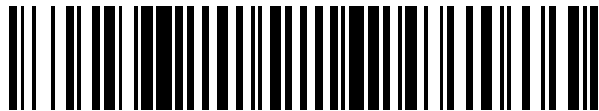


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 916 023**

21 Número de solicitud: 202131221

51 Int. Cl.:

**H05H 1/12** (2006.01)

**G21B 1/05** (2006.01)

12

PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

22 Fecha de presentación:

**28.12.2021**

43 Fecha de publicación de la solicitud:

**27.06.2022**

Fecha de concesión:

**07.12.2022**

45 Fecha de publicación de la concesión:

**15.12.2022**

73 Titular/es:

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID  
(100.0%)**

**C/ Ramiro de Maeztu, 7  
28040 Madrid (Madrid) ES**

72 Inventor/es:

**ROSALES BEJARANO, José Luis y  
MARTÍN AYUSO, Vicente**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

54 Título: **Sistema y procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante**

57 Resumen:

Sistema y procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante que comprende una trampa iónica cilíndrica de tipo Penning-Malmberg donde se ha hecho el vacío y que comprende:

- un contenedor cilíndrico (50),
- dos primeros electrodos cilíndricos (11) situados consecutivamente en dirección longitudinal,
- un tercer electrodo cilíndrico (12) situado en el eje de simetría del contenedor cilíndrico (50) con una diferencia de potencial respecto a los dos primeros electrodos cilíndricos (11),
- ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) con paridades alternas en disposición circular alrededor del tercer electrodo cilíndrico (12) configurados para generar un campo cuadripolar de corriente alterna, donde el sistema está configurado para la aplicación de una intensidad del campo eléctrico cuadripolar donde el parámetro de intensidad  $\delta$  es igual a  $\delta(V_0, B, R) \approx$

$$\xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

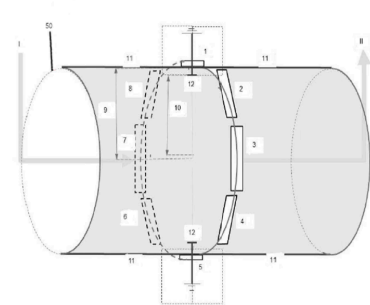


Fig. 1

ES 2 916 023 B2

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015. Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

**DESCRIPCIÓN**

Sistema y procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante

**Campo de la invención**

La invención es relativa al sector energético, más concretamente a los reactores o  
5 sistemas de fusión por confinamiento iónico.

**Antecedentes de la invención**

La energía de fusión nuclear se obtiene en reacciones que, a partir de núcleos de  
elementos más masivos, generan como productos nuevos núcleos más ligeros. La  
diferencia de masa entre los reactivos y los productos de reacción se transforma en  
10 energía debido a la equivalencia entre masa y energía calculable mediante la fórmula  
de Einstein  $\Delta E = \Delta m c^2$ . Se consigue así una gran cantidad de energía debido al factor  
del cuadrado de la velocidad de la luz en la ecuación. Este tipo de reacciones,  
denominadas termonucleares, se lleva a cabo de forma natural en las estrellas en cuyos  
centros se alcanzan densidades lo suficientemente altas para que dos núcleos de  
15 Deuterio, un isótopo del elemento Hidrógeno, formado por un protón y un neutrón, se  
aproximen lo necesario para que las fuerzas nucleares superen la repulsión eléctrica de  
los protones (barrera de Coulomb).

Para que tenga lugar la fusión de forma espontánea los núcleos deben mantenerse  
confinados en una región de volumen muy pequeño durante un tiempo suficiente. Así,  
20 la física necesaria se resume fácilmente mediante una desigualdad que es conocida  
como condición de Lawson que debe satisfacerse por cualquier reactor de fusión  
eficiente: la presión hidrodinámica,  $p$ , del gas nuclear dentro de un volumen dado,  
multiplicada por el tiempo,  $\tau_E$ , del confinamiento energético en dicho volumen, debe ser  
superior a una cantidad específica que depende del fuel nuclear utilizado, para el caso  
25 de Deuterio este valor es del orden a  $L = 130 \text{ atm. s.}$

$$p\tau_E > L$$

El objeto de desarrollar una tecnología de fusión es reducir la huella de carbono en la  
atmósfera, esto es, reducir el empleo de combustibles fósiles en la producción de

energía mediante sistemas que eviten la emisión de materiales contaminantes a la atmósfera. Otro objetivo no menos importante es evitar la proliferación de residuos nucleares que se da en el caso de los reactores nucleares de fisión.

5 Por otro lado, debido a las temperaturas que se originan en el este tipo de reacciones (varios cientos de millones de grados centígrados), existen enormes dificultades por superar en el diseño de un reactor de fusión viable (puesto que es necesario sostener a los núcleos confinados en el interior de una vasija, resistente térmicamente, y suficientemente alejados de sus paredes).

10 Un gas de iones y electrones o plasma tiene propiedades eléctricas y magnéticas especiales; cuando los núcleos y los electrones se mantienen artificialmente separados tendremos un plasma iónico o electrónico respectivamente. Se presenta entonces una segunda posibilidad: el confinamiento magnético de un plasma neutro. En este caso los núcleos logran mantenerse localizados lejos de la superficie del recipiente que los contiene a una temperatura extremadamente alta. Por ejemplo, para un plasma de  
15 Deuterio y Tritio es ya tecnológicamente viable generar densidades tales que la reacción de fusión está bastante cerca de ser auto-sostenida. En el experimento ITER se esperan ganancias de potencia eléctrica que superarán en un factor 10 ( $Q > 10$ ) la potencia requerida para lograr la ignición nuclear. Este dispositivo es un tokamak. Habrá que superar aun dificultades tales como la eliminación de inestabilidades magneto-  
20 hidrodinámicas así como lograr el control de las turbulencias del plasma dentro del reactor. Otros posibles conceptos de fusión por confinamiento magnético son los stellarators, caracterizados por plasmas confinados casi sin corriente, esto es, sin grandes inestabilidades MHD. Pero el mayor problema para este tipo de reactores es económico ya que se requieren enormes instalaciones para mantener y llevar a cabo la  
25 ingeniería de control de las reacciones nucleares.

Un tercer método es el confinamiento inercial. En este caso la fusión tiene lugar por la implosión del plasma por medio, por ejemplo, de un pulso láser o bien usando campos eléctricos muy intensos. En este caso no se esperan ganancias energéticas netas importantes, aunque el sistema permite fabricar a partir de Deuterio isótopos de  
30 Hidrógeno y de Helio con aplicaciones industriales interesantes. Un procedimiento de confinamiento inercial consiste en aplicar un potencial electrostático de aproximadamente 15kV sobre una distancia entre electrodos de unos 10 cm, los iones de Deuterio son acelerados hacia el cátodo central hasta alcanzar energías de colisión de aproximadamente 250 millones de grados Centígrados, de modo que se consigue

superar el criterio de Lawson por muy breve período de tiempo, momento en el cual la reacción nuclear de fusión tiene lugar, el inconveniente de este método es que el electrodo queda dañado rápidamente de modo que el dispositivo no puede mantener con eficiencia la reacción nuclear. En definitiva, el reactor no es sostenible.

## 5 Descripción de la invención

En esta invención se describe un cuarto método para alcanzar la fusión nuclear. Se basa en el concepto de Confinamiento Iónico Resonante. Mediante este sistema y procedimiento un porcentaje de los núcleos, por ejemplo, de Deuterio, confinados en una trampa de iones de Penning-Malmberg cilíndrica (que consigue el confinamiento iónico mediante la aplicación de una diferencia de potencial eléctrico,  $V_0$ , y un campo magnético axial,  $B$ ), desarrollarán trayectorias especiales que les acercarán entre sí lo suficiente, en el centro del dispositivo, hasta el punto de obtener densidades que permitirán que la condición de Lawson, de presión y tiempo de confinamiento energético, se satisfaga.

15 La trampa de iones dispone, adicionalmente, de un campo cuadripolar eléctrico de una frecuencia,  $\omega$ , tal que permite que los núcleos de deuterio roten con la velocidad angular  $\omega$ . El sistema de iones confinados adquiere la forma de un esferoide muy aplanado. Todas estas características son comunes a cualquier sistema de Penning-Malmberg.

20 Existe, no obstante, un valor muy preciso para el parámetro,  $\delta$ , que determina intensidad del campo cuadripolar que se ha de aplicar, para el cual surgen trayectorias resonantes, coalescentes, en los iones de Deuterio. Estas trayectorias serán necesarias para que los núcleos colisionen en el centro del sistema y tengan lugar, de este modo, las reacciones de fusión nuclear.

25 Así pues, la dependencia precisa de este parámetro de intensidad del campo eléctrico cuadripolar,  $\delta$ , en función del potencial del campo eléctrico,  $V_0$ , de la intensidad del campo magnético,  $B$ , así como del radio del cilindro de la trampa,  $R$ , determinará las condiciones de resonancia requeridas para que el sistema se transforme en un reactor nuclear. Se alcanzarán, en fin, las condiciones de fusión de presión del gas y de tiempo de confinamiento en el centro de la trampa iónica solo para determinadas  
30 configuraciones de los parámetros del sistema de confinamiento.

De este modo la ignición nuclear tendrá lugar en una región donde se ha hecho el vacío, no existen electrodos que puedan dañarse por la reacción y esta tendrá lugar lejos de las paredes del contenedor de la trampa iónica que mantiene confinados a los iones.

5 Con el propósito de especificar las propiedades del plasma, por ejemplo, de Deuterio, con características de confinamiento resonante, el reactor de fusión necesita ser configurado dentro de una trampa de iones denominada de Penning-Malmberg. Este equipamiento sirve como contenedor físico del plasma. Por esta razón se describe brevemente a continuación las características de este dispositivo.

10 Se remarca que el objeto de la invención es describir la configuración especial requerida para la intensidad del potencial cuadripolar eléctrico aplicado,  $\delta = F(B, V_0 R)$ , y de las condiciones concretas sobre el número de iones confinados en relación con el tamaño radial R de este tipo de trampa iónica, con el fin de que la fusión nuclear tenga lugar, pero, en ningún caso, esta memoria tiene el propósito de hacer modificaciones sobre las especificaciones de estos dispositivos de confinamiento iónico. Esto último debe  
15 considerarse fuera del ámbito de la invención. En la memoria se dispone de este equipamiento estándar.

En teoría, una trampa de Penning –Malmberg es un dispositivo capaz de almacenar de forma permanente un plasma cargado. Esto es muy importante puesto que ello hace innecesario discutir acerca de las inestabilidades magneto-hidro-dinámicas que son  
20 lugar común en el confinamiento magnético toroidal de plasmas neutros (Tokamaks y similares). También es reseñable que el tiempo de confinamiento se hace tan largo como sea necesario para producir las medidas que se requieran llevar a cabo sobre las propiedades intrínsecas del plasma de iones (o de electrones en su caso). Asimismo, para la configuración que se especificará en esta memoria de la trampa de Penning-  
25 Malmberg como contenedor de un reactor de fusión, la estabilidad del plasma posibilitará que el tiempo de confinamiento energético, cerca del centro, para aquellos núcleos de Deuterio que siguen las trayectorias coalescentes, sea lo suficientemente largo como para conseguir que se satisfaga el criterio de Lawson descrito anteriormente a presiones no necesariamente extremadamente elevadas. Para este fin en el interior  
30 de la trampa de Penning-Malmberg debe hacerse el vacío evitando así colisiones entre moléculas de aire y los iones, pudiendo alcanzarse, de este modo, los rendimientos termodinámicos imprescindibles para un elevado tiempo de confinamiento del plasma de Deuterio completamente ionizado. Así, con el fin de garantizar la estabilidad de las trayectorias magnetrón de los núcleos de Deuterio se eliminan todos los electrones a la

entrada de la trampa iónica, de modo que el gas de Deuterio esté completamente ionizado.

Una trampa de Penning-Malmberg dispone de los siguientes elementos:

- 5 1. Un contenedor que debe tener geometría cilíndrica. Ello dará lugar a un confinamiento perfecto y estable de la nube de iones en el interior de la trampa (por conservación del momento angular total). Este es el teorema de confinamiento de plasmas cargados.
- 10 2. Se requieren tres electrodos cilíndricos, los dos primeros, se sitúan longitudinalmente de forma simétrica respecto al centro de la trampa. Un tercer electrodo central, situado en el eje de simetría del cilindro que forma la trampa. Para el almacenamiento de iones, las polaridades de los electrodos longitudinales son positivas con respecto al electrodo central al cual se le confiere una toma de tierra. Así pues, la diferencia de potencial entre los electrodos longitudinales y el electrodo central será  $V_0$ , positiva (si en la trampa se usara para el almacenamiento de electrones la toma de tierra se da en los electrodos cilíndricos y la polaridad del potencial  $V_0$  en el electrodo central sería, en este caso, negativa).
- 15 3. En el interior del contenedor de la trampa se aplica un campo magnético axial de intensidad  $B$  constante.

20

El plasma iónico (o electrónico en su caso) se introduce por uno de los extremos (digamos desde el inferior de la vasija del contenedor).

- 25 4. Mediante un sistema de ocho electrodos, se desarrolla un potencial eléctrico cuadripolar. La distancia de estos electrodos al centro de la trampa es aproximadamente el radio de la parte central del cilindro que constituye la trampa. La polaridad de estos electrodos varía de forma alterna siendo que los electrodos alternos están en fase mientras que los otros electrodos están en contrafase. La frecuencia angular de la variación armónica de las polaridades de estos electrodos es cuatro veces la frecuencia magnetrón de los iones confinados.
- 30 5. Los iones (o electrones en su caso) quedan confinados en el centro de simetría en la región cilíndrica que ocupa el electrodo central. El movimiento de los iones (o electrones) tiene tres frecuencias fundamentales que dependen de las características de la trampa,  $\omega_z$ ,  $\omega$  y  $\Omega$ . La primera de estas frecuencias,  $\omega_z$ , depende de la diferencia de potencial aplicado entre los
- 35

electrodos de la trampa iónica, de la carga  $e$  y masa  $m$  de los iones y del radio  $R$  del cilindro a través de la fórmula

$$\omega_z^2 = 4e \frac{V_0}{mR^2};$$

esta frecuencia se corresponde con un movimiento armónico simple axial de los iones (o electrones) sobre el plano del eje de simetría perpendicular al eje  $z$  del cilindro, la segunda,  $\omega$ , es la frecuencia magnetrón de la trampa, que obliga a los iones (electrones) a describir una rotación con velocidad angular  $\omega$ , mientras que, la tercera frecuencia  $\Omega$  dará lugar al movimiento denominado ciclotrón, que, para iones confinados con carga  $e$  y masa  $m$ , depende de la intensidad del campo  $B$  como

$$\Omega = eB/m,$$

Así pues, este campo  $B$  da lugar a una rapidísima oscilación circular sobre la trayectoria magnetrón en el mismo plano de simetría de la trampa, perpendicularmente a las líneas de fuerza del campo magnético axial  $B$ .

La jerarquía de estos movimientos es tal que sus frecuencias relativas cumplen  $\omega \ll \omega_z \ll \Omega$ . Las trayectorias de los iones hacen que el plasma confinado adquiera una geometría elipsoidal en promedio.

6. En el caso de los iones de Deuterio, para estabilizar estos movimientos y aplanar al máximo la forma del elipsoide del plasma confinado se aplica un campo cuadripolar dependiente del tiempo con la frecuencia magnetrón,  $\omega$ , y una intensidad característica (potencial eléctrico máximo aplicable a los electrodos del campo cuadripolar). El campo cuadripolar se puede desarrollar incluyendo en las proximidades del electrodo central, esto es, próximo a los dos ejes centrales de simetría del cilindro de la trampa iónica, ocho electrodos con polaridades alternas que cambian armónicamente dentro de los máximos y mínimos que se deseen establecer. Incluso una pequeña perturbación en la intensidad de este campo cuadripolar estabiliza el plasma que rotará como una nube con propiedades de un rotor sólido de densidad promedio constante.
7. El principio sobre el que se basa el confinamiento iónico en una trampa de Penning-Malmberg es la conservación del momento angular total de un sistema de partículas, cuando la suma de todas las fuerzas radiales exteriores aplicadas se anula exactamente. El confinamiento axial es evidente dado que el movimiento axial es armónico. Por otro lado, sobre el eje radial, existen para el sistema del centro de masas de los iones en

rotación, tres fuerzas concurrentes. Estas son: la fuerza centrífuga  $+m\omega^2r$ , la fuerza de atracción radial eléctrica hacia el electrodo de polaridad negativa (para los electrones positiva),  $+\frac{1}{2}m\omega_z^2r$  y la fuerza debida al campo eléctrico inducido en los iones al rotar con velocidad angular  $\omega$  en el seno de un campo magnético  $-m\omega\Omega r$ . La condición de confinamiento es entonces que las tres frecuencias deben satisfacer la condición que se corresponde con la anulación de la componente radial de la fuerza resultante:

$$+m\omega^2r + \frac{1}{2}m\omega_z^2r - m\omega\Omega r = 0$$

Podemos tomar esta condición como el punto de partida de configuración de la trampa iónica de Penning Malmberg de modo que existe un parámetro libre  $0 < \theta \leq \pi/2$  que debe cumplir

$$\omega = \Omega(\sin\frac{\theta}{2})^2, \omega_z = \frac{\Omega}{\sqrt{2}}\sin\theta.$$

A  $\theta$  le denominaremos parámetro de confinamiento de la trampa de Penning-Malmberg. De estas fórmulas se deduce inmediatamente que *la frecuencia magnetrón* de la trampa debe venir dada a través de la fórmula

$$\omega \approx \frac{\omega_z^2}{2\Omega}$$

El límite  $\theta = \pi/2$  se corresponde con una trampa en el régimen de Brillouin. Las trampas que consideraremos en esta memoria están siempre muy lejos de este límite. La intensidad del campo magnético en el interior de la nube iónica se reduce efectivamente a cero en dicho límite y se debe al efecto diamagnético de las corrientes eléctricas internas.

$$B_{plasma} = B - 2m\omega/e$$

8. El movimiento armónico axial de los iones en el plasma confieren a estos de una temperatura y, por ello, el plasma alcanza el equilibrio térmico y dinámico.

9. Las presiones internas del plasma pueden eliminarse completamente debido que la rotación, estabilizada por el campo cuadripolar, termaliza completamente al plasma. Esto permite calcular el valor de la densidad promedio del plasma iónico confinado para una diferencia de potencial  $V_0$  en una trampa cilíndrica de Penning-Malmberg de radio  $R$

$$n = \frac{4\epsilon_0 V_0}{eR^2}$$

El sistema de fusión por confinamiento iónico resonante objeto de la invención comprende, por lo tanto, una trampa iónica cilíndrica de tipo Penning-Malmberg donde se ha hecho el vacío y que comprende:

- 10                   ○ un contenedor cilíndrico para el confinamiento de una nube de iones,
- dos primeros electrodos cilíndricos situados consecutivamente en dirección longitudinal y simétricamente respecto al centro del contenedor cilíndrico, estando separados longitudinalmente por un espacio configurado para el confinamiento de los iones,
- 15                   ○ un tercer electrodo cilíndrico situado en el eje de simetría del contenedor cilíndrico con una diferencia de potencial respecto a los dos primeros electrodos cilíndricos, por ejemplo, puede comprender una toma a tierra, y situado en dicho espacio entre los dos primeros electrodos cilíndricos destinado a confinar los iones en la región delimitada por el par de electrodos cilíndricos, los dos primeros electrodos cilíndricos estando situados simétricamente por encima y por debajo de este tercer electrodo,
- 20                   ○ ocho electrodos con paridades alternas en disposición circular alrededor del tercer electrodo cilíndrico que están configurados para generar un campo cuadripolar de corriente alterna cuando dos pares de electrodos alternos están en fase y otros dos pares de electrodos alternos están en antifase; la frecuencia angular de la variación armónica de las polaridades de estos electrodos es cuatro veces la frecuencia magnetrón de los iones confinados  $\omega$ ,
- 25                   ○ una entrada de iones localizada en un extremo longitudinal de uno de los dos primeros electrodos cilíndricos,
- 30

- o una salida localizada en el extremo longitudinal opuesto del otro electrodo cilíndrico configurada para la salida de los productos de la reacción.

5 La trampa iónica cilíndrica está configurada para la aplicación de un campo magnético axial  $\vec{B}$ , un potencial eléctrico  $V_0$  sobre los electrodos cilíndricos y un campo cuadrípolar sobre los ocho electrodos de valor  $V_\lambda(t) = \frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi)$ , siendo  $\lambda = (2\delta + 1)\left(\frac{R'}{R}\right)^2$ ,  $\omega$  la velocidad angular de giro magnetrón de la nube iónica,  $t$  tiempo y  $\phi$  es la fase relativa del potencial aplicado a cada electrodo, en esta fórmula  $\delta$  es el parámetro de intensidad del potencial cuadrípolar,  $R'$  el radio del cilindro de los electrodos del campo cuadrípolar y  $R$  el radio de los electrodos cilíndricos, se tendrá en cuenta que  $R' \approx R$ .

El sistema se caracteriza porque está configurado para la aplicación de una intensidad descrita mediante un parámetro  $\delta$  del campo eléctrico cuadrípolar igual a  $\delta(V_0, B, R) \approx$   
 15  $\xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}$ , siendo  $e=1,602176487 \times 10^{-19} C$ ,  $m = 3,34358320(17) \times 10^{-27} \text{ kg}$  y  $\xi$  una constante próxima a 1 de modo que se generen trayectorias resonantes de los iones para que tengan lugar las reacciones de fusión nuclear.

Así pues, para estos campos aplicados en la trampa de Penning-Malmberg, el sistema de iones de Deuterio se confina formando una nube esferoidal. Para aplanar la nube iónica el campo cuadrípolar debe tener una intensidad no nula  $\lambda$ .

Se aplica a la trampa de iones ya confinados un campo cuadrípolar arbitrario inicial de intensidad  $\lambda$  muy pequeña,  $\lambda_{inicial} \ll 1$ . Conocidos el potencial eléctrico  $V_0$ , la intensidad de campo magnético  $B$  y la frecuencia de confinamiento magnetrón del plasma  $\omega$ , el campo cuadrípolar vendrá dado por  $V_\lambda(t) = \frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi)$ . Una vez la  
 25 nube iónica de Deuterio está aplanada se incrementa el valor de la intensidad  $\lambda$  de forma adiabática para llevar a cabo la transición que confiere a los iones de Deuterio trayectorias coalescentes hacia el centro del contenedor de la trampa iónica. Esto define la situación de resonancia que vendrá caracterizada porque el parámetro de intensidad  $\delta$  del campo cuadrípolar generado es

$$\delta(V_0, B, R) = \xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}$$

siendo  $R$  el radio de confinamiento del reactor,  $e=1,602176487 \times 10^{-19} C$ ,  $m=3,34358320(17) \times 10^{-27} \text{ kg}$  y  $\xi$  una constante próxima a 1 calculada mediante las técnicas de ajuste fino descritas en esta memoria.

- 5 La invención tiene, por lo tanto, por objeto un sistema y un procedimiento de Fusión por Confinamiento Iónico Resonante para núcleos de Deuterio en una trampa de Penning Malmberg con las características especificadas anteriormente.

Es decir, el campo cuadripolar está sincronizado estroboscópicamente con la frecuencia de rotación magnetrón de los núcleos de Deuterio confinados en la trampa iónica cilíndrica (de Penning-Malmberg) donde se ha hecho el vacío para eliminar las colisiones con las moléculas del aire. Así mismo, la intensidad del campo cuadripolar debe ajustarse de modo que un porcentaje de los iones de Deuterio adquiera trayectorias resonantes; estas órbitas les conducen hacia el centro donde colisionarán y tendrán lugar las reacciones de fusión. En el centro del reactor se cumplirá, así, la condición de Lawson para la presión y tiempo de confinamiento nuclear, de este modo las reacciones nucleares podrán tener lugar.

En el reactor, esto es en la trampa de Penning-Malmberg cuyo valor especial para la intensidad de campo cuadripolar eléctrico sea el requerido para el confinamiento resonante, dada por el procedimiento derivado de la condición  $\delta(V_0, B, R) \approx \xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}$ , se generarán neutrones consecuencia de las reacciones nucleares (Ecuación (1.1) indicada más abajo. La energía cinética de estos neutrones, que serán capturados en una envoltura regeneradora o Blanket, podrá ser transformada en energía eléctrica aprovechable mediante un sistema termoeléctrico anexo al reactor. La potencia eléctrica aprovechable por la red será del orden de unos 100 kW.

25 Por otro lado, para que la fusión nuclear sea sostenible será necesario superar un umbral para el flujo de iones de Deuterio que alimentarán al reactor, este número depende del potencial eléctrico aplicado y del radio del reactor  $R$  y, para la configuración que se detalla en la memoria será aproximadamente de unos  $10^{19}$  iones de Deuterio por segundo que pueden entrar en la cámara de confinamiento de la trampa iónica a unos 30 7500 – 8000 °C de temperatura (temperatura suficiente para la ionización

prácticamente completa del Deuterio) desde una cámara de vacío. El ritmo de los pulsos de la reacción nuclear representa un consumo de  $2 \times 10^{10}$  núcleos de Deuterio por cada pulso del reactor que tiene lugar en un tiempo de 1.6ns. El potencial eléctrico aplicable será en este caso de  $V_0 \approx 10 \text{ kV}$  si la intensidad del campo magnético axial de la trampa es de unos  $B = 3.5 \text{ Tesla}$  para un reactor cuya cavidad cilíndrica supere un radio de aproximadamente 11.0 cm. En este caso, asumiendo que los iones se empaquetan en la nube iónica de forma óptima, el esferoide de confinamiento de los iones deberá tener un radio de

$$R_{\text{nube de plasma}} = \frac{\pi}{\sqrt{12}} R \sim 10.0 \text{ cm.}$$

10 Que es ligeramente inferior al radio de la trampa iónica, impidiéndose, de este modo, la fuga de fuel de Deuterio por colisiones con el material constitutivo del contenedor de la trampa iónica. Esta será denominada configuración estándar del reactor de fusión iónico resonante de Deuterio.

En el dispositivo de confinamiento, la trampa iónica cilíndrica de Penning-Malmberg, debido al campo cuadripolar aplicado, cuando este satisfaga las condiciones necesarias,  $\delta = F(B, V_0, R)$  (conforme al procedimiento derivado de la condición  $\delta(V_0, B, R) \approx \xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}$  los núcleos de Deuterio desarrollarán trayectorias resonantes que convergerán en el centro de la trampa permitiéndose, así, que tengan lugar las densidades requeridas para que se desarrollen espontáneamente las siguientes reacciones de fusión nuclear:



Las energías de fusión correspondientes son  $E_{f_1} [{}^3_2\text{He} + \text{n}] = 3.27 \text{ Mev}$  y  $E_{f_2} [{}^3_1\text{H} + \text{p}] = 4.04 \text{ Mev}$ . Cada reacción tiene lugar aproximadamente con un 50% de probabilidad ( ${}^2_1\text{H}$  denota al núcleo de Deuterio,  ${}^3_1\text{H}$  al núcleo de Tritio,  ${}^3_2\text{He}$  al isótopo de Helio-3).

Estas reacciones no tienen lugar en todo el plasma confinado, sino que tan solo aparecen en la región central de la vasija del reactor, el porcentaje de los núcleos que

se fusionan son una porción de los que desarrollan las trayectorias resonantes. Ello permite que el plasma iónico de Deuterio en el reactor se mantenga a temperaturas inferiores a algunas decenas de miles de grados centígrados en lugar de los cientos de millones de grados característicos de los sistemas de confinamiento magnético en tokamaks válidos para plasmas neutros. El dispositivo tiene un tamaño muy reducido, no mayor de medio metro de diámetro; la potencia eléctrica generada es del orden de 100kW y el flujo de combustible de Deuterio iónico es aproximadamente  $10^{19}$  Deuterones/s.

Es también objeto de la invención un procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante, que comprende los siguientes pasos:

- Paso 1º, desviar iones hacia una trampa iónica cilíndrica de tipo Penning-Malmberg donde se ha hecho el vacío que comprende:

- un contenedor cilíndrico para el confinamiento de una nube de iones,
- dos primeros electrodos cilíndricos situados longitudinalmente y simétricamente respecto al centro del contenedor cilíndrico estando separados longitudinalmente por un espacio configurado para el confinamiento de los iones,
- un tercer electrodo cilíndrico situado en el eje de simetría del contenedor que dispone de una diferencia de potencial respecto a los dos primeros electrodos cilíndricos anteriores. El espacio comprendido en la región delimitada por este tercer electrodo central está destinado a confinar la nube iónica,
- ocho electrodos con paridades alternas en disposición circular alrededor del tercer electrodo cilíndrico central que están configurados para generar un campo cuadripolar de corriente alterna cuando las fases relativas de cada dos electrodos consecutivos es de  $\pi/2$ ; la frecuencia angular de la variación armónica de las polaridades de cada uno de estos electrodos es cuatro veces la frecuencia magnetrón de los iones confinados,
- una entrada localizada en un extremo longitudinal de uno de los primeros electrodos cilíndricos,

- o una salida localizada en el extremo longitudinal opuesto del otro electrodo cilíndrico configurada para la salida de los productos de la reacción,

- Paso 2º, aplicar un campo magnético axial  $\vec{B}$  y un potencial eléctrico  $V_0$  sobre los primeros electrodos cilíndricos situados longitudinalmente,

- Paso 3º, generar un campo cuadripolar sobre los ocho electrodos de valor  $V_\lambda(t) = \frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi)$ , siendo  $\lambda = (2\delta + 1)\left(\frac{R'}{R}\right)^2$ ,  $\omega$  la velocidad angular de giro magnetrón de la nube iónica,  $t$  tiempo,  $\phi$  es la fase relativa del potencial aplicado a cada electrodo (por ejemplo,  $\phi = 0$  para los electrodos pares y  $\phi = \pi/2$  para los electrodos impares),  $\delta$  es el parámetro de intensidad del potencial cuadripolar,  $R$  el radio de los electrodos cilíndricos y  $R'$  el radio del círculo en el que se localizan los electrodos del campo cuadripolar,

caracterizado por que comprende posteriormente el paso de aplicar una intensidad  $\delta$  del campo eléctrico cuadripolar igual a  $\delta(V_0, B, R) \approx \xi \left(\frac{V_0 m}{B^2 R^2 e}\right)^{\frac{1}{2}}$ , siendo  $e=1,602176487 \times 10^{-19} C$ ,  $m = 3,34358320(17) \times 10^{-27} kg$  y  $\xi$  una constante próxima a 1 de modo que se generen trayectorias resonantes de los iones para que tengan lugar las reacciones de fusión nuclear.

### Breve descripción de los dibujos

Para completar la descripción y con el fin de proporcionar una mejor comprensión de la invención, se proporcionan unas figuras. Dichas figuras forman una parte integral de la descripción e ilustran un ejemplo de realización de la invención.

Figura 1. Representa una configuración de un ejemplo de realización del sistema de confinamiento de Penning-Malmberg.

Figura 2. Representa un gráfico del flujo de neutrones por segundo emitidos por un prototipo de reactor estándar de fusión por confinamiento resonante en función del potencial eléctrico  $V_0$  aplicado. El radio del cilindro de la trampa es de 11,57 cm y la intensidad de campo magnético es de  $B = 3.5 Tesla$ .

Figura 3. Representa un gráfico de la potencia eléctrica calculada para un reactor de fusión que emplee el método de confinamiento resonante como función del potencial  $V_0$  aplicado a la trampa. Se representa el caso

correspondiente a un plasma confinado cuyo factor de forma sea de  $\frac{z}{R} \sim 4.5 \times 10^{-2}$  y el contenedor de la trampa iónica disponga de un radio de  $R = 11,0 \text{ cm}$ . En este caso el punto de equilibrio entre la potencia eléctrica generada del reactor y las pérdidas causadas por la potencia radiada se encuentra en unos 5500 Voltios.

Figura 4. Representa un esquema de una realización de un reactor que emplea el método de fusión por confinamiento iónico resonante.

### Descripción de un ejemplo de realización

10 En la figura 1 se divulga una configuración de un ejemplo de realización del sistema de confinamiento de Penning-Malmberg que tiene los siguientes elementos:

- (I) Tubo de vacío de entrada de los iones de Deuterio.
- (II) Tubo de vacío de la salida de los productos de la reacción nuclear.

15 (1), (2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), sistema de electrodos del campo cuadripolar eléctrico (con polaridades alternas, para los electrodos pares respecto de los impares).

(9) Radio del sistema de electrodos que generan el campo cuadripolar.

(10) Radio de la cavidad central del cilindro del reactor.

20 (11) Electrodos longitudinales cilíndricos con polaridad positiva respecto del electrodo cilíndrico (12) central con toma de tierra.

El sistema tiene las siguientes características:

1. El contenedor de la trampa tiene geometría cilíndrica. Ello dará lugar a un confinamiento perfecto y estable de la nube de iones en el interior de la trampa (por conservación del momento angular total). Este es el teorema de confinamiento de plasmas cargados.

2. Se requieren tres electrodos cilíndricos, los dos primeros (11) se sitúan longitudinalmente de forma simétrica respecto al centro de la trampa. Un tercer electrodo cilíndrico central (12), situado en el eje de simetría central del cilindro que forma la trampa. Para el almacenamiento de iones, las polaridades de los electrodos cilíndricos longitudinales (11) son positivas con respecto al electrodo central (12) al cual se le confiere una toma de tierra. Así pues, la diferencia de potencial entre el electrodo central (12) y los electrodos cilíndricos longitudinales (11) será  $V_0$ , positiva. Si la trampa se usara para el almacenamiento de electrones la toma de tierra se da en los electrodos cilíndricos longitudinales (11) y la polaridad del potencial  $V_0$  en el electrodo central (12) que sería, en este caso, negativa.

3. En el interior del contenedor de la trampa se aplica un campo magnético axial de intensidad B constante.

El plasma iónico, o electrónico en su caso, se introduce por uno de los extremos, por ejemplo, desde el inferior de la vasija del contenedor.

4. Mediante un sistema de ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) , se desarrolla un potencial eléctrico cuadripolar. La distancia (9) de estos electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) al centro de la trampa es aproximadamente el radio de la parte central del cilindro que constituye la trampa. La polaridad de estos electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) varía de forma alterna siendo que los electrodos (1), (5) , (3) y (7) están en fase mientras que los electrodos (2), (4), (6) y (8) están en contrafase. La frecuencia angular de la variación armónica de las polaridades de estos electrodos coincide con la frecuencia magnetrón de los iones confinados.

Más concretamente, la figura 1 representa una trampa iónica de Penning-Malmberg con electrodos cilíndricos (11, 12) y un campo perturbador periódico cuadripolar eléctrico que gira estroboscópicamente con la frecuencia fundamental magnetrón del plasma. Se produce un campo cuadripolar eléctrico variable cuando los pares de electrodos (1-5) y (7-3) están en fase mientras que los pares de electrodos (8-2) y (6-4) están en anti-fase (desfasados  $\pi/2$ ) con una frecuencia de rotación igual a la frecuencia magnetrón de los deuterones atrapados.

El flujo de Deuterio ionizado (I) entra por un conducto donde se ha hecho el vacío a través de los agujeros en un extremo longitudinal de la trampa iónica.

La reacción tiene lugar en la región central entre el tercer electrodo cilíndrico (12). La diferencia de potencial entre el primer y el segundo electrodo cilíndrico (11) y el tercer electrodo cilíndrico (12) es de aproximadamente 10kV. La distancia (10) denota el radio R del reactor que es aproximadamente de 11.0 cm en el caso del reactor estándar.

El radio (9) del sistema de electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) que generan el campo cuadripolar variable puede hacerse idealmente coincidir con el radio de confinamiento de la trampa iónica, 11.0 cm.

10 Se hace notar que la figura 1 no representa las relaciones exactas de las distancias entre los elementos del sistema de confinamiento.

La figura 2 representa un gráfico del flujo de neutrones por segundo emitidos por un prototipo de reactor estándar de fusión por confinamiento resonante. En las condiciones del reactor estándar, se espera obtener un flujo de neutrones de aproximadamente 15  $2.5 \cdot 10^{18}$  neutrones por segundo.

La figura 3 representa un gráfico de la potencia eléctrica esperable, para un reactor de fusión que emplee el método de confinamiento resonante, como función del potencial eléctrico aplicado  $V_0$ .

Geoméricamente, la nube iónica confinada forma un elipsoide de revolución muy aplanado de semieje mayor  $R$  y semieje menor  $z$ . Al cociente  $l = z/R$  se denomina factor forma de la nube iónica.

Se muestran la gráfica correspondiente a un factor de forma  $z/R \sim 4 \times 10^{-2}$  Para que el reactor genere más energía que la requerida para el confinamiento iónico resonante tiene que superarse un determinado umbral de potencial eléctrico  $V_0 > 5 \text{ kV}$  aproximadamente; se espera que la potencia alcanzable pueda superar los 100kW para 25  $V_0 \approx 10 \text{ kV}$ .

La figura 4 representa un esquema de una realización de un reactor que emplea el procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante.

(13) horno de ionización,

(14) tubo de vacío para el transporte de iones positivos de Deuterio al contenedor del reactor,

(15) trampa de iones de Penning-Malmberg,

5

(16) tubo de vacío para el transporte de los electrones producto de la ionización hacia la trampa para electrones,

(17) contenedor temporal para electrones (trampa de Penning-Malmberg de electrones sin campo cuadripolar añadido),

10 (18) nube de deuterones confinados en el contenedor de la trampa de Penning-Malmberg de iones positivos,

(19) Blanket principal para la captura de los neutrones consecuencia de las reacciones termonucleares en el centro del reactor,

(20) tubo de vacío para la salida de los productos de la reacción de fusión en el reactor,

15 (21) sistema de refrigeración mediante un flujo de Helio líquido en el Blanket,

(22) un dispositivo termoeléctrico permite aprovechar el calor transportado por el Helio líquido que llega desde el conducto de refrigeración del Blanket principal en energía eléctrica que se transforma en corriente continua en la energía potencial eléctrica aprovechable (23) que puede ser transformada a corriente alterna mediante un inversor, esta diferencia de potencial alterno puede alimentar la red eléctrica convencional (24).

20

(25) cámara de neutralización eléctrica de los productos de la reacción.

Las paredes de la trampa iónica pueden fabricarse con alguna aleación de Circonio, o de algún otro metal con una baja sección eficaz de captura de neutrones. Los electrodos de la trampa iónica deben situarse muy próximos a la región de confinamiento central de los núcleos de deuterio para evitar ser dañados por los neutrones emitidos

25

isotrópicamente desde la región central de la trampa iónica donde la reacción tiene lugar.

Las paredes del reactor están envueltas por una envoltura regeneradora o Blanket (19) de captura de los neutrones emitidos. La disposición exacta de este Blanket (19) podrá  
5 depender de implementación real. Este elemento no existe en una trampa convencional de Penning-Malmberg que no esté adaptada a las características del reactor de fusión por confinamiento resonante y es un añadido específico del procedimiento que da fundamento a la invención que se presenta en esta memoria.

El sistema comprende:

10 En primer lugar, a partir del procedimiento derivado del ajuste fino de los parámetros de la Ecuación (6.1), se determinará la intensidad del campo cuadripolar eléctrico de modo que se le confiere, a las trayectorias de los núcleos de Deuterio, características coalescentes hacia el centro del reactor. Con esta condición, enumeraremos las partes constitutivas del reactor:

- 15
- Un horno de ionización (13).
  - Un conducto de entrada del fuel de iones de Deuterio (14) desde el horno de ionización hacia la trampa de iones de Penning-Malmberg (15) resonante (configurado mediante la técnica derivada del ajuste de los parámetros que aparecen en la Ecuación (6.1) para la intensidad del campo cuadripolar  
20 eléctrico).

Paralelamente a la entrada del fuel de Deuterio hacia el contenedor cilíndrico (50) del reactor, debe disponerse adicionalmente de:

- Un conducto de salida para los electrones desde el horno de ionización (13) hasta la trampa de Penning-Malmberg convencional (17) -esto es, sin campo  
25 cuadripolar añadido- Esta debe situarse anexa a la trampa iónica principal del reactor y tiene por finalidad confinarlos hasta que puedan resultar neutralizados eléctricamente con los productos ionizados de la reacción de fusión de Deuterio una vez finalizada.
- Una región de confinamiento (18) de la reacción nuclear de fusión.
- El Blanket (19) que captura los neutrones de la reacción.  
30

- Una salida (20) de los productos de reacción.
  - Un circuito de refrigeración (21) del Blanket (19).
  - Un dispositivo termoeléctrico (22).
  - La energía potencial eléctrica aprovechable (23).
- 5     • La red eléctrica (24). Una cámara de neutralización (25) de los productos de reacción.

Los pulsos de plasma del orden de nanosegundos, que son impulsados por un interruptor de corriente eléctrica de alta frecuencia, que posibilita la inversión de la polaridad del potencial  $V_0$  confinante, permiten alimentar el reactor. El plasma se origina  
10 por medio del horno de ionización (13), por ejemplo, de Radio Frecuencia. Los iones de Deuterio son desviados hacia el ánodo; la nube de plasma es acelerada después hasta alcanzar la temperatura requerida para que la resonancia tenga lugar. Para cargar el reactor y vaciarlo después de la reacción, el campo  $V_0$  debe activarse, desactivarse y  
15 cambiar de polaridad mediante disyuntores (interruptores de circuito eléctrico) de ultra alta frecuencia de forma síncrona con los pulsos del plasma emitidos por el dispositivo de ionización. La frecuencia estimada de estas rupturas del circuito de corriente continua, que alimenta los electrodos de la trampa iónica, debe ser del orden de 1-10 GHz.

Durante la reacción, los neutrones emitidos serán capturados en la pared de enfriamiento, "neutron Breeding Blanket" (19). En las condiciones de resonancia, la  
20 potencia eléctrica obtenida será del orden de 100 kW, dependiendo de la eficiencia termoeléctrica del sistema anexo al reactor. Los productos de la reacción cargados se enfriarán en una cámara de neutralización donde se recombinan con los electrones almacenados en una trampa de Penning-Malmberg para electrones, que son liberados  
25 con idéntica frecuencia que dichos productos de la reacción.

El cilindro del Blanket (19) del reactor (de radio  $R$ ). Está situada por encima y por debajo de los electrodos (11). Debe ser de un material capaz de absorber los neutrones emitidos por las reacciones de fusión del núcleo del reactor.

Este sistema puede enfriarse, por ejemplo, mediante un circuito refrigerante de Helio  
30 para transportar el calor fuera de las paredes del reactor. El cilindro debe disponer de un agujero en la parte inferior para permitir la entrada del fuel de Deuterio que va a reaccionar y un segundo agujero en la parte superior para la salida de los productos de

la reacción (Helio-3, Tritio y núcleos de Hidrógeno (protones)). La disposición del Blanket (19) se puede ver en el esquema de la figura 4.

En la cámara de neutralización (25) anexa al reactor los productos de la reacción cargados deben combinarse eléctricamente con los electrones provenientes de la ionización completa del Deuterio que constituye el fuel del reactor, como se ve en el esquema de la Figura 4.

En el sistema termoeléctrico anexo al reactor la fuente de calor proveniente de la refrigeración del cilindro del Blanket (19) alimenta un circuito de corriente continua. Este circuito eléctrico puede conectarse a la red o bien ser la fuente de potencia de un motor eléctrico. Es posible transformar la corriente eléctrica continua obtenible en corriente alterna mediante un dispositivo inversor de convencional.

En los ejemplos de realización, las técnicas del procedimiento de fusión nuclear por confinamiento iónico resonante son las siguientes:

CAMPOS DE CONFINAMIENTO DE LA TRAMPA IÓNICA: Para que tenga lugar el confinamiento axial se aplica una diferencia de potencial eléctrica  $V_0$  entre el par de electrodos cilíndricos (11) y el tercer electrodo cilíndrico (12) central, según se denota en la figura 1. Para confinar radialmente el plasma se aplica axialmente un campo magnético de intensidad  $B$ .

FRECUENCIA ANGULAR DE LAS OSCILACIONES AXIALES DEL PLASMA CONFINADO: Debido al potencial eléctrico aplicado  $V_0$  (entre el par de electrodos cilíndricos (11) y el tercer electrodo cilíndrico (12) central de la figura 1, los iones de Deuterio se comportan como osciladores. La frecuencia de oscilación axial depende de la masa de los núcleos de Deuterio  $m = 3,34358320(17) \times 10^{-27}$  kg viene dada por

$$\omega_z^2 = 4eV_0 / mR^2 \quad (\text{Ecuación 2})$$

Aquí  $R$  es el radio regulable del cilindro cuya pared se encuentra entre los dos electrodos cilíndricos (11) de la figura 1 y  $e = 1,602176487 \times 10^{-19}$  C es la carga eléctrica del deuterón.

VELOCIDAD ANGULAR MAGNETRÓN DE LA NUBE IÓNICA: El confinamiento radial tiene lugar para todos los iones y es estable. La velocidad angular de giro, magnetrón, que adquiere la nube confinada es aproximadamente independiente de la masa del Deuterón.

5 
$$\omega \approx \frac{2V_0}{B R^2} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

POLARIDAD DE LOS ELECTRODOS DEL CAMPO CUADRIPOlar: Se configura en la trampa un campo eléctrico cuádrípolar perturbador que gira estroboscópicamente con la frecuencia magnetrón (Ecuación 3). Este campo es generado por el potencial eléctrico cuádrípolar dependiente del tiempo que se aplica en cada uno de los ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) de polaridades alternas. Estos electrodos están situados en el plano de la trampa de Penning-Malmberg entre el par de electrodos cilíndricos (11) en la figura 1, o plano central del cilindro del reactor donde se sitúa el tercer electrodo cilíndrico (12). En este plano tendrá lugar el confinamiento de la nube de plasma y las reacciones nucleares. La distancia al centro de la trampa de los electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), del potencial rotatorio cuádrípolar, es  $R'$  (9). Para cada uno estos electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8), el potencial eléctrico vale, definiendo  $\lambda = (2\delta + 1)\left(\frac{R'}{R}\right)^2$

$$\frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi) \quad \text{(Ecuación 4)}$$

Donde  $\phi$  es la fase relativa del potencial aplicado a cada electrodo y  $\delta$  es el parámetro de intensidad del potencial cuádrípolar. El radio (10) de confinamiento  $R$  del reactor se representa en la figura 1. La polaridad de los electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) del campo eléctrico rotatorio será la correspondiente a la siguiente regla:

Polaridad eléctrica de 1  $\stackrel{\text{def}}{=} 3 \stackrel{\text{def}}{=} 5 \stackrel{\text{def}}{=} 7$ , con  $\phi = 0$ . Polaridad eléctrica de 2  $\stackrel{\text{def}}{=} 4 \stackrel{\text{def}}{=} 6 \stackrel{\text{def}}{=} 8$ , con  $\phi = \pi/2$ .

25 Como se ve, cada electrodo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) cambia cuatro veces de polaridad por cada periodo de rotación magnetrón de la nube de plasma confinado.

TEMPERATURA DEL PLASMA CONFINADO: El plasma está en equilibrio termodinámico. Las oscilaciones axiales de los iones, dentro del esferoide de

confinamiento con semieje menor  $z$  y semieje mayor  $R$ , confieren al plasma una temperatura efectiva que viene dada por:

$$k_B T = \frac{2z^2}{R^2} eV_0 \quad (\text{Ecuación 5})$$

Aquí se asume que el semieje mayor del esferoide,  $R$ , coincide con el valor regulable del radio del cilindro de la trampa iónica.

CONDICIÓN DE RESONANCIA DEL REACTOR DE FUSIÓN: debido a la perturbación cuadrupolar los iones abandonan el equilibrio dinámico y algunas de sus trayectorias son conducidas hacia el centro de la trampa. Estas trayectorias serán resonantes e involucrarán colectivamente a un porcentaje no nulo de los núcleos de la nube tan solo cuando el parámetro  $\delta$  de intensidad del campo cuadrupolar tome el valor, dependiendo de los campos de confinamiento,  $V_0$  y  $B$  y del radio  $R$  del cilindro de la trampa iónica, dado por

$$\delta(V_0, B, R) = \xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ecuación 6.1})$$

Donde teóricamente puede tomarse la aproximación  $\xi = 1$ . En prototipos reales del reactor de fusión resonante su valor exacto deberá determinarse experimentalmente.

La técnica asociada requerida para transformar la trampa iónica en un reactor de fusión nuclear es la determinación exacta de la constante  $\xi$  para cada prototipo de reactor de fusión resonante de un tamaño del radio del cilindro dado,  $R$ .

TECNICA EXPERIMENTAL DE DETERMINACIÓN DEL PARÁMETRO  $\xi$  para el reactor de fusión iónico resonante.

1. Se inicia el confinamiento iónico para un campo cuadrupolar de intensidad  $\lambda \ll 1$ . De este modo se consigue, conocidos  $V_0$  y el valor inicial de la intensidad del campo magnético  $B_0$ , que la nube iónica de Deuterio confinada se aplane. Adiabáticamente se incrementa el valor de  $\lambda$  hasta lograr la situación de resonancia, esto es, según la Ecuación (6.1) con valor  $\xi = 1$ , es decir  $\lambda_0 = \left( \frac{R'}{R} \right)^2 (2\delta_0 + 1)$  con  $\delta_0 = (V_0 m /$

$B_0^2 R^2 e)^{\frac{1}{2}}$ . En la práctica, los iones de Deuterio quedarán por esta razón confinados en la trampa de Penning-Malmberg con trayectorias coalescentes; así pues, sus distancias relativas se reducirán drásticamente con respecto a sus anteriores trayectorias magnetron circulares dentro de la nube de iones en el elipsoide de confinamiento. No obstante, debido a las imperfecciones del equipo (térmicas o de la geometría imperfecta del propio cilindro de la trampa, por ejemplo) y del hecho de que el vacío de la cavidad de confinamiento en la trampa no será perfecto, en general, no se obtendrán aun las distancias relativas inter-nucleares necesarias para que se satisfaga el criterio de Lawson, es decir, la densidad de confinamiento en el centro del reactor será a priori insuficiente para que tengan lugar de forma práctica las reacciones de fusión en las Ecuaciones (1.1) y (1.2).

2. Ajuste fino del parámetro  $\xi$  (este procedimiento se lleva a cabo una única vez, inicialmente, para configurar el sistema de fusión por confinamiento iónico resonante):

Se permite la variación del potencial eléctrico  $V_0$  y de la intensidad del campo magnético  $B$ , manteniendo el valor del parámetro de intensidad del campo cuadrupolar  $\delta_0$  inicial. Esta variación debe llevarse a cabo de modo que, según la Ecuación (3),  $\Delta V_0 = (R\omega^2)\Delta B$  (con  $R\omega^2 \approx \frac{2V_0}{B_0 R} = \frac{2V_{fin}}{B_{fin} R}$ ). De este modo, y como consecuencia del ajuste de los parámetros de la trampa, las trayectorias de los iones cambiarán conduciéndoles a posiciones relativas, en el centro de la trampa, próximas entre sí lo suficiente para que comiencen a producirse reacciones nucleares de fusión nuclear.

Se detectará, así, la emisión de un flujo de neutrones (mediante detectores instalados próximos al equipo de Penning-Malmberg, por ejemplo en la parte superior e inferior del contenedor) para determinados valores óptimos de  $V_{0fin}$  y  $B_{fin}$  aplicables a la trampa que son aquellos que permiten observar un pico en el número de neutrones detectables, consecuencia de haber llegado a la configuración resonante de fusión del reactor nuclear.

Mediante este procedimiento, para los valores finales de  $V_{0fin}$  y  $B_{fin}$ , se habrá determinado el valor numérico exacto del parámetro  $\xi_{fin}$  del reactor de fusión resonante aplicando nuevamente la Ecuación 6.1,

(donde  $\delta_0$  se había calculado al comienzo de este procedimiento para un valor de  $B_0$  inicial):

$$\xi \rightarrow \sqrt{\frac{B_{fin}}{B_0}} \quad (\text{Ecuación 6.2})$$

5

Mediante esta técnica, una vez determinado el parámetro  $\xi$  del reactor, la Ecuación 6.1 tendrá ahora validez universal y permitirá calcular la intensidad de resonancia,  $\delta$ , para cualquier configuración posible de los campos eléctrico  $V_0$  y magnético  $B$  de la trampa iónica de Penning-Malmberg.

10

1. Mediante este procedimiento, para los valores finales de  $V_0$  y  $B$ , se habrá determinado el parámetro  $\xi$  exacto del reactor de fusión resonante.

Dado que la potencia eléctrica del reactor debe ser proporcional al flujo de neutrones óptimo en el pico detectable, la técnica de ajuste fino de  $\xi$  determinará también la potencia eléctrica real asumible para el reactor de fusión iónico resonante.

15

**FACTOR DE FORMA DE LA NUBE IÓNICA:** Los iones en movimiento crean un campo magnético inducido que se opone al campo  $B$ . Por ello hemos de tener en cuenta el teorema de Brillouin que afirma que la densidad de la nube de plasma dependerá del número de iones confinados y del campo aplicado. Por medio de esta condición de Brillouin el semieje menor,  $z$  del esferoide de la nube iónica se relaciona con el número de iones confinados,  $N$ , y el potencial  $V_0$

20

$$z = \frac{3e}{16\pi\epsilon_0 V_0} N \quad (\text{Ecuación 7})$$

Así, dado que la (Ecuación 7) se cumple incluso cuando el potencial cuadripolar está apagado, se permite mediante mediciones, calibrar experimentalmente la trampa iónica antes de aplicar la condición de resonancia. Se define el factor de forma como el parámetro  $l = z/R$ .

25

**NÚMERO DE IONES CONFINADOS EN EQUILIBRIO TÉRMICO:** Si la temperatura  $T = 2V_0^2 m/k_B B^2 R^2$  del plasma confinado en la trampa iónica está dada, quedarán confinados en la trampa

$$N = (8\pi\sqrt{2}/3e^2)\epsilon_0 R\sqrt{eV_0 k_B T} \quad (\text{Ecuación 8})$$

iones de Deuterio. En el sistema internacional, si  $V_0$  está en Voltios y  $T$  en °C

$$N \approx 6.07648 \times 10^6 R \sqrt{V_0 T} \quad (\text{Ecuación 9})$$

CONDICIONES DE REACCIÓN DE FUSIÓN NUCLEAR: En condiciones de equilibrio termodinámico la fusión de los núcleos de Deuterio tendrá lugar si existe un mínimo mayor de  $130 \text{ atm} \cdot \text{s}$  en el valor del producto de la presión por el tiempo de confinamiento energético calculados en la región central del reactor. Este producto de Lawson adquiere dicho mínimo si se cumple:

- LA PRIMERA CONDICIÓN DEL REACTOR DE FUSIÓN

El campo magnético que permite el confinamiento de los iones en la trampa de Penning-Malmberg debe tomar el valor:

$$B = \frac{\cot \frac{\theta}{2}}{R} \left( \frac{mV_0}{e} \right)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Siendo  $\theta$  el parámetro de confinamiento de la trampa de Penning-Malmberg introducido anteriormente en la descripción de los parámetros de confinamiento.

Como característica fundamental del reactor de fusión, con el fin permitir que los iones sigan órbitas resonantes que les hagan caer hacia el centro de la vasija cilíndrica del reactor se requiere que el parámetro de intensidad del potencial cuadripolar tenga el valor dado por

- LA SEGUNDA CONDICIÓN DEL REACTOR DE FUSIÓN

$$\delta = \xi \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) / \sqrt{2}, \quad \xi \approx 1. \quad (\text{Ecuación 11.1})$$

Así, por ejemplo, si el radio de la trampa es de  $11.0 \text{ cm}$  y el potencial aplicado es de  $V_0 = 10.000 \text{ Voltios}$ , las reacciones de fusión tendrán lugar para un parámetro de confinamiento resonante  $\theta = 0.0901$  para una intensidad de campo magnético  $B = 3.5 \text{ Tesla}$ .

Se obtiene, en la configuración que otorga a los iones trayectorias coalescentes hacia el centro de la nube de confinamiento, dentro de la trampa, la siguiente expresión para la intensidad del campo cuadripolar en función de los parámetros físicos de la trampa de Penning-Malmberg

$$\delta \approx \xi \sqrt{\left( \frac{mV_0}{eR^2 B^2} \right)}, \quad (\text{Ecuación 11.2})$$

que coincide con la (Ecuación 6.1).

PROBABILIDAD DE RESONANCIA: Dada mediante la condición de resonancia en la (Ecuación 6.1), la probabilidad de que dos núcleos de Deuterio, en posiciones opuestas dentro de la nube, se encuentren simultáneamente en trayectorias de colisión en el centro del sistema vale, usando la (Ecuación 10)

$$\Gamma_R = \frac{2V_0 m}{B^2 R^2 e} \quad (\text{Ecuación 12})$$

Esta es una cantidad universal, válida para cualquier configuración del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante.

RADIO DEL CILINDRO DEL REACTOR: En el mínimo de Lawson las distancias entre los núcleos en el centro del reactor deben ser de 46 fm (es decir, una energía de la barrera de Coulomb de  $W = 31 \text{ keV}$ ). Dado que el factor de compresión de las trayectorias resonantes de los iones de Deuterio que reaccionan nuclearmente toma el valor  $\kappa = 2.05 \cdot 10^{-13}$ , se logra determinar el radio,  $R$ , de la nube de confinamiento de modo que el radio del cilindro de la trampa iónica debe ser no inferior a

$$R = 11.0 \text{ cm} \quad (\text{Ecuación 13})$$

REACTOR ESTÁNDAR DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO IÓNICO RESONANTE: El reactor estándar se define como aquel que genera 100 kW de potencia eléctrica. El factor de forma del plasma confinado en el reactor estándar es

$$\text{Factor de forma del Reactor Estándar} = \frac{z}{R} \sim 4 \cdot 10^{-2} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Los campos que confinan el plasma para este factor de forma y esta temperatura son

$$V_0 = 10. \text{ kV}, \quad B = 3.5 \text{ T}, \quad \delta \approx 0.032 \quad (\text{Ecuación 15.1})$$

El número de iones de Deuterio confinados en la trampa es, según la (Ecuación 9)

$$N \approx 2 \times 10^{10} \quad \text{(Ecuación 15.2)}$$

La probabilidad de resonancia de los iones en el reactor estándar es según la ecuación 12, para los campos de la ecuación 15.1 es

$$5 \quad \Gamma_R \sim 0.2\% \quad \text{(Ecuación 15.3)}$$

PROBABILIDAD DE REACCIÓN NUCLEAR para la interacción nuclear de Deuterio – Deuterio a la distancia de la barrera de Coulomb accesible por las trayectorias resonantes de los iones ( $W = 31keV$ ); se puede calcular a partir de la fórmula de Gamow

$$10 \quad \Gamma_G = e^{-\frac{\pi}{137}\sqrt{mc^2/W}} \sim 1/263. \quad \text{(Ecuación 16)}$$

VELOCIDAD DE REACCIÓN: Aproximadamente, el número de reacciones nucleares que se producen por segundo es, si la frecuencia ciclotrón del plasma es  $\Omega/2\pi = \frac{eB}{2\pi m} = \sim 30 MHz$ ,

$$\frac{d}{dt}N = \Gamma_G \times \Gamma_R^2 \frac{N^2}{2} \times (\Omega/2\pi) \sim 10^{19} \text{ Deuterones/s} \quad \text{(Ecuación 17)}$$

15 Donde se tiene en cuenta que el número de colisiones binarias para  $N$  iones es muy aproximadamente  $N^2/2$ . Este cálculo puede mejorarse usando la sección eficaz de dispersión nuclear de las colisiones D-D, no obstante, el resultado (Ecuación 17) sigue siendo válido.

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA ENERGÉTICA NEUTRÓNICA DEL REACTOR.  $\frac{1}{4}$

20  $\frac{d}{dt}N$  representan el flujo de los neutrones emitidos (ver Figura 2) cuya energía cinética son aproximadamente  $2.4 MeV$ , por lo tanto, la potencia energética máxima aprovechable en la reacción nuclear es

$$\text{Potencia de los neutrones} = \frac{1}{4} \frac{d}{dt}N \times 2.4 MeV \sim 960kW \quad \text{(Ecuación 18)}$$

Estos neutrones son capturados en la envoltura regeneradora del reactor o Blanket (19), en donde la potencia calculada en la (Ecuación 18) es transformada en forma de calor.

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA APROVECHABLE DEL REACTOR. La energía de los productos de la reacción nuclear incrementa la temperatura del plasma iónico que se encuentra en equilibrio térmico. El plasma de Deuterio a la temperatura  $T$  se debe considerar como un cuerpo negro que emite calor radiativamente (proporcionalmente a la cuarta potencia de la temperatura), de modo que la potencia radiada debe ser suministrada continuamente al plasma para mantener la temperatura necesaria para mantener las condiciones requeridas para el confinamiento resonante. Esto se permite mediante la energía potencial que acumula la nube iónica mediante la diferencia de potencial aplicada  $V_0$ . Por otro lado, mediante un circuito de refrigeración, parte del calor de la pared del reactor puede aprovecharse mediante un dispositivo termoeléctrico anexo al reactor (Figura 4) (cuya eficiencia es no mayor de  $\eta \sim \frac{1}{3}$ ). En definitiva, para el reactor estándar, la potencia eléctrica aprovechable es la diferencia

$$15 \quad \text{Potencia del reactor} = \eta (\text{Potencia de los neutrones}) - (1 - \eta) \text{Potencia radiada} \sim 100 \text{ kW} \quad (\text{Ecuación 19})$$

FRECUENCIA MÁXIMA DE LOS INTERRUPTORES DE CORRIENTE CONTINUA: La entrada del fuel de iones de Deuterio en el reactor se regula mediante disyuntores (interruptores eléctricos) de corriente continua de alto voltaje (HVDC-Circuit Breakers).

20 Para generar 100 kW en el reactor estándar la frecuencia máxima de los disyuntores debe ser la solución de  $v_{DC}^{Max} = \frac{\dot{N}}{N}$ , o bien

$$v_{DC}^{Max} = 1.6 \text{ GHz} . \quad (\text{Ecuación 20})$$

ESTIMACIÓN DE LA POTENCIA ELÉCTRICA EFECTIVA ALCANZABLE POR EL REACTOR ESTANDAR depende linealmente con la frecuencia,  $v_{DC}$ , de los interruptores de corriente continua para alta frecuencia de alto voltaje disponibles tecnológicamente (dado que esta frecuencia determina el número de pulsos de plasma del reactor). Esta frecuencia de los disyuntores eléctricos debe elegirse de modo que sea posible realizar un cambio adiabático del parámetro de intensidad del campo cuadripolar hasta el valor óptimo de la resonancia del reactor.

$$Potencia\ Efectiva \sim \frac{v_{DC}}{v_{DC}^{Max}} \times 100\ kW \quad (\text{Ecuación 21})$$

CAPTURA DE NEUTRONES EN EL BLANKET (19) DEL REACTOR: En la Figura 2 se muestra el número calculado de los neutrones por unidad de tiempo emitidos para el Reactor estándar de Fusión Resonante. Estos neutrones, productos de la reacción de fusión en la (Ecuación 1.1), no pueden confinarse en la trampa de Penning-Malmberg y son emitidos hacia la envoltura regeneradora donde se capturan mediante un material cerámico, por ejemplo, en una aleación de Litio y Plomo  $Pb_{83}Li_{17}$  o bien mediante un metal líquido de Plomo y Litio o de Litio metálico puro. El diseño del Blanket (19) del sistema no es objetivo específico de esta patente y se asume como parte de la tecnología necesaria para llevar a cabo futuros prototipos. Un diseño esquemático del reactor con el Blanket (19) de captura de los neutrones se muestra en la Figura 4. El Blanket (19), que ha de recubrir el interior de las paredes del cilindro entre los electrodos cilíndricos (12), una vez refrigerado mediante un circuito de Helio líquido, por ejemplo, permitirá eliminar el calor transportado por los neutrones emitidos que se transformará en energía eléctrica (mediante un dispositivo termoeléctrico anexo al reactor).

#### RESUMEN DE LOS PARAMETROS TÉCNICOS DEL REACTOR ESTÁNDAR DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO IÓNICO RESONANTE

- Definimos estándar al reactor capaz de generar aproximadamente 100 kW de potencia máxima para una nube de plasma confinada a la temperatura de ionización del plasma de 7500 °C .
- El factor de forma del plasma en el reactor estándar es  $\frac{z}{R} \sim 4 \cdot 10^{-2}$ .
- Radio del cilindro de la trampa iónica de Penning – Malmberg  $R = 0.1157\ m$ .
- Valor del potencial eléctrico de confinamiento axial  $V_0 = 10\ kV$ .
- Campo magnético  $B = 3.5\ Tesla$ , para el confinamiento radial de los iones.
- La frecuencia magnetrón de la nube iónica es  $\nu = 68\ kHz$ .
- Para que las condiciones de reacción tengan lugar  $\delta = 0.032$  debe tomarse como parámetro adimensional de la intensidad del campo estroboscópico cuadripolar.
- La frecuencia de cambio de polaridad de cada electrodo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) del campo cuadripolar estroboscópico debe ser 4 veces el valor de la frecuencia angular magnetrón, unos 427 krad/s.

- La frecuencia máxima de los pulsos de plasma que alimentan el reactor es de aproximadamente  $\nu_{DC}^{Max} = 1.6 \text{ GHz}$ .
- Para alcanzar la máxima potencia aprovechable del reactor deben existir disyuntores de corriente continua par alto voltaje de un máximo  $1.6 \text{ GHz}$  de frecuencia. Estos interruptores proporcionarán la inversión de polaridad del potencial de confinamiento,  $V_0$ , necesaria para alimentar el reactor con nuevos pulsos de plasma.
- Cada pulso de alimentación de plasma del reactor requiere  $N = 2. \times 10^{10}$  núcleos de Deuterio.
- La velocidad de reacción es de  $\frac{d}{dt} N \sim 10^{19}$  núcleos de Deuterio por segundo. Los neutrones generados en el reactor,  $\frac{1}{4}$  de esta cantidad, deben ser capturados por la envoltura regeneradora del reactor o Blanket (de un material rico en Litio, cuya sección eficaz de captura de neutrones es elevada).
- La potencia efectiva alcanzable depende de la frecuencia real,  $\nu_{DC}$ , de los disyuntores de corriente continua (que permitirán los pulsos de plasma en el reactor): *Potencia Efectiva*  $\sim \frac{\nu_{DC}}{\nu_{DC}^{Max}} \times 100 \text{ kW}$ .
- Es una característica del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante que, en la Configuración Estándar, se generarán aproximadamente  $4.16 \mu$  mol por segundo del isótopo de Helio-3 y otros tantos de Tritio.
- Es una característica del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante que, en la Configuración Estándar, el período del disyuntor que invierte la polaridad del potencial de corriente continua  $V_0$  es de aproximadamente  $1.6 \text{ GHz}$ .
- Es una característica del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante que, en la Configuración Estándar, el flujo de núcleos de Deuterio necesarios para sostener las reacciones de fusión es de  $10^{19}$  núcleos de Deuterio por segundo. Esto supone un suministro pulsante de corriente eléctrica iónica de aproximadamente  $1.6 \text{ A}$  en el reactor.

Valores aproximados de rendimiento: el voltaje del sistema del reactor de fusión nuclear por confinamiento resonante es, en la configuración estándar, equivalente a aproximadamente  $50 \text{ kV} - 100 \text{ kV}$ , es decir se supera por un factor de 5 el valor de  $V_0$  necesario para polarizar la trampa iónica en condiciones resonantes. Por lo tanto, la reacción nuclear es auto-sostenida.

Es una característica del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante que, en la configuración estándar, la potencia eléctrica neta que este reactor puede producir es del orden de los 100 kW (véase la Figura 3). La potencia eléctrica aprovechable dependerá de la eficiencia del sistema termoeléctrico que opere en el reactor.

- 5 La invención es aplicable también para centrales eléctricas. Este tipo de reactores de fusión no presenta el peligro de proliferación de residuos nucleares como ocurriría en el caso de reactores de fisión de Uranio-238 o de Plutonio-239.

Los equipos modulares de fusión por confinamiento iónico resonante podrían ser instalados en redes de autoabastecimiento eléctrico local en edificios no conectados a  
 10 la red general o en dispositivos autónomos. En este caso deben usarse sistemas de fusión por confinamiento iónico de alta temperatura y alta potencia, es decir con factores de forma de la nube iónica muy bajos  $z/R < 10^{-3}$ . Estos sistemas deben usar interruptores de circuito de altísima frecuencia para alto Voltaje  $\nu > 10GHz$ . El potencial de confinamiento en este caso es de más de 10kV. Las ganancias de potencia  
 15 esperables serán  $Q > 10$ . La potencia generada en estos equipos será superior a los 100 kW por unidad.

Para sistemas de propulsión eléctrica de equipos o vehículos autónomos que deban operar lejos de redes de abastecimiento eléctrico. En esta ocasión deben desarrollarse modelos del reactor de baja potencia, es decir que emplean trampas de iones  
 20 confinados para factores de forma  $10^{-2} > z/R > 10^{-3}$ . El potencial de confinamiento será  $V_0 \leq 10kV$  y los interruptores de circuito de corriente continua (disyuntores) deben actuar en frecuencias  $\nu < 2GHz$ . Las ganancias de potencia serán  $5 < Q \leq 10$ . El tamaño del dispositivo permite acomodar el reactor en un volumen suficientemente reducido como para permitir su incorporación como fuente de energía de un motor  
 25 eléctrico que opere para potencias del orden de hasta 100kW. Se deberá disponer de elementos de protección adicionales suficientes que eviten las radiaciones producidas por los productos de la reacción que no hayan sido previamente neutralizadas por el Blanket (19).

Otra aplicación del reactor de fusión por confinamiento iónico resonante es la producción  
 30 de átomos de los isótopos  ${}^3_2He$  (Helio-3) y  ${}^3_1H$  (Tritio) que se obtienen en la cámara de neutralización del sistema propuesto.



(11) y un campo cuadripolar sobre los ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) de valor  $V_{\lambda}(t) = \frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi)$ , siendo  $\lambda = (2\delta + 1)\left(\frac{R'}{R}\right)^2$ ,  $\omega$  la velocidad angular de giro magnetrón de la nube iónica,  $t$  tiempo,  $\phi$  es la fase relativa del potencial aplicado a cada electrodo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8),  $\delta$  es el parámetro de intensidad del potencial cuadripolar,  $R$  el radio de los electrodos cilíndricos (11, 12) y  $R'$  el radio del círculo en el que se localizan los electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) del campo cuadripolar,

estando el sistema caracterizado porque está configurado para la aplicación de una intensidad del campo eléctrico cuadripolar caracterizado por el parámetro  $\delta$  igual a

$$\delta(V_0, B, R) \approx \xi \left( \frac{V_0 m}{B^2 R^2 e} \right)^{\frac{1}{2}}, \text{ siendo } e=1,602176487 \times 10^{-19} \text{ C, } m = 3,34358320(17)$$

$\times 10^{-27} \text{ kg}$  y  $\xi$  una constante próxima a 1 de modo que se generen trayectorias resonantes de los iones para que tengan lugar las reacciones de fusión nuclear.

2.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según la reivindicación 1, caracterizado por que el contenedor cilíndrico (50) comprende una envoltura regeneradora Blanket (19) alrededor de la región de los primeros electrodos cilíndricos (11) situados longitudinalmente para la captura de los neutrones emitidos en las reacciones de fusión dentro del reactor.

3.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según la reivindicación 2, caracterizado por que la envoltura regeneradora Blanket (19) comprende un circuito refrigerante de Helio para transportar el calor generado por la captura de neutrones en la envoltura regeneradora Blanket (19).

4.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende una trampa iónica cilíndrica de Penning-Malmberg de confinamiento de electrones (17).

5.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende un sistema termoelectrico (22) anexo a la trampa iónica, donde la fuente de calor proveniente de la refrigeración de la envoltura regeneradora Blanket (19) está configurada para alimentar un circuito de corriente continua.

6.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la entrada de iones está configurada para la entrada de iones de Deuterio y la salida para la salida de Helio-3, Tritio y núcleos de Hidrógeno.

5 7.- Sistema de fusión por confinamiento iónico resonante, según la reivindicación anteriores, caracterizado por que el flujo de núcleos de Deuterio necesarios para sostener las reacciones de fusión es de  $10^{19}$  núcleos de Deuterio por segundo.

8.- Procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante, que comprende los siguientes pasos:

10 - desviar iones hacia una trampa iónica cilíndrica de tipo Penning-Malmberg donde se ha hecho el vacío que comprende:

- o un contenedor cilíndrico (50) para el confinamiento de una nube de iones,
- o dos primeros electrodos cilíndricos (11) situados longitudinalmente y simétricamente respecto al centro del contenedor cilíndrico (50) estando separados longitudinalmente por un espacio configurado para el confinamiento de los iones ,
- o un tercer electrodo cilíndrico (12) situado en el eje de simetría del contenedor cilíndrico con una diferencia de potencial respecto a los dos primeros electrodos cilíndricos (11) situado en dicho espacio entre los dos primeros electrodos cilíndricos (11) destinado a confinar los iones en el interior de la región delimitada por los primeros electrodos cilíndricos (11),
- o ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) con paridades alternas en disposición circular alrededor del tercer electrodo cilíndrico (12) que están configurados para generar un campo cuadripolar de corriente alterna cuando dos pares de electrodos alternos están en fase y otros dos pares de electrodos alternos están en antifase, la frecuencia angular de la variación armónica de las polaridades de estos electrodos coincide con cuatro veces la frecuencia magnetrón de los iones confinados  $\omega$ ,

- o una entrada localizada en un extremo longitudinal de uno de los primeros electrodos cilíndricos (11)
  - o una salida localizada en el extremo longitudinal opuesto del otro electrodo cilíndrico (11) configurada para la salida de los productos de la reacción,
- 5
- aplicar un campo magnético axial  $\vec{B}$  y un potencial eléctrico  $V_0$  sobre los primeros electrodos cilíndricos (11) situados longitudinalmente,
  - generar un campo cuadripolar sobre los ocho electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) de valor  $V_\lambda(t) = \frac{V_0}{8} \lambda \cos(4\omega t + \phi)$ , siendo  $\lambda = (2\delta + 1) \left(\frac{R'}{R}\right)^2$ ,  $\omega$  la velocidad angular de giro magnetrón de la nube iónica,  $t$  tiempo,  $\phi$  es la fase relativa del potencial aplicado a cada electrodo (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8),  $\delta$  es el parámetro de intensidad del potencial cuadripolar,  $R$  el radio de los electrodos cilíndricos (11, 12) y  $R'$  el radio del círculo en el que se localizan los electrodos (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) del campo cuadripolar,
- 10
- 15 caracterizado por que comprende, posteriormente, el paso de aplicar una intensidad  $\delta$  del campo eléctrico cuadripolar igual a  $\delta(V_0, B, R) \approx \xi \left(\frac{V_0 m}{B^2 R^2 e}\right)^{\frac{1}{2}}$ , siendo  $e = 1,602176487 \times 10^{-19} C$ ,  $m = 3,34358320(17) \times 10^{-27} kg$  y  $\xi$  una constante próxima a 1 de modo que se generen trayectorias resonantes de los iones para que tengan lugar las reacciones de fusión nuclear.
- 20 9.- Procedimiento de fusión por confinamiento iónico resonante, según la reivindicación 8, caracterizado por que para el ajuste del parámetro  $\xi$  se realizan los siguientes pasos:
- se varía el potencial eléctrico  $V_0$  y el campo magnético axial  $\vec{B}$  manteniendo el valor del parámetro de intensidad del campo cuadripolar  $\delta_0$  inicial mediante la siguiente relación  $\Delta V_0 = (R\omega^2)\Delta B$ ,
- 25
- se detecta la emisión del flujo de neutrones,
  - se determina el valor óptimo  $V_{0fin}$  y  $B_{fin}$  que se corresponde a los valores en los que se observa un pico de número de neutrones detectados,
  - se determina el parámetro final  $\xi$  en función de  $B_{fin}$  y  $B_0$ :  $\xi \sim \sqrt{\frac{B_{fin}}{B_0}}$ .

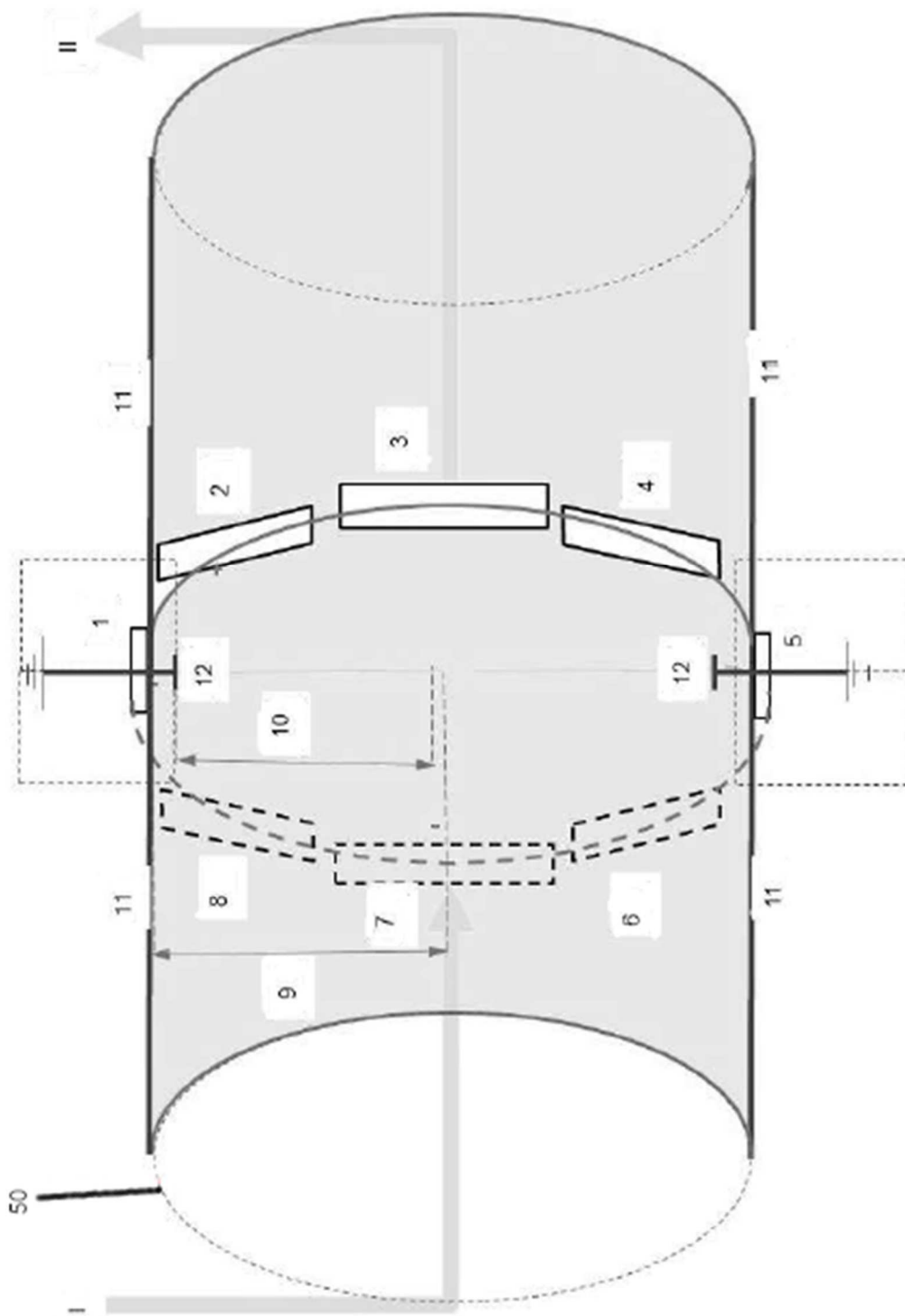


Fig. 1

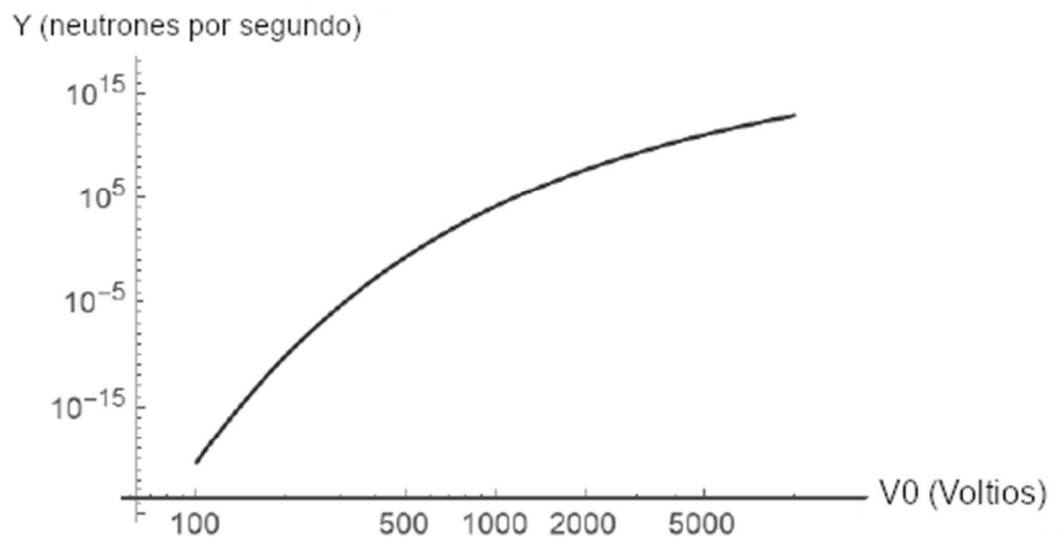


Fig. 2

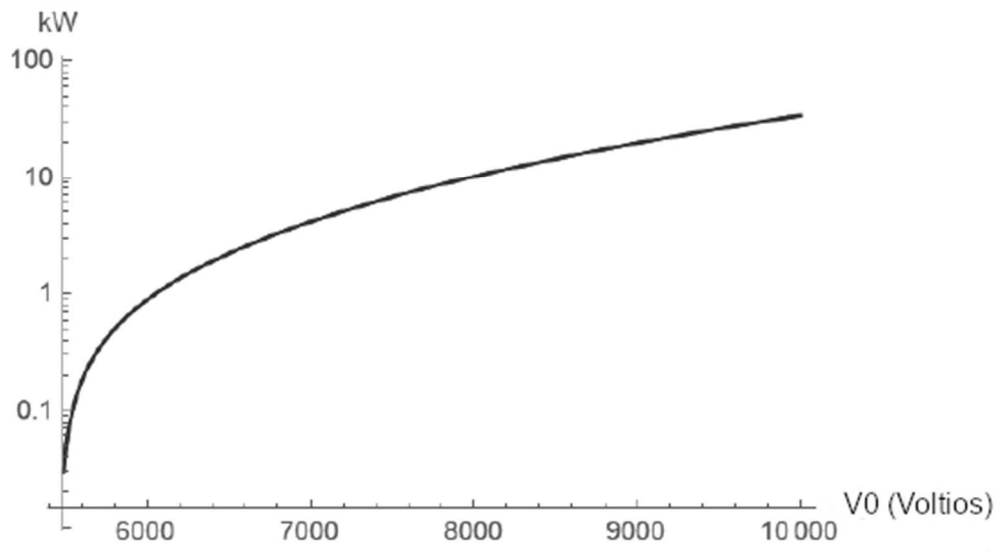


Fig. 3

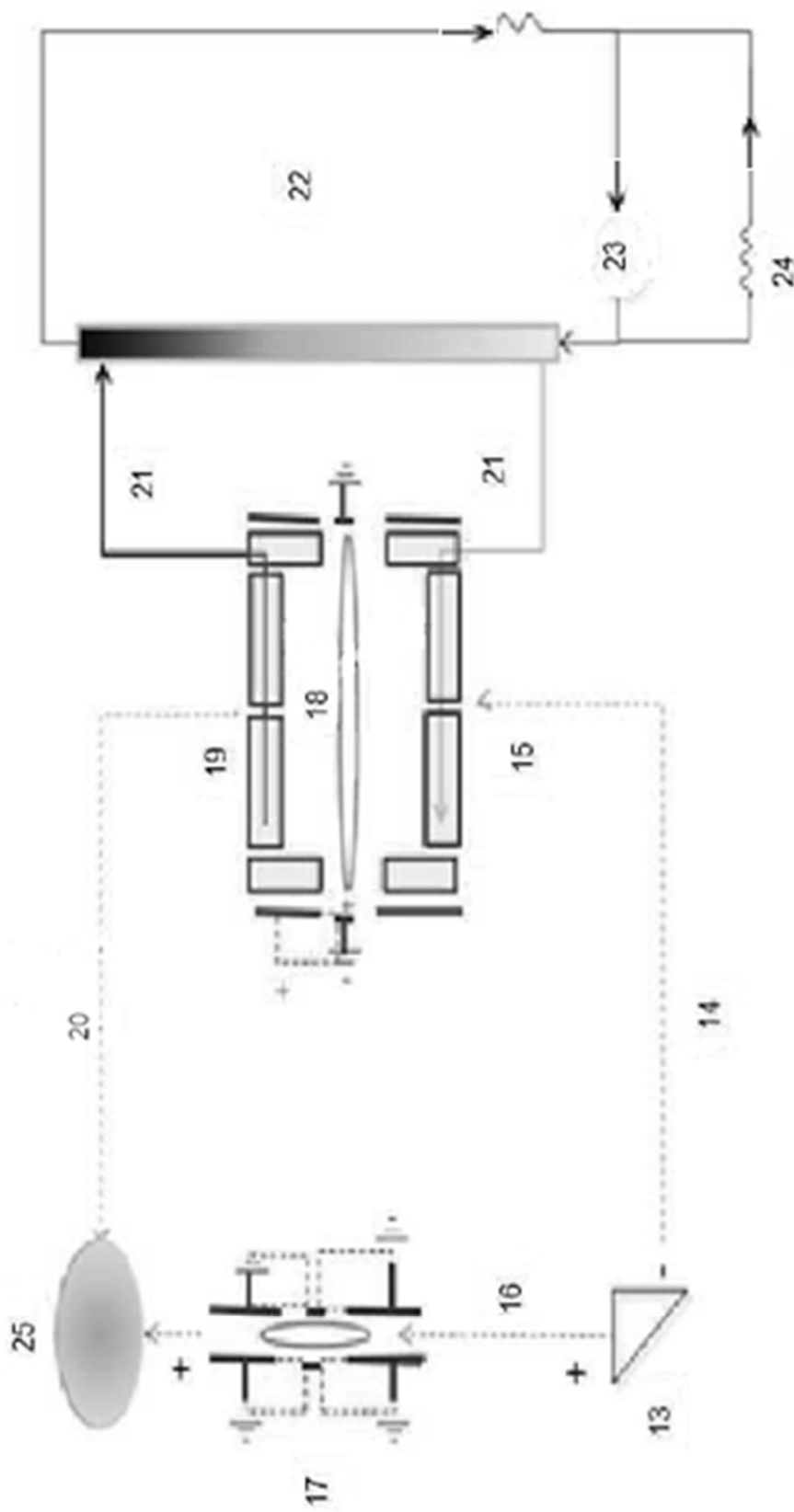


Fig. 4