opuesta a la sección de formación compacta configurada en una forma cilíndrica con una pluralidad de bobinas magnéticas activas (32N, 32S) que están dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la sección de formación (12N, 12S), que comprende unos sistemas de formación y aceleración modularizados para generar unos toros compactos de plasma y acelerar axialmente los toros compactos y trasladar los toros compactos hacia un plano medio de la cámara de compresión (20),
- 25 una tercera sección de compresión (14N, 14S) diametralmente opuesta a la primera sección de compresión y acoplada sobre un primer extremo a un extremo de salida de la segunda sección de formación, estando la tercera sección de compresión configurada con un conservador de flujo de constricción cónica para comprimir adiabáticamente de forma pasiva los toros compactos a medida que los toros compactos atraviesan la tercera sección de compresión hacia el plano medio de la cámara de compresión (20),
- 30 una segunda sección de aceleración (16N, 16S) diametralmente opuesta a la sección de aceleración y configurada en una forma cilíndrica con una pluralidad de bobinas magnéticas activas (36N, 36S) que están dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la sección de aceleración (16N, 16S), estando la sección de aceleración acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la tercera sección de compresión, comprendiendo la segunda sección de aceleración unos sistemas de aceleración modularizados para acelerar axialmente los toros compactos y trasladar los toros compactos hacia el plano medio de la cámara de compresión (20), y
- 35 una cuarta sección de compresión (18N, 18S) diametralmente opuesta a la segunda sección de compresión y acoplada sobre un primer extremo a un segundo extremo de la segunda sección de aceleración y sobre un segundo extremo a un segundo extremo de la cámara de compresión diametralmente opuesta al primer extremo de la cámara de compresión, estando la cuarta sección de compresión configurada con un conservador de flujo de constricción cónica para comprimir adiabáticamente de forma pasiva los toros compactos a medida que los toros compactos atraviesan las cuartas secciones de compresión hacia el plano medio de la cámara de compresión (20).
- 45 13. Sistema (100, 200) según la reivindicación 12, en el que la cámara de compresión (20) está configurada de manera que comprima magnéticamente los toros compactos después de la colisión y fusión de los mismos.
- 50 14. Sistema (100, 200) según la reivindicación 12, en el que la cámara de compresión (20) comprende un sistema de aceleración modularizado para comprimir magnéticamente los toros compactos después de la colisión y fusión de los mismos.
- 55 15. Sistemas (100, 200) según la reivindicación 12 que comprenden asimismo una pluralidad de bobinas magnéticas de CC (30) dispuestas alrededor y axialmente a lo largo de la cámara de compresión central (20) y las secciones de formación (12N, 12S), de compresión (14N, 14S) y de aceleración (16N, 16S) para formar un campo guía de polarización o CC en el interior y que se extiende axialmente a través de la cámara de compresión central (20) y de las secciones de formación (12N, 12S), de compresión (14N, 14S) y de aceleración (16N, 16S).
- 60 16. Sistema (100, 200) según la reivindicación 12, que comprende asimismo una envuelta o revestimiento cilíndrico (60) posicionado en el interior de la cámara de compresión central (20) para una compresión rápida de dicho revestimiento.

10



- Bobinas magnéticas rápidas
- Bobinas magnéticas lentas
- ▨ Pared conductora
- ▩ Pared aislante

FIGURA 1

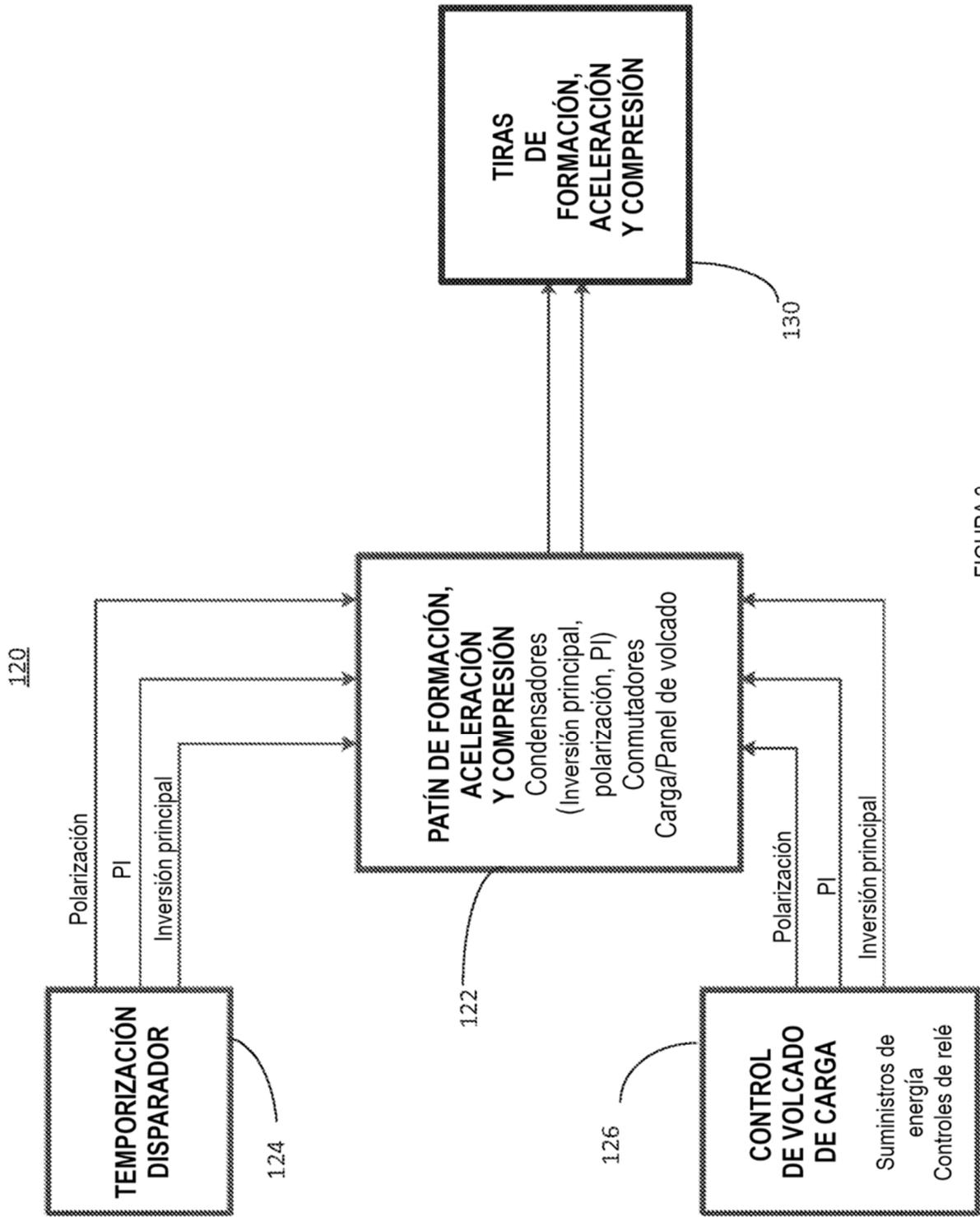


FIGURA 2

x

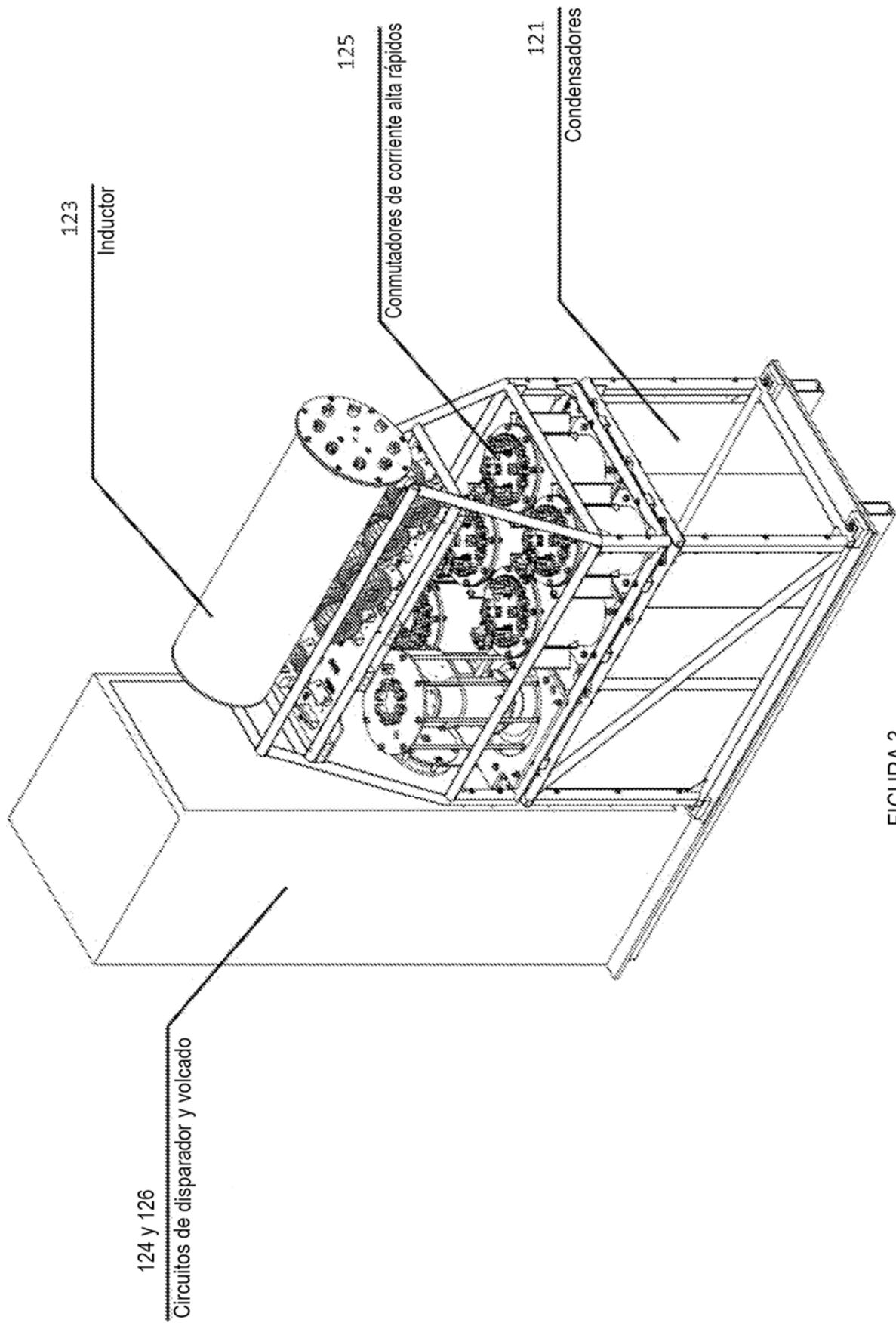


FIGURA 3

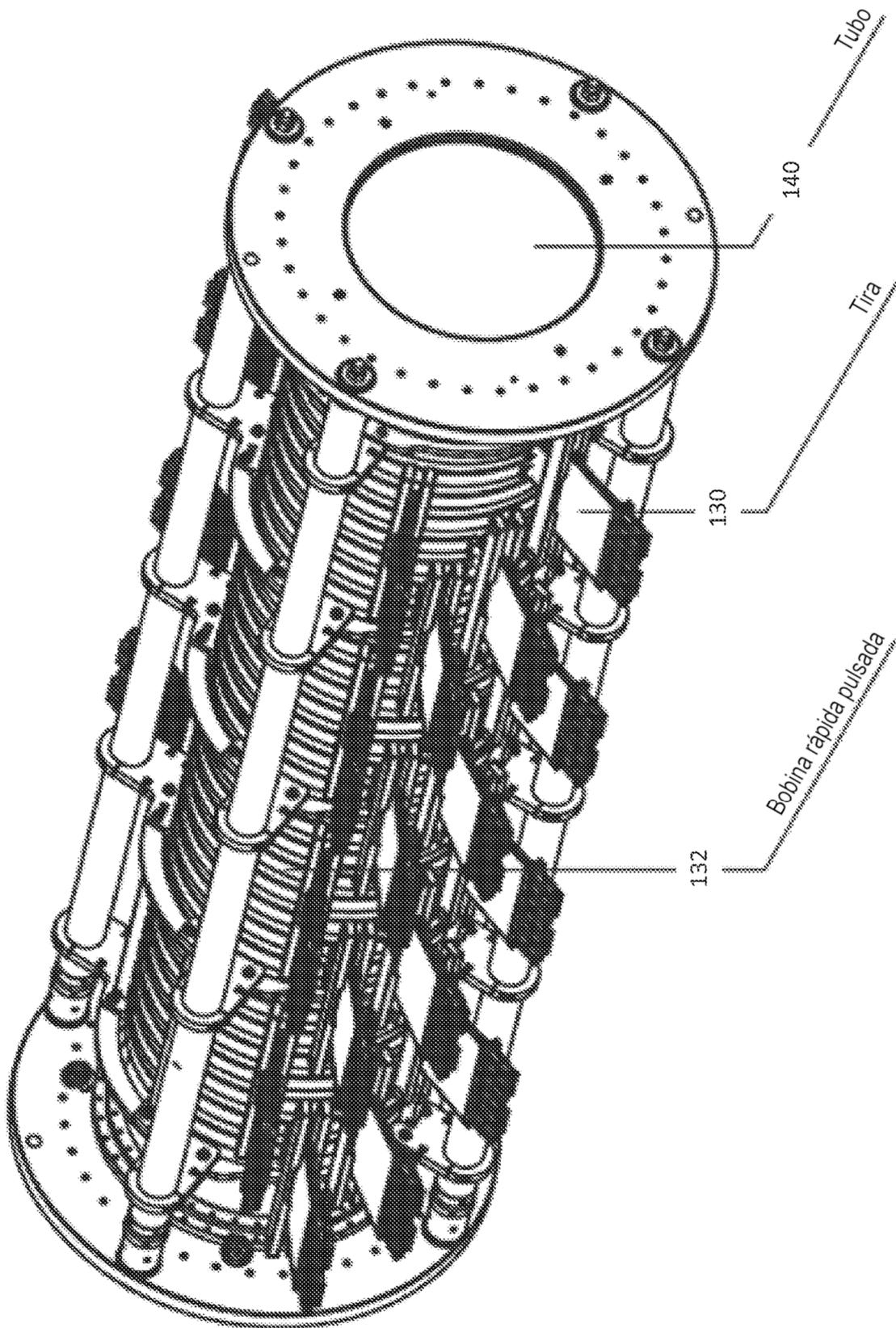


FIGURA 4

