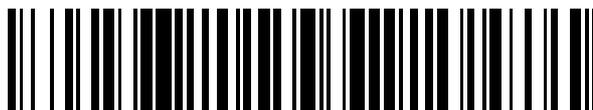


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 558 978**

51 Int. Cl.:

H05H 13/02 (2006.01)

H05H 7/02 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **21.07.2005 E 05776532 (3)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **30.12.2015 EP 1790203**

54 Título: **Generador de formas de ondas de radiofrecuencia programable para un sincrociclotrón**

30 Prioridad:

21.07.2004 US 590089 P

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

09.02.2016

73 Titular/es:

**MEVION MEDICAL SYSTEMS, INC. (100.0%)
300 Foster Street
Littleton, MA 01772, US**

72 Inventor/es:

**SLISKI, ALAN y
GALL, KENNETH**

74 Agente/Representante:

UNGRÍA LÓPEZ, Javier

ES 2 558 978 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

Generador de formas de ondas de radiofrecuencia programable para un sincrociclotrón

5 Solicitudes relacionadas

Esta solicitud reivindica la prioridad de la solicitud provisional de los EE.UU n.º. 60/590.089, presentada el 21 de julio de 2004.

10 Antecedentes de la invención

Para acelerar partículas cargadas a altas energías, se han desarrollado muchos tipos de aceleradores de partículas desde la década de 1930. Un tipo de acelerador de partículas es un ciclotrón. Un ciclotrón acelera partículas cargadas en un campo magnético axial mediante la aplicación de una tensión alterna a una o más "des" en una cámara de vacío. El nombre "de" es descriptivo de la forma de los electrodos en los primeros ciclotrones, aunque no pueden parecerse a la letra D en algunos ciclotrones. El recorrido en espiral producido por las partículas de aceleración es normal al campo magnético. Cuando las partículas en espiral salen, se aplica un campo eléctrico de aceleración en la separación entre las des. La tensión de la radiofrecuencia (RF) crea un campo eléctrico alterno a través de la separación entre las des. La tensión de RF y, por lo tanto, el campo, se sincroniza con el período orbital de las partículas cargadas en el campo magnético, de modo que las partículas son aceleradas por la forma de onda de radiofrecuencia a medida que cruzan repetidamente la separación. La energía de las partículas aumenta a un nivel de energía muy por encima de la tensión de pico de la tensión aplicada de radiofrecuencia (RF). A medida que las partículas cargadas se aceleran, sus masas crecen debido a los efectos relativistas. En consecuencia, la aceleración de las partículas se convierte en no uniforme y las partículas llegan a la separación de forma asíncrona con los picos de la tensión aplicada.

Dos tipos de ciclotrones actualmente empleados, un ciclotrón isócrono y sincrociclotrón, superan el desafío de aumento de la masa relativista de las partículas aceleradas de diferentes maneras. El ciclotrón isócrono utiliza una frecuencia constante de la tensión con un campo magnético que aumenta con el radio para mantener la aceleración adecuada. El sincrociclotrón utiliza un campo magnético decreciente al aumentar el radio y varía la frecuencia de la tensión de aceleración para coincidir con el aumento de la masa causada por la velocidad relativista de las partículas cargadas. Por ejemplo, la patente US 4.641.057 divulga paneles de ajuste de accionamiento mecánico que varían la frecuencia del campo de conducción para compensar los efectos relativistas.

En un sincrociclotrón, "haces" discretos de partículas cargadas son acelerados a la energía final antes de iniciar de nuevo el ciclo. En ciclotrones isócronos, las partículas cargadas se pueden acelerar de forma continua, en lugar de en haces, permitiendo alcanzar una energía del haz superior.

En un sincrociclotrón, capaz de acelerar un protón, por ejemplo, a la energía de 250 MeV, la velocidad final de los protones es de $0,61c$, donde c es la velocidad de la luz, y el aumento de la masa es del 27% por encima de la masa en reposo. La frecuencia tiene que disminuir en una cantidad correspondiente, además de reducir la frecuencia para tener en cuenta la intensidad de campo magnético radialmente decreciente. La dependencia de la frecuencia en el tiempo no será lineal, y un perfil óptimo de la función que describe esta dependencia dependerá de un gran número de detalles.

R. Schneider y J. Rainwater, IEEE Transactions on Nuclear Science, 16 (3): 430-433, 1969, divulga diversas técnicas para corregir el comportamiento indeseable del circuito resonante, incluyendo la reducción de la frecuencia y el factor de calidad de los modos no deseados. Estas soluciones, sin embargo, cambian en lugar de eliminar las restricciones a los parámetros de funcionamiento del sincrociclotrón, tales como el tipo de partícula, el rango de velocidades de partículas, y la frecuencia de oscilación del campo eléctrico. Alternativamente, la tensión de aceleración puede ser pulsada, tal como se divulga en I.B. Enchevich y T.N. Tomilina, traducido del Atomnaya Energiya, 26 (3): 285-287, 1969.

De acuerdo con un aspecto, se proporciona un sincrociclotrón acuerdo con la reivindicación 1.

Según otro aspecto, se proporciona un método para producir un haz de partículas en un sincrociclotrón acuerdo con la reivindicación 10.

El control preciso y reproducible de la frecuencia en el rango requerido por una energía final deseada que compensa el aumento de la masa relativista y la dependencia del campo magnético en la distancia desde el centro de la de ha sido históricamente un reto. Además, puede necesitar variarse la amplitud de la tensión de aceleración a lo largo del ciclo de aceleración para mantener el enfoque y aumentar la estabilidad del haz. Por otra parte, las des y otros equipos que comprenden un ciclotrón definen un circuito resonante, donde las des pueden considerarse los electrodos de un condensador. Este circuito resonante se describe mediante el factor Q, que contribuye al perfil de la tensión a través de la separación.

Un sincrociclotrón para acelerar las partículas cargadas, tales como protones, puede comprender un generador de campo magnético y un circuito resonante que comprende electrodos, dispuesto entre los polos magnéticos. Un espacio entre los electrodos se puede disponer a través del campo magnético. Una entrada de tensión oscilante impulsa un campo eléctrico oscilante a través de la separación. La entrada de tensión oscilante puede controlarse para variar en el tiempo la aceleración de las partículas cargadas. Cualquiera o ambas de la amplitud y la frecuencia de la entrada de tensión oscilante se pueden variar. La entrada de tensión oscilante puede generarse mediante un generador de forma de onda digital programable.

El circuito resonante incluye además un elemento reactivo variable en circuito con la entrada de tensión y los electrodos para variar la frecuencia de resonancia del circuito resonante. El elemento reactivo variable puede ser un elemento de capacitancia variable tal como un condensador giratorio o una lámina vibrante. Mediante la variación de la reactancia de este elemento reactivo y el ajuste de la frecuencia de resonancia del circuito resonante, las condiciones de resonancia se pueden mantener en el rango de frecuencia de funcionamiento del sincrociclotrón.

El sincrociclotrón puede incluir además un sensor de tensión para medir el campo eléctrico oscilante a través de la separación. Al medir el campo eléctrico oscilante a través de la separación y compararlo con la entrada de tensión oscilante, pueden detectarse condiciones de resonancia en el circuito resonante. El generador de forma de onda programable puede ser el ajuste de la entrada de tensión y la frecuencia para mantener las condiciones de resonancia.

El sincrociclotrón puede incluir además un electrodo de inyección, dispuesto entre los polos magnéticos, bajo una tensión controlada por el generador de forma de onda digital programable. El electrodo de inyección se utiliza para la inyección de partículas cargadas en el sincrociclotrón. El sincrociclotrón puede incluir además un electrodo de extracción, dispuesto entre los polos magnéticos, bajo una tensión controlada por el generador de forma de onda digital programable. El electrodo de extracción se utiliza para extraer un haz de partículas del sincrociclotrón.

El sincrociclotrón puede incluir además un monitor de haz para medir las propiedades del haz de partículas. Por ejemplo, el monitor del haz puede medir la intensidad del haz de partículas, el tiempo de partículas o la distribución espacial del haz de partículas. El generador de forma de onda programable puede ajustar al menos una de la entrada de tensión, la tensión en el electrodo de inyección y la tensión en el electrodo de extracción para compensar las variaciones en las propiedades del haz de partículas.

Esta invención tiene como objetivo tratar la generación de las señales moduladas de la frecuencia y la amplitud variable adecuada para la inyección eficiente, mediante aceleración, y la extracción de partículas cargadas desde un acelerador.

Breve descripción de los dibujos

Los anteriores y otros objetos, características y ventajas de la invención serán evidentes a partir de la siguiente descripción más particular de realizaciones preferidas de la invención, como se ilustra en los dibujos adjuntos en los que caracteres de referencia similares se refieren a las mismas partes en todas las diferentes vistas. Los dibujos no están necesariamente a escala, poniéndose énfasis en su lugar en ilustrar los principios de la invención.

La figura 1A es una vista en sección transversal en planta de un sincrociclotrón de la presente invención.
 La figura 1B es una vista en sección transversal lateral del sincrociclotrón que se muestra en la figura 1A.
 La figura 2 es una ilustración de una forma de onda idealizada que se puede utilizar para acelerar partículas cargadas en un sincrociclotrón que se muestra en las figuras 1A y 1B.
 La figura 3 representa un diagrama de bloques de un sincrociclotrón de la presente invención que incluye un sistema generador de forma de onda.
 La figura 4 es un diagrama de flujo que ilustra los principios de operación de un generador de forma de onda digital y un sistema de retroalimentación adaptativo (optimizador) de la presente invención.
 La figura 5A muestra el efecto de la demora de propagación finita de la señal a través de diferentes trayectorias en una estructura de electrodo acelerador ("de").
 La figura 5B muestra la temporización de forma de onda de entrada ajustada para corregir la variación en el retardo de propagación a través de la estructura de "de".
 La figura 6A muestra una respuesta de frecuencia, ilustrativa del sistema resonante con variaciones debido a los efectos de circuito parasitarios.
 La figura 6B muestra una forma de onda calculada para corregir las variaciones en la respuesta de frecuencia debida a los efectos del circuito parasitarios.
 La figura 6C muestra la respuesta de frecuencia "plana" resultante del sistema cuando la forma de onda mostrada en la figura 6B se utiliza como tensión de entrada.
 La figura 7A muestra una tensión de entrada de amplitud constante aplicada a los electrodos de aceleración que se muestran en la figura 7B.
 La figura 7B muestra un ejemplo de la geometría del electrodo de aceleración en la que la distancia entre los electrodos se reduce hacia el centro.
 La figura 7C muestra la intensidad de campo eléctrico deseada y resultante en la separación de los electrodos

como una función del radio que logra una aceleración estable y eficiente de las partículas cargadas mediante la aplicación de tensión de entrada como se muestra en la figura 7A a la geometría del electrodo que se muestra en la figura 7B.

La figura 7D muestra amplitudes de tensión de entrada como una función del radio que se corresponde directamente con la intensidad de campo eléctrico deseado y puede producirse utilizando un generador de forma de onda digital.

La figura 7E muestra una geometría paralela de los electrodos de aceleración que da una proporcionalidad directa entre la tensión aplicada y la intensidad de campo eléctrico.

La figura 7F muestra la intensidad de campo eléctrico deseada y resultante en la separación de los electrodos como una función del radio que logra una aceleración estable y eficiente de partículas cargadas mediante la aplicación de una tensión de entrada como se muestra en la figura 7D a la geometría del electrodo se muestra en la figura 7E.

La figura 8A muestra un ejemplo de una forma de onda de la tensión de aceleración generada por el generador de forma de onda programable.

La figura 8B muestra un ejemplo de una señal de inyector de iones temporizado.

La figura 8C muestra otro ejemplo de una señal de inyector de iones temporizado.

Descripción detallada de la invención

Esta invención se refiere a los dispositivos y métodos para generar las tensiones de aceleración complejas temporizadas precisamente a través de la separación "de" en un sincrociclotrón. Esta invención comprende un aparato y un método para conducir la tensión a través de la separación "de" mediante la generación de una forma de onda específica, donde la amplitud, la frecuencia y la fase se controlan de una manera tal como para crear la aceleración de partículas más eficaz dada la configuración física del acelerador individual, el perfil de campo magnético, y otras variables que pueden o no pueden ser conocidas *a priori*. Un sincrociclotrón necesita un campo magnético decreciente para mantener el enfoque del haz de partículas, modificando así la forma deseada de la frecuencia de barrido. Hay finitos retardos de propagación predecibles de la señal eléctrica aplicada al punto efectivo en la de, donde el haz de partículas experimenta la aceleración del campo eléctrico que conduce a la aceleración continua. El amplificador se utiliza para amplificar la señal de radiofrecuencia (RF) que conduce a que la tensión a través de la separación de también puede tener un desplazamiento de fase que varía con la frecuencia. Algunos de los efectos pueden no conocerse *a priori*, y puede solamente observarse después de la integración de todo el sincrociclotrón. Además, la sincronización de la inyección de partículas y la extracción en una escala de tiempo de nanosegundos puede aumentar la eficacia de la extracción del acelerador, reduciendo así la radiación parásita debido a las partículas perdidas en las fases de aceleración y de extracción de la operación.

Haciendo referencia a las figuras 1A y 1B, un sincrociclotrón de la presente invención comprende unas bobinas eléctricas 2a y 2b alrededor de dos polos magnéticos 4a y 4b de metal separados configurados para generar un campo magnético. Los polos magnéticos 4a y 4b se definen mediante dos porciones opuestas de yugo 6a y 6b (mostradas en sección transversal). El espacio entre los polos 4a y 4b define una cámara de vacío 8 o una cámara de vacío separada se puede instalar entre los polos 4a y 4b. La intensidad del campo magnético es generalmente una función de la distancia desde el centro de la cámara de vacío 8 y está determinada en gran medida por la elección de la geometría de las bobinas 2a y 2b y la forma y el material de los polos magnéticos 4a y 4b.

Los electrodos de aceleración comprenden "de" 10 y "de" 12, que tiene una separación 13 entre los mismos. La de 10 está conectado a un potencial de tensión alterna cuya frecuencia se cambia de alta a baja durante el ciclo de aceleración para tener en cuenta la masa relativista cada vez mayor de una partícula cargada y campo magnético radialmente decreciente (medido desde el centro de la cámara de vacío 8) producido por las bobinas 2a y 2b y las porciones polares 4a y 4b. El perfil característico de la tensión alterna en des 10 y 12 se muestran en la figura 2, y se describirá en detalle a continuación. La de 10 es una estructura de medio cilindro de interior hueca. La de 12, también conocida como la "de ficticia", no tiene por qué ser una estructura cilíndrica hueca, ya que se basa en las paredes de la cámara de vacío 14. La de 12 como se muestra en las figuras 1A y 1B comprende una tira de metal, por ejemplo, cobre, que tiene una ranura cuya forma coincide con una ranura sustancialmente similar en la de 10. La de 12 puede conformarse para formar una imagen de espejo de la superficie 16 de la de 10.

La fuente de iones 18 que incluye un electrodo de fuente de iones 20, situado en el centro de la cámara de vacío 8, se proporciona para la inyección de partículas cargadas. Unos electrodos de extracción 22 se proporcionan para dirigir las partículas de carga en el canal de extracción 24, formando de este modo el haz 26 de las partículas cargadas. La fuente de iones también puede montarse en el exterior e inyectar los iones de manera sustancialmente axial en la región de aceleración.

Las des 10 y 12 y otras piezas de hardware que comprenden un ciclotrón, definen un circuito resonante sintonizable en virtud de una entrada de tensión oscilante que crea un campo eléctrico oscilante a través de la separación 13. Este circuito resonante puede sintonizarse para mantener el factor Q alto durante el barrido de frecuencias mediante el uso de unos medios de ajuste.

Como se usa aquí, el factor Q es una medida de la "calidad" de un sistema resonante en su respuesta a las frecuencias cercanas a la frecuencia de resonancia. El factor Q se define como

$$Q = 1/R \times \sqrt{L/C},$$

5 donde R es la resistencia activa de un circuito resonante, L es la inductancia y C es la capacitancia de este circuito.

Los medios de ajuste pueden ser una bobina de inductancia variable o una capacitancia variable. Un dispositivo de capacitancia variable puede ser una lengüeta vibrante o un condensador giratorio. En el ejemplo mostrado en las figuras 1A y 1B, los medios de ajuste son un condensador giratorio 28. El condensador giratorio 28 comprende unas cuchillas giratorias 30 accionadas mediante un motor 31. Durante cada cuarto de ciclo del motor 31, cuando las cuchillas 30 engranan con las cuchillas 32, la capacitancia del circuito resonante que incluye las "des" 10 y 12 y el condensador 28 giratorio aumenta y la frecuencia de resonancia disminuye. El proceso se invierte cuando las cuchillas se desengranan. Por lo tanto, la frecuencia resonante se cambia cambiando la capacitancia del circuito resonante. Esto sirve al propósito de reducir mediante un factor grande la potencia requerida para generar la alta tensión aplicada a las "des" y necesaria para acelerar el haz. La forma de las cuchillas 30 y 32 puede mecanizarse para crear la dependencia de la frecuencia de resonancia requerida a tiempo.

La rotación de la cuchilla se puede sincronizar con la generación de frecuencia RF, de modo que variando el factor Q de la cavidad de RF, la frecuencia de resonancia del circuito resonante, definida por el ciclotrón, se mantiene cerca de la frecuencia del potencial de tensión alterna aplicada a las "des" 10 y 12.

La rotación de las cuchillas puede controlarse mediante el generador de forma de onda digital, que se describe a continuación con referencia a la figura 3 y a la figura 4, de una manera que mantiene la frecuencia de resonancia del circuito resonante próxima a la frecuencia de corriente generada por el generador de forma de onda digital. Alternativamente, el generador de forma de onda digital puede controlarse mediante un sensor de posición angular (no mostrado) en el eje de rotación del condensador 33 para controlar la frecuencia de reloj del generador de forma de onda para mantener la condición resonante óptima. Este método se puede emplear si el perfil de las cuchillas de engranaje del condensador giratorio está precisamente relacionado con la posición angular del eje.

Un sensor que detecta la condición del pico de resonancia (no mostrada) se puede emplear también para proporcionar retroalimentación al reloj del generador de forma de onda digital para mantener la más alta coincidencia con la frecuencia de resonancia. Los sensores para detectar las condiciones de resonancia pueden medir la tensión oscilante y la corriente en el circuito resonante. En otro ejemplo, el sensor puede ser un sensor de capacitancia. Este método puede acomodar pequeñas irregularidades en la relación entre el perfil de las cuchillas de engranaje del condensador de rotación y la posición angular del eje.

Un sistema de bombeo de vacío 40 mantiene la cámara de vacío 8 a una presión muy baja para no dispersar el haz de aceleración.

Para lograr la aceleración uniforme en un sincrociclotrón, la frecuencia y la amplitud del campo eléctrico a través de la separación "de" necesita variarse para tener en cuenta el aumento de masa relativista y la variación radial (medido como la distancia desde el centro de la trayectoria en espiral de las partículas cargadas) del campo magnético, así como para mantener el foco del haz de partículas.

La figura 2 es una ilustración de una forma de onda idealizada que puede ser necesaria para acelerar partículas cargadas en un sincrociclotrón. Muestra sólo unos pocos ciclos de la forma de onda y no representa necesariamente la frecuencia ideal y los perfiles de modulación de amplitud. La figura 2 ilustra el tiempo que varía las propiedades amplitud y frecuencia de la forma de onda utilizada en un sincrociclotrón dado. La frecuencia cambia de alta a baja cuando la masa relativista de las partículas aumenta, mientras que la velocidad de las partículas se acerca a una fracción significativa de la velocidad de la luz.

La presente invención utiliza un conjunto de convertidores de digital a analógico (DAC) de alta velocidad que pueden generar, a partir de una memoria de alta velocidad, las señales necesarias en una escala de tiempo de nanosegundos. Refiriéndonos a la figura 1A, una señal de radiofrecuencia (RF) que acciona la tensión a través de la separación de 13 y las señales que conducen a la tensión en el electrodo inyector 20 y el electrodo extractor 22 puede generarse a partir de la memoria mediante los DACs. La señal del acelerador es una forma de onda de amplitud y frecuencia variable. Las señales de los inyectores y extractores pueden ser cualquiera de al menos tres tipos: continuas; señales discretas, tales como pulsos, que pueden operar en uno o más períodos de la forma de onda del acelerador en sincronismo con la forma de onda del acelerador; o señales discretas, tales como los pulsos, que pueden operar en casos precisamente temporizados durante el barrido de frecuencia de forma de onda del acelerador en sincronismo con la forma de onda del acelerador. (Véase a continuación con referencia a las figuras 8A-C).

La figura 3 representa un diagrama de bloques de un sincrociclotrón 300 de la presente invención que incluye un

acelerador de partículas 302, un sistema generador de forma de onda 319 y el sistema de amplificación 330. La figura 3 muestra también un sistema de retroalimentación adaptativo que incluye un optimizador 350. El condensador variable 28 opcional y el subsistema de accionamiento al motor 31 no se muestran.

5 Con referencia a la figura 3, el acelerador de partículas 302 es sustancialmente similar al representado en las figuras 1A y 1B, e incluye una "de ficticia" (de conectada a tierra) 304, una "de" 306 y una horquilla 308, un electrodo de inyección 310, conectado a la fuente de iones 312, y unos electrodos de extracción 314. Un monitor de haz 316 monitoriza la intensidad del haz 318.

10 El sincrociclotrón 300 incluye un generador de forma de onda digital 319. El generador de forma de onda digital 319 comprende uno o más convertidores de digital a analógico (DAC) 320 que convierten las representaciones digitales de formas de onda almacenadas en la memoria 322 en señales analógicas. El controlador 324 controla el direccionamiento de la memoria 322 a la salida de los datos apropiados y controla los DACs 320 a los que se aplican los datos en cualquier punto en el tiempo. El controlador 324 también escribe datos en la memoria 322. La interfaz
15 326 proporciona un enlace de datos a un ordenador externo (no mostrado). La interfaz 326 puede ser una interfaz de fibra óptica.

La señal de reloj que controla la temporización del proceso de conversión "de analógico a digital" puede estar disponible como una entrada al generador de forma de onda digital. Esta señal se puede utilizar en conjunción con un codificador de posición del eje (no mostrado) en el condensador de rotación (ver las figuras 1A y 1B) o un detector de condición resonante para afinar la frecuencia generada.
20

La figura 3 ilustra tres DACs 320a, 320b y 320c. En este ejemplo, las señales desde los DACs 320a y 320b son amplificadas mediante unos amplificadores 328a y 328b, respectivamente. La señal amplificada desde el DAC 320a acciona la fuente de iones 312 y/o el electrodo de inyección 310, mientras que la señal amplificada desde el DAC
25 320b acciona los electrodos de extracción 314.

La señal generada por el DAC 320c pasa al sistema de amplificación 330, operado bajo el control del sistema de control del amplificador de RF 332. En el sistema de amplificación 330, la señal del DAC 320c se aplica mediante el accionador de RF 334 al divisor de RF 336, que envía la señal de RF para amplificarse mediante un amplificador de potencia de RF 338. En el ejemplo mostrado en la figura 3, se utilizan cuatro amplificadores de potencia, 338a, b, c y d. Cualquier número de amplificadores 338 puede ser utilizado dependiendo del grado deseado de amplificación. La señal amplificada, combinada mediante el combinador de RF 340 y filtrada por el filtro 342, sale del sistema de amplificación 330 a través del acoplador direccional 344, lo que garantiza que las ondas de RF no se reflejan de nuevo en el sistema de amplificación 330. La potencia para el sistema de amplificación de operación 330 se suministra mediante la fuente de alimentación 346.
30

A su salida del sistema de amplificación 330, la señal desde el DAC 320c se pasa al acelerador de partículas 302 a través de red de adaptación 348. La red de adaptación 348 de la impedancia adapta una carga (acelerador de partículas 302) y una fuente (sistema de amplificación 330). La red de adaptación 348 incluye un conjunto de elementos reactivos variables.
40

El sincrociclotrón 300 puede incluir además un optimizador 350. Usando la medición de la intensidad del haz 318 mediante el monitor de haz 316, el optimizador 350, bajo el control de un procesador programable puede ajustar las formas de onda producidas por los DACs 320a, b y c y su temporización para optimizar el funcionamiento del sincrociclotrón 300 y lograr una óptima aceleración de las partículas cargadas.
45

Los principios de funcionamiento del generador de forma de onda digital 319 y el sistema de retroalimentación adaptativo 350 se describirán ahora con referencia a la figura 4.
50

Las condiciones iniciales para las formas de onda pueden calcularse a partir de principios físicos que gobiernan el movimiento de partículas cargadas en el campo magnético, a partir de la mecánica relativista que describe el comportamiento de una masa de partículas cargadas, así como de la descripción teórica de campo magnético como una función del radio en una cámara de vacío. Estos cálculos se realizan en la etapa 402. La forma de onda teórica de la tensión en la separación de, RF (ω , t), donde ω es la frecuencia del campo eléctrico a través de la separación de y t es el tiempo, se calcula basándose en los principios físicos de un ciclotrón, la mecánica relativista de un movimiento de partículas cargadas, y la dependencia radial teórica del campo magnético.
55

Las salidas de la práctica de la teoría pueden ser medidas y la forma de onda se puede corregir cuando el sincrociclotrón opera bajo estas condiciones iniciales. Por ejemplo, como se describirá a continuación con referencia a las figuras 8A-C, la temporización del inyector de iones con respecto a la forma de onda de aceleración puede variarse para maximizar la captura de las partículas inyectadas en el haz acelerado de las partículas.
60

La temporización de la forma de onda del acelerador se puede ajustar y optimizar, tal como se describe a continuación, sobre una base de ciclo por ciclo para corregir los retardos de propagación presentes en la disposición física del cableado de radiofrecuencia; la asimetría en la colocación o en la fabricación de las des se puede corregir
65

mediante la colocación de la tensión positiva pico más cerca en el tiempo de la tensión de pico negativa posterior o viceversa, creando en efecto una onda senoidal asimétrica.

En general, la distorsión de la forma de onda debida a las características del hardware puede corregirse mediante distorsión previa de la forma de onda teórica RF (ω, t) utilizando una función de transferencia dependiente del dispositivo A, resultando así en la forma de onda deseada que aparece en el punto específico en el electrodo de aceleración, donde los protones están en el ciclo de aceleración. En consecuencia, y haciendo referencia de nuevo a la figura 4, en la etapa 404, se calcula una función de transferencia A (ω, t) basándose en la respuesta medida experimentalmente del dispositivo para la tensión de entrada.

En la etapa 405, una forma de onda que corresponde a una expresión RF (ω, t)/A (ω, t) se calcula y se almacena en la memoria 322. En la etapa 406, el generador de forma de onda digital 319 genera la forma de onda RF/A de la memoria. La señal de excitación RF (ω, t)/A (ω, t) se amplifica en la etapa 408, y la señal amplificada se propaga a través de todo el dispositivo 300 en la etapa 410 para generar una tensión a través de la separación de en la etapa 412. Se dará una descripción más detallada de una función de transferencia representativa A (ω, t) a continuación con referencia a las figuras 6A-C.

Después de que el haz haya alcanzado la energía deseada, una tensión precisamente temporizada se puede aplicar a un electrodo o dispositivo de extracción para crear la trayectoria deseada del haz para extraer el haz del acelerador, donde se mide mediante el monitor del haz en la etapa 414a. La tensión de RF y la frecuencia se miden mediante sensores de tensión en la etapa 414b. La información sobre la intensidad del haz y la frecuencia RF se transmite de vuelta al generador de forma de onda digital 319, que ahora puede ajustar la forma de la señal de RF (ω, t)/A (ω, t) en la etapa 406.

Todo el proceso se puede controlar en la etapa 416 mediante el optimizador 350. El optimizador 350 puede ejecutar un algoritmo semi o totalmente automático diseñado para optimizar las formas de onda y el tiempo relativo de las formas de onda. El recocido simulado es un ejemplo de una clase de algoritmos de optimización que puede emplearse. Instrumentos de diagnóstico en línea pueden sondear el haz en diferentes etapas de aceleración para proporcionar información para el algoritmo de optimización. Cuando se han encontrado las condiciones óptimas, la memoria que contiene las formas de onda optimizadas puede fijarse y realizar una copia de seguridad para la operación continua estable durante un cierto período de tiempo. Esta capacidad de ajustar la forma de onda exacta de las propiedades del acelerador individual disminuye la variabilidad de unidad a unidad en funcionamiento y puede compensar las tolerancias y las variaciones de fabricación en las propiedades de los materiales utilizados en la construcción del ciclotrón.

El concepto del condensador giratorio (tales como el condensador 28 que se muestra en las figuras 1A y 1B) se puede integrar en este esquema de control digital mediante la medición de la tensión y la corriente de la forma de onda de RF para detectar el pico de la condición resonante. La desviación de la condición resonante puede alimentarse de vuelta al generador de forma de onda digital 319 (véase la figura 3) para ajustar la frecuencia de la forma de onda almacenada para mantener la condición del pico de resonancia en todo el ciclo de aceleración. La amplitud todavía puede controlarse con precisión, mientras se emplea este método.

La estructura del condensador de rotación 28 (ver las figuras 1A y 1B) opcionalmente puede estar integrada con una bomba de vacío turbomolecular, tal como la bomba de vacío 40 que se muestra en las figuras 1A y 1B, que proporciona bombeo de vacío a la cavidad del acelerador. Esta integración se traduciría en una estructura muy integrada y en ahorro de costes. El motor y el accionamiento para la bomba turbo pueden estar provistos de un elemento de retroalimentación, tal como un codificador giratorio para proporcionar un control preciso sobre la velocidad y la posición angular de las cuchillas giratorias 30, y el control de la unidad de motor se integraría con el generador de forma de onda 319 que controla el circuito para asegurar la correcta sincronización de la forma de onda de aceleración.

Como se mencionó anteriormente, la sincronización de la forma de onda de la entrada de tensión oscilante puede ajustarse para corregir los retardos de propagación que surgen en el dispositivo. La figura 5A ilustra un ejemplo de los errores de propagación de la onda debido a la diferencia en las distancias R1 y R2 desde el punto 504 de entrada de RF a los puntos 506 y 508, respectivamente, en la superficie de aceleración 502 del electrodo de aceleración 500. La diferencia en las distancias R1 y R2 resulta en el retardo de la propagación de la señal, que afecta a las partículas a medida que aceleran a lo largo de una trayectoria en espiral (no mostrada) centrada en el punto 506. Si la forma de onda de entrada, representada por la curva 510, no tiene en cuenta el retardo de propagación adicional causado por la distancia cada vez mayor, las partículas pueden salir de sincronización con la forma de onda de aceleración. La forma de onda de entrada 510 en el punto 504 sobre el electrodo de aceleración 500 experimenta un retardo variable cuando las partículas se aceleran hacia fuera desde el centro en el punto 506. Este retraso resulta en una tensión de entrada que tiene una forma de onda 512 en el punto 506, pero una forma de onda 514 temporizada de manera diferente en el punto 508. La forma de onda 514 muestra un desplazamiento de fase con respecto a la forma de onda 512 y esto puede afectar al proceso de aceleración. Como el tamaño físico de la estructura de aceleración (alrededor de 0,6 metros) es una fracción significativa de la longitud de onda de la frecuencia de aceleración (aproximadamente 2 metros), se experimenta un desplazamiento de fase significativo

entre diferentes partes de la estructura de aceleración.

En la figura 5B, la tensión de entrada que tiene la forma de onda 516 se ajusta previamente con respecto a la tensión de entrada descrita por la forma de onda 510 para tener la misma magnitud, pero de signo opuesto de retardo de tiempo. Como resultado, se corrige el retardo de fase causado por las diferentes longitudes de la trayectoria a través del electrodo de aceleración 500. Las formas de onda 518 y 520 resultantes están ahora alineadas correctamente para aumentar la eficiencia del proceso de aceleración de partículas. Este ejemplo ilustra un simple caso de retardo de propagación causado por un efecto geométrico fácilmente predecible. Puede haber otros efectos de temporización de formas de onda que se generan mediante la geometría más compleja utilizada en el acelerador real, y estos efectos, si es que se pueden predecir o medir, pueden compensarse mediante el uso de los mismos principios ilustrados en este ejemplo.

Como se describió anteriormente, el generador de forma de onda digital produce una tensión oscilante de entrada de la forma $RF(\omega, t)/A(\omega, t)$, donde $RF(\omega, t)$ es una tensión deseada a través de la separación de y y $A(\omega, t)$ es una función de transferencia. Una función de transferencia A específica del dispositivo representativo se ilustra mediante la curva 600 en la figura 6A. La curva 600 muestra el factor Q como una función de la frecuencia. La curva 600 tiene dos desviaciones no deseadas a partir de una función de transferencia ideal, a saber, las depresiones 602 y 604. Estas desviaciones pueden ser causadas por efectos debido a la longitud física de los componentes del circuito resonante, características auto-resonantes no deseadas de los componentes, u otros efectos. Esta función de transferencia puede ser medida y una tensión de entrada de compensación puede ser calculada y almacenada en la memoria del generador de forma de onda. Una representación de esta función de compensación 610 se muestra en la figura 6B. Cuando la tensión de entrada compensada 610 se aplica al dispositivo 300, la tensión resultante 620 es uniforme con respecto al perfil de tensión deseado calculado para dar una aceleración eficiente.

Otro ejemplo del tipo de efectos que pueden ser controlados con el generador de forma de onda programable se muestra en la figura 7. En algunos sincrociclotrones, la intensidad de campo eléctrico utilizado para la aceleración puede seleccionarse para ser algo reducida, ya que las partículas se aceleran hacia el exterior a lo largo de una trayectoria en espiral 705. Esta reducción de la intensidad de campo eléctrico se realiza aplicando tensión de aceleración 700, que se mantiene relativamente constante, como se muestra en la figura 7A, en el electrodo de aceleración 702. El electrodo 704 está usualmente en el potencial de tierra. La intensidad de campo eléctrico en la separación es la tensión aplicada dividida por la longitud de la separación. Como se muestra en la figura 7B, la distancia entre los electrodos de aceleración 702 y 704 aumenta con el radio R . La intensidad de campo eléctrico resultante como una función o radio R se muestra como la curva 706 en la figura 7C.

Con el uso del generador de forma de onda programable, la amplitud de la tensión de aceleración 708 puede modularse de la manera deseada, como se muestra en la figura 7D. Esta modulación permite mantener la distancia entre los electrodos de aceleración 710 y 712, que se mantiene constante, como se muestra en la figura 7E. Como resultado, la misma intensidad de campo eléctrico resultante como una función del radio 714, que se muestra en la figura 7F, se produce como se muestra en la figura 7C. Aunque esto es un simple ejemplo de otro tipo de control sobre los efectos del sistema de sincrociclotrón, la forma real de los electrodos y el perfil de la tensión de aceleración en comparación con radio pueden no seguir este sencillo ejemplo.

Como se mencionó anteriormente, el generador de forma de onda programable puede ser utilizado para controlar el inyector de iones (fuente de iones) para lograr la aceleración óptima de las partículas cargadas mediante la temporización precisa de las inyecciones de partículas. La figura 8A muestra la forma de onda de RF de aceleración generada por el generador de forma de onda programable. La figura 8B muestra una señal del inyector temporizada de manera precisa ciclo por ciclo que puede accionar la fuente de iones de una manera precisa para inyectar un pequeño haz de iones en la cavidad del acelerador a intervalos controlados con precisión para sincronizarse con el ángulo de fase de aceptación del proceso de aceleración. Las señales se muestran en aproximadamente la alineación correcta, ya que los haces de partículas por lo general se desplazan a través del acelerador en un ángulo de desfase de 30 grados en comparación con la forma de onda de campo eléctrico de RF para la estabilidad del haz. El momento actual de las señales en algún punto externo, como la salida de los convertidores de digital a analógico, puede no tener esta relación exacta, ya que los retardos de propagación de las dos señales es probable que sea diferente. Con el generador de forma de onda programable, la temporización de los pulsos de inyección puede variarse continuamente con respecto a la forma de onda de RF para optimizar el acoplamiento de los impulsos inyectados en el proceso de aceleración. Esta señal puede activarse o desactivarse para activar el encendido y el apagado del haz. La señal también puede ser modulada a través de técnicas de caída de pulsos para mantener una corriente de haz media requerida. Esta regulación de corriente del haz se logra mediante la elección de un intervalo de tiempo macroscópico que contiene un número de pulsos relativamente grande, del orden de 1000, y el cambio de la fracción de pulsos que se habilitan durante este intervalo.

La figura 8C muestra un pulso de control de la inyección más largo que corresponde a un número múltiple de ciclos de RF. Este pulso se genera cuando un haz de protones debe ser acelerado. El proceso de aceleración periódica capta sólo un número limitado de partículas que se aceleran a la energía final y se extraen. El control de la sincronización de la inyección de iones puede resultar en una menor carga de gas y, en consecuencia, mejores condiciones de vacío, lo que reduce los requisitos de bombeo de vacío y mejora la alta tensión y las propiedades de

pérdida de haz durante el ciclo de aceleración. Esto puede ser utilizado donde la temporización precisa de la inyección que se muestra en la figura 8B no se requiere para el acoplamiento aceptable de la fuente de iones para el ángulo de fase de forma de onda de RF. Este enfoque inyecta iones para un número de ciclos de RF que corresponde aproximadamente a la cantidad de "vueltas", que son aceptadas por el proceso de aceleración en el sincrociclotrón. Esta señal también se activa o desactiva para activar el encendido y apagado del haz o modular la corriente de haz promedio.

Aunque esta invención se ha mostrado y descrito particularmente con referencia a realizaciones preferidas de la misma, se entenderá por los expertos en la técnica que diversos cambios en forma y detalles pueden hacerse en la misma sin apartarse del alcance de la invención, abarcado por las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un sincrociclotrón (300) que comprende:

5 polos magnéticos (4a, 4b) que tienen una separación (13) entre los mismos
 un generador de campo magnético para generar el campo magnético en la separación;
 una fuente de iones (18) para inyectar partículas cargadas en el sincrociclotrón;
 un generador de forma de onda programable (319) proporcionado para generar una entrada de tensión, estando
 la entrada de tensión en una frecuencia oscilante;
 10 un circuito resonante dispuesto para recibir la entrada de tensión, comprendiendo el circuito resonante:

unos electrodos de aceleración (10 y 12), dispuestos entre los polos magnéticos (4a y 4b); y
 un elemento reactivo variable (28) en circuito con los electrodos (10 y 12) para variar la frecuencia de
 resonancia (602 y 604) del circuito resonante;
 15 estando el sincrociclotrón **caracterizado por que** el generador de forma de onda programable (319) es digital
 y está dispuesto para proporcionar la entrada de tensión a una frecuencia que varía a lo largo del tiempo de
 la aceleración de las partículas cargadas.

2. El sincrociclotrón de la reivindicación 1, donde la frecuencia de la entrada de tensión se ajusta para mantener
 20 condiciones de resonancia en el circuito resonante.

3. El sincrociclotrón (300) de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** la amplitud de la tensión es
 variada.

25 4. El sincrociclotrón (300) de acuerdo con la reivindicación 3, **caracterizado por que** incluye además uno o más
 sensores para detectar condiciones de resonancia en el circuito resonante.

5. El sincrociclotrón (300) de la reivindicación 3, **caracterizado por que** incluye además:

30 medios para controlar la reactancia del elemento reactivo variable (28) y ajustar la frecuencia de resonancia (602
 y 604) del circuito resonante para mantener las condiciones resonantes.

6. El sincrociclotrón (300) de acuerdo con la reivindicación 1, **caracterizado por que** incluye además un electrodo
 de extracción (22) dispuesto entre los polos magnéticos (4a y 4b) para extraer un haz de partículas del
 35 sincrociclotrón (300).

7. El sincrociclotrón (300) de la reivindicación 6, **caracterizado por que** incluye además un monitor de haz (316)
 para medir al menos una de la intensidad del haz de partículas, la temporización del haz de partículas, o la
 distribución espacial del haz de partículas; y
 40 donde además al menos uno de la entrada de tensión, la fuente de iones (18) y el electrodo de extracción (22) se
 controlan para compensar las variaciones en el haz de partículas.

8. El sincrociclotrón (300) de acuerdo con la reivindicación 7, **caracterizado por que** el generador de forma de onda
 programable (319) controla al menos uno de la fuente de iones (18) y el electrodo de extracción (22) para
 45 compensar las variaciones en el haz de partículas.

9. Un método para producir un haz de partículas en un sincrociclotrón (300) de acuerdo con la reivindicación 1, que
 comprende:

50 inyectar partículas cargadas en el sincrociclotrón (300) mediante la fuente de iones (18);
 aplicar una entrada de tensión oscilante al circuito resonante;
 acelerar las partículas cargadas;
 extraer las partículas cargadas aceleradas (26) mediante un electrodo de extracción (22) para formar un haz de
 partículas; y
 55 **caracterizado por que** la entrada de tensión se hace variar en frecuencia mediante el generador de forma de
 onda digital programable a lo largo del tiempo de la aceleración de las partículas cargadas.

10. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** incluye además el ajuste de la frecuencia de la entrada
 de tensión para mantener las condiciones de resonancia en el circuito resonante.
 60

11. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** la amplitud de la tensión de entrada es variada.

12. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** incluye además la detección de condiciones de
 resonancia en el circuito resonante.
 65

13. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** incluye además el ajuste de la reactancia de un elemento reactivo variable (28) en circuito con la entrada de tensión oscilante y los electrodos de aceleración (10 y 12) para mantener las condiciones de resonancia en el circuito resonante.
- 5 14. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** incluye, además, medir al menos una de la intensidad del haz de partículas, la temporización del haz, o la distribución espacial del haz de partículas mediante un monitor de haz; y controlar al menos uno de la entrada de tensión oscilante, la fuente de iones (18) y el electrodo de extracción (22) para compensar las variaciones en el haz de partículas.
- 10 15. El método de la reivindicación 9, **caracterizado por que** el generador de forma de onda programable (319) controla al menos uno de la fuente de iones (18) y el electrodo de extracción (22) para compensar las variaciones en el haz de partículas.

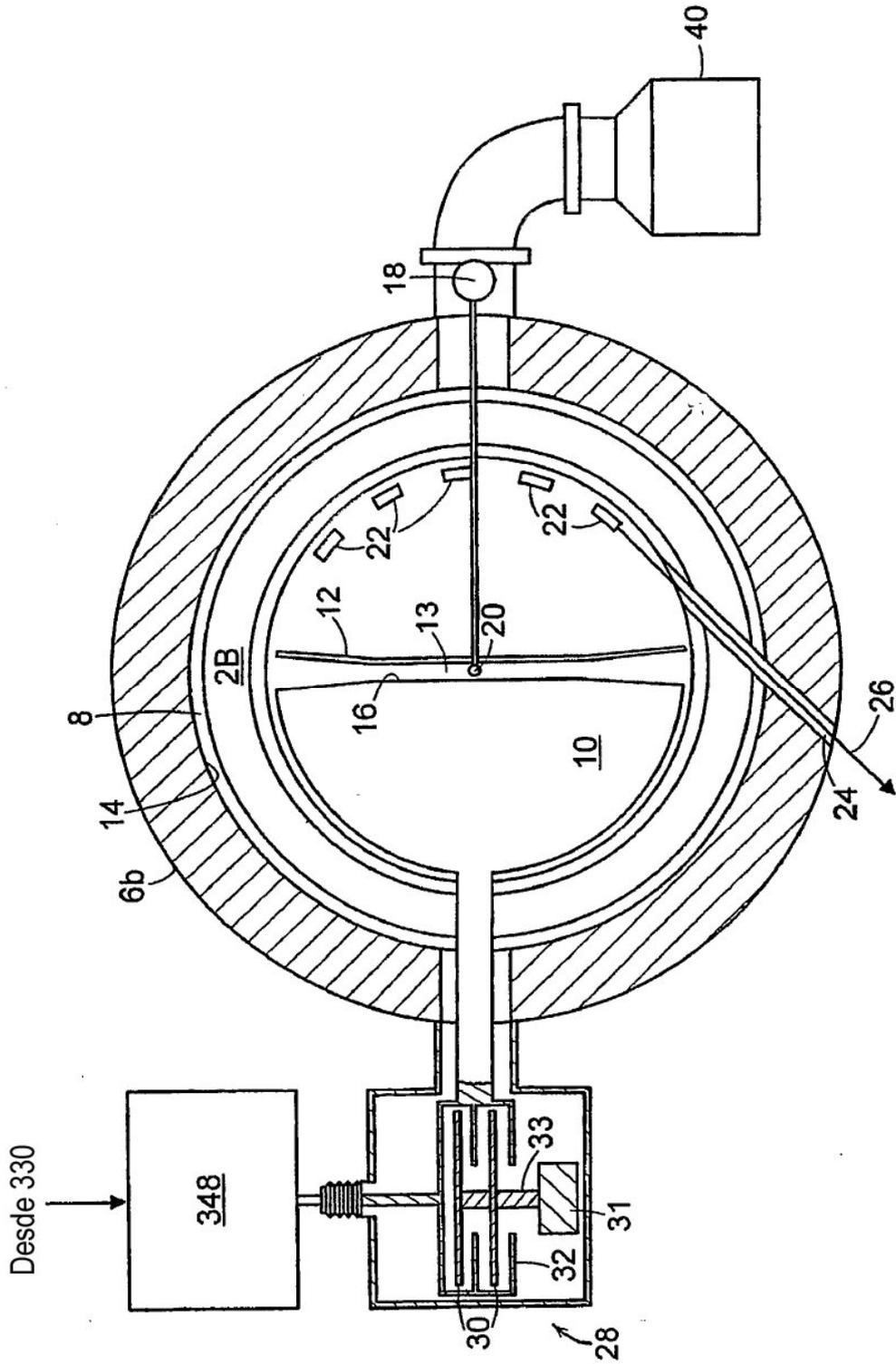
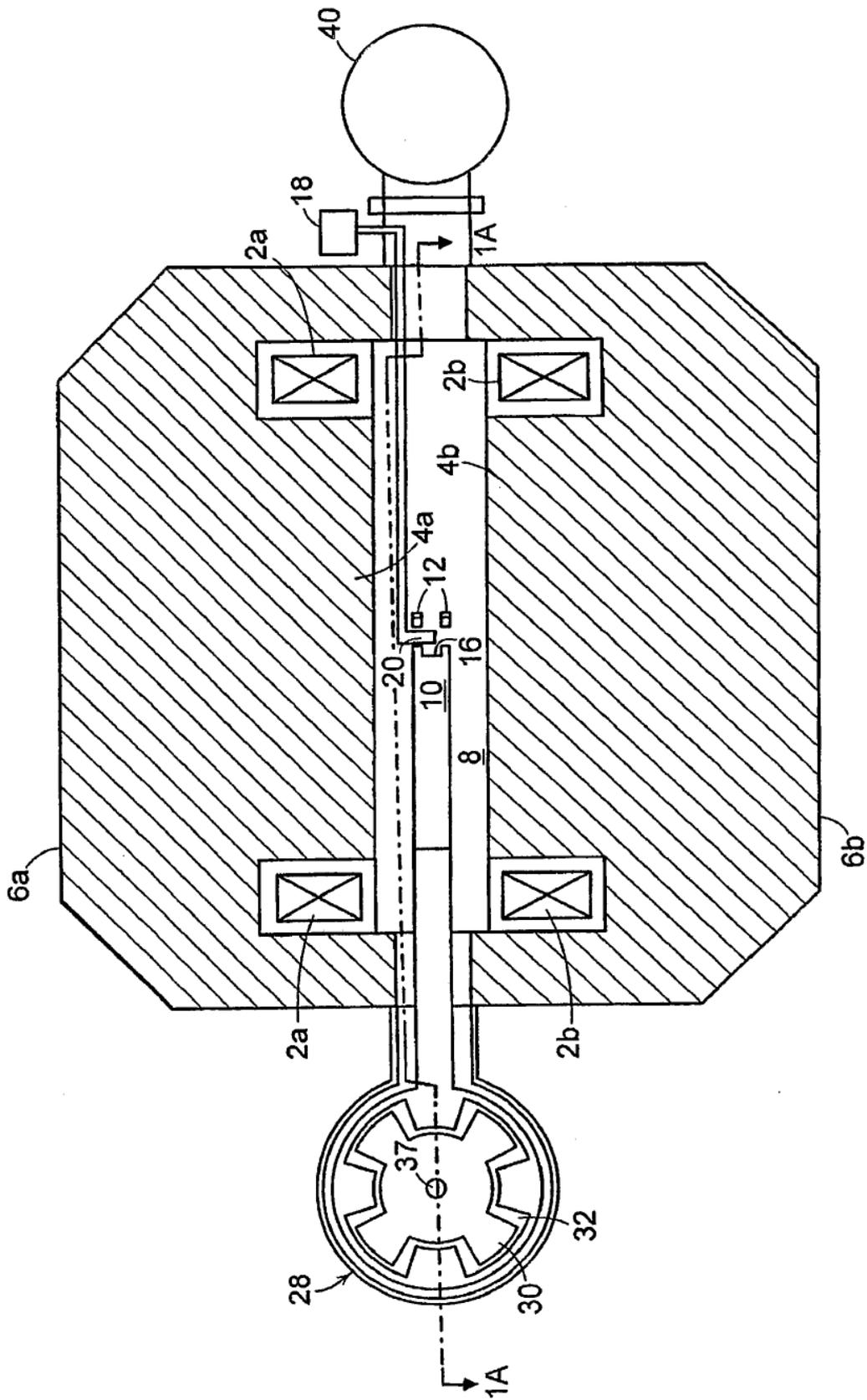


FIG. 1A



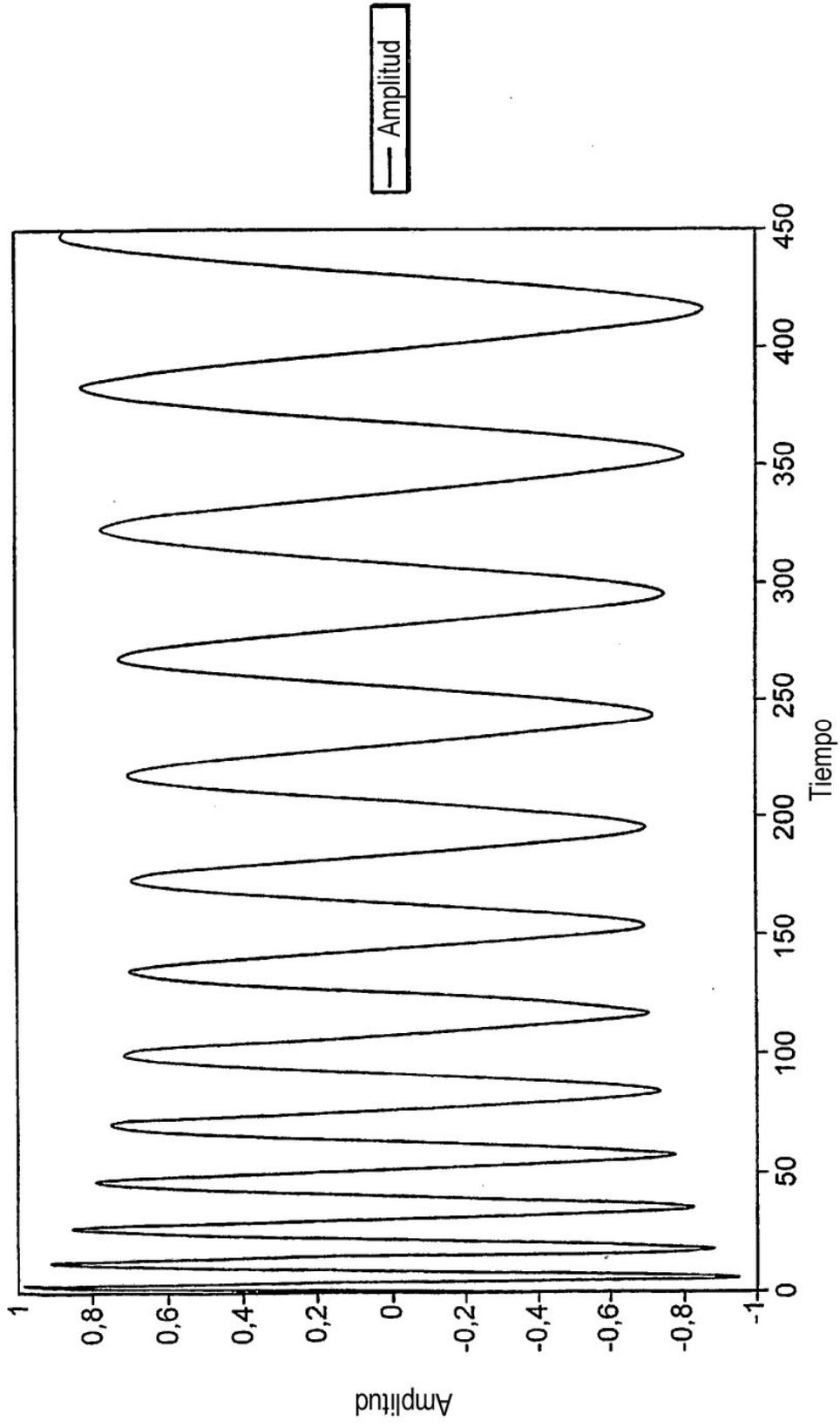


FIG. 2

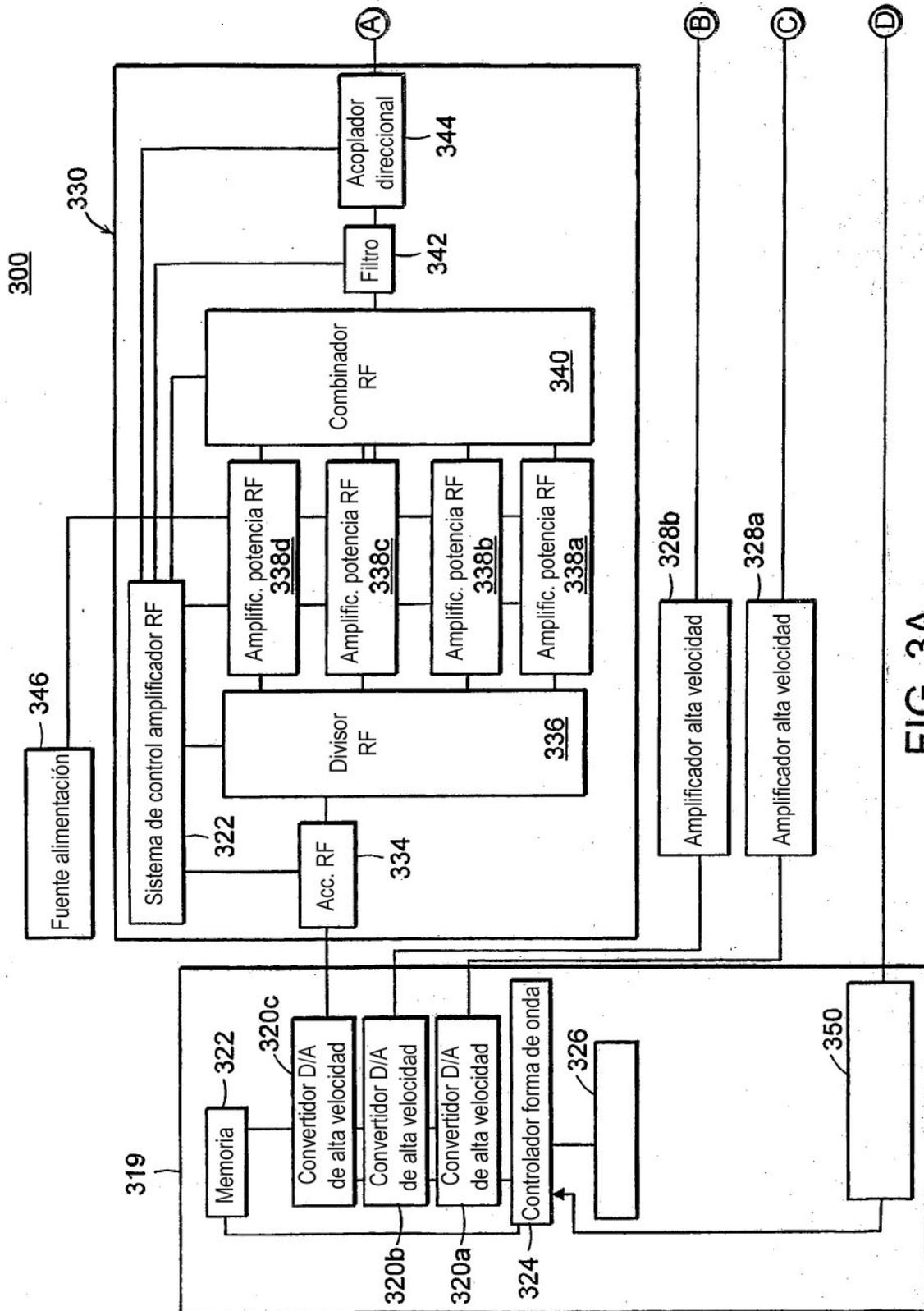


FIG. 3A

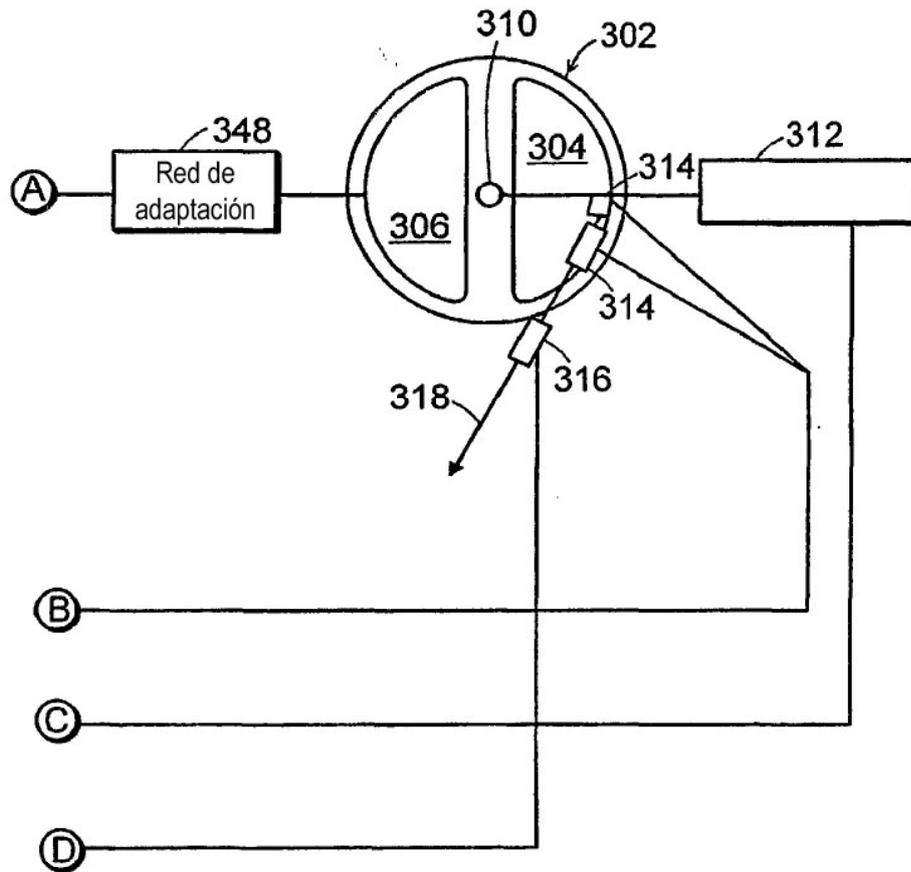


FIG. 3B

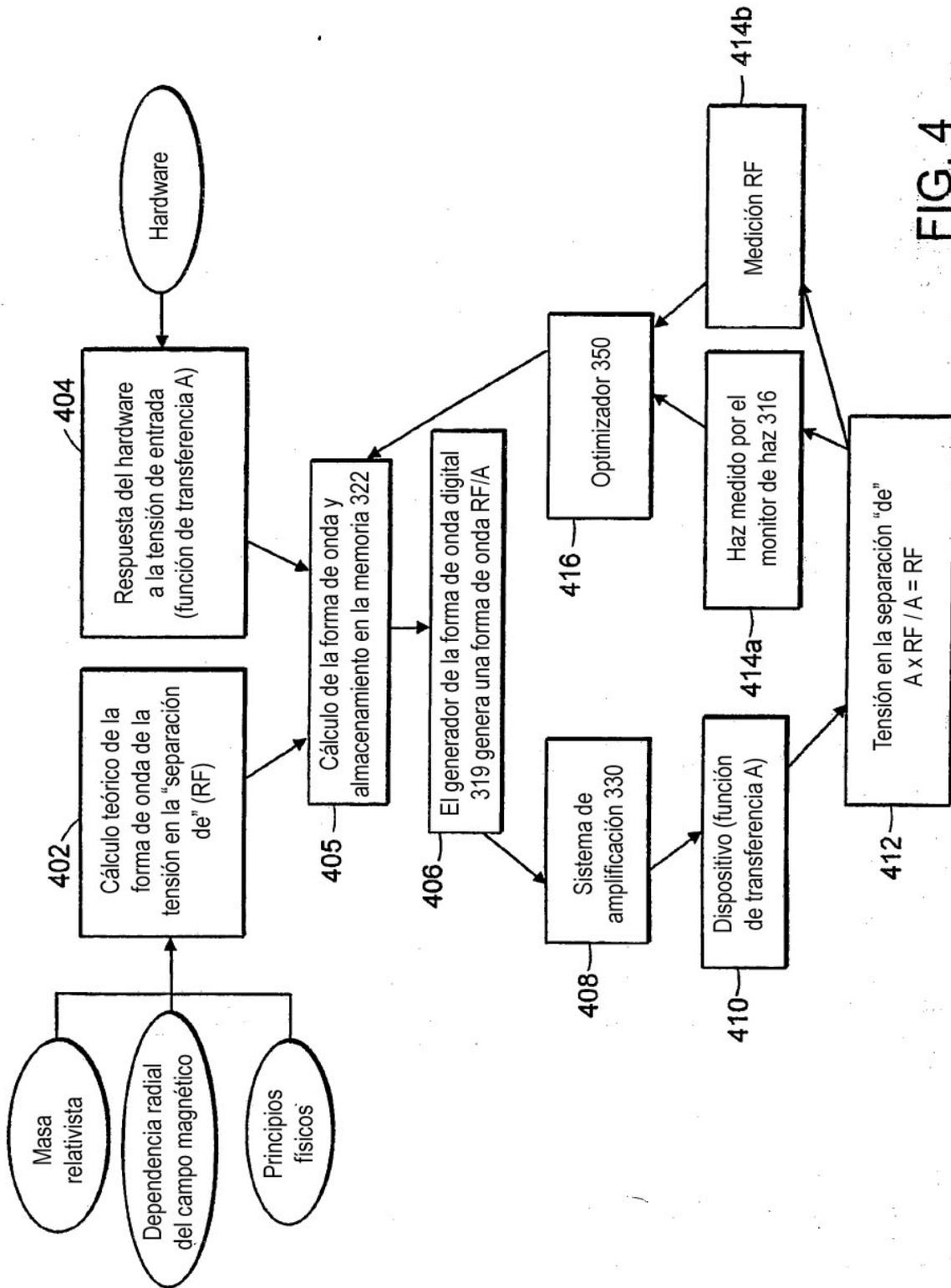


FIG. 4

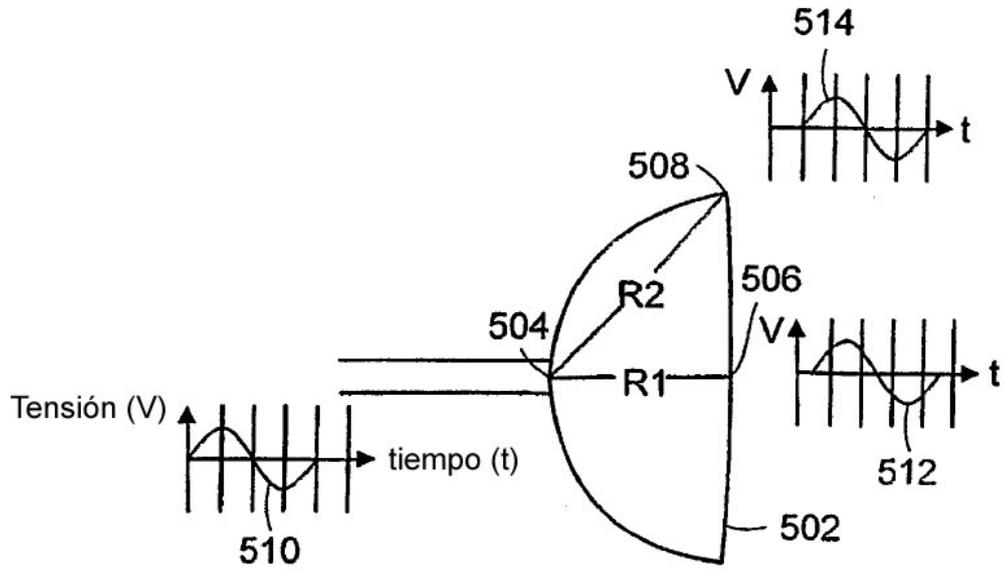


FIG. 5A

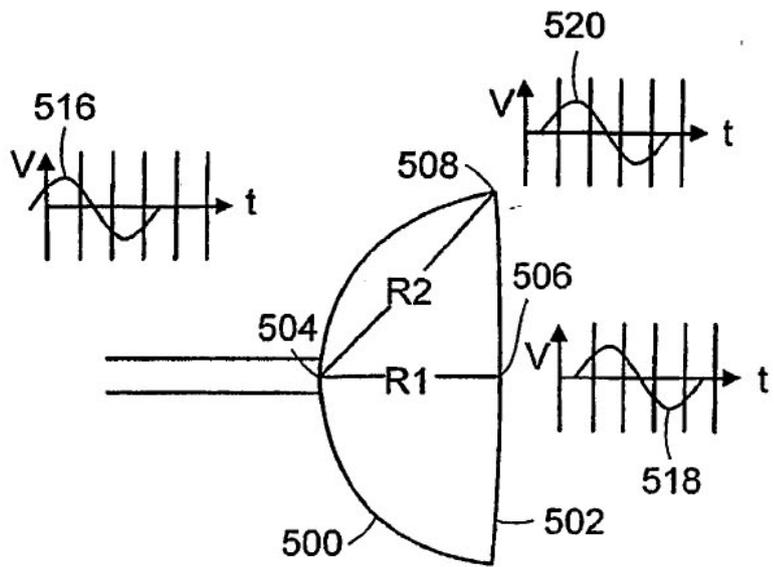


FIG. 5B

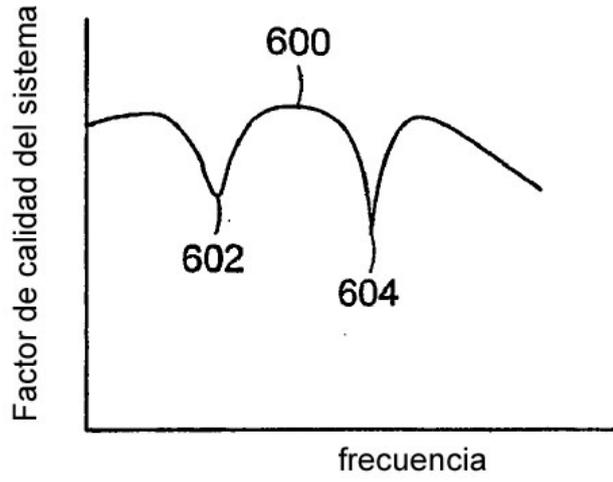


FIG. 6A

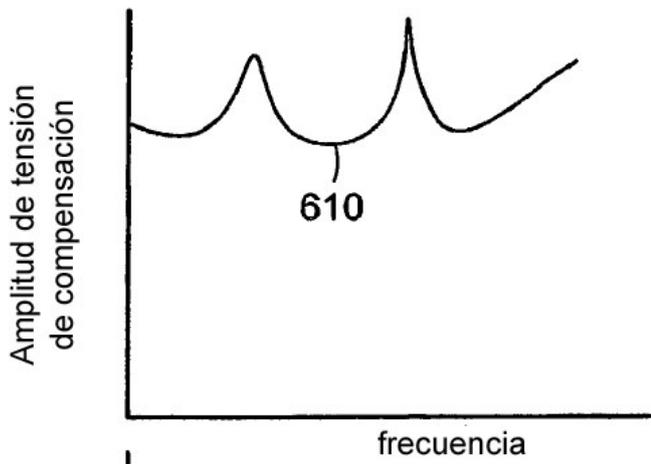


FIG. 6B

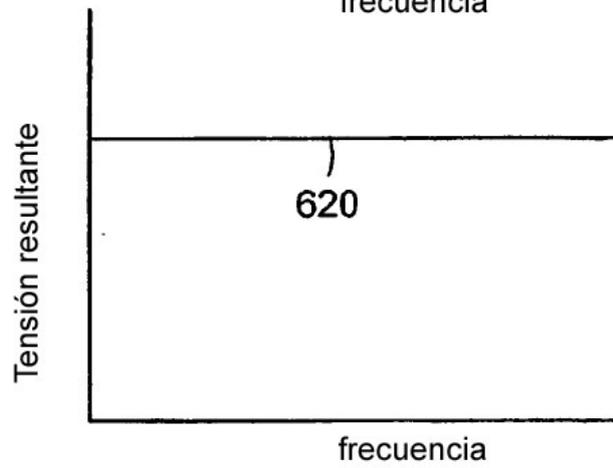


FIG. 6C

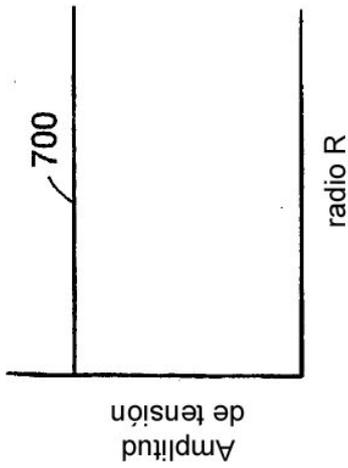


FIG. 7A

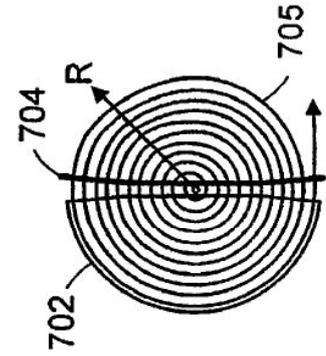


FIG. 7B

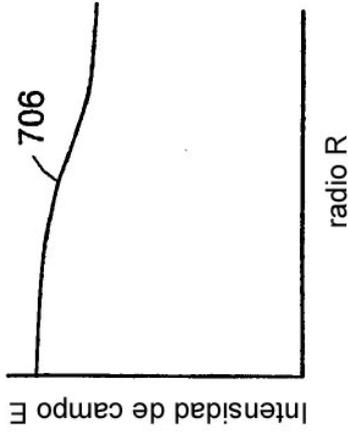


FIG. 7C

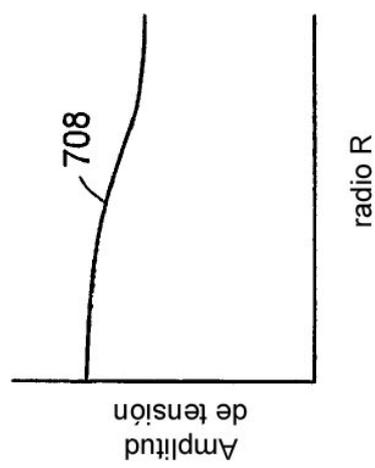


FIG. 7D

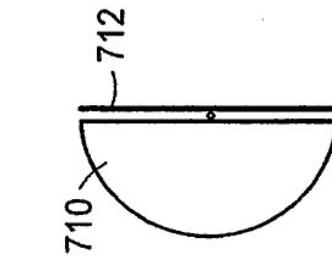


FIG. 7E

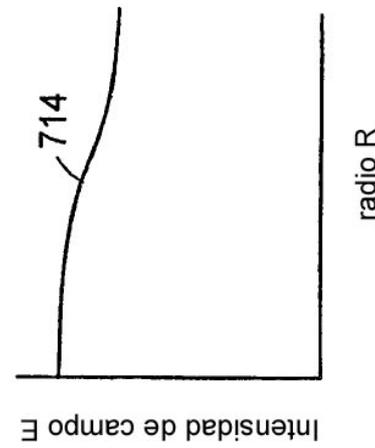


FIG. 7F

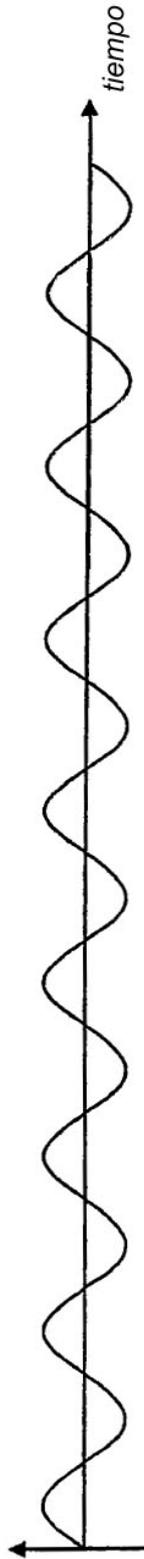


FIG. 8A

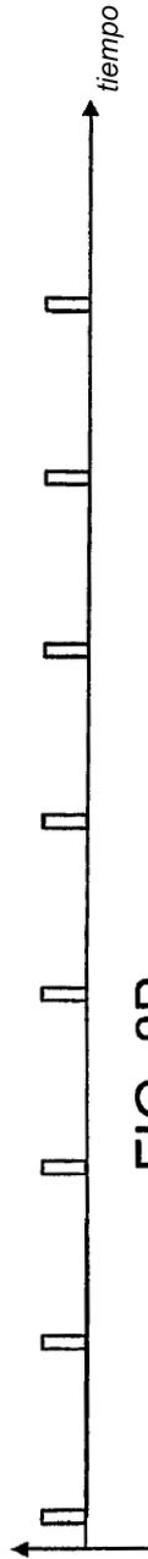


FIG. 8B

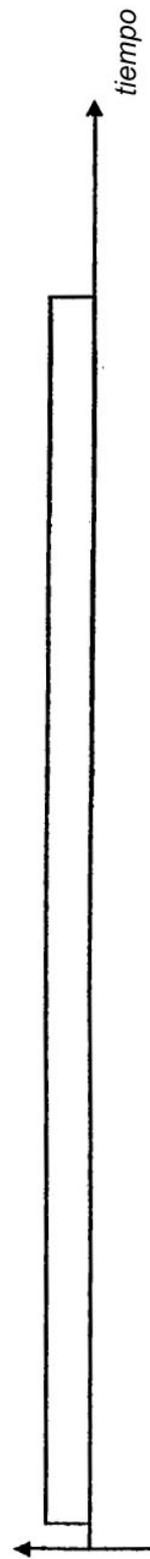


FIG. 8C