

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **3 004 521**

21 Número de solicitud: 202330761

51 Int. Cl.:

G01R 33/383 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

08.09.2023

43 Fecha de publicación de la solicitud:

12.03.2025

71 Solicitantes:

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (50.00%)
C/ Serrano 117
28006 Madrid (Madrid) ES y
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(50.00%)**

72 Inventor/es:

**GALVE CONDE, Fernando;
ALONSO OTAMENDI, Joseba y
BENLLOCH BAVIERA, José María**

74 Agente/Representante:

ESCUDERO PRIETO, Nicolás

54 Título: **IMÁN PRINCIPAL BASADO EN CONJUNTOS HALBACH ELÍPTICOS, ESCÁNER DE IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA Y MÉTODO DE FABRICACIÓN ASOCIADOS**

57 Resumen:

Imán principal basado en conjuntos Halbach elípticos, escáner de imagen por resonancia magnética y método de fabricación asociados.

La invención se refiere a un imán principal (1) que comprende una pluralidad de anillos (9, 10) con secciones huecas (11, 12) que forman una cavidad (2). Cada anillo (9, 10) comprende una pluralidad de bloques (19) de material magnético permanente, dispuestos en una o más capas (9', 9'', 10', 10''), comprendiendo cada capa (9', 9'', 10', 10'') un conjunto elíptico de dipolo Halbach. Los ejes menores de las elipses de dichas capas (9', 9'', 10', 10'') son sustancialmente paralelos entre sí. La cavidad (2) del imán principal (1) está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos (5) que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca al menos un 70 % de toda la longitud del imán principal (1). La invención también se refiere a un escáner de MRI (3) que comprende dicho imán principal (1) y al método de fabricación del mismo.

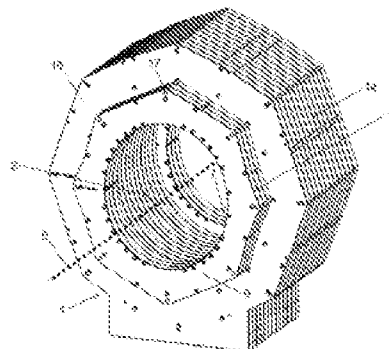


FIG. 1

ES 3 004 521 A1

DESCRIPCIÓN

IMÁN PRINCIPAL BASADO EN CONJUNTOS HALBACH ELÍPTICOS, ESCÁNER DE IMAGEN POR RESONANCIA MAGNÉTICA Y MÉTODO DE FABRICACIÓN ASOCIADOS

CAMPO DE LA INVENCION

La presente invención se refiere a un imán principal basado en conjuntos Halbach elípticos y a un método de fabricación del mismo. Dicho imán principal está comprendido, preferentemente, en un escáner de imagen por resonancia magnética (en inglés, "magnetic resonance imaging", o MRI).

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

Un escáner de imagen por resonancia magnética (MRI) es un dispositivo que obtiene imágenes de una muestra, de un sujeto humano o animal, o de una parte del cuerpo de los mismos. Dichas imágenes comprenden información de la estructura y composición de la muestra o del sujeto. La obtención de las imágenes se basa en la excitación con señales de radio frecuencia (RF) de una pluralidad espines nucleares (por ejemplo, de núcleos de hidrógeno) comprendidos en la muestra o en el sujeto, y en la reconstrucción de la estructura y composición de los mismos a partir de las señales de resonancia magnética generadas por la excitación. Generalmente, un escáner de MRI comprende, al menos, un imán principal, un sistema de RF y un sistema de gradientes magnéticos. El imán principal aplica un campo magnético principal sobre la muestra/sujeto, fijando la magnetización inicial de una pluralidad espines nucleares comprendidos en los mismos. El sistema de RF excita dichos espines nucleares, modificando su magnetización inicial mediante la aplicación de un campo de RF. El sistema de gradientes magnéticos aplica uno o más campos magnéticos que codifican espacialmente la muestra/sujeto y, al mismo tiempo, el sistema de RF recibe la señal de decaimiento de inducción libre (en inglés, "free induction decay", o FID) que emiten los espines nucleares excitados.

Los imanes principales de escáneres de MRI pueden estar basados en imanes permanentes (esto es, en imanes compuestos por uno o más materiales magnéticos permanentes), en imanes resistivos, o en imanes superconductores. La mayoría de los escáneres de MRI comerciales se basan en imanes superconductores, típicamente con

campos de 1,5-3 T. Sin embargo, los imanes superconductores son más costosos y requieren mayores recursos de mantenimiento, al requerir temperaturas criogénicas para funcionar adecuadamente. Por otro lado, los imanes resistivos requieren una corriente eléctrica para su funcionamiento y medios de enfriamiento, lo que también supone un
 5 impacto en costes y complejidad. Según lo anterior, son preferibles los imanes principales basados en imanes permanentes, pues sus costes de operación y mantenimiento son sustancialmente menores que los de los imanes superconductores o resistivos. En este sentido, el abaratamiento de los imanes principales basados en imanes permanentes facilita una mayor disponibilidad de escáneres de MRI en el mercado, lo cual es
 10 particularmente beneficioso en regiones en vías de desarrollo.

Con relación a la configuración de los imanes permanentes, éstos se pueden configurar formando un conjunto (en inglés, "array"), donde el campo magnético total generado en un punto del espacio viene dado por la superposición de los campos magnéticos de cada imán
 15 del conjunto. Un conjunto especial es el denominado conjunto Halbach (K. Halbach, *Strong rare earth cobalt quadrupoles*, IEEE Trans. Nucl. Sci. 26, 3882-3884 (1979), y K. Halbach, *Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material*, Nucl. Instrum. Meth. 169, 1–10 (1980)), donde la disposición de los imanes permanentes es tal que el campo magnético total se refuerza a un lado del conjunto de imanes permanentes,
 20 y es aproximadamente cero al otro lado del mismo.

Un ejemplo de conjunto Halbach es el conocido como conjunto elíptico de dipolo Halbach, donde los imanes permanentes forman una elipse en el espacio, y la magnetización característica de los mismos da dos vueltas a lo largo de dicha de elipse. Bajo este
 25 planteamiento, es posible disponer una pluralidad de conjuntos elípticos de dipolo Halbach a lo largo de un eje longitudinal, formando un cilindro, donde en cada conjunto cada imán permanente tiene una posición angular θ en el cilindro, y una magnetización con orientación igual a dos veces dicha posición angular θ y perpendicular al eje longitudinal del cilindro. Esta disposición crea un campo magnético relativamente homogéneo para cilindros muy
 30 largos en la dirección perpendicular al eje longitudinal del cilindro, y un campo muy débil fuera del cilindro.

De acuerdo con lo anterior, en los imanes principales de escáneres de MRI basados en conjuntos Halbach, el campo magnético principal B_0 generado está restringido a las
 35 regiones donde se coloca la muestra del escáner de MRI, siendo despreciable en el exterior del imán principal. Además, dichos imanes principales son típicamente ligeros y están

- exentos del conocido como yugo magnético (en inglés, “magnetic yoke”). El uso de imanes principales de escáneres de MRI basados en conjuntos Halbach se propuso por primera vez en el artículo H. Raich et al., *Design and Construction of a Dipolar Halbach Array with a Homogeneous Field from Identical Bar Magnets: NMR Mandhalas*, Concepts in Magnetic Resonance Part B (Magnetic Resonance Engineering), Vol. 23B, 16-25 (2004). Por otra parte, el artículo T. O’Reilly et al., *Three-dimensional MRI in a homogenous 27 cm diameter bore Halbach array magnet*, J. Magn. Reson. 307 (2019) se refiere a otro ejemplo de imán principal basado en conjuntos Halbach y, en particular, a un imán principal que comprende una pluralidad de anillos, donde cada anillo comprende una pluralidad de huecos y una sección hueca en el centro del mismo, y donde cada hueco está configurado para colocar un bloque cúbico de material magnético permanente. Además, los huecos en cada anillo están dispuestos de manera que se forman dos capas de bloques separadas radialmente, constituyendo cada capa un conjunto Halbach.
- 15 La patente US 5,659,250 A se refiere a un imán principal con una pluralidad de secciones que comprenden conjuntos elípticos de dipolo Halbach. Dichas secciones son equivalentes a los anillos de T. O’Reilly et al. aunque, en lugar de bloques individuales de material magnético permanente, cada sección comprende una pluralidad de segmentos, donde cada segmento comprende a su vez una serie de bloques de material magnético permanente. En cada segmento, los bloques están apretados entre sí y la magnetización de los mismos tiene la misma orientación. Sin embargo, uno de los problemas del imán principal de esta patente es que sus conjuntos elípticos limitan la homogeneidad y la amplitud del campo magnético. Además, la magnetización está angularmente discretizada en segmentos muy grandes, lo que también afecta de manera negativa a la homogeneidad de dicho campo magnético principal, en comparación con una discretización más fina característica de los conjuntos que comprenden bloques individuales de una pieza. La patente US 5,659,250 A también se refiere a varios métodos de optimización del campo magnético principal en la cavidad del imán principal. Concretamente, dichos métodos consisten en ajustar el campo magnético principal, reduciendo en cada sección un número determinado de ladrillos de material magnético permanente. Sin embargo, la homogeneidad resultante con el método preferente no experimenta una mejora sustancial. Además, la eliminación de material magnético permanente conlleva una reducción severa de la amplitud del campo magnético principal.
- 35 La patente US 10,018,694 B2 se refiere a otro ejemplo de imán principal basado en conjuntos Halbach elípticos, donde la magnetización de los bloques de material magnético

permanente no es perpendicular al eje longitudinal del imán principal. El problema del imán principal de este documento es que, para su operación, requiere anillos de soporte de los bloques de material magnético con formas complejas, industrialmente difíciles de fabricar. Esto, además, potencia las desviaciones en la homogeneidad del campo magnético principal generado por el imán principal respecto al diseño teórico del imán principal.

La presente invención soluciona los problemas presentes en el estado de la técnica mencionados anteriormente, mediante un novedoso imán principal basado en conjuntos Halbach elípticos, así como de un método de fabricación de dicho imán principal.

10

DESCRIPCIÓN BREVE DE LA INVENCION

La presente invención propone un imán principal mejorado, un escáner de MRI y un método de fabricación asociado que soluciona los problemas técnicos e inconvenientes del estado de la técnica descritos en la sección anterior.

15

Un primer objeto de la invención se refiere a un imán principal según la reivindicación 1. Dicho imán está basado, principalmente, en conjuntos elípticos de dipolo Halbach configurados para generar un campo magnético principal B_0 de un escáner de MRI, donde:

20

- dicho imán principal comprende una pluralidad de anillos apilados a lo largo de un eje longitudinal, desde un primer extremo del imán principal hasta un segundo extremo del imán principal, de manera que cada extremo del imán principal comprende uno o más anillos exteriores, y la porción central del imán principal comprendida entre el primer extremo y el segundo extremo del mismo comprende uno o más anillos centrales;

25

- cada anillo exterior y central comprende una pluralidad de huecos, donde cada hueco (13) aloja un bloque de material magnético permanente;

- cada anillo exterior y central comprende una sección hueca, donde las secciones huecas de los anillos exteriores y centrales forman una cavidad interior del imán principal;

30

- en cada anillo exterior y central, los bloques de material magnético permanente están dispuestos radialmente respecto al centro de dicho anillo en un conjunto de una pluralidad de capas, donde cada capa describe sustancialmente una elipse, teniendo dicha elipse un eje menor, y un eje mayor perpendicular a dicho eje menor y de longitud mayor que la del eje menor;

35

- los ejes menores de las elipses de las capas de bloques de material magnético permanente de los anillos exteriores y centrales son sustancialmente paralelos entre sí; y

- en cada capa, los bloques de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach, de manera que los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos exteriores y centrales generan el campo magnético principal B_0 en la cavidad del imán principal;

5

Ventajosamente en la invención, la cavidad está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos que se extiende a lo largo del eje longitudinal, y donde dicho sistema de gradientes magnéticos abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal. De esta manera, se soluciona la necesidad de proporcionar un imán principal basado en conjuntos elípticos de dipolo Halbach que incremente de manera notable el campo de visión (FoV) del escáner de MRI que comprende dicho imán principal y un sistema de gradientes magnéticos.

Otras realizaciones preferentes del imán principal de la invención se describen en las reivindicaciones 2-10 del presente documento.

Un segundo objeto de la presente invención se refiere a un escáner de MRI según la reivindicación 11. Preferentemente, dicho escáner comprende un imán principal según cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento, así como un sistema de gradientes magnéticos y un sistema de RF, donde:

- la cavidad del imán principal está configurada para alojar el sistema de RF y el sistema de gradientes magnéticos;
- el imán principal está configurado para generar el campo magnético principal B_0 en la cavidad;
- el sistema de gradientes está configurado para aplicar al menos un gradiente magnético en la cavidad; y
- el sistema de RF está configurado para aplicar un campo de RF en una muestra situada en la cavidad y para recibir una señal de resonancia magnética procedente de dicha muestra.

30

Un tercer objeto de la presente invención se refiere a un método de fabricación de un imán principal según la reivindicación 12 del presente documento, donde dicho método comprende la realización de los siguientes pasos, en cualquier orden técnicamente posible:

- a) proporcionar los anillos exteriores y centrales;
- b) formar los huecos de los anillos exteriores perforando los mismos, de manera que dichos huecos están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo exterior;

35

c) colocar bloques de material magnético permanente en el interior de los huecos de los anillos exteriores, de manera que dichos bloques de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una pluralidad de capas, donde en cada capa los bloques de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach;

d) formar los huecos de los anillos centrales perforando los mismos, de manera que dichos huecos están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo central;

e) colocar bloques de material magnético permanente en el interior de los huecos de los anillos centrales, de manera que dichos bloques de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una pluralidad de capas, donde en cada capa los bloques de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach; y

f) apilar los anillos exteriores y centrales a lo largo de un eje longitudinal.

Ventajosamente en el método de la invención, después del paso f), la cavidad que forman las secciones huecas de los anillos exteriores y centrales está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos que se extiende a lo largo del eje longitudinal, y donde dicho sistema de gradientes magnéticos abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal. De esta manera, se soluciona la necesidad de fabricar un imán principal basado en conjuntos elípticos de dipolo Halbach que incremente de manera notable el campo de visión (FoV) del escáner de MRI que comprende dicho imán principal y un sistema de gradientes magnéticos.

Otras realizaciones preferentes del método de la invención se describen en las reivindicaciones 13-17 del presente documento.

DESCRIPCION DE LOS DIBUJOS

Para completar la descripción y con el propósito de ayudar a una mejor comprensión de la invención, se aporta un conjunto de dibujos que ilustran diferentes realizaciones de la misma, las cuales no deben interpretarse como restrictivas o limitativas del alcance de protección de la solicitud.

La Figura 1 muestra una vista en perspectiva de una realización preferente de un imán principal de acuerdo con la presente invención.

La Figura 2 muestra una vista frontal de una realización de un escáner de MRI que comprende el imán principal de la Figura 1.

5

La Figuras 3a muestra un anillo exterior del imán principal de la Figura 1.

La Figura 3b muestra una vista ampliada del anillo exterior de la Figura 3a.

La Figuras 4 muestra un anillo central del imán principal de la Figura 1.

10 La Figura 5 muestra una gráfica de la amplitud del campo magnético principal B_0 generado en el eje longitudinal por un imán principal de acuerdo con la presente invención, en función de la longitud $d_i^{(0)}/2$ del semieje menor de las elipses comprendidas en las capas más cercanas a dicho eje longitudinal.

15 La Figura 6 muestra una vista transversal del imán principal de la Figura 1, donde dicho imán principal comprende adicionalmente una unidad de ajuste fino.

Las Figuras 7-8 muestran, respectivamente, un esquema de un algoritmo de optimización y un esquema de un algoritmo auxiliar de acuerdo con el método de la presente invención.

20

La Figura 9 es una gráfica que muestra resultado de un algoritmo auxiliar empleado en el método de fabricación de imán principal de la Figura 6.

Referencias numéricas utilizadas en las figuras:

25

(1)	Imán principal
(2)	Cavidad del imán principal
(3)	Escáner de MRI
(4)	Sistema de RF del escáner de MRI
(5, 5', 5'', 5''')	Sistema de gradientes magnéticos del escáner de MRI
(6)	Primer extremo del imán principal
(7)	Segundo extremo del imán principal
(8)	Eje longitudinal del imán principal
(9)	Anillos exteriores del imán principal
(9', 9'')	Capas de bloques de material magnético de los anillos exteriores

(10)	Anillos centrales del imán principal
(10', 10'')	Capas de bloques de material magnético de los anillos centrales
(11)	Sección hueca del anillo exterior
(12)	Sección hueca del anillo central
(13)	Huecos de los anillos exteriores/centrales
(14)	Porción central del imán principal
(15)	Sección transversal del sistema de gradientes magnéticos
(16)	Agujeros
(17)	Varillas
(18)	Unidad de ajuste fino
(19)	Bloques de material magnético de los anillos exteriores/centrales
(20)	Campo de visión del escáner de MRI
(21)	Anillos auxiliares
(22)	Bloques de material magnético permanente de los anillos auxiliares
(23)	Algoritmo de optimización
(24)	Parámetros de entrada del algoritmo de optimización
(25)	Resultado del algoritmo de optimización
(26)	Variables de optimización del algoritmo de optimización
(27)	Función de optimización del algoritmo de optimización
(28)	Algoritmo auxiliar
(29)	Parámetros de entrada del algoritmo de auxiliar
(30)	Resultado del algoritmo de auxiliar
(31)	Variables de optimización del algoritmo de auxiliar
(32)	Función de optimización del algoritmo auxiliar

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

Un primer objeto de la invención se refiere a un imán principal basado en conjuntos elípticos de dipolo Halbach, adaptado para su uso preferente en un escáner de MRI. Según dicho objeto, la Figura 1 muestra una vista en perspectiva de una realización preferente de un imán principal (1) de acuerdo con la invención, que comprende una cavidad (2) interior, configurada para alojar un sistema de RF (4) y un sistema de gradientes magnéticos (5) de un escáner de MRI (ver Figura 2), donde dicha cavidad (2) se extiende, preferentemente, desde un primer extremo (6) del imán principal (1) hasta un segundo extremo (7) del imán principal (1), a lo largo de un eje longitudinal (8) del mismo. De modo preferente, el sistema

de RF (4) y el sistema de gradientes magnéticos (5) comprenden, respectivamente, una bobina (4) de RF, y un conjunto de bobinas de gradientes magnéticos (5', 5'', 5'''), donde dichas bobinas (4, 5', 5'', 5''') son concéntricas respecto al eje longitudinal (8) del imán principal (1). Otros tipos de sistemas de RF (4) y/o de gradientes magnéticos (5) compatibles con la presente invención (por ejemplo, con otras formas geométrías y/o no concéntricos respecto al eje longitudinal (8) del imán principal (2), etc.), son deducibles por un experto en la materia, a partir del contenido del presente documento.

El imán principal (1) comprende una pluralidad de anillos (9, 10) apilados desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (7), a lo largo del eje longitudinal (8), donde dicho eje longitudinal (8) atraviesa cada anillo (9, 10). Asimismo, cada anillo (9, 10) comprende una sección hueca (11, 12) en su centro, de modo que las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10) apilados forman la cavidad (2) del imán principal (1). Dichas secciones huecas (11, 12) se señalan en las Figuras 3-4. Preferentemente, cada anillo (9, 10) está compuesto por un material no magnético, como, por ejemplo, nylon o polietileno, entre otros. Por otro lado, cada anillo (9, 10) comprende una pluralidad de huecos (13), donde cada hueco (13) contiene en su interior un bloque de material magnético permanente (indicado en la Figura 6 con la referencia (19)), de manera que dichos bloques (19) de material magnético permanente están embebidos en cada anillo (9, 10). En este contexto, la superposición de los campos magnéticos individuales de los bloques (19) de material magnético permanente genera un campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) del imán principal (1). Los huecos (13) y los bloques (19) de los anillos (9, 10) no se aprecian en la vista frontal ni en la vista en perspectiva del imán principal (1) de las Figuras 1-2, pues las caras de los anillos (9, 10) que se aprecian en dichas figuras comprenden unas tapas de material no magnético (como, por ejemplo, nylon, polietileno, aluminio, entre otros). Sin embargo, en las Figuras 3-4 se muestran los huecos (13) sin los bloques (19) de material magnético instalados.

Las Figuras 3-4 muestran un anillo (9, 10) del imán principal (1) de la Figura 1, donde se aprecian los huecos (13) de los bloques (19). Más concretamente, la Figura 3a muestra un anillo exterior (9) del imán principal (1), esto es, un anillo de uno de los extremos (6, 7) del mismo. La Figura 4 muestra un anillo central (10) del imán principal (1), esto es, un anillo de la porción central (14) del imán principal (1), donde dicha porción central (14) está comprendida entre el primer extremo (6) y el segundo extremo (7). Por otro lado, en la realización del imán principal (1) de la Figura 1, cada anillo (9, 10) exterior y central comprenden una primera cara plana y una segunda cara plana opuesta a la primera. La

primera cara plana es la que se aprecia en las Figuras 3-4. En dicha primera cara se forman los huecos (13) de cada anillo (9, 10) exterior y central. A diferencia de los anillos centrales (10), el campo magnético principal B_0 generado por los anillos exteriores (9) de cada extremo (6,7) diverge hacia el exterior del imán principal (1). Por ello, en los imanes principales conocidos en el estado de la técnica, las secciones huecas (11) de los anillos exteriores (9) son de menor tamaño que las secciones huecas (12) de los anillos centrales (10), lo que permite disponer las capas (9', 9'') de bloques de material magnético permanente más cerca del eje longitudinal (8) para corregir los efectos de las divergencias mencionadas anteriormente.

10

Por otra parte, los huecos (13) y los bloques (19) de material magnético están dispuestos, preferentemente en la invención, de forma radial respecto al centro de cada anillo (9, 10), de manera que dichos bloques (19) de material magnético permanente forman un conjunto de una pluralidad de capas (9', 9'', 10', 10''). Así, al colocar los bloques (19) de material magnético permanente en los huecos (13), el anillo exterior (9) de la Figura 3a y el anillo central (10) de la Figura 4 tienen cada uno una capa (9', 10') interior y una capa (9'', 10'') exterior de bloques (19) de material magnético permanente. En otras realizaciones, los anillos (9, 10) tienen una capa (9', 10') interior y más de una capa (9'', 10'') exterior de bloques (19) de material magnético permanente. En otras realizaciones de la invención, al menos un anillo (9,10), exterior o central, tiene un número de capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) material magnético permanente diferente al resto de anillos (9,10) del imán principal (1).

15

20

25

Asimismo, cada capa (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente describe sustancialmente una elipse definida por un eje menor, y un eje mayor perpendicular a dicho eje menor, donde la longitud del eje mayor es mayor que la longitud del eje menor.

30

35

Asimismo, en el contexto anterior, la expresión "sustancialmente una elipse" se refiere a que todos los centros geométricos de los bloques (19) de material magnético permanente de una misma capa (9', 9'', 10', 10'') se disponen, sustancialmente, en la curva trazada por una misma elipse, salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1), por ejemplo relacionadas con procesos de mecanización realizados sobre los anillos (9,10) exteriores y centrales, tales como la formación de los huecos (13), o el pulido de las caras de los anillos (9, 10) antes de la formación de dichos huecos (13), entre otros. Estas desviaciones son, generalmente, inferiores a las longitudes características de los bloques

(19) de material magnético permanente (por ejemplo, cuando un bloque (19) es cúbico, la longitud de un lado de dicho cubo), puesto que están determinadas por la precisión de los dispositivos que realizan dichos procesos de mecanización.

5 Por otro lado, los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales son, sustancialmente, paralelos entre sí. En este contexto, la expresión "sustancialmente paralelos" se refiere a que dichos ejes menores son paralelos entre sí, salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Además de las desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1) descritas
 10 anteriormente, en este contexto las desviaciones también pueden originarse durante el apilamiento de los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo del eje longitudinal (8), y/o durante la unión de dichos anillos (9, 10), por ejemplo mediante varillas o pernos de conexión.

15 En las Figuras 3-4 se representa, con una línea a trazos, la elipse que describen las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de cada anillo (9, 10), cuando se colocan los bloques (19) (Figura 6) en los huecos (13) de dichos anillos (9, 10). Además, se denota como d_i/d'_i la longitud del eje menor de la elipse de la capa (9', 10') interior del anillo exterior (9)/central (10), y como D_i/D'_i la longitud del eje mayor de esa misma elipse. Así, la posición (y, z) de
 20 cada bloque de material magnético permanente de la capa (9', 10') interior en su respectiva elipse viene dada, preferentemente, por las expresiones:

$$(y, z) = (d_i \cos(\theta), D_i \sin(\theta)), \text{ en un anillo exterior (9);}$$

$$(y, z) = (d'_i \cos(\theta), D'_i \sin(\theta)), \text{ en un anillo central (10),}$$

25 donde θ es la posición angular del centro geométrico de cada bloque (19) de material magnético permanente en la respectiva elipse. Según lo anteriormente descrito, en las Figuras 3-4 se indica la posición angular tomada como posición angular de origen (esto es, $\theta=0^\circ$) en la elipse de cada capa (9', 10'). Asimismo, se indica en ambas figuras, con una flecha punteada y curvada, el sentido angular tomado como positivo en la elipse de cada
 30 capa (9', 10') interior (sentido antihorario en la Figura 3a, y sentido horario en la Figura 4).

En el contexto anterior, en cada capa (9', 9'', 10', 10'') de los anillos (9, 10) del imán principal (1), los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach, de manera que la magnetización característica de los bloques
 35 (19) de material magnético permanente da dos vueltas a lo largo de la elipse de dicha capa. Así, si entre un primer bloque y un segundo bloque contiguo a éste en dicha elipse existe

una separación angular $\Delta\theta$, la dirección de la magnetización del segundo bloque está girada en dos veces esa separación angular $\Delta\theta$, respecto a la dirección de la magnetización del primer bloque. Por ejemplo, en la capa (9') interior del anillo exterior (9) de la Figura 3a, donde la posición (y, z) de un bloque de material magnético permanente viene dada por (y, z) = (d_i cos(θ), D_i sin(θ)), las componentes de la magnetización de dicho bloque de material magnético permanente vienen dadas por

$$m_y = m_0 \cos(2 \cdot \theta);$$

$$m_z = m_0 \sin(2 \cdot \theta),$$

donde m_0 es la magnetización de dicho bloque de material magnético permanente. Los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) exteriores y centrales del imán principal (1) generan el campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) del mismo.

Según lo anteriormente descrito, el escáner de MRI (3) (Figura 2) está configurado para introducir una muestra/sujeto por uno de los dos extremos (6, 7) del imán principal (1), y situarla en el interior de la cavidad (2), preferentemente a la altura de la porción central (14). El imán principal (1) genera el campo magnético principal B_0 en la cavidad (2), de manera que dicho campo magnético principal B_0 fija la magnetización inicial de una pluralidad de espines nucleares (por ejemplo, de núcleos de hidrógeno, fósforo, flúor, etc.) comprendidos en la muestra o sujeto. Por su parte, el sistema de RF (4) excita dichos espines nucleares, modificando la magnetización inicial mediante la aplicación de un campo de RF. El sistema de gradientes (5) aplica al menos un gradiente magnético en la cavidad (2), codificando espacialmente la muestra/sujeto y, por su parte, el sistema de RF (4) recibe la señal de decaimiento de inducción libre (en inglés, "free induction decay", o FID) que emiten los espines nucleares excitados. A partir de dicha señal FID se obtiene la información correspondiente a la estructura y composición de la muestra/sujeto.

Así pues, el imán principal (1) de la presente invención se caracteriza por su cavidad (2) está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos (5) que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal (1). En la realización preferente de la Figura 1, la cavidad (2) del imán principal (1) está adaptada para alojar el sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2, que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8) desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (7) del imán principal (1), y abarca toda la longitud de dicho imán principal (1). De esta manera, se soluciona la necesidad de proporcionar un imán principal (1) basado en conjuntos elípticos de dipolo Halbach que incremente de manera notable el campo de visión (FoV) del escáner de MRI (3) que

comprende dicho imán principal (1) y un sistema de gradientes magnéticos (5). De acuerdo con lo anterior, en la realización no limitativa de la Figura 1, el área de cada una de las secciones huecas (11, 12) que forman la cavidad (2) del imán principal (1) es mayor o igual que la de la sección transversal (15) del sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2. Típicamente, la región que abarca el FoV del escáner de MRI (3) en la cavidad (2) del imán principal (1) (esto es, la región donde se puede obtener imagen de MRI), está limitada por la región donde los gradientes magnéticos generados por el sistema de gradientes magnéticos (5) son lineales, o donde, por lo menos, se genera suficiente diferencia de frecuencias de Larmor entre vóxeles de la muestra. La expresión "vóxeles" se entiende como los elementos volumétricos en los que se divide la imagen de MRI. El tamaño de la región anterior está restringido por los límites del sistema de gradientes magnéticos (5). En concreto, es particularmente crítica la longitud del sistema de gradientes magnéticos (5) a lo largo del eje longitudinal (8), cuando éste genera un gradiente magnético en la dirección del eje longitudinal (8). En la realización de la Figura 2, la bobina (5') más cercana al eje longitudinal (8) genera el gradiente magnético en la dirección del eje longitudinal (8). Dicho gradiente comprende al menos dos lóbulos en la dirección del eje longitudinal (8), uno en cada extremo de la bobina (5') más cercana al eje longitudinal (8). Estos lóbulos abarcan parte del interior de dicha bobina (5') y poseen cada uno un centro. En este contexto, en el interior del sistema de gradientes magnéticos (5) y en las proximidades de los centros de dichos lóbulos, deja de ser posible hacer imagen por resonancia. Así pues, gracias a la cavidad (2) del imán principal (1), los lóbulos mencionados anteriormente están lo más alejados posible y, en consecuencia, la región que abarca el FoV del escáner de MRI (3) en la cavidad (2) es la máxima posible.

De acuerdo con lo descrito anteriormente, en la Figura 2 la bobina externa (5'') del sistema de gradientes magnéticos (5) define un contorno exterior cilíndrico del mismo con sección transversal (15) elíptica. Asimismo, en la Figura 2 se muestra la longitud D_G/d_g del eje mayor/menor del contorno elíptico de la sección transversal (15) del sistema de gradientes magnéticos (5), donde el eje menor es perpendicular a dicho eje mayor. El cociente entre las longitudes del eje menor d_g y del eje mayor D_G es menor que uno. En este contexto, las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales son también elípticas. Además, el área de dichas secciones huecas (11, 12) es mayor o igual que la sección transversal (15) del sistema de gradientes magnéticos (5), de manera que el sistema de gradientes magnéticos (5) atraviesa todas las secciones huecas (11, 12) que forman la cavidad (2) del imán principal (1) y, en consecuencia, se extiende en toda la longitud del imán principal (1). En un ejemplo de realización preferente, la longitud del imán principal

(1) y del sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2 está comprendida entre 40-50 cm. Así, el FoV del escáner de MRI (3) de la Figura 2 abarca una región esférica con un radio del orden de 10 cm en la cavidad (2) y en la porción central (14). Ello supone un aumento de alrededor de un 50% en el tamaño del FoV, con respecto a los imanes principales conocidos con la misma longitud, donde la cavidad (2) interior de los mismos sólo permite alojar un sistema de gradientes magnéticos (5) que abarca, como máximo, la porción central (14) de dichos imanes principales.

Por otro lado, en el imán principal (1) de la Figura 1, los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos, en cada anillo (9, 10) exterior y central, de forma que la dirección del campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2) por los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) exteriores y centrales es, sustancialmente, paralela a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente. La expresión "sustancialmente paralela" se refiere a que la dirección del campo principal B_0 es paralela a los ejes menores de las elipses de dichas capas (9', 9'', 10', 10''), salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Generalmente, dichas desviaciones conllevan que, en cada punto de la cavidad (2), el valor de las componentes no paralelas a dichos ejes menores del campo magnético principal B_0 es menor que un 10% del valor de la componente paralela a dichos ejes menores. En este contexto, la homogeneidad y la amplitud del campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) se ven, ventajosamente, aumentadas con respecto al campo magnético principal B_0 generado por otros conjuntos elípticos de dipolo Halbach, en particular respecto a los imanes principales donde los conjuntos elípticos de dipolo Halbach son tales que el campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2) es perpendicular a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales.

Preferentemente, el campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2) por los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) exteriores y centrales es, sustancialmente, perpendicular al eje longitudinal (8) del imán principal (1). La expresión "sustancialmente perpendicular" se refiere a que la dirección del campo principal B_0 es perpendicular al eje longitudinal (8), salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Generalmente, dichas desviaciones conllevan que, en cada punto de la cavidad (2), el valor de las componentes no perpendiculares al eje longitudinal (8) del campo magnético principal B_0 es menor que un 1% del valor de la componente perpendicular a dicho eje longitudinal (8).

Más preferentemente, en el imán principal se disponen tapas (no mostrada en las figuras) de material no magnético sobre la cara de los anillos (9, 10) donde se forman los huecos (13). La colocación de las tapas se realiza después de colocar los bloques (19) de material magnético permanente en los huecos (13) de cada anillo (9, 10) y antes de apilar dichos anillos (9, 10) a lo largo del eje longitudinal (8). La tapa de cada anillo (9, 10) evita que los bloques (19) se descoloquen del interior de los huecos (13).

Por otro lado, en una realización preferente de la invención, en al menos en un mismo anillo (9, 10) exterior o central, los bloques (19) de material magnético permanente son sustancialmente idénticos, esto es, tienen igual forma geométrica, material magnético permanente y tamaño. Asimismo, preferentemente los bloques (19) de material magnético permanente son bloques (19) que comprenden una pluralidad de aristas. Más preferentemente, la forma geométrica de los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales es cúbica. En una realización preferente, los bloques (19) de material magnético permanente de todos los anillos (9, 10) exteriores y centrales son cúbicos e idénticos. Ello facilita la fabricación industrial del imán principal (1), en comparación con a otras realizaciones donde dichos bloques (19) tienen otras formas geométricas (por ejemplo, hexagonales, cilíndricas, entre otras) o no son idénticos en todos los anillos (9, 10) exteriores y centrales.

En otra realización preferente, los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales comprenden bloques compuestos de una aleación de samario-cobalto (Sm-Co), o una aleación de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B). En otra realización preferente, los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos exteriores y centrales (10) comprenden bloques de una pieza (esto es, cada bloque comprende una única pieza individual de material magnético permanente, en lugar de una pluralidad de piezas individuales apiladas). De acuerdo con esta realización, en el imán principal (1) de la Figura 1, los bloques (19) de material magnético permanente (ver Figura 6) comprendidos en los anillos (9, 10) exteriores y centrales son bloques de una pieza y cúbicos. A modo de ejemplo, los bloques (19) de material magnético permanente comprendidos en todos los anillos (9, 10) exteriores y centrales pueden estar compuestos de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{15}\text{B}$, donde dicha aleación $\text{Nd}_2\text{Fe}_{15}\text{B}$ se caracteriza por su alta magnetización m_0 y su gran coercitividad. Asimismo, el grado magnético de la aleación $\text{Nd}_2\text{Fe}_{15}\text{B}$ de los bloques (19) de material magnético permanente del imán de la Figura 1 es, por ejemplo, igual a N48. Como es sabido, el grado magnético de un bloque de Nd-Fe-B es una medida

de su producto de energía máxima (en inglés, "maximum energy product") que se representa con un número entero (en este ejemplo no limitativo, "48"), de manera que, cuanto mayor es dicho número entero, mayor es la fuerza de atracción de dicho bloque.

- 5 Por otro lado, puesto que la cavidad (2) del imán principal (1) de la Figura 2 aloja el sistema de gradientes magnéticos (5) en toda la longitud del imán principal (1), ello conlleva un aumento del tamaño de la sección hueca (11) de los anillos exteriores (9), y, en consecuencia, un distanciamiento de los bloques (19) de material magnético permanente de dichos anillos exteriores (9) con respecto al eje longitudinal (8) del imán principal (1).
- 10 Dicho distanciamiento reduce la amplitud del campo magnético generado por los bloques (19) de material magnético de los anillos exteriores (9) en la cavidad (2) del imán principal (1). Además, típicamente las divergencias del campo magnético principal B_0 en los extremos (6, 7) reducen la amplitud del mismo en región de la cavidad (2) que comprenden dichos extremos (6, 7). Por tanto, preferentemente para cada anillo exterior (9) y con el
- 15 objetivo de solventar dicha limitación, la separación entre la capa (9') de bloques (19) de material magnético permanente más cercana al eje longitudinal (8) y el sistema de gradientes magnéticos (5) se minimiza para el tamaño y la forma geométrica de cada bloque de material magnético de dicha capa (9'), y la longitud D_G del eje mayor y la longitud d_G del eje menor del contorno de la sección transversal (15) del sistema de gradientes
- 20 magnéticos (5) (Figura 2). En tal caso, se dice que los bloques (19) de dicha capa (9') están apretados (en inglés, "tightly packed") respecto al sistema de gradientes magnéticos (5). De acuerdo con lo anterior, para cada anillo exterior (9), cuando los bloques (19) de material magnético permanente de la capa (9') más cercana al eje longitudinal (8) están apretados respecto al sistema de gradientes magnéticos (5), se fija una tolerancia de fabricación
- 25 durante el diseño teórico del imán principal (1), de manera que, tras formar los huecos (13) de dicha capa (9') de acuerdo con esta tolerancia de fabricación, se evita que los bloques (19) de material magnético permanente colocados en esos huecos (13) se superpongan con el sistema de gradientes magnéticos (5). En este sentido, el valor de dicha tolerancia de fabricación tiene en cuenta la precisión de los dispositivos que forman los huecos (13)
- 30 de la capa (9') más cercana al eje longitudinal (8). Así pues, en cada anillo exterior (9), los bloques (19) de material magnético permanente de la capa (9') más cercana al eje longitudinal (8) están apretados respecto al sistema de gradientes magnéticos (5). Así pues, en la realización preferente del imán principal (1) de la Figura 1, en la capa (9') más cercana al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de cada anillo exterior (9), los bloques
- 35 (19) de material magnético se encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre cada bloque (19) y el contorno exterior del sistema de gradientes

magnéticos (5) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm. En el contexto anterior, la expresión "sustancialmente igual 1 mm" se refiere a que dicha distancia es igual a 1mm, salvo desviaciones inherentes la fabricación del imán principal (1). Asimismo, para cada bloque (19) de material magnético, la distancia anterior se mide desde el punto de dicho
5 bloque (19) más cercano al contorno exterior del sistema de gradientes magnéticos (5).

En realizaciones de la invención, los bloques (19) de material magnético de al menos un anillo (9, 10) exterior y/o central del imán principal (1) de la capa (9', 10') más cercana al eje longitudinal (8) se encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre
10 cada bloque (19) y el perímetro interior de dicho anillo (9,10) (esto es, el perímetro que delimita el inicio de la sección hueca (11, 12) de ese anillo (9,10)) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm. Al mismo tiempo o alternativamente, en realizaciones de la invención, los bloques (19) de material magnético de al menos un anillo (9, 10) exterior y/o central del
15 imán principal (1) de la capa (9'', 10'') más alejada del eje longitudinal (8) se encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre cada bloque (19) y el perímetro exterior de dicho anillo (9,10) (esto es, el perímetro opuesto al que delimita el inicio de la sección hueca (11, 12) de ese anillo (9,10)) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm. En el contexto anterior, la "expresión sustancialmente igual a 1 mm" se refiere a que las distancias descritas en el presente párrafo son iguales a un 1mm, salvo desviaciones
20 inherentes la fabricación del imán principal (1). Asimismo, para cada bloque (19) de material magnético, las distancias anteriores se miden desde el punto de cada bloque (19) más cercano a su respectivo contorno interior o exterior. de su anillo (9,10).

Asimismo, en la realización preferente del imán principal (1) de la Figura 1, los bloques (19)
25 de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales del imán principal (1) están apretados (en inglés, "tightly packed") radial, angular, y axialmente, evitando al mismo tiempo que bloques (19) de material magnético permanente contiguos se superpongan. De esta manera, se maximiza la amplitud del campo magnético principal B_0 generado por el imán principal (1) en la cavidad (2). Esto se debe a que, en tal caso, los
30 bloques (19) de material magnético están lo más cerca posible del eje longitudinal (8) y la cantidad de dichos bloques (19) de material magnético permanente es la máxima posible. En otras realizaciones de la invención los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales están sólo radialmente, o sólo angularmente, o sólo axialmente apretados, o en una combinación de estas tres disposiciones. En otras
35 realizaciones, los bloques (19) de material magnético permanente no están ni radial, ni angular, ni axialmente apretados.

En contexto anterior, los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1) están apretados angularmente cuando, entre dos bloques (19) contiguos de una misma capa (9', 9'', 10', 10''), dichos bloques (19) contiguos se encuentran dispuestos a una distancia de separación sustancialmente igual o inferior a 1 mm. Además, los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1) están apretados radialmente cuando, entre dos bloques (19) contiguos de dos capas (9', 9'', 10', 10'') distintas y consecutivas de un mismo anillo (9, 10), dichos bloques (19) contiguos se encuentran dispuestos a una distancia de separación sustancialmente igual o inferior a 1 mm. Por otra parte, los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1) están apretados axialmente cuando, entre dos bloques (19) contiguos de dos anillos (9, 10) distintos y consecutivos a lo largo del eje longitudinal (8), dichos bloques (19) se encuentran dispuestos a una distancia longitudinal de separación sustancialmente igual o inferior a 4 mm. La expresión "sustancialmente igual" se refiere a que cada una de las distancias que determinan cómo están apretados los bloques (19) es igual a la cantidad indicada anteriormente, salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Además, la distancia entre dos bloques (19) de material magnético contiguos se define en este sentido como la distancia entre los dos puntos más próximos entre dichos bloques (19) contiguos.

La Figura 3b muestra una vista ampliada del anillo exterior (9) de la Figura 3b. De la misma forma que en la Figura 3a, los bloques de material magnético permanente no se muestran en la figura 3b (los bloques de anillos (9, 10) exteriores y centros se muestran más adelante, en la Figura 6). Así pues, en dicha Figura 3b, se muestra con una doble flecha la eventual distancia de separación δ_A entre dos bloques de material magnético contiguos en una misma capa (9'), cuando se colocan dichos bloques contiguos en sus huecos (13). Además, también se muestra con otra doble flecha la eventual distancia de separación δ_R entre dos bloques (19) de material magnético contiguos de dos capas (9', 9'') distintas y consecutivas, cuando se colocan dichos bloques contiguos en sus huecos (13). De acuerdo con lo descrito anteriormente, los bloques (19) del anillo exterior (9) de la Figura 3b se colocan en los huecos (13) de manera que están radial y axialmente apretados.

Como se ha descrito anteriormente, las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales, la longitud del eje mayor de la elipse que describe cada capa (9', 9'', 10', 10'') es mayor que la longitud del eje menor.

Ventajosamente, se incrementa con ello la amplitud del campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2), con respecto a otras configuraciones conocidas donde las capas de bloques de material magnético permanente son circulares. Por otro lado, también en el imán principal (1) de la Figura 1, el cociente entre la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor es, de forma preferente, sustancialmente igual en todas las elipses descritas por las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente. De esta manera, se facilita la instalación del sistema de gradientes magnéticos (5) de sección transversal (15) elíptica en la cavidad (2). En este contexto, la expresión "sustancialmente igual" se refiere a que es igual en todas las elipses, salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1).

La Figura 5 muestra una gráfica donde se representa la amplitud del campo magnético principal B_0 generado en el eje longitudinal (8) por un imán principal (1) de acuerdo con la presente invención, en función de la longitud $d_i^{(0)}/2$ del semieje menor de las elipses comprendidas en las capas interiores (9', 10') de los anillos (9, 10) exteriores y centrales. En este ejemplo, cada anillo (9, 10) comprende dos capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente. Las elipses descritas por las capas interiores (9')/exteriores (9'') de los anillos exteriores (9) son iguales que las elipses descritas por las capas interiores (10')/exteriores (10'') de los anillos centrales (10). En particular, la longitud $D_i^{(0)}/2$ del semieje mayor de las elipses de las capas interiores (9', 10') es igual a 0,30 m. Los ejes menores de todas las capas (9', 9'', 10', 10'') son paralelos entre sí. Por otro lado, los bloques (19) de material magnético permanente de todas las capas (9', 9'', 10', 10'') son cúbicos, con un lado de longitud l igual a 1,9 cm, y están compuestos una aleación de $Nd_2Fe_{15}B$ y grado magnético N48. Asimismo, los bloques (19) de material magnético están apretados radial, angular y axialmente, de acuerdo con lo explicado anteriormente. En este contexto, la Figura 5 muestra cómo el campo magnético principal B_0 aumenta de 74 mT a 81 mT, cuando la longitud $d_i^{(0)}/2$ del semieje menor de las elipses de las capas interiores (9', 10') decrece de 0,30 m a 0,20 m, esto es, cuanto más pequeño es el eje menor de la elipse de cada capa (9', 9'', 10', 10'') con respecto al eje mayor de la misma elipse. Cabe destacar que, cuando en la gráfica decrece la longitud $d_i^{(0)}/2$ del semieje menor de las capas interiores (9', 10'), al mismo tiempo se modifica el número de bloques (19) de cada capa (9', 9'', 10', 10'') de los anillos (9, 10) exteriores y centrales, de manera que dichos bloques (19) de material magnético permanente siguen apretados radial, angular y axialmente.

Asimismo, en el imán principal (1) de la Figura 1, los anillos (9, 10) exteriores y centrales presentan una simetría especular a lo largo del eje longitudinal (8) del imán principal (1) y

respecto al centro de dicho eje longitudinal (8). Así pues, ordenando los anillos (9, 10) del imán principal (1) de la Figura 1 desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (7), el primer anillo (9) es sustancialmente igual al decimonoveno anillo (9), el segundo anillo (9) es sustancialmente igual al decimooctavo anillo (9), etc. En particular, en la realización
5 no limitativa del imán principal (1) de la Figura 1, los tres anillos exteriores (9) de cada extremo (6, 7) del imán principal (1) son sustancialmente iguales al mostrado en la Figura 3a (con los bloques (22) de material magnético permanente contenidos en los huecos (13) y con las tapas no mostrados en dicha figura) mientras que, en los trece anillos centrales (10), el primer anillo central (10) es sustancialmente igual al decimotercer anillo central (10),
10 el segundo anillo central (10) es sustancialmente igual al decimosegundo central (10), etc. En el contexto anterior, la expresión “sustancialmente” se refiere a que, en cada pareja especular, los anillos de dicha pareja son iguales, salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Cuando los anillos (9, 10) exteriores y centrales siguen una simetría especular a lo largo del eje longitudinal (8), el campo magnético principal B_0
15 generado en la cavidad (2) es simétrico a lo largo del eje longitudinal (8), salvo desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal (1). Cabe destacar que, cuando el imán principal (1) comprende un número impar de anillos (9, 10), el anillo (10) del centro de dicho imán principal (1) (por ejemplo, el séptimo anillo central (10) en el imán principal (1) de la Figura 1), no tiene asociada una pareja especular.

20

Los anillos (9, 10) exteriores y centrales de las Figuras 3-4 comprenden, adicionalmente, uno o más agujeros (16), a través de los cuales pasan unas varillas (17) o pernos de conexión. Asimismo, cada tapa de cada anillo (9,10) exterior y central también comprende uno o más agujeros a través de los cuales pasan las mismas varillas (17). De esta forma,
25 se unen todos los anillos (9, 10) exteriores y centrales y sus tapas a lo largo de la longitud del imán principal (1). Opcionalmente, es posible colocar una tuerca al final de cada varilla (17) para fijar dicha unión. En realizaciones alternativas, otros medios de unión pueden emplearse para unir los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales y/o las tapas de los mismos si las hubiera.

30

Por su parte, el sistema de RF (4) comprendido en la cavidad (2) del imán principal (1) (Figura 2) se extiende desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (5) del mismo, de manera que dicho sistema de RF (4) está comprendido en el interior del sistema de gradientes magnéticos (5) y se extiende en toda la longitud del imán principal (1). De esta
35 forma, el interior del sistema de RF (4) comprende en su interior la región donde los gradientes magnéticos generados son lineales o donde, al menos, se genera suficiente

diferencia de frecuencias de Larmor entre vóxeles de la muestra/sujeto. En otras realizaciones de la invención, la longitud de sistema de RF (4) es menor, coincidiendo con la distancia entre lóbulos del gradiente magnético que genera sistema de gradientes magnéticos (5) en la dirección del eje longitudinal (8). Alternativamente, la longitud del sistema de RF (4) es incluso menor que la de la realización anterior, con el objeto de optimizar otras características de dicho sistema de RF (4) (como el factor de calidad, el “ringdown” de la bobina de RF (4), entre otras).

En otro aspecto de la invención, el imán principal (1) de la Figura 1 está preferentemente fabricado de acuerdo con un diseño teórico, de manera que se conoce el campo magnético principal B_0 que teóricamente genera el imán principal (1) tras apilar los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo del eje longitudinal (8). Sin embargo, típicamente existen desviaciones el imán principal (1) del diseño teórico y el imán principal (1) fabricado. En particular, generalmente los valores de la amplitud y la homogeneidad del campo magnético principal B_0 determinados experimentalmente se desvían respecto a los valores del diseño teórico. Dichas desviaciones son inherentes a la propia fabricación del imán principal (1). Así pues, en una realización de la invención, la cavidad (2) del imán principal (1) está configurada para alojar una unidad de ajuste fino (en inglés, “shimming unit”), donde dicha unidad de ajuste fino está a su vez configurada para corregir dichas desviaciones experimentales.

La Figura 6 muestra una vista transversal del imán principal (1) de la Figura 1, donde dicho imán principal (1) comprende adicionalmente una unidad de ajuste fino (18). Los anillos (9, 10) exteriores y centrales no se muestran en la Figura 6, sino solamente los bloques (19) de material magnético permanente comprendidos en las capas (9', 9'', 10', 10'') de dichos anillos (9,10) exteriores y centrales. Asimismo, en la Figura 6 se muestra la región que abarca en la cavidad (2) el FoV (20) esférico de un escáner de MRI (3), cuando éste comprende el imán principal (1) de la Figura 6 y los sistemas (3, 4) de RF y de gradientes magnéticos de la Figura 2.

30

La unidad de ajuste fino (18) comprende una pluralidad de anillos auxiliares (21), apilados a lo largo de un eje longitudinal (8) en la porción central (14) del imán principal (1), de modo que la unidad de ajuste fino (18) atraviesa la sección hueca (12) de cada anillo central (10) del imán principal (1). Dichos anillos auxiliares (21) comparten algunas características con los anillos exteriores (9) de los extremos (6, 7) del imán principal (1). En este sentido, preferentemente, cada anillo auxiliar (21) está compuesto por un material no magnético,

35

como, por ejemplo, nylon o polietileno, entre otros. Asimismo, cada anillo auxiliar (21) comprende una sección hueca en su centro, y una pluralidad de huecos dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo auxiliar (21). Sin embargo, a diferencia de los anillos exteriores (9), en cada anillo auxiliar (21) cada hueco está vacío o contiene en su interior un bloque (22) de material magnético permanente. En cada anillo auxiliar (21) los bloques (22) de material magnético permanente están dispuestos radialmente respecto al centro del anillo auxiliar (21) en un conjunto de una o más capas, donde cada capa describe sustancialmente una elipse, teniendo dicha elipse un eje menor, y un eje mayor perpendicular a dicho eje menor y de longitud mayor que la del eje menor. En el contexto anterior, la expresión "sustancialmente una elipse" se refiere a que todos los centros geométricos de los bloques (22) de material magnético permanente de una misma capa yacen en una misma elipse, salvo desviaciones inherentes la fabricación del imán principal (1).

Cabe destacar que, como se ha descrito anteriormente, es posible que haya uno o más huecos en cada anillo auxiliar (21) que no comprendan en su interior un bloque (22) de material magnético permanente. En tal caso, se considera que la elipse que describe cada capa de un anillo auxiliar (21) es la misma que describiría dicha capa en el caso de que todos los huecos de dicho anillo auxiliar (21) comprendieran un bloque (22) de material magnético permanente. Por tanto, según lo anterior, los bloques (22) de cada capa de cada anillo auxiliar (21) no están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach. Ciertamente, la disposición en cada capa de los bloques (22) de material magnético permanente es tal que el campo magnético que generan los anillos auxiliares (21) corrige las desviaciones experimentales inherentes a la fabricación del imán principal (1). En particular, la disposición de los bloques (22) de material magnético permanente en las capas de los anillos auxiliares (21) es tal que se incrementa la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) del imán principal (1), respecto a la homogeneidad de dicho campo magnético principal B_0 cuando el imán principal (1) no comprende la unidad de ajuste fino (18) en su cavidad (2). Así pues, en una realización de la invención, cuando un hueco de un anillo auxiliar (21) contiene en su interior un bloque (22) de material magnético permanente, dicho bloque (22) está colocado en el interior del hueco de manera que la orientación de su magnetización puede ser cualquiera de las orientaciones permitidas por el hueco, incluso una orientación paralela al eje longitudinal del imán principal (1).

35

Asimismo, en la unidad de ajuste fino (18), los ejes menores de las elipses de las capas de bloques (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21) son sustancialmente paralelos a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y
 5 centrales. En este contexto, la expresión “sustancialmente” se refiere a desviaciones inherentes fabricación del imán principal (1).

De acuerdo con lo anteriormente descrito, en la realización de la Figura 6 los bloques (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21) están dispuestos en una
 10 sola capa en cada anillo auxiliar (21). En particular, dichos bloques (22) son bloques de una pieza, idénticos, cúbicos, y están compuestos por Nd₂Fe₁₅B. Además, en cada capa de cada anillo auxiliar (21), se colocan los bloques (22) de material magnético permanente de manera que en cada hueco de cada capa se da una de las tres situaciones siguientes:

15 I. Magnetización Halbach: la dirección y el sentido de la magnetización del bloque (22) de material magnético permanente, son la dirección y el sentido que le correspondería a dicho bloque (22) en dicho hueco, si en dicha capa todos los bloques (22) de material magnético permanente estuvieran dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach.

20 II. Magnetización anti-Halbach: la dirección de la magnetización del bloque (22) de material magnético permanente, es la dirección que le correspondería a dicho bloque (22) en dicho hueco, si en dicha capa todos los bloques (22) de material magnético permanente estuvieran dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo
 25 Halbach. Sin embargo, el sentido de la magnetización de dicho bloque (22) de material magnético permanente es opuesto al que le correspondería a dicho bloque (22) en dicho hueco, si en dicha capa todos los bloques (22) de material magnético permanente estuvieran dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach.

30 III. No-bloque: el hueco no tiene colocado ningún bloque (22) de material magnético permanente en su interior.

Asimismo, en la realización de la Figura 6, el cociente entre la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor es sustancialmente igual en todas las elipses descritas por las capas
 35 (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19, 22) de material magnético permanente de todos los anillos (9, 10, 21) exteriores, centrales y auxiliares. La expresión “sustancialmente” se refiere a que dicho cociente es igual en todas esas elipses, salvo desviaciones inherentes a la de

fabricación del imán principal (1). De esta manera, la elipticidad de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de todos los anillos (9, 10, 21) exteriores, centrales y auxiliares es aproximadamente la misma. La fabricación de una unidad de ajuste fino (18) que comprende capas con dichas elipticidades es industrialmente más sencilla y, a su vez, facilita que dicha unidad de ajuste fino (18) tenga una forma geométrica que esté adaptada para la cavidad (2) del imán principal (1).

En otra realización de la invención, los bloques (22) de material magnético de los anillos auxiliares (21) están compuesto de otro material magnético permanente, por ejemplo una aleación de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B) o una aleación de samario-cobalto (Sm-Co). Por otro lado, en la realización preferente de la Figura 6, los bloques (19) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y los bloques (22) de los anillos auxiliares (21) están compuestos por exactamente el mismo material magnético permanente. Esto facilita que la unidad de ajuste fino (18) corrija correctamente las desviaciones experimentales inherentes al método de fabricación y/o al diseño del imán principal (1) y a su dependencia con la temperatura de los bloques (19, 22). Así pues, en el contexto anterior, la "exactamente el mismo material magnético permanente" se refiere a que los bloques los bloques (19) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y los bloques (22) de los anillos auxiliares (21) de la Figura 6 están compuestos por $\text{Nd}_2\text{Fe}_{15}\text{B}$, con un grado magnético igual a N48.

20

En otra realización de la invención, en al menos un anillo auxiliar (21) al menos un bloque (22) de material magnético permanente tiene una forma geométrica, material magnético y/o tamaño diferente al resto de bloques (22) de dicho anillo auxiliar (21).

En otra realización de la invención, los bloques (22) de material magnético permanente de al menos un anillo auxiliar (21) comprenden bloques con otras formas geométricas distintas a la cúbica, donde preferentemente dichos bloques comprenden una pluralidad de aristas. En un ejemplo no limitativo, cada anillo auxiliar (21) comprende varias capas, cada una de ellas con bloques (22) de material magnético permanente de igual tamaño y forma geométrica, pero donde en cada anillo auxiliar (21) el tamaño de los bloques (22) aumenta de una capa a otra capa más alejada del eje longitudinal (8) del imán principal (1). De esta manera, la unidad de ajuste fino (18) corrige las desviaciones del campo magnético principal citadas anteriormente en diferentes niveles de ajuste, tanto más refinados cuanto menor es el tamaño de los bloques (22) de material magnético de cada capa.

35

Por otro lado, en la unidad de ajuste fino (18) de la Figura 6, cada anillo auxiliar (21) comprende una primera cara plana y una segunda cara plana opuesta a la primera, donde solamente en dicha primera cara se forman los huecos de cada anillo auxiliar (21). Además, existe una porción de material no magnético entre el fondo de cada hueco y la segunda
5 cara de cada anillo auxiliar (21), de manera que el hueco no esté abierto en dicho fondo. Asimismo, cada anillo auxiliar (21) comprende una tapa de material no magnético (como, por ejemplo, nylon, polietileno, aluminio, entre otros), de manera análoga a los anillos (9, 10) exteriores y centrales. En particular, en el método de fabricación del imán principal (1) del Figura 6, se coloca una tapa de material no magnético sobre la cara de cada anillo
10 auxiliar (9, 10) donde se forman los huecos. La colocación de dichas tapas se realiza después de colocar los bloques (22) de material magnético permanente en los huecos correspondientes y antes de apilar dichos anillos auxiliares (9, 10) a lo largo del eje longitudinal (8). La tapa de cada anillo auxiliar (9, 10) evita que los bloques (22) de material magnético permanente se descoloquen del interior de los huecos.

15

En una realización de la invención, los bloques (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21) están apretados radialmente, angularmente, y/o axialmente. En este contexto, las definiciones de bloques (22) de material magnético permanentes apretados radialmente, angularmente, y axialmente son análogas a las de los bloques (19)
20 de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales. En particular, cuando un hueco de un anillo auxiliar esté vacío, se considera para dichas definiciones que dicho hueco comprende un bloque (22) de material magnético.

Por otro lado, en la realización preferente de la Figura 6, y de acuerdo con la presente
25 invención, la unidad de ajuste fino (18) está configurada para alojar en su interior el sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2, de manera que dicho sistema de gradientes magnéticos (5) atraviesa la sección hueca de cada anillo exterior (21) y se extiende a lo largo del eje longitudinal (8), sustancialmente desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (7) del imán principal (1) y abarcando toda la longitud del mismo. En este sentido,
30 el área de cada sección hueca de cada anillo auxiliar (21) es mayor o igual que la sección transversal (15) del sistema de gradientes magnéticos (5). En particular, la sección hueca de cada anillo auxiliar (21) de la Figura 6 tiene la misma forma que la sección transversal (15) del sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2, de manera que los anillos auxiliares (21) están configurados para sujetar dicho sistema de gradientes magnéticos (5).

35

Por otra parte, en una realización del imán principal (1) de acuerdo con la presente invención, la amplitud del campo magnético principal B_0 en al menos una región de la cavidad (2) es preferentemente menor que 1 T, y más preferentemente menor que 0,1 T. El imán principal (1) de acuerdo con dicha realización se denomina imán de campo bajo
 5 (en inglés, "low field"). Asimismo, la al menos una región de la cavidad (2) anterior es preferentemente la región que abarca el FoV (20) de un escáner de MRI (3) que comprende dicho imán principal (1).

Otro objeto de la invención se refiere a un método de fabricación de un imán principal (1)
 10 según cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento. Preferentemente, el método se realiza siguiendo un diseño teórico del imán principal (1) a fabricar y comprende los siguientes pasos, realizados en cualquier orden técnicamente posible:

- a) proporcionar los anillos (9, 10) exteriores y centrales;
- 15 b) formar los huecos (13) de los anillos (9) exteriores perforando los mismos, de manera que dichos huecos (13) están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo (9) exterior (9);
- c) colocar bloques (19) de material magnético permanente en el interior de los huecos (13) de los anillos exteriores (9), de manera que dichos bloques (19) de material
 20 magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una pluralidad de capas (9', 9''), donde en cada capa (9', 9'') los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach;
- d) formar los huecos (13) de los anillos centrales (10), por ejemplo perforando los mismos, de manera que dichos huecos (13) están dispuestos radialmente respecto al
 25 centro de cada anillo central (10);
- e) colocar bloques (19) de material magnético permanente en el interior de los huecos (13) de los anillos centrales (10), de manera que dichos bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una pluralidad de capas (10', 10''), donde en cada capa (10', 10'') los bloques (19) de material magnético permanente
 30 están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach; y
- f) apilar los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo de un eje longitudinal (8).

Además, de forma ventajosa en el método de la presente invención, el método, después del paso f), la cavidad (2) que forman las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10)
 35 exteriores y centrales está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos (5)

que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal (1).

En una realización preferente del método de la presente invención, después del paso f), el método comprende el paso k) de disponer el sistema de gradientes (5) en la cavidad (2) del imán principal (1).

Asimismo, en realizaciones del método de la presente invención, los pasos del método a), b), c), d), e), f) y/o k) se realizan de manera que se cumple lo descrito anteriormente sobre cualquiera de las realizaciones del imán principal (1) de la presente invención. Por ejemplo, en el método de fabricación del imán principal (1) de la Figura 1, los pasos b) y d) de formación de los huecos (13), y los pasos c) y e) de colocación de los bloques (19) de material magnético permanente, se realizan de forma que la dirección del campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2) por los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) es, sustancialmente, paralela a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente.

Al mismo tiempo, en la realización del método de fabricación del imán principal (1) de la Figura 1, después del paso f), la cavidad (2) que forman las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales está adaptada para alojar el sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2, que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8) desde el primer extremo (6) hasta el segundo extremo (7) del imán principal (1), y abarca toda la longitud de dicho imán principal (1).

Además, la realización del método de fabricación del imán principal (1) de la Figura 1, en cada anillo (9, 10) exterior y central se forman los huecos (13) en una de las dos caras planas de dicho anillo (9, 10) y, tras colocar los bloques (19) de material magnético permanente en el interior de los huecos (13), se coloca una tapa de material no magnético sobre dicha cara. La tapa de cada anillo (9, 10) evita que los bloques (19) de material magnético permanente se descoloquen del interior de los huecos (13). En otras realizaciones de la invención, en lugar de emplearse tapas, se pueden emplear medios adhesivos u otros medios de sujeción aptos para evitar que los bloques se descoloquen del interior de los huecos (13).

Más preferentemente, el método de la invención comprende, adicionalmente, los siguientes pasos, realizados en cualquier orden técnicamente posible:

g1) determinar la amplitud y/o la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2);

g2) determinar una o más características de cada anillo auxiliar (21) de la unidad de ajuste fino (18) del diseño teórico del imán principal (1) que comprende la misma, que
5 incrementan o maximizan la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en dicha región de la cavidad (2), hasta un valor de la homogeneidad deseado.

En una realización preferente de la invención, en el paso g2) anterior se determina la orientación de la magnetización de cada bloque (22) de material magnético permanente de
10 cada anillo auxiliar (21), y/o la forma geométrica y/o el tamaño de cada bloque (22) de material magnético permanente de cada anillo auxiliar (21).

Por su parte, el diseño teórico del imán principal (1) (ver, por ejemplo, en Figura 1) se basa, adicionalmente, en el resultado de un algoritmo de optimización (23) (ver Figura 7). Dicho
15 algoritmo de optimización de diseño determina, al menos parcialmente, la configuración de cada anillo central (10), de manera que se maximiza la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en la región de la cavidad (2) que abarca el FoV (20) del escáner de MRI (3) (ver, por ejemplo, según la Figura 2, cuando el escáner de MRI (3) comprende
20 el imán principal (1) de la Figura 1).

Así pues, en una realización preferente de la presente invención, al menos antes del paso d) de formar los huecos (13) de los anillos centrales (10), el método de fabricación del imán principal (1) comprende el siguiente paso:

h) determinar, por medio de un algoritmo de optimización (23), una o más
25 características de cada anillo central (10) del diseño teórico del imán principal (1) que maximizan u optimizan la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2); de manera que se forman los huecos (13) en el paso d) y/o se colocan bloques (19) de material magnético permanente en el paso e), de acuerdo con la información determinada por el algoritmo de optimización (23) en el paso h).

Más concretamente, en el método de fabricación del imán principal (1) de la Figura 1, el algoritmo de optimización (23) determina, en el paso h), las distancias al eje longitudinal
30 (8) del imán principal (1) de cada capa (10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de cada anillo central (10), de modo que se forman los huecos (13) en el paso
35 d) según la información determinada en el paso h) por dicho algoritmo de optimización (23). El algoritmo de optimización (23) puede también aplicarse, alternativa o

complementariamente, a los bloques (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21).

5 En otras realizaciones del método de la invención, el algoritmo de optimización (23) determina forma geométrica, el tamaño, y/o la composición de cada bloque (19) de material magnético permanente de cada anillo central (10), y/u otra u otras características de cada anillo central (10), de manera que se forman los huecos (13) en el paso d) y/o se colocan bloques (19) de material magnético permanente en el paso e) de acuerdo con la información determinada por el algoritmo de optimización (23) en el paso h).

10

La Figura 7 muestra un esquema de un ejemplo no limitativo de un algoritmo de optimización (23) de acuerdo con la presente invención. Al algoritmo de optimización (23) se le suministra un conjunto de uno o más parámetros de entrada (24). Asimismo, el algoritmo de optimización (23) obtiene un resultado (25). Dicho resultado (25) comprende los valores de una o más variables de optimización (26) que optimizan al menos una función de optimización (27). Preferentemente, los parámetros de entrada (24) y las variables de optimización (26) son parámetros que comprenden información del diseño teórico del imán principal (1) y, por tanto, comprenden información sobre las dimensiones de dicho imán principal (1) y de la cavidad (2) del mismo, sobre la cantidad y la distribución espacial del material magnético permanente comprendido en los anillos (9, 10) exteriores y centrales de dicho imán principal (1), y sobre las dimensiones de la región que abarca el FoV (20) en la cavidad (2) cuando un escáner de MRI (3) comprende dicho imán principal (1). En este sentido, la diferencia entre los parámetros de entrada (24) y las variables de optimización (26) es que los parámetros de entrada (24) son parámetros fijos, mientras que las variables de optimización (26) son parámetros que el algoritmo de optimización (23) varía durante la ejecución de un método de optimización. Así pues, en una realización de la invención, un parámetro particular del diseño del imán principal (1) es un parámetro de entrada (24), mientras en otra realización diferente de la invención ese mismo parámetro es una variable de optimización (26).

30

En una realización preferente de la invención, las dimensiones máximas de imán principal (1) del diseño teórico, las dimensiones mínimas de la cavidad (2), y/o el tamaño y la forma del FoV (20) son parámetros de entrada (24), o son parámetros del diseño del imán principal (1) derivados de uno o más parámetros de entrada (24). Típicamente, son parámetros particularmente relevantes la longitud del imán principal (1) y las dimensiones de su cavidad (2). Su relevancia se debe a que, generalmente, el diseño teórico del imán

35

principal (1) se concibe para la longitud del imán principal (1) y las dimensiones de la cavidad (2) a un tipo de muestra concreto (por ejemplo, la cabeza o la pierna de un paciente), de manera que el imán principal (1) está configurado para situar la muestra en la región que abarca el FoV (20) en la cavidad (2) y en la porción central (14). Además, en distintas realizaciones de la invención, la longitud y las dimensiones de la cavidad (2) del imán principal (1) delimitan el tamaño del FoV (20) del escáner de MRI (3) que comprende el mismo, tal y como se ha explicado anteriormente en la descripción de la realización de la Figura 2. Por otro lado, en una realización de la invención, los parámetros de entrada (24) comprenden el rango de amplitud de campo magnético principal B_0 que se espera generar en la región que abarca el FoV (20), el peso total esperado del imán principal (1), las tolerancias de fabricación de los anillos (9,10) exteriores y centrales, y/o el cociente entre la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor de la elipse de cada capa (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de cada anillo (9, 10) exterior y/o central.

15

En otra realización preferente de la invención, las variables de optimización (26) comprenden el número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10). En el contexto anterior, generalmente los parámetros de entrada (24) restringen el valor del número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10). Así pues, el valor del número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10) determina el número total de bloques (19) de dicho anillo central (10), así como las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de cada capa (10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de dicho anillo central (10). En otra realización de la invención, las variables de optimización (26) comprenden la forma geométrica y/o el tamaño de cada bloque (19) de material magnético permanente de cada capa (10', 10'') de cada anillo central (10). En otra realización de la invención, las variables de optimización (26) comprenden la composición de cada bloque (19) de material magnético permanente de cada capa (10', 10'') de cada anillo central (10). En un ejemplo no limitativo, en el diseño teórico del imán principal (1) cada bloque (19) de material magnético permanente está compuesto por una aleación de Nd-Fe-B, y una de las variables de optimización (26) del algoritmo de optimización (23) es el grado magnético de cada bloque (19) comprendido en cada anillo central (10).

35

Asimismo, cuando el diseño teórico se refiere a un imán principal (1) que presenta una simetría especular a lo largo del eje longitudinal (8) del imán principal (1) y respecto al centro de dicho eje longitudinal (8), se reduce ventajosamente el número de variables de optimización (23). Por ejemplo, si dicho diseño teórico se refiere a un imán principal (1) que comprende cinco anillos centrales (10), y las variables de optimización (23) son el número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10), entonces dichas variables de optimización (23) comprenderían tres números diferentes N_1, N_2, N_3 de bloques (19) de material magnético permanente. De este modo, la distribución del número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa interior (10') de cada anillo central (10) a lo largo del eje longitudinal (8) sería $[N_1, N_2, N_3, N_2, N_1]$.

De acuerdo con lo anterior, el algoritmo de optimización (23) de la Figura 7 está configurado para simular, a partir de los parámetros de entrada (24) y las variables de optimización (26), el campo magnético principal B_0 generado en al menos una región de la cavidad (2) del imán principal (1) del diseño teórico. Preferentemente, dicha región es la región que abarca en la cavidad (2) el FoV (20) de un eventual escáner de MRI (1) que comprende el imán principal (1) del diseño teórico. Asimismo, de acuerdo con la presente invención, dicho algoritmo de optimización (23) considera que la disposición de los bloques (19) de material magnético permanente de cada capa (9', 9'', 10', 10'') de cada anillo (9, 10) exterior y central, es tal que la dirección del campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) simulado es paralela a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de dichos anillo (9, 10) exteriores y centrales.

En diferentes realizaciones de la invención, la función de optimización (27) comprende una o más funciones lineales. La programación lineal es ventajosamente más sencilla y eficiente que la no lineal. En estas realizaciones, típicamente se imponen una o más cotas superiores e/o inferiores durante la propia optimización. Preferentemente, dichas cotas y/o uno o más parámetros que las determinan, son suministradas al algoritmo de optimización (23) junto con los parámetros de entrada (24). En un ejemplo no limitativo, la función de optimización (27) lineal es el propio número de bloques (19) de material magnético permanente de cada anillo central (10). En este contexto, el algoritmo de optimización (23) minimiza el número de bloques (19) de los anillos centrales (10), de manera que el campo magnético principal B_0 simulado es menor que la suma de un valor objetivo B_{obj} y un rango ϵ , y mayor que la diferencia entre dicho valor objetivo B_{obj} y dicho rango ϵ . Preferentemente, el valor objetivo B_{obj} y el rango ϵ se suministran al algoritmo de optimización (23) junto con

los parámetros de entrada (24). El valor objetivo B_{obj} y el rango ε imponen unas cotas durante la optimización y, además, dicho rango ε restringe la homogeneidad del campo magnético principal B_0 simulado por el algoritmo de optimización (23).

- 5 En otras realizaciones de la invención, la función de optimización (27) comprende una o más funciones no lineales. En un ejemplo no limitativo, la función de optimización (27) no lineal es la función inhomogeneidad (I) del campo magnético principal B_0 simulado, dada por ejemplo por la expresión $I = (B_{0,max} - B_{0,min})/B_{0,medio}$, donde $B_{0,max}$, $B_{0,min}$ y $B_{0,medio}$ son, respectivamente, valores simulados del campo magnético principal B_0 máximo, mínimo y
- 10 promedio en la región que abarca un FoV (20) en la cavidad (2) del imán principal (1) del diseño teórico. En este contexto, el algoritmo de optimización (23) obtiene como resultado (25) las variables de optimización (26) que minimizan dicha inhomogeneidad (I).

- Adicionalmente, el algoritmo de optimización (23) puede utilizar diferentes métodos de
- 15 optimización. En una realización preferente de la invención, el algoritmo de optimización (23) comprende un algoritmo genético, que se ejecuta de manera evolutiva. En dicha realización, el algoritmo de optimización (23) genera una población de partida de imanes principales (1), donde cada población comprende una pluralidad de individuos. En este contexto, la expresión "individuo" se refiere los parámetros que definen el diseño teórico de
- 20 un imán principal (1), donde dichos parámetros comprenden los parámetros de entrada (24) y unos valores aleatorios generados por el algoritmo de optimización (23) de las variables de optimización (26) (por ejemplo, el número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10)). Típicamente, dichos valores aleatorios son enteros y discretos. Así pues, cada
- 25 individuo tiene asociada su correspondiente homogeneidad del campo magnético principal B_0 simulado por el algoritmo de optimización (23). Tras generar la población de partida, el algoritmo de optimización (23) selecciona un primer subconjunto de dicha población de imanes principales (1), donde dicho subconjunto comprende los individuos más exitosos (esto es, con mayores valores de la homogeneidad del campo magnético principal B_0
- 30 simulado). Seguidamente, el algoritmo de optimización (23) mezcla los valores de las variables de optimización (26) de los individuos comprendidos en el primer subconjunto, formando una segunda población de imanes principales (1). En este contexto, dicha segunda población se denomina descendencia. Así, el algoritmo de optimización (23) genera progresivamente nuevas descendencias, seleccionando los individuos más
- 35 exitosos y mezclando los valores de las variables de optimización (26) de dichos individuos, hasta que un criterio de convergencia es alcanzado. En un ejemplo no limitativo, la

generación de nuevas descendencias termina cuando la inhomogeneidad (I) de un individuo de una de las poblaciones de la última descendencia generada, es menor que un valor objetivo. En dicho ejemplo, el resultado (25) del algoritmo de optimización (23) comprende el valor de las variables de optimización (27) de dicho individuo de la última descendencia generada. En realizaciones preferentes, antes o después de mezclar los valores de las variables de optimización (26) de los individuos más exitosos, el algoritmo de optimización (23) genera mutaciones aleatorias, esto es, modifica aleatoriamente el valor de una o más variables de optimización (26) en uno o más individuos.

10 En otra realización de la invención, el algoritmo de optimización (23) comprende un algoritmo de evolución diferencial. A diferencia de los algoritmos genéticos, en la población de partida generada por el algoritmo de evolución diferencial, los valores aleatorios de las variables de optimización (26) son valores reales no discretos y no necesariamente enteros. Además, típicamente el algoritmo de optimización (23) dispone los individuos de la población de partida y de las descendencias en vectores. Así, partiendo de la población de partida, el algoritmo de optimización (23) genera progresivamente las descendencias usando información direccional, hasta que un criterio de convergencia es alcanzado en un individuo de la última descendencia generada (por ejemplo, cuando la inhomogeneidad (I) de dicho individuo es menor que un valor prefijado). En una realización de la invención, cuando el criterio de convergencia es alcanzado, el algoritmo de optimización (23) transforma cada valor no discreto de las variables de optimización (26) de dicho individuo de la última descendencia generada, en el valor entero más cercano a dicho valor no discreto (por ejemplo, en realizaciones no limitativas donde las variables de optimización (26) comprenden el número N_i de bloques (19) de material magnético permanente de la capa (10') más cercana al eje longitudinal (8) de cada anillo central (10)).

En otra realización de la invención, el algoritmo de optimización (23) comprende modificar uno o más parámetros de entrada (24) (por ejemplo, el número de capas (10', 10''), el número de bloques (19) de material magnético permanente de cada capa (10', 10''), la separación entre bloques (19) contiguos de cada capa (10', 10''), y/o el cociente entre la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor de la elipse de cada capa (10', 10'') de cada anillo central (10)), con el objeto de obtener un nuevo resultado (25) que aumente la homogeneidad del campo magnético principal B_0 simulado y/o mejore otra u otras característica del imán principal (1) del diseño teórico, con respecto al resultado (25) obtenido previamente por el algoritmo de optimización (23). Ejemplos no limitativos de otras características son, el peso total del imán principal (1) del diseño teórico o la amplitud del

campo magnético principal B_0 simulado. En otra realización de la invención, el algoritmo de optimización (23) está configurado para variar el tamaño y/o la forma geométrica de cada bloque (19) de material magnético permanente de cada anillo (9,10) exterior y/o central, mediante un bucle que recorre diferentes valores de tamaño y/o formas geométricas. En
5 dicha realización, el algoritmo de optimización (23) selecciona el número de anillos (9, 10) exteriores y centrales compatibles con una longitudinal del imán principal (1) y con un rango de amplitud del campo principal B_0 simulado prefijados. Asimismo, preferentemente, para cada tamaño de bloque (19) de material magnético permanente, el algoritmo puede determinar cuántas capas (10', 10'') de cada anillo central (10) son necesarias para
10 alcanzar dicho rango de amplitud.

En otra realización de la invención, el algoritmo de optimización (23) impone, para cada anillo central (10), al menos una cota inferior a las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de la capa (10') de bloques (19) más cercana a dicho eje longitudinal (8). Por
15 ejemplo, cuando el diseño teórico del imán principal (1) se refiere a un imán principal (1) configurado para alojar en su cavidad (2) unos sistemas (3, 4) de RF y de gradientes magnéticos (5) y una unidad de ajuste fino (18), el algoritmo de optimización (23) impone límites a las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de la capa (10') de bloques (19) de material magnético permanente más cercana a dicho eje longitudinal (8),
20 de manera que sean compatibles con que el imán principal (1) aloje dichos sistemas (3, 4) de RF y de gradientes magnéticos (5) y unidad de ajuste fino (18).

En otra realización de la invención, el algoritmo de optimización (23) impone, para cada anillo central (10), al menos una cota superior a las distancias al eje longitudinal (8) del
25 imán principal (1) de la capa (10'') de bloques (19) de material magnético permanente más alejada de dicho eje longitudinal (8). Por ejemplo, en una realización no limitativa, los parámetros de entrada (24) comprenden adicionalmente una altura máxima y/o una anchura máxima del imán principal (1). En dicha realización, a partir de dicha altura máxima y/o una anchura máxima del imán principal (1) y para cada anillo central (10), el algoritmo
30 de optimización (23) acota la distancia máxima al eje longitudinal (8) de la capa (10'') de bloques (19) de material magnético permanente más alejada de dicho eje longitudinal (8).

En otra realización del método de la invención, después de formar los huecos (13) de cada anillo central (10), se apilan los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo de un eje
35 longitudinal (8). Tras aplicar dichos anillos (9, 10), típicamente la homogeneidad del campo magnético principal B_0 generando en la cavidad (2) del imán principal (1) sufre desviaciones

con respecto al valor de dicha homogeneidad determinado en el diseño teórico. Dichas desviaciones son inherentes a la propia fabricación de un imán principal (1). Ello explica que el diseño del imán principal (1) de la Figura 1 se refiriera a un imán principal configurado para alojar una unidad de ajuste fino (18), donde dicha unidad de ajuste fino (18)
5 incrementa la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en la cavidad (2).

Así pues, de acuerdo con lo anterior, una realización preferente de la invención se refiere a un método de fabricación de un imán principal (1) que comprende una unidad de ajuste fino (18) según cualquiera de las realizaciones descritas en el presente documento, donde,
10 además de los pasos anteriormente descritos, antes o después del paso f), el método comprende los siguientes pasos, realizados en cualquier orden técnicamente posible:

i1) proporcionar los anillos auxiliares (21) de la unidad de ajuste fino (18);
i2) formar los huecos de los anillos auxiliares (21) perforando los mismos, de manera que dichos huecos están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo auxiliar (21); y
15

i3) colocar bloques (22) de material magnético permanente en el interior de los huecos de los anillos auxiliares (21), de manera que cada hueco está vacío o contiene en su interior un bloque (22) de material magnético permanente.

20 Adicionalmente, la realización anterior del método comprende el siguiente paso después del paso f):

i4) disponer los anillos auxiliares (21) a lo largo de un eje longitudinal (8) y colocarlos en la porción central (14) del imán principal (1), de modo que la unidad de ajuste fino (18) atraviesa la sección hueca (12) de cada anillo central (10) del imán principal (1).

25

La Figura 8 muestra un esquema de un ejemplo no limitativo de un algoritmo auxiliar (28) de optimización de la unidad de ajuste fino (18), de acuerdo con una realización preferente de la presente invención. El algoritmo auxiliar (28) es un algoritmo de optimización al que se le suministra un conjunto de uno o más parámetros de entrada (29). Asimismo, el
30 algoritmo auxiliar (28) obtiene un resultado (30). Dicho resultado (30) comprende los valores de una o más variables de optimización (31) que optimizan al menos una función de optimización (32).

Los parámetros de entrada (29) y las variables de optimización (31) del algoritmo auxiliar
35 (28) son parámetros que comprenden información sobre el diseño teórico de un imán principal (1) que comprende la unidad de ajuste fino (18), y sobre el campo magnético

principal B_0 generado, tras apilar los anillos (9, 10) exteriores y centrales, por el imán principal (1) en su cavidad (20) y en ausencia de la unidad de ajuste fino (18). Preferentemente, los parámetros de entrada (29) y las variables de optimización (31) del algoritmo auxiliar (28) son parámetros que comprenden información sobre dimensiones de la unidad de ajuste fino (18), y sobre la cantidad y la distribución espacial del material magnético permanente comprendido en los anillos auxiliares (21) de dicha unidad de ajuste fino (18). Los parámetros de entrada (29) del algoritmo auxiliar (28) son parámetros fijos, mientras que las variables de optimización (31) del algoritmo auxiliar (28) son parámetros que el algoritmo auxiliar (28) varía durante la ejecución de un método de optimización. En una realización de la invención un parámetro particular es un parámetro de entrada (29) del algoritmo auxiliar (28), mientras en otra realización diferente de la invención ese mismo parámetro es una variable de optimización (31).

En una realización de la invención, los parámetros de entrada (29) del algoritmo auxiliar (28) comprenden una o más tolerancias de fabricación de cada anillo auxiliar (21). En otra realización de la invención, dichos parámetros de entrada (29) comprenden información del diseño del imán principal (1) sobre las dimensiones que ocupan unos eventuales sistema de RF (4) y/o sistema de gradientes magnéticos (4) en la cavidad (2) del mismo. En una realización de la invención, dichos parámetros de entrada (29) comprenden el tamaño y la forma del FoV (20) de un escáner de MRI (3) que comprende el imán principal (1) que aloja es su cavidad (2) la unidad de ajuste fino (18), y/o la amplitud del campo magnético principal B_0 en dicho FoV (20) medido experimentalmente y en ausencia de la unidad de ajuste fino (18).

En una realización de la invención, las variables de optimización (31) del algoritmo auxiliar (28) comprenden la orientación de la magnetización de cada bloque (22) de material magnético permanente de cada anillo auxiliar (21), y/o la forma geométrica y/o el tamaño de cada bloque (22) de material magnético permanente de cada anillo auxiliar (21). En una realización de la invención, variables de optimización (31) del algoritmo auxiliar (28) comprenden la forma geométrica y/o el tamaño de cada bloque (22) de material magnético permanente de cada anillo auxiliar (21), y el algoritmo auxiliar (28) está configurado para variar de manera iterativa el valor de cada forma geométrica y/o tamaño. Dichos valores pueden suministrarse junto con los parámetros de entrada (29) (correspondiendo, por ejemplo, a los valores de las formas geométricas y/o tamaños de los bloques (22) de material magnético permanente disponibles en el mercado).

De acuerdo con lo anterior, el algoritmo auxiliar (28) de la Figura 8 está configurado para simular, a partir de los parámetros de entrada (29) y las variables de optimización (31), el campo magnético principal B_0 generado en al menos una región de la cavidad (2) del imán principal (1) que comprende la unidad de ajuste fino (18), de acuerdo con un diseño teórico.

- 5 Preferentemente, dicha región es la región que abarca en la cavidad (2) el FoV (20) de un eventual escáner de MRI (1) que comprende dicho imán principal (1). Además, el algoritmo auxiliar (28) está configurado para optimizar al menos una función de optimización (32) que depende de los parámetros de entrada (29) y las variables de optimización (31). Dicha función de optimización (27) determina la homogeneidad del campo magnético principal B_0
- 10 simulado por el algoritmo de auxiliar (28). Como resultado (30) de la optimización de la función de optimización (32), el algoritmo auxiliar (28) obtiene los valores de las variables de optimización (31) que hacen máxima la homogeneidad del campo magnético principal B_0 simulado por el algoritmo auxiliar (28). En este contexto, el resultado (30) del algoritmo auxiliar (28) es la información determinada en el paso g2) de una realización del método
- 15 fabricación del imán principal (1). Por tanto, en una realización del método de la invención, se forman los huecos de cada anillo auxiliar (21) en el paso i2) y/o se colocan bloques (22) de material magnético permanente en el paso i3) en cada anillo auxiliar (21) de con dicho resultado (30).
- 20 En una realización preferente de la invención, la función de optimización (32) optimizada por el algoritmo auxiliar (28) es una función lineal o no lineal (como, por ejemplo, la inhomogeneidad (I) del campo magnético principal B_0 en al menos una región de la cavidad (2) simulado por el algoritmo auxiliar (28)). El algoritmo auxiliar (28) puede utilizar diferentes métodos de optimización de la función (32). En una realización de la invención, el algoritmo
- 25 auxiliar (28) es un algoritmo genético o de evolución diferencial.

En otra realización preferente de la invención, el algoritmo de optimización (23) empleado para optimizar la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en ausencia de una unidad de ajuste fino (18), está configurado para determinar la información del paso g2)

30 descrito anteriormente. En este sentido, a dicho algoritmo de optimización (23) se le suministra el conjunto de los uno o más parámetros de entrada (29), y obtiene el resultado (30) que comprende los valores de las una o más variables de optimización (31) que optimizan la al menos una función de optimización (32) anterior, de manera análoga a lo descrito sobre el algoritmo auxiliar (28).

35

La Figura 9 es una gráfica que muestra un resultado (30) del algoritmo auxiliar empleado en el método de fabricación de imán principal (1) según la Figura 6. En el eje horizontal de la gráfica, los números 1-23 se corresponden con la posición a lo largo del eje longitudinal (8) de cada anillo auxiliar (21) de la Figura 6, de derecha a izquierda. En el eje vertical, los números 1-87 se corresponden con la posición de cada uno de los 87 huecos comprendidos en cada anillo auxiliar (21). Por otro lado, en la gráfica se indica con tres tipos de cuadros si existe o no bloque (22) de material magnético colocado en cada hueco de cada anillo auxiliar (21) y, en caso de existir, la orientación y sentido de la magnetización de dicho bloque (22). Según lo explicado anteriormente, los cuadrados blancos se corresponden con la situación "Magnetización Halbach", los cuadrados negros se corresponden con la situación "Magnetización anti-Halbach", y los cuadrados con una cruz se corresponden con la situación "No-bloque".

Así pues, a continuación se describen algunos pasos de una realización no limitativa del método de fabricación del imán principal (1) de la Figura 6. Tras apilar los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo de un eje longitudinal (8) en el paso f) y antes de disponer el sistema de gradientes (5) en el paso k), se determina en el paso g1) la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2). En particular, se mide experimentalmente la amplitud del campo magnético del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2), concretamente en la región de la cavidad (2) que abarcará eventualmente el FoV (20) del escáner de MRI (3) de la Figura 2. A partir de la medición anterior, se determina la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en la región de la cavidad (2) que abarcará eventualmente el FoV (20). Dicha homogeneidad se desvía del valor esperado teóricamente, debido a las desviaciones inherentes a la fabricación del imán principal.

A continuación, se determina en el paso g2) la orientación de la magnetización de cada bloque (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21), que incrementan la homogeneidad determinada en el paso g1) hasta un valor de la homogeneidad deseado, de manera que en el paso i3) se colocan bloques (22) de material magnético permanente en los huecos de los anillos auxiliares (28), de acuerdo con la información determinada en el paso g2). En particular, en el método de fabricación del imán principal de la Figura 6, la información determinada en el paso g2) es el resultado (30) de la Figura 9, determinado por un algoritmo auxiliar (28). A continuación, en el paso i4) se disponen los anillos auxiliares (21) a lo largo de un eje longitudinal (8) y se colocan en la porción central (14) del imán principal (1), de modo que la unidad de ajuste fino (18)

atraviesa la sección hueca (12) de cada anillo central (10) del imán principal (1). En esta realización particular, antes de realizar el paso i4), se retiran los anillos exteriores (9) del imán principal (1) de uno de los extremos, puesto que el tamaño de las secciones huecas (11) de dichos anillos exteriores (9) impide introducir la unidad de ajuste fino (19) en el interior de la cavidad (2).

Tras realizar el paso i4) se apilan de nuevo los anillos exteriores (9) que se habían retirado previamente. Finalmente, tras disponer la unidad de ajuste fino (18) de la Figura 6 en la cavidad del imán principal (1), se dispone el sistema de gradientes magnéticos (5) de la Figura 2 en el paso k), de manera que dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca toda la longitud del imán principal (1).

REIVINDICACIONES

1.- Un imán principal (1) basado en conjuntos elípticos de dipolo Halbach, configurado para generar el campo magnético principal B_0 de un escáner de MRI (3),

5 donde:

- dicho imán principal (1) comprende una pluralidad de anillos (9, 10) apilados a lo largo de un eje longitudinal (8), desde un primer extremo (6) del imán principal (1) hasta un segundo extremo (7) del imán principal (1), de manera que cada extremo (6, 7) del imán principal (1) comprende uno o más anillos exteriores (9), y la porción central (14) del imán principal (1) comprendida entre el primer extremo (6) y el segundo extremo (7) del mismo comprende uno o más anillos centrales (10);

- cada anillo (9, 10) exterior y central comprende una pluralidad de huecos (13), donde cada hueco (13) aloja un bloque (19) de material magnético permanente;

15 - cada anillo (9, 10) exterior y central comprende una sección hueca (11, 12), donde las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales forman una cavidad (2) interior del imán principal (1);

- en cada anillo (9, 10) exterior y central, los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos radialmente respecto al centro de dicho anillo (9, 10) en un conjunto de una pluralidad de capas (9', 9'', 10', 10''), donde cada capa (9', 9'', 10', 10'') describe sustancialmente una elipse, teniendo dicha elipse un eje menor, y un eje mayor perpendicular a dicho eje menor y de longitud mayor que la del eje menor;

20 - los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales son sustancialmente paralelos entre sí; y

25 - en cada capa (9', 9'', 10', 10''), los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach, de manera que los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) exteriores y centrales generan el campo magnético principal B_0 en la cavidad (2) del imán principal (1);

estando el imán principal (1) **caracterizado por que:**

30 la cavidad (2) está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos (5) que se extiende a lo largo del eje longitudinal (8), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal (1).

35 2.- El imán principal (1) según la reivindicación anterior, donde el sistema de gradientes magnéticos (5) se extiende desde el primer extremo (6) del imán principal (1)

hasta el segundo extremo (7) del imán principal (1), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca toda la longitud del imán principal (1).

3.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde
5 los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos, en cada anillo (9, 10) exterior y central, de forma que la dirección del campo magnético principal B_0 generado en la cavidad (2) por los conjuntos elípticos de dipolo Halbach de los anillos (9, 10) exteriores y centrales es sustancialmente paralela a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de dichos anillos (9, 10).

10

4.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende adicionalmente una unidad de ajuste fino (18) configurada para ajustar la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en la cavidad (2), donde:

- la unidad de ajuste fino (18) comprende una pluralidad de anillos auxiliares (21),
15 apilados a lo largo de un eje longitudinal (8) en la porción central (14) del imán principal (1), de modo que la unidad de ajuste fino (18) atraviesa la sección hueca (12) de cada anillo central (10) del imán principal (1);

- cada anillo auxiliar (21) comprende una pluralidad de huecos, donde cada hueco está vacío o contiene en su interior un bloque (22) de material magnético permanente;

20

- cada anillo auxiliar (21) comprende una sección hueca;

- en cada anillo auxiliar (21), los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos radialmente respecto al centro del anillo auxiliar (21) en un conjunto de una o más capas, donde cada capa describe sustancialmente una elipse, teniendo dicha elipse un eje menor, y un eje mayor perpendicular a dicho eje menor y de longitud mayor
25 que la del eje menor; y

- los ejes menores de las elipses de las capas de bloques (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21) son sustancialmente paralelos a los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales.

30

5.- El imán principal (1) según la reivindicación anterior, donde los bloques (19) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y los bloques (22) de los anillos auxiliares (21) están compuestos por exactamente el mismo material magnético permanente.

35

6.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la dirección de la magnetización de cada bloque (19) de material magnético permanente

de los anillos (9, 10) exterior y central es, sustancialmente, perpendicular al eje longitudinal (8) del imán principal (1).

7.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde:

5 - los bloques (19, 22) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y/o de los anillos auxiliares (21) están compuestos de una aleación de samario-cobalto (Sm-Co) o de una aleación de neodimio-hierro-boro (Nd-Fe-B); y/o son bloques (19, 22) de material magnético permanente de una pieza;

10 - al menos en un mismo anillo (9, 10) exterior o central, los bloques (19) de material magnético permanente tienen igual forma geométrica, material magnético permanente y tamaño;

15 - los ejes menores de las elipses de las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales son sustancialmente paralelos o sustancialmente perpendiculares a una superficie en la que yace el imán principal (1);

 - en las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19, 22) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y/o de los anillos auxiliares (21), la longitud del eje mayor de la elipse que describe cada capa (9', 9'', 10', 10'') es mayor que la longitud del eje menor; y/o

20 - el cociente entre la longitud del eje menor y la longitud del eje mayor es sustancialmente igual en todas las elipses descritas por las capas (9', 9'', 10', 10'') de bloques (19, 22) material magnético permanente de todos los anillos (9, 10) exteriores y centrales y/o de todos los anillos auxiliares (21).

25 8.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la forma geométrica de los bloques (19, 22) de material magnético permanente de los anillos (9, 10) exteriores y centrales y/o de los anillos auxiliares (21) es cúbica.

9.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde

30 - en al menos un anillo exterior (9) y en la capa (9') más cercana al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de dicho anillo exterior (9), los bloques (19) de material magnético de dicha capa (9') se encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre cada bloque (19) y el contorno exterior del sistema de gradientes magnéticos (5) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm;

35 - los bloques (19) de material magnético de al menos un anillo (9, 10) exterior y/o central del imán principal (1) de la capa (9', 10') más cercana al eje longitudinal (8), se

encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre cada bloque (19) y el perímetro interior de dicho anillo (9,10) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm;

5 - los bloques (19) de material magnético de al menos un anillo (9, 10) exterior y/o central del imán principal (1) de la capa (9'',10'') más alejada del eje longitudinal (8), se encuentran dispuestos de manera que la distancia de separación entre cada bloque (19) y el perímetro exterior de dicho anillo (9,10) es sustancialmente igual o inferior a 1 mm;

10 - en los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1), los bloques (19) de material magnético permanente contiguos de una misma capa (9', 9'', 10', 10''), se encuentran dispuestos a una distancia de separación sustancialmente igual o inferior a 1 mm;

- en los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1), los bloques (19) de material magnético permanente contiguos de dos capas (9',9'',10',10'') distintas y consecutivas de un mismo anillo (9,10), se encuentran dispuestos a una distancia de separación sustancialmente igual o inferior a 1 mm; y/o

15 - en los anillos (9, 10) exteriores y/o centrales del imán principal (1), los bloques (19) de material magnético permanente contiguos de dos anillos (9, 10) distintos y consecutivos a lo largo del eje longitudinal (8), se encuentran dispuestos a una distancia longitudinal de separación sustancialmente igual o inferior a 4 mm.

20 10.- El imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, donde la amplitud del campo magnético principal B_0 en al menos una región de la cavidad (2) es menor que 0,1 T.

25 11.- Un escáner de MRI (3) que comprende el imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, un sistema de gradientes magnéticos (5) y un sistema de RF (4), donde:

- la cavidad (2) del imán principal (1) está configurada para alojar el sistema de RF (4) y el sistema de gradientes magnéticos (5);

30 - el imán principal (1) está configurado para generar el campo magnético principal B_0 en la cavidad (2);

- el sistema de gradientes (5) está configurado para aplicar al menos un gradiente magnético en la cavidad (2); y

35 - el sistema de RF (4) está configurado para aplicar un campo de RF en una muestra situada en la cavidad (2) y para recibir una señal de resonancia magnética procedente de dicha muestra.

12.- Un método de fabricación del imán principal (1) según cualquiera de las reivindicaciones 1-10, donde el método comprende los siguientes pasos, realizados en cualquier orden técnicamente posible:

- a) proporcionar los anillos (9, 10) exteriores y centrales;
- 5 b) formar los huecos (13) de los anillos (9) exteriores perforando los mismos, de manera que dichos huecos (13) están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo (9) exterior (9);
- c) colocar bloques (19) de material magnético permanente en el interior de los huecos (13) de los anillos exteriores (9), de manera que dichos bloques (19) de material
10 magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una o más capas (9', 9''), donde en cada capa (9', 9'') los bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach;
- d) formar los huecos (13) de los anillos centrales (10) perforando los mismos, de manera que dichos huecos (13) están dispuestos radialmente respecto al centro de cada
15 anillo central (10);
- e) colocar bloques (19) de material magnético permanente en el interior de los huecos (13) de los anillos centrales (10), de manera que dichos bloques (19) de material magnético permanente están dispuestos en un conjunto de una o más capas (10', 10''), donde en cada capa (10', 10'') los bloques (19) de material magnético permanente están
20 dispuestos en un conjunto elíptico de dipolo Halbach; y
- f) apilar los anillos (9, 10) exteriores y centrales a lo largo de un eje longitudinal (8), estando el método **caracterizado por que** el método, después del paso f), la cavidad (2) que forman las secciones huecas (11, 12) de los anillos (9, 10) exteriores y centrales está adaptada para alojar un sistema de gradientes magnéticos (5) que se extiende a lo largo
25 del eje longitudinal (8), y donde dicho sistema de gradientes magnéticos (5) abarca al menos un 70% de toda la longitud del imán principal (1).

13.- El método según la reivindicación anterior, donde, después del paso f), el método comprende el paso k) de disponer el sistema de gradientes (5) en la cavidad (2)
30 del imán principal (1).

14.- El método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores 12-13 que comprende, antes o después del paso f), los siguientes pasos realizados en cualquier orden técnicamente posible:

- i1) proporcionar una pluralidad de anillos auxiliares (21) de una unidad de ajuste fino (18);

i2) formar huecos de los anillos auxiliares (21) perforando los mismos, de manera que dichos huecos están dispuestos radialmente respecto al centro de cada anillo auxiliar (21); e

i3) colocar bloques (22) de material magnético permanente en el interior de los huecos de los anillos auxiliares (21), de manera que cada hueco está vacío o contiene en su interior un bloque (22) de material magnético permanente;

donde, adicionalmente, el método comprende el siguiente paso después del paso f):

i4) disponer los anillos auxiliares (21) a lo largo de un eje longitudinal (8) y colocarlos en la porción central (14) del imán principal (1), de modo que la unidad de ajuste fino (18) atraviesa la sección hueca (12) de cada anillo central (10) del imán principal (1).

15.- El método según la reivindicación anterior, donde después del paso f) y antes de los pasos i2) y/o i3), el método comprende los siguientes pasos, realizados en cualquier orden técnicamente posible:

g1) determinar la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2);

g2) determinar la orientación de la magnetización de cada bloque (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21), y/o la forma geométrica y/o el tamaño de cada bloque (22) de material magnético permanente de los anillos auxiliares (21), que incrementan la homogeneidad del campo magnético principal B_0 determinado en el paso g1) hasta un valor de la homogeneidad deseado;

de manera que se forman los huecos de los anillos auxiliares (21) en el paso i2) y/o se colocan bloques (22) de material magnético permanente en el paso i3) de acuerdo con la información determinada en el paso g2).

16.- El método según cualquiera de las reivindicaciones 12-15 donde, antes de formar los huecos (13) de los anillos centrales (10) en el paso d), el método comprende el paso de:

h) determinar, por medio de un algoritmo de optimización (23), la forma geométrica, el tamaño y/o la composición de los bloques (19) de material magnético permanente de los anillos centrales (10), y/o las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de cada capa (10', 10') de bloques (19) de material magnético permanente de los anillos centrales (10), que hacen máxima la homogeneidad del campo magnético principal B_0 en una región de la cavidad (2);

de manera que se forman los huecos (13) en el paso d) y/o se colocan bloques (19) de material magnético permanente en el paso e) de acuerdo con la información determinada por el algoritmo de optimización (23) en el paso h).

5 17.- El método según la reivindicación anterior, donde:

- en la determinación del paso h), el algoritmo de optimización (23) optimiza al menos una función de optimización (27) no lineal;

- el algoritmo de optimización (23) es un algoritmo de evolución diferencial o un algoritmo genético;

10 - para cada anillo central (10), el algoritmo de optimización (23) impone al menos una cota inferior a las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de la capa (10') de bloques (19) de material magnético permanente más cercana a dicho eje longitudinal (8); y/o

15 - para cada anillo central (10), el algoritmo de optimización (23) impone al menos una cota superior a las distancias al eje longitudinal (8) del imán principal (1) de la capa (10'') de bloques (19) de material magnético permanente más alejada de dicho eje longitudinal (8).

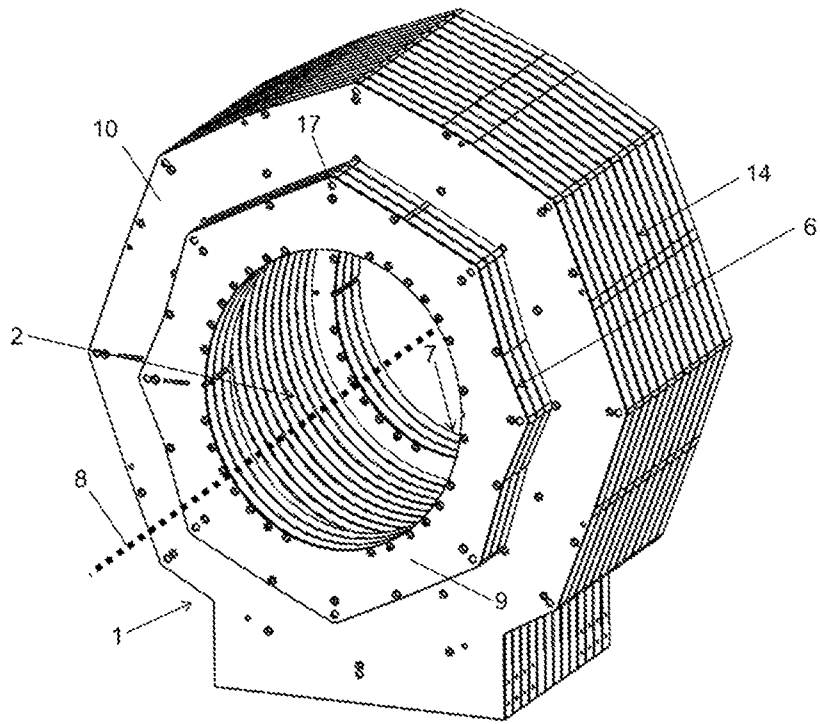


FIG. 1

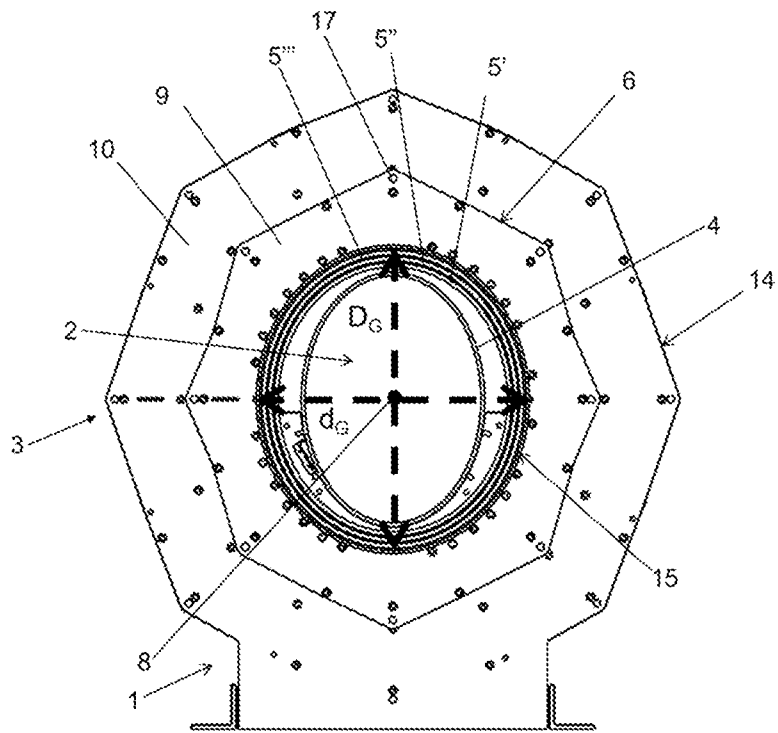


FIG. 2

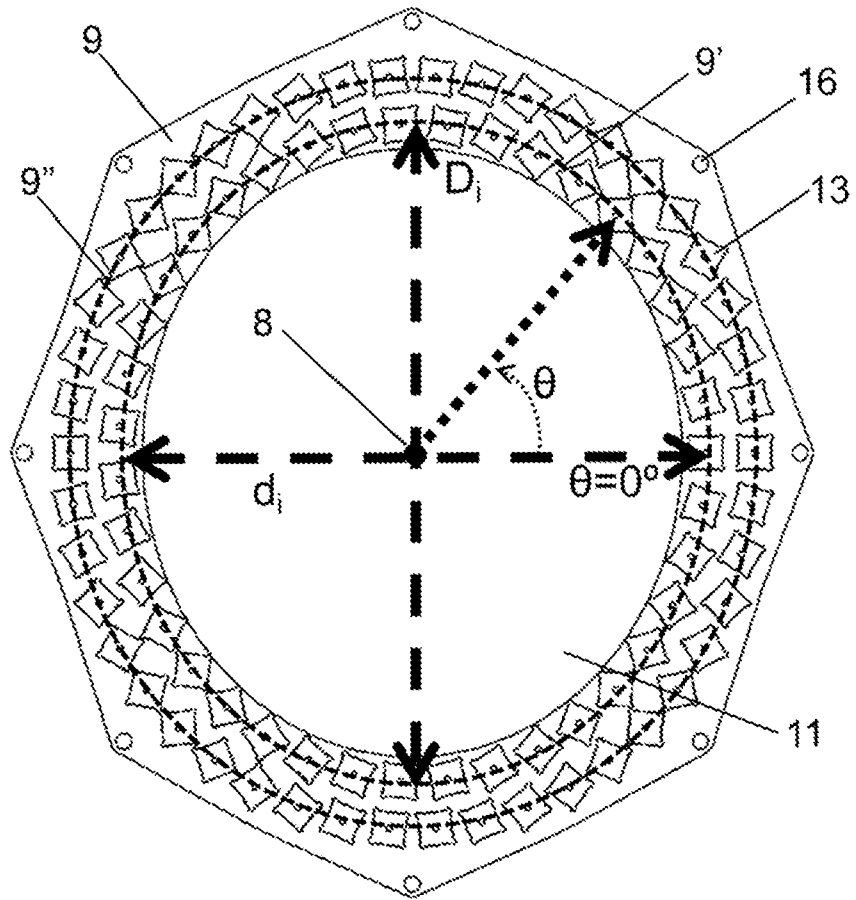


FIG. 3a

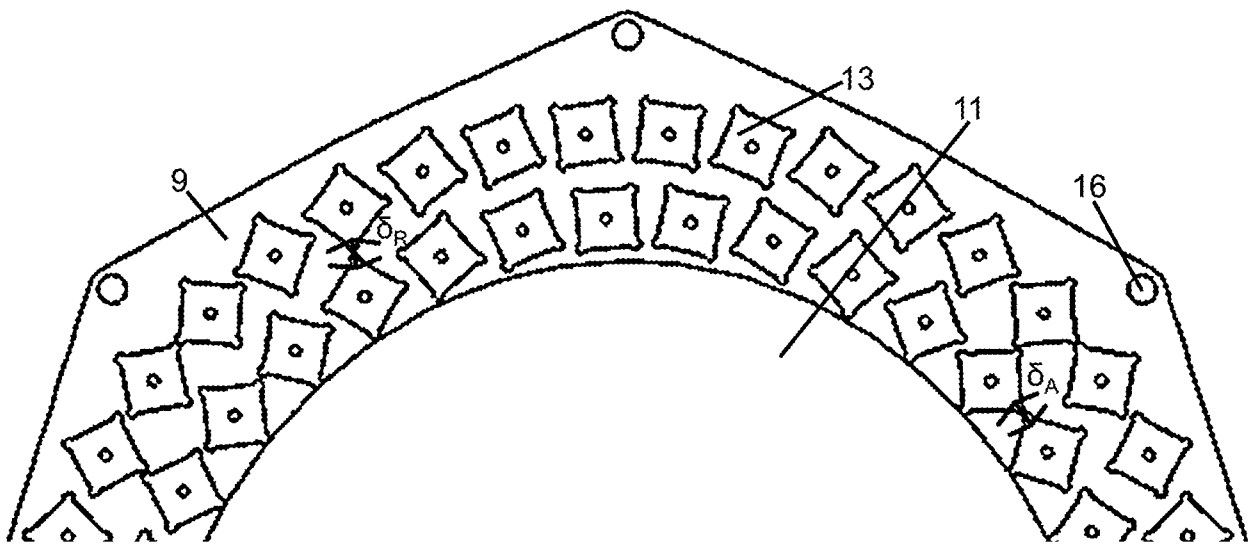


FIG. 3b

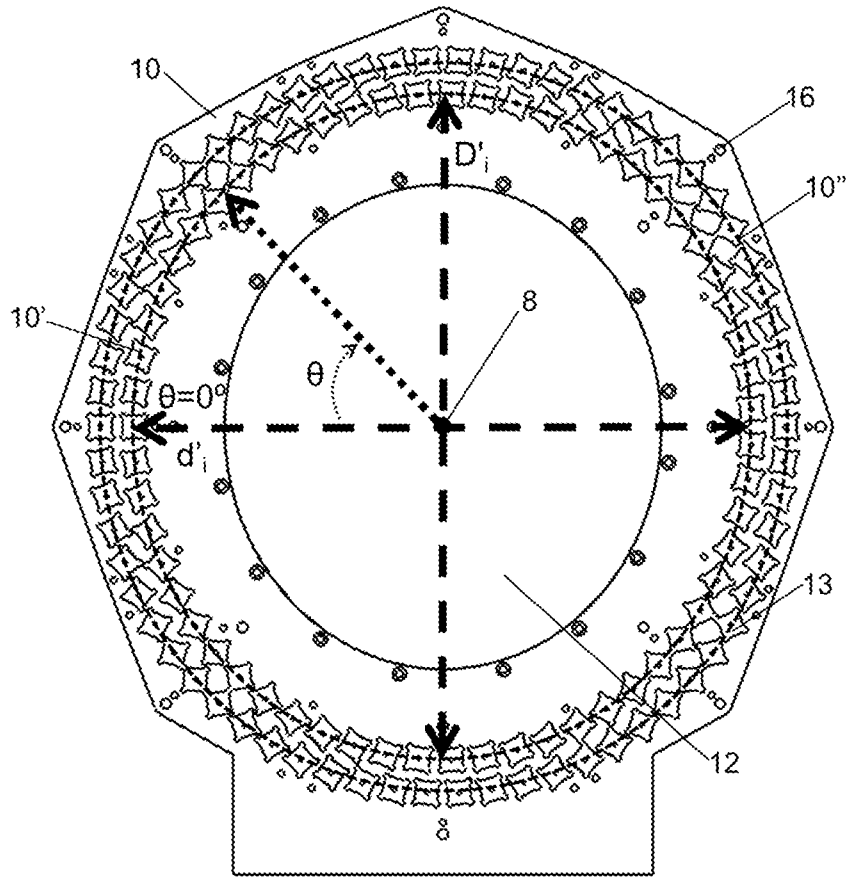


FIG. 4

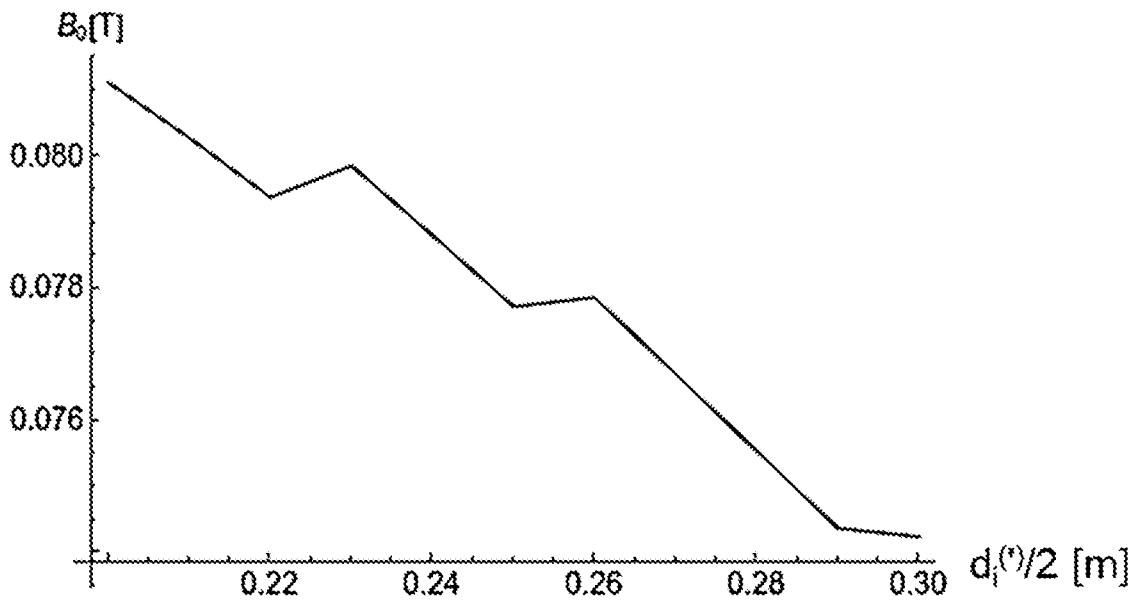


FIG. 5

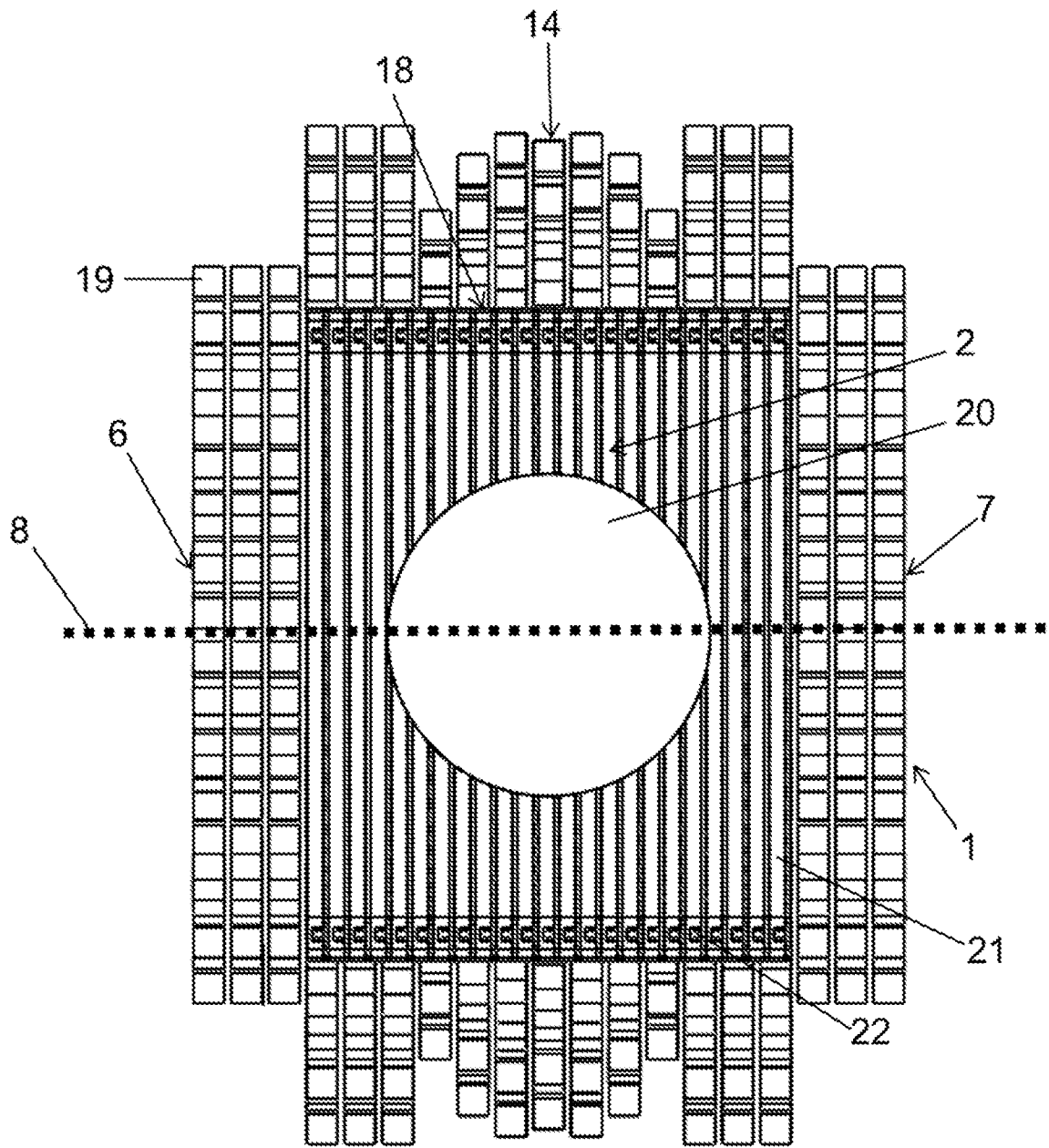


FIG. 6

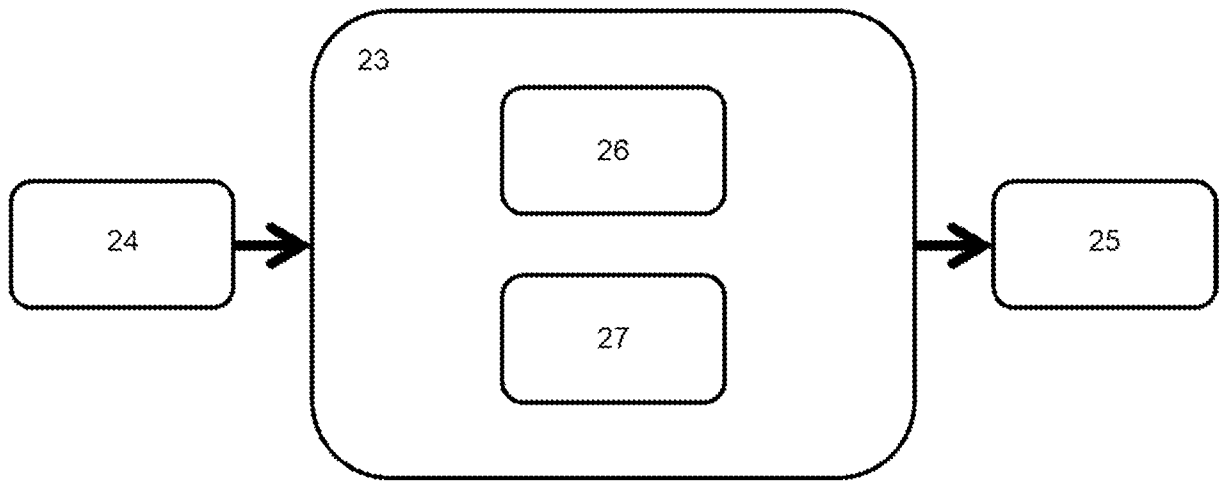


FIG. 7

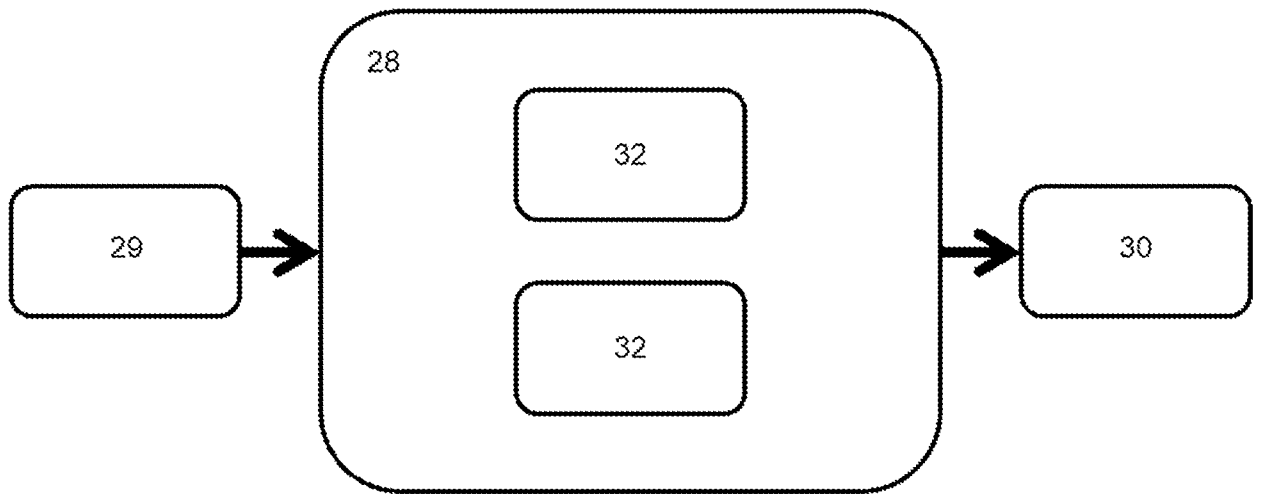


FIG. 8

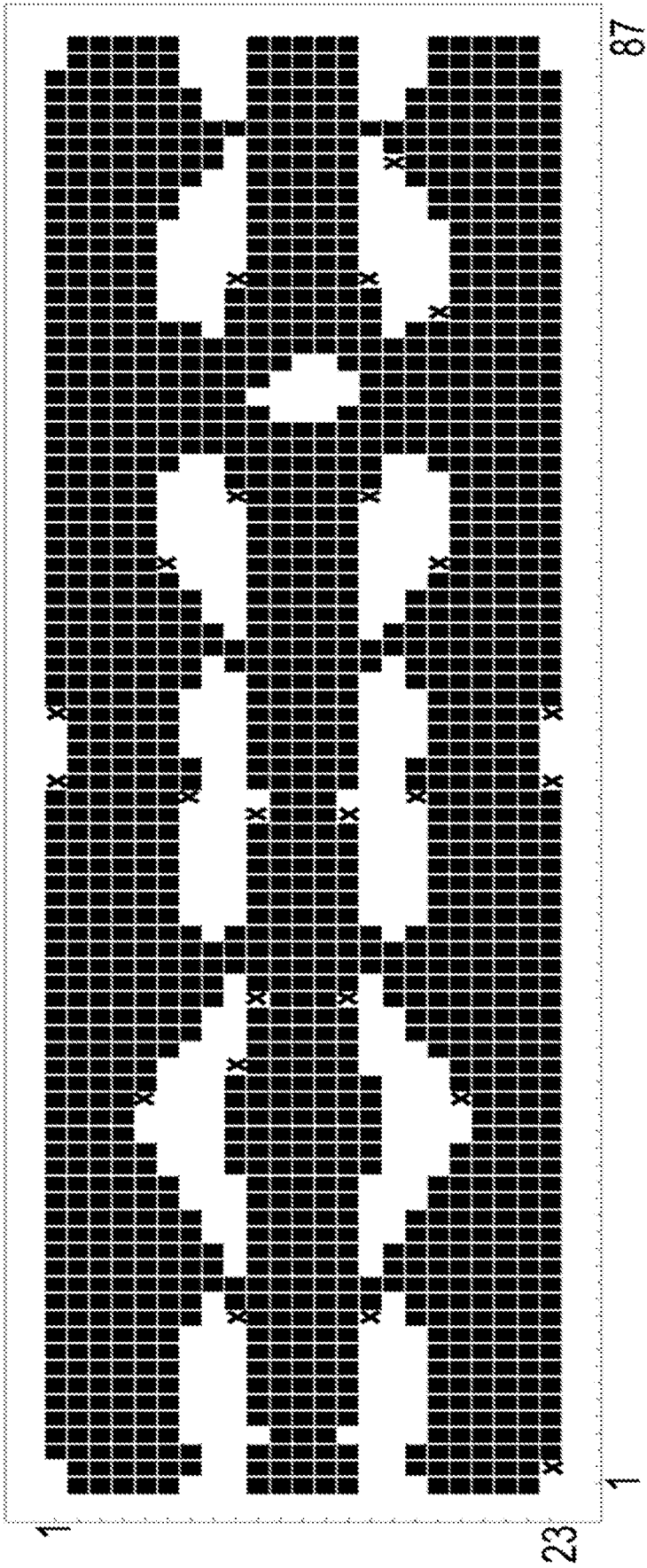


FIG. 9



- ②1 N.º solicitud: 202330761
②2 Fecha de presentación de la solicitud: 08.09.2023
③2 Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. ci.: **G01R33/383** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
X	CN 116580917 A (UNIV HONG KONG) 11/08/2023, resumen de la base de datos WPI, recuperado de EPOQUE [recuperado el 11-04-2024]; figuras 1, 6; reivindicaciones 9, 20-21.	1-3, 6-13, 16-17
Y		4-5, 14-15
Y	US 2018313920 A1 (SOTGIU, ANTONELLO) 01/11/2018, párrafos [0008], [0010 - 0011], [0017 - 0019], [0023], [0032 - 0045]; reivindicación 6; figuras 1 - 2, 4 y 6.	4-5, 14-15
Y	CN 116052978 A (SHENZHEN ACAD AEROSPACE TECH et al.) 02/05/2023, resumen de la base de datos WPI, recuperado de EPOQUE [recuperado el 11-04-2024]; figuras; reivindicaciones.	4-5, 14-15
A	US 2022276328 A1 (GALLAGHER, NEAL et al.) 01/09/2022, resumen; figuras 4 - 14; párrafos [0139 - 0209].	1-17
A	US 2009289632 A1 (BLUEMLER, PETER et al.) 26/11/2009, párrafos [0010], [0034]; figuras.	1-17

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones n.º:

Fecha de realización del informe
11.04.2024

Examinadora
E. Pina Martínez

Página
1/2

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G01R, H01F

Bases de datos electrónicas consultadas durante la búsqueda (nombre de la base de datos y, si es posible, términos de búsqueda utilizados)

INVENES, EPODOC, WPI, INSPEC, XPAIP, XPESP, XPI3E, XPI3ES, XPIEE, XPMISC, XPOAC