

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 987 253**

51 Int. Cl.:

H01F 7/06 (2006.01)

H01F 7/20 (2006.01)

H05H 13/04 (2006.01)

H05H 7/04 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **13.05.2022** **PCT/EP2022/063074**

87 Fecha y número de publicación internacional: **24.11.2022** **WO22243200**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.05.2022** **E 22729502 (9)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **03.07.2024** **EP 4179553**

54 Título: **Electroimán multipolo**

30 Prioridad:

18.05.2021 FR 2105166

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

14.11.2024

73 Titular/es:

**SYNCHROTRON SOLEIL (100.0%)
CEA SaclayL'Orme des Merisiers
91190 St Aubin, FR**

72 Inventor/es:

**ALEXANDRE, PATRICK y
BEN EL FEKIH, RACHID**

74 Agente/Representante:

DEL VALLE VALIENTE, Sonia

ES 2 987 253 T3

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

DESCRIPCIÓN

Electroimán multipolo

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a un electroimán multipolar. También se refiere a un procedimiento implementado con un electroimán de este tipo.

- 10 Tal electroimán permite a un usuario generar un campo magnético. El campo de la invención es más particularmente el de los aceleradores de partículas.

Estado de la técnica anterior

- 15 Con referencia a la Figura 1, una fuente de radiación de sincrotrón se compone generalmente de un anillo de almacenamiento (AA) en el que circulan continuamente paquetes 106 de partículas cargadas. Las partículas utilizadas en la mayoría de las máquinas en funcionamiento en el mundo son electrones. Las energías de trabajo de estos anillos de almacenamiento generalmente están entre 1 y 8 GeV.

- 20 Un anillo de almacenamiento consiste, como mínimo, en una sucesión periódica de imanes de curvatura (imanes dipolares) e imanes de focalización (imanes cuadrupolares). También se instalan imanes de orden superior (imanes sextupolares, octupolares, etc.) para corregir defectos de focalización de orden superior (cromaticidad, por ejemplo). Esta sucesión de imanes se denomina "malla".

- 25 Cuando los electrones son desviados por los imanes de curvatura, pierden parte de su energía en forma de radiación de sincrotrón, radiación caracterizada por una amplia gama espectral que se extiende normalmente desde el infrarrojo hasta los rayos X duros y por un elevado flujo de fotones. Esta radiación de sincrotrón es entonces utilizada por los diferentes laboratorios (denominados líneas de luz) instalados alrededor del anillo de almacenamiento. También se produce radiación de sincrotrón a partir de otros tipos de imanes denominados inserciones magnéticas, generalmente constituidas por una gran sucesión de pequeños imanes dipolares.

- 30 Los paquetes de electrones almacenados en el anillo de almacenamiento no tienen una vida útil infinita. Se pierden poco a poco debido a dos fenómenos principales: interacciones entre electrones (efecto Touschek cuya explicación se da a continuación) y choques con moléculas de gas residuales (porque los electrones circulan en cámaras de ultravacío). Por lo tanto, para garantizar un flujo constante de fotones en las estaciones experimentales de las líneas de luz, es importante mantener una corriente constante de electrones en la máquina.

- 35 El proceso de reinyección continua se denomina inyección o reinyección "continua para mantener una corriente almacenada prácticamente constante" (también denominada inyección "Top-Up" en lo sucesivo) y el siguiente esquema, tradicional, de la Figura 1, se implementa en la mayoría de los anillos de almacenamiento de 3ª generación. El esquema se basa en cuatro imanes deflectores/desviadores 101, 102, 103, 104 magnéticos rápidos (también denominados imanes kickers 101, 102, 103, 104 en lo sucesivo en este documento) y un imán 108 de tipo septum pasivo 109. Estos imanes kickers 101, 102, 103, 104 son electroimanes dipolares simples, generalmente constituidos por una espira de uno o dos devanados en un circuito magnético de ferrita y alimentados por corriente eléctrica pulsada de forma semisinusoidal o trapezoidal. La alimentación pulsada de corriente permite la generación de campos magnéticos breves y, por lo tanto, la desviación rápida de electrones, en algunas revoluciones de un anillo de almacenamiento.

- 40 El imán 108 de tipo septum pasivo también es un electroimán dipolar y su característica principal es que su distribución transversal de campo magnético tiene dos zonas: una primera zona, donde el campo magnético es intenso para permitir la desviación final de los haces inyectados 107 (es decir, el entrehierro (también denominado gap) del imán), y una zona muy cercana donde el campo magnético es casi nulo, para no perturbar el haz almacenado 106. La separación entre las dos zonas de campo magnético se realiza con una lámina física: el septum 109.

- 45 La trayectoria normal del haz almacenado se da según la línea de puntos 105. Durante una inyección, los cuatro kickers 101, 102, 103, 104 se alimentan con corriente pulsada, generando así una desviación de órbita cerrada: se trata de la órbita representada en la línea de puntos 106, con los paquetes ya almacenados. La desviación hace "lamer" los paquetes almacenados en el borde interior del septum 109.

- 50 En el máximo de esta desviación de órbita cerrada, los electrones a inyectar llegan bien desde un anillo sincrotrón elevador de energía (ASEE) también denominado anillo acelerador o booster, o bien desde un acelerador lineal, (trayectoria en línea de puntos de los paquetes 107) y sufren una última desviación en el entrehierro del imán de tipo septum pasivo 108. A la salida del imán 108 de tipo septum pasivo, los paquetes inyectados 107 están separados por tanto de los paquetes almacenados 106 por el espesor del septum 109 (sin contar los márgenes técnicos).

65

Los dos últimos kickers (103 y 104) llevan obviamente los haces 106, 107 hacia el eje normal de la máquina. El haz inyectado 107, que es ligeramente excéntrico, inicia una oscilación betatrónica de amplitud relativamente grande alrededor del haz almacenado 106. El haz inyectado 107 se amortiguará entonces vuelta tras vuelta en el haz almacenado 106. De este modo se consigue acumular corriente en un anillo de almacenamiento.

Para comprender algunos inconvenientes sobre la inyección “Top-up” según el estado de la técnica, es necesario definir algunos parámetros sobre los haces de electrones. El movimiento de cada electrón se caracteriza por 6 magnitudes:

[Matemáticas 1]

$$(x; x'; z; z'; s; \delta)$$

Las magnitudes x , z y s representan las posiciones transversales de un electrón (x y z) y su posición longitudinal en el anillo de almacenamiento (s). Las magnitudes x' y z' son las divergencias angulares del electrón con respecto a la trayectoria ideal (es decir, la proyección del vector velocidad del electrón en los ejes X y Z). La letra “delta” es el error de energía del electrón con respecto a la energía de trabajo (o nominal) del anillo de almacenamiento.

Utilizando estos parámetros y para hacer representaciones del movimiento de los electrones, se utiliza con frecuencia la noción de espacio de las fases. Se representa en un gráfico, por ejemplo, como se ilustra en la Figura 2, en la abscisa la posición x y en la ordenada la divergencia x' , en una posición z y s dadas del haz.

En la Figura 2 se observan posiciones y divergencias de ocho electrones representados por puntos. Por extensión, cuando se inyecta un gran número de partículas (un paquete de electrones normalmente contiene 10^{11} electrones), se recorrerán todas las posiciones estables x y x' , obteniendo así el contorno (elipse de la Figura 2) cuya área se denomina emitancia (aquí horizontal) del haz de electrones.

Los espacios de las fases se utilizan con frecuencia para representar los mecanismos de inyección, tal y como se describirán más adelante.

Una última magnitud importante en el estudio de esquemas de inyección “Top-Up” es la abertura dinámica. En la primera aproximación, la abertura dinámica corresponde al conjunto de posiciones transversales estables en el anillo de almacenamiento en las que se puede colocar un haz inyectado 107. Un haz de partículas inyectado en estas posiciones iniciará una oscilación betatrónica y luego se amortiguará vuelta tras vuelta en la posición de un haz almacenado.

El haz almacenado 106 está lógicamente en el centro de la abertura dinámica.

La desviación de órbita por los cuatro kickers 101-104 desplaza la abertura dinámica hacia el septum 109.

El haz inyectado 107 se encuentra en la abertura dinámica en una zona estable.

El haz almacenado 106 se encuentra efectivamente en su eje centrado, con el haz inyectado 107 oscilando alrededor del haz almacenado 106. En ausencia de una desviación de órbita cerrada por los cuatro kickers 101-104, el borde interior del septum 109 está lo suficientemente lejos del haz almacenado 106 (normalmente una veintena de milímetros): esta posición no afecta al haz almacenado 106, debido a las pérdidas de electrones por efecto Touschek: se trata de intercambios de energía aleatorios entre los electrones dentro de un mismo paquete. Aquellos que tienen un defecto o exceso de energía demasiado grande oscilarán entonces a mayor o menor amplitud a lo largo del anillo de almacenamiento. Si las paredes de las cámaras de vacío (y, por lo tanto, del septum, que es una barrera física) están demasiado cerca de los paquetes de electrones, corren el riesgo de interceptar estas partículas “Touschek” y, por lo tanto, será necesario reinyectar electrones con más frecuencia. La vida útil por el efecto Touschek es uno de los parámetros fundamentales del diseño de los anillos de almacenamiento.

La desviación de órbita por los cuatro kickers 101-104 se hace necesaria por el hecho de que no se puede dejar una limitación física (el septum 109) cerca del haz almacenado 106 permanentemente: la vida útil del haz se reduciría considerablemente, como se ha explicado anteriormente.

En conclusión, para inyectar en Top-Up con un esquema de cuatro kickers 101-104:

- el haz almacenado 106 se desplaza lo más cerca posible del septum 109 utilizando una desviación de órbita generada por cuatro imanes kickers 101-104,
- el haz inyectado 107 se aproxima lo más posible al haz almacenado 106 y entra así en la abertura dinámica,

- cuando se reduce la desviación de órbita cerrada, los dos haces 106, 107 vuelven hacia el eje normal del anillo de almacenamiento, lejos del borde del septum 109.

Normalmente, la generación de la desviación de órbita cerrada por los cuatro kickers 101-104 dura varias vueltas del anillo de almacenamiento (es decir, varios microsegundos (μs)) y su reducción dura lo mismo.

Por su modo de funcionamiento, este esquema se denomina “fuera de eje” (porque el haz inyectado 107 no se inyecta directamente en el eje del haz almacenado 106) y “a la energía de trabajo del anillo de almacenamiento (o nominal)” (“on-momentum”) porque el haz inyectado 107 tiene la misma energía que el haz almacenado 106.

Las desventajas del esquema de inyección Top-Up de la Figura 1 con imanes kickers 101-102 son las siguientes:

- un límite del esquema de inyección Top-Up con 4 imanes kickers 101-104 es la falta de identidad magnética de los imanes. Este defecto implica que la desviación de órbita del haz almacenado 106 durante la inyección no está perfectamente cerrada y, por consiguiente, todo el haz almacenado 106 oscilará ligeramente hasta estabilizarse nuevamente después de unos pocos miles de revoluciones,

- esta oscilación global del haz almacenado 106 a causa de la inyección Top-Up induce una oscilación del flujo de fotones en las líneas de luz, lo que perjudica algunos experimentos que requieren un tiempo de adquisición muy corto o que buscan analizar muestras nanométricas,

- a pesar del cuidado puesto en la realización y del ajuste de los imanes kickers 101-104, las mejores inyecciones Top-Up difícilmente logran obtener oscilaciones residuales del haz almacenado 106 inferiores a algunas decenas o centenas de micrómetros eficaces (en el sentido de la raíz cuadrática media), siendo el orden de magnitud de las estabilidades de los haces almacenados el micrómetro para las máquinas actuales, e inferior al micrómetro para las máquinas futuras.

El esquema de inyección Top-Up con cuatro kickers 101-104 ya no es necesariamente deseable en los nuevos anillos de almacenamiento (4ª generación) porque las líneas de luz ya no desean ninguna perturbación en su flujo de fotones debido a la reinyección, especialmente debido a los nuevos métodos de experimentación e instrumentación que requieren tiempos de adquisición muy cortos. Por tanto, la perturbación del haz almacenado por la desviación de órbita cerrada por los cuatro kickers 101-104 ya no debe existir.

Además, es importante tener una abertura dinámica relativamente grande que permita contener el haz almacenado, el espesor de la lámina del septum y el haz inyectado (así como los márgenes técnicos obvios). Los imanes de tipo septum pasivo con septums finos (1 milímetro o menos) son difíciles de diseñar porque las tensiones en el campo magnético de fuga, es decir, el campo residual en la zona donde está situado el haz almacenado, son muy severas.

Ahora bien, las máquinas de 4ª generación utilizan numerosos imanes de orden elevado con un fuerte campo magnético (sextúpolos, octúpolos, dodecápolos, etc.), lo que tiene como consecuencia nefasta reducir considerablemente la abertura dinámica. A pesar de las optimizaciones no lineales de estas nuevas máquinas, las interesantes aberturas dinámicas (donde el rendimiento de inyección supera el 75 %) apenas superan los 4 a 5 mm (en lugar de las aberturas dinámicas entre 10 y 40 mm en las máquinas actuales).

Un esquema de inyección fuera de eje propuesto por Bessy II (artículo titulado “DEVELOPMENT OF A NON-LINEAR KICKER SYSTEM TO FACILITATE A NEW INJECTION SCHEME FOR THE BESSY II STORAGE RING”, T. Atkinson y col., Proceedings of IPAC2011, San Sebastián, España) utiliza un imán kicker multipolar (o en inglés “Multipole Injection Kicker” o MIK). En la literatura también se encuentra el término kicker no lineal (NLK en inglés).

El MIK propuesto por Bessy II consta de 8 conductores 70 cilíndricos colocados paralelos al eje longitudinal de un anillo de almacenamiento. En la Figura 3 se ilustra un esquema.

Cada uno de los conductores 70 se coloca en la parte superior de uno de dos cuadrados cuyo centro se coloca en el haz almacenado. Estos conductores 70 están alineados en dos diagonales 881, 882 comunes a los dos cuadrados y que se cruzan en el centro de la cámara 300. En la Figura 3, los conductores externos 70, 702 del más grande de los dos cuadrados son recorridos por una corriente que va en un sentido, los conductores internos 70, 701 del más pequeño de los dos cuadrados son recorridos por la misma corriente, pero en el sentido opuesto. Los conductores están encastrados en la cámara de vacío 300 en material aislante. Los electrones circulan por el interior al centro de esta cámara de vacío 300.

El imán de la Figura 3 genera a priori el mapa de campo magnético de la Figura 4 para una corriente de 1 kiloamperio (1 kA). Se constata que esta componente magnética vertical B_z (según el eje vertical de la Figura 3), que permite desviar electrones en el plano horizontal, posee en su centro un punto 100 de campo magnético cero, interesante para el haz almacenado. Fuera de esta zona, se encuentra un campo magnético que es susceptible de desviarse en la abertura dinámica de los electrones fuera de eje, normalmente los que se inyectarían en Top-Up. Se distinguen unos

picos 110, 120 de campo magnético donde la variación del campo con respecto al eje X es baja (picos), y unas zonas 130 donde estas variaciones son altas (gradientes fuertes).

5 El uso de unos MIK parece ser ideal para la inyección en estos nuevos anillos de almacenamiento con una abertura dinámica muy reducida.

Sin embargo, este tipo de imán MIK tiene las siguientes limitaciones o inconvenientes.

10 La primera dificultad proviene de los propios haces inyectados: estos generalmente se generan con la ayuda de un booster, es decir, un acelerador que hace que los electrones de baja energía suban a la energía de trabajo del anillo de almacenamiento. Las mallas de los boosters son en general bastante clásicas, lo que confiere a los haces a inyectar una gran emitancia horizontal. Normalmente, la emitancia del haz a la salida del booster es, por ejemplo, de aproximadamente 140 nm.rad, en comparación con los 4,3 nm.rad del haz que circula por el anillo de almacenamiento. Concretamente, esto significa que sus dimensiones transversales no son despreciables (los paquetes son transversalmente “anchos”).

15 Si se superponen estos haces inyectados en el mapa de campo de un MIK tipo Bessy II, es posible darse cuenta de que la zona más interesante en relación con el problema de las dimensiones del haz inyectado es el pico del campo magnético, situado alrededor de +/- 10 mm. Las variaciones del campo magnético con respecto a “X” son las más bajas y, por lo tanto, la mayoría de los electrones inyectados recibirían una buena desviación en la abertura dinámica.

20 Desafortunadamente, desviar un haz inyectado 10 mm hacia la abertura dinámica en el MIK (es decir, una coordenada x_{inj} por debajo de 5 mm) requeriría una fuerza magnética significativa que uno o incluso varios MIK no podrían generar razonablemente. Por lo tanto, los haces a la salida del septum deben llegar al MIK más cerca del eje normal y utilizar inevitablemente las zonas de campo magnético donde el gradiente es alto. Como resultado, la desviación en un paquete de electrones de alta emitancia no sería uniforme y, por lo tanto, gran parte de estos electrones no se inyectarían correctamente y, por lo tanto, se perderían.

25 Del mismo modo, para mantener una vida útil por efecto Touschek adecuada, no se puede meter el septum más hacia el interior del anillo de almacenamiento.

30 Por último, para inyectar cerca del eje normal, se debe generar un campo magnético suficientemente intenso (normalmente unas decenas de militeslas, a unos milímetros de la zona de campo cero para el haz almacenado), y por consiguiente se necesita una corriente pulsada de alta intensidad, normalmente de unos miles de amperios.

35 El objetivo de la presente invención es resolver al menos uno de los inconvenientes mencionados anteriormente, y/o proponer un electroimán:

40 - que limite y/o evite una desviación de órbita del haz almacenado durante la inyección, que no estuviera perfectamente cerrada y/o una oscilación del haz almacenado demasiado larga antes de estabilizarse, y/o

- que limite y/o evite una oscilación del flujo de fotones perjudicial para algunos experimentos que requieren un tiempo de adquisición muy corto o que buscan analizar muestras nanométricas, y/o

45 - que permita obtener oscilaciones residuales del haz almacenado inferiores a unas decenas o centenas de micrómetros eficaces,

- que permita desviar más eficazmente un haz inyectado, preferiblemente de gran emitancia, hacia una abertura dinámica funcional y preferiblemente reducida con una fuerza magnética razonable, y/o

50 - que mejore la uniformidad de la desviación en un paquete de electrones de alta emitancia y/o la calidad de inyección de estos electrones, y/o

55 - que permita mantener una abertura mecánica de la cámara de vacío de imán kicker compatible con las restricciones de vida útil por efecto Touschek, y/o

- que permita un ahorro de espacio o reducción de las dimensiones del electroimán, especialmente en comparación con las soluciones de varios imanes kickers dipolares.

60 Descripción de la invención

Este objetivo se logra con un electroimán multipolar que se define en la reivindicación 1, comprendiendo el electroimán multipolar para la inyección de partículas, preferiblemente electrones o positrones:

65 - un conducto hueco, dispuesto para la conducción de partículas al interior de su hueco, extendiéndose este hueco según un eje longitudinal Y,

- una pluralidad de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, (preferiblemente conectados eléctricamente en serie) y dispuestos para conducir corriente eléctrica.

El sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados no es el mismo para todos los conductores cableados.

Preferiblemente, el electroimán puede incluir tanto conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en un primer sentido como conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en un segundo sentido opuesto al primer sentido.

Preferiblemente, los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados pueden ser simétricos con respecto a un primer plano de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco.

Los conductores cableados se distribuyen en varios planos estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano de simetría, incluidos dos planos estructurales principales simétricos con respecto al primer plano de simetría y situados en el exterior del hueco. Cada plano estructural principal lleva conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido y conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

Cada plano estructural principal puede llevar al menos cuatro conductores cableados, y preferiblemente lleva 4, 5 o 14 conductores cableados.

Los dos planos estructurales principales pueden estar separados entre sí a una distancia superior o igual a 7 mm.

Cada plano estructural principal puede comprender únicamente conductores cableados que se sucedan uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el primer sentido y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

Los planos estructurales pueden comprender además dos planos estructurales de ajuste, simétricos con respecto al primer plano de simetría y situados en el exterior del hueco de manera que los planos estructurales principales estén situados entre los planos estructurales de ajuste.

El electroimán según la invención puede comprender medios para desplazar los planos estructurales de ajuste en paralelo y/o perpendicular al primer plano de simetría.

Cada plano estructural de ajuste puede llevar al menos o exactamente 1, 2 o 4 conductores cableados.

Cada plano estructural de ajuste puede comprender conductores cableados que se sucedan uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el primer sentido y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

El sentido o los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos estructurales principales puede o pueden ser opuestos al sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos estructurales de ajuste.

Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados pueden ser simétricos con respecto a un segundo plano de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco y es perpendicular al primer plano de simetría.

El hueco puede tener:

- según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales, una dimensión de al menos 6 mm, y/o

- según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y, una dimensión de al menos 6 mm o incluso de al menos 15 mm

Los conductores cableados y su corriente se pueden disponer para generar un campo magnético cuya componente $B_z(x)$ según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales y que varía en función de la coordenada según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y:

- tiene un valor cero para una posición de campo cero situada en el hueco del conducto, preferiblemente situada sustancialmente en el centro de una sección transversal del hueco del conducto, y preferiblemente tiene un campo inferior a 5 microteslas (μT) (preferiblemente $2\ \mu\text{T}$) preferiblemente en un intervalo según la dirección X de al menos 0,05 mm alrededor de la posición de campo cero, preferiblemente para una disposición de los conductores que da lugar a una forma de campo cero de forma sextupolar u octupolar (que permita garantizar la transparencia de la inyección con respecto al haz almacenado), y/o
- tiene un valor de al menos un pico, preferiblemente de al menos dos picos a ambos lados de la posición de campo cero, de al menos 10 militeslas (mT), preferiblemente de al menos 15 mT, para una posición a una distancia A de la posición de campo cero a lo largo de la dirección X y para un pico de corriente eléctrica de 1 kA en los conductores cableados, estando este pico de campo magnético situado en el hueco del conducto, y preferiblemente con A superior o igual a 3 mm y/o inferior o igual a 7 mm (o incluso inferior o igual a 5 mm)
- El electroimán según la invención puede comprender medios para generar la corriente eléctrica, preferiblemente por pulsos (también denominada corriente pulsada), que recorre los conductores cableados y normalmente superior a 500 amperios y/o inferior a 10.000 amperios.
- El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser superior o igual a 12.
- El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser inferior o igual a 32.
- El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser igual a 12, 16 o 32.
- En cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo del eje longitudinal Y, los conductores cableados vecinos pueden estar conectados por pares mediante una conexión en serie, comprendiendo esta conexión en serie un bucle que se extiende por un plano perpendicular al primer plano de simetría, comprendiendo este bucle cerrado preferiblemente:
 - una primera parte del bucle que parte de un primer conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano de simetría
 - una tercera parte del bucle que se une a un segundo conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano de simetría
 - una segunda parte del bucle que conecta la primera parte del bucle con la tercera parte del bucle, en paralelo o sustancialmente en paralelo, al primer plano de simetría
 siendo las segundas partes de todos estos bucles, para un extremo determinado de los conductores cableados, preferiblemente recorridas por la corriente eléctrica en un mismo sentido;
- además, a ambos lados del primer plano de simetría, el electroimán puede comprender un conductor auxiliar que conecte eléctricamente en serie un conductor cableado a otro conductor cableado o a un terminal de alimentación eléctrica, desde un primer extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y hasta un segundo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal, comprendiendo este conductor auxiliar, en cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo de la dirección Y, las siguientes partes conectadas en serie, en este orden:
 - una primera parte conectada eléctricamente a un conductor cableado o a uno de los dos terminales de alimentación eléctrica
 - una segunda parte que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un sentido opuesto a las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que estas segundas partes de bucles se sitúen entre el primer plano de simetría y la segunda parte del conductor auxiliar,
 - opcionalmente, una tercera parte que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un mismo sentido que las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que la segunda parte del conductor auxiliar esté situada entre el primer plano de simetría y la tercera parte del conductor auxiliar,
 - una cuarta parte que conecta los dos extremos del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y.

Según otro aspecto adicional de la invención, se propone un acelerador de partículas, preferiblemente electrones o positrones, que comprende una fuente de radiación de sincrotrón, un anillo de almacenamiento de partículas cargadas que circulan por este anillo y un electroimán según la invención.

5 Según otro aspecto adicional de la invención, un procedimiento implementado en un electroimán multipolar para la inyección de partículas tal como se define en la reivindicación 19 comprende:

- una etapa de conducción de partículas, preferiblemente electrones o positrones, al interior del hueco de un conducto hueco, extendiéndose este hueco según un eje longitudinal Y,

- una etapa de conducción de una corriente eléctrica en una pluralidad de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, (y preferiblemente conectados eléctricamente en serie).

15 El sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados no es el mismo para todos los conductores cableados.

El electroimán puede comprender tanto conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en un primer sentido como conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en un segundo sentido opuesto al primero.

Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados pueden ser simétricos con respecto a un primer plano de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco.

Los conductores cableados se distribuyen en varios planos estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano de simetría, incluidos dos planos estructurales principales simétricos con respecto al primer plano de simetría y situados en el exterior del hueco.

Cada plano estructural principal lleva conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido y conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

Cada plano estructural principal puede llevar al menos cuatro conductores cableados, y preferiblemente lleva 4, 5 o 14 conductores cableados.

Los dos planos estructurales principales pueden estar separados a una distancia entre ellos superior o igual a 7 mm.

Cada plano estructural principal puede comprender únicamente conductores cableados que se sucedan uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el primer sentido y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

Los planos estructurales pueden comprender además dos planos estructurales de ajuste, simétricos con respecto al primer plano de simetría y situados en el exterior del hueco de manera que los planos estructurales principales estén situados entre los planos estructurales de ajuste.

45 El procedimiento según la invención puede comprender un desplazamiento, mediante unos medios de desplazamiento, de los planos estructurales de ajuste en paralelo y/o perpendicular al primer plano de simetría.

Cada plano estructural de ajuste puede llevar al menos o exactamente 1, 2 o 4 conductores cableados.

50 Cada plano estructural de ajuste puede comprender conductores cableados que se sucedan uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el primer sentido y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conduzcan la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

55 El sentido o los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos estructurales principales puede o pueden ser opuestos al sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos estructurales de ajuste.

60 Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados pueden ser simétricos con respecto a un segundo plano de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco y es perpendicular al primer plano de simetría.

El hueco puede tener:

- según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales, una dimensión de al menos 6 mm, y/o

5 - según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y, una dimensión de al menos 6 mm o incluso de al menos 15 mm

Los conductores cableados y su corriente pueden generar un campo magnético cuya componente $B_z(x)$ según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales y que varía en función de la coordenada según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y:

10 - tiene un valor cero para una posición de campo cero situada en el hueco del conducto, preferiblemente situada sustancialmente en el centro de una sección transversal del hueco del conducto, y preferiblemente tiene un campo inferior a 5 μT (preferiblemente 2 μT) preferiblemente en un intervalo según la dirección X de al menos 0,05 mm alrededor de la posición de campo cero, preferiblemente para una disposición de los conductores que da lugar a una forma de campo cero de forma sextupolar u octupolar (que permita garantizar la transparencia de la inyección con respecto al haz almacenado), y/o

15 - tiene un valor de al menos un pico, preferiblemente de al menos dos picos a ambos lados de la posición de campo cero, de al menos 10 mT, preferiblemente de al menos 15 mT, para una posición a una distancia A de la posición de campo cero a lo largo de la dirección X y para un pico de corriente eléctrica de 1 kA en los conductores cableados, estando este pico de campo magnético situado en el hueco del conducto, y preferiblemente con A superior o igual a 3 mm y/o inferior o igual a 7 mm (o incluso inferior o igual a 5 mm)

20 El procedimiento según la invención puede comprender una generación de corriente eléctrica, preferiblemente pulsada, que recorra los conductores cableados y que es normalmente superior a 500 amperios y/o inferior a 10.000 amperios.

25 El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser superior o igual a 12.

30 El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser inferior o igual a 32.

35 El número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie puede ser igual a 12, 16 o 32.

40 En cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo del eje longitudinal Y, los conductores cableados vecinos pueden estar conectados por pares mediante una conexión en serie, comprendiendo esta conexión en serie un bucle que se extiende por un plano perpendicular al primer plano de simetría, comprendiendo este bucle cerrado preferiblemente:

- una primera parte del bucle que parte de un primer conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano de simetría

45 - una tercera parte del bucle que se une a un segundo conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano de simetría

- una segunda parte del bucle que conecta la primera parte del bucle con la tercera parte del bucle, en paralelo o sustancialmente en paralelo, al primer plano de simetría

50 siendo las segundas partes de todos estos bucles, para un extremo determinado de los conductores cableados, preferiblemente recorridas por la corriente eléctrica en un mismo sentido;

55 además, a ambos lados del primer plano de simetría, el electroimán puede comprender un conductor auxiliar que conecte eléctricamente en serie un conductor cableado a otro conductor cableado o a un terminal de alimentación eléctrica, desde un primer extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y hasta un segundo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal, comprendiendo este conductor auxiliar, en cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo de la dirección Y, las siguientes partes conectadas en serie, en este orden:

60 - una primera parte conectada eléctricamente a un conductor cableado o a uno de los dos terminales de alimentación eléctrica

65 - una segunda parte que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un sentido opuesto a las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que estas segundas partes de bucles se sitúen entre el primer plano de simetría y la segunda parte del conductor auxiliar,

- opcionalmente, una tercera parte que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un mismo sentido que las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que la segunda parte del conductor auxiliar esté situada entre el primer plano de simetría y la tercera parte del conductor auxiliar,

- una cuarta parte que conecta los dos extremos del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y.

Descripción de las figuras y realizaciones

Otras ventajas y particularidades de la invención se irán poniendo de manifiesto con la lectura de la descripción detallada de implementaciones y de realizaciones en absoluto limitativas, y de los siguientes dibujos adjuntos:

[Figura 1] la Figura 1 es una vista esquemática desde abajo de una sección de inyección según el estado de la técnica,

[Figura 2] la Figura 2 ilustra un ejemplo de espacio de las fases x y x' según el estado de la técnica,

[Figura 3] la Figura 3 ilustra una sección transversal de un imán MIK de tipo MAX IV según el estado de la técnica,

[Figura 4] la Figura 4 ilustra el campo magnético B_z creado por el imán de la Figura 3 según el estado de la técnica, para una corriente de pico de 1 kA.

[Figura 5] la Figura 5 es una vista desde arriba de una parte de un acelerador de partículas que comprende un electroimán 1 según la invención,

[Figura 6] la Figura 6 es un ejemplo de espacio de las fases x y x' de un electroimán 1 según la invención,

[Figura 7] la Figura 7 es una vista en sección, perpendicular al eje longitudinal Y, de un primer modo de realización de electroimán 1 según la invención, que es el modo de realización preferido de la invención,

[Figura 8] la Figura 8 es una vista en perspectiva del primer modo de realización del electroimán 1 según la invención,

[Figura 9] la Figura 9 es el mapa de campo magnético $B_z(X)$ para $Z=0$ e $Y=0$ generado a 1 kA del primer modo de realización de la Figura 7,

[Figura 10] la Figura 10 ilustra, para el primer modo de realización del electroimán 1 según la invención: en su parte a), la superposición de los campos $B_z(X)$ (ideal 17, antes de 18 y después de 19 la corrección) ampliada en el centro de la cámara 3 ($Z=0$, $Y=0$); en su parte b), la superposición de los campos $B_x(X)$ (ideal 170, antes de 180 y después de 190 la corrección) ampliada en el centro de la cámara 3 ($Z=0$, $Y=0$),

[Figura 11] la Figura 11 es una vista en sección, perpendicular al eje longitudinal Y, de un segundo modo de realización del electroimán 1 según la invención,

[Figura 12] la Figura 12 es el mapa de campo magnético $B_z(X)$ para $Z=0$ e $Y=0$ generado a 1 kA del segundo modo de realización de la Figura 11,

[Figura 13] la Figura 13 es, en su parte a), una vista en sección, perpendicular al eje longitudinal Y, de un tercer modo de realización del electroimán 1 según la invención; y en su parte b), el mapa de campo magnético $B_z(X)$ para $Z=0$ e $Y=0$ generada a 1 kA del tercer modo de realización de la Figura 13a),

[Figura 14] la Figura 14 es, en su parte a), una vista en sección, perpendicular al eje longitudinal Y, de un cuarto modo de realización del electroimán 1 según la invención; y en su parte b), el mapa de campo magnético $B_z(X)$ para $Z=0$ e $Y=0$ generada a 1 kA del cuarto modo de realización de la Figura 14a),

[Figura 15] la Figura 15 es una vista tridimensional de los conectores 7 y sus conexiones eléctricas en serie para el primer modo de realización de la Figura 7,

[Figura 16] la Figura 16 ilustra el campo magnético vertical B_z según el eje "S" o Y longitudinal para diferentes posiciones X interesantes, en el caso de conexiones en serie no optimizadas entre los conectores 7 del primer modo de realización de la Figura 7 y por lo tanto diferentes de las ilustradas en la Figura 15,

[Figura 17] la Figura 17 ilustra el campo magnético vertical B_z según el eje "S" o Y longitudinal para diferentes posiciones X interesantes, en el caso de conexiones en serie optimizadas entre los conectores 7 del primer modo de realización de la Figura 7 ilustradas en la Figura 15.

Cada una de las Figuras 7, 11, 13a) y 14a) es una vista en sección, perpendicular al eje longitudinal Y, de un modo de realización del electroimán 1 según la invención, en medio del imán 1 a lo largo del eje Y (es decir, para $Y=0$)

En primer lugar, se observa que una homotecia de un imán MIK de tipo Bessy II según el estado de la técnica ilustrado en la Figura 3, con el objetivo de reducir los picos de la Figura 4 situados más o menos a 10 mm de posiciones más cercanas al centro (unos milímetros de la zona de campo cero para el haz almacenado), tendría el efecto de desplazar cada pico hacia el centro del imán. Desafortunadamente, para tener este pico en una abertura dinámica de entre 3 y 5 mm, se requiere tener los conductores 70 prácticamente en contacto con el haz almacenado, lo cual es un sinsentido.

Por lo tanto, la modificación del imán según el estado de la técnica de la Figura 3 está lejos de ser fácil u obvia para el experto en la materia que busque resolver los problemas técnicos en los que se basa la presente invención.

A continuación, con referencia a las Figuras 5 a 10 y 15 a 17, se presentará un primer modo de realización del electroimán 1 según la invención.

Como se muestra en las Figuras 7 y 8, este electroimán 1 multipolar para la inyección de partículas, preferiblemente electrones o positrones, comprende:

- un conducto 2 hueco, dispuesto para la conducción de partículas al interior de su hueco 3 (preferiblemente al centro o sustancialmente al centro de este hueco 3), extendiéndose este hueco 3 (también denominado "cámara") según un eje longitudinal Y también denominado S y también con el número de referencia 5,

- una pluralidad de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, conectados eléctricamente en serie y dispuestos para conducir corriente eléctrica.

Los conductores, con el número de referencia 7, solo comprenden:

- conductores 7 principales, en los planos 91, 92 principales (varios conductores 7 principales, preferiblemente al menos cuatro, por plano 91 o 92), y

- de forma opcional, conductores 7 de ajuste, en los planos 93, 94 de ajuste (al menos un conductor 7 de ajuste por plano 93 o 94) Un valor $Y=0$ y $S=0$ define una posición a lo largo del eje Y o S.

Por sustancialmente paralelo o sustancialmente en paralelo, se entiende paralelo o en paralelo con un potencial defecto de ángulo de inclinación comprendido entre más 5 grados y menos 5 grados, preferiblemente entre más 1 grado y menos 1 grado.

Los conductores 7 son de sección pequeña, normalmente con un radio de 1 mm o menos.

Los conductores 7 se colocan en paralelo o sustancialmente en paralelo a la tangente o al eje longitudinal "Y" (también denominado "S") de un anillo de almacenamiento.

La Figura 7 es una vista en sección perpendicular al eje Y, sustancialmente en el centro del imán 1 a lo largo de su elongación a lo largo del eje Y.

La longitud del conducto 2 a lo largo del eje Y es normalmente de 100 a 300 mm, normalmente de 250 mm.

El conducto 2 es de cerámica.

El conducto 2 está recubierto, en su cara interior (es decir, en contacto con el volumen de la cámara 3), por un depósito metálico.

Este depósito es eléctricamente conductor.

Este depósito es normalmente de titanio. Este depósito permite la conducción de la "corriente imagen", inducida por la circulación del haz de electrones en el centro de la cámara 3. Es importante, en primer lugar, disponer las caras horizontales metalizadas orientadas hacia los planos 91, 92 de conductores.

El sentido 71, 72 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 no es el mismo para todos los conductores cableados 7.

El electroimán 1 comprende tanto conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en un primer sentido 71 (también denominado en la presente descripción "sentido positivo", con una densidad de corriente en un conductor 7 orientada en el mismo sentido que los electrones) como conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica

en un segundo sentido 72 (también denominado en la presente descripción “sentido negativo”, con una densidad de corriente orientada en el sentido inverso de los electrones) opuesto al primer sentido.

5 Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 son simétricos con respecto a un primer plano 8 de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco 3.

Los conductores cableados 7 se distribuyen en varios planos 9 estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano 8 de simetría, de los cuales:

10 - dos planos 91, 92 estructurales principales de posiciones simétricas con respecto al primer plano 8 de simetría y situados en el exterior del hueco 3, llevando cada plano 91, 92 estructural principal unos conductores cableados 7 principales que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido,

15 - dos planos 93, 94 estructurales de ajuste, de posiciones simétricas con respecto al primer plano 8 de simetría y situados en el exterior del hueco 3 de manera que los planos 91, 92 estructurales principales estén situados entre los planos 93, 94 estructurales de ajuste, llevando cada plano 93, 94 estructural de ajuste al menos un conductor 7 de ajuste.

20 Los conductores cableados 7 de cada uno de los planos 91, 92 se distribuyen con una periodicidad espacial a lo largo de la dirección X o del eje X.

Los conductores cableados 7 de cada uno de los planos 93, 94 se distribuyen con una periodicidad espacial a lo largo de la dirección X o del eje X.

25 A diferencia del estado de la técnica (Figura 3), los conductores 7 que generan el campo magnético en la cámara 3 no los llevan solo dos diagonales 881, 882 de un cuadrado (o rectángulo).

30 Los conductores 7 tienen una sección rectangular de $500\ \mu\text{m} \times 135\ \mu\text{m}$ (pista de circuito impreso (“PCB”) clásica). En una variante, los conductores 7 son cilíndricos con un diámetro de $400\ \mu\text{m}$.

35 En el presente documento, se dice que un conductor 7 lo lleva o está distribuido en un plano cuando al menos un segmento recto (preferiblemente paralelo al eje Y, y/o preferiblemente perpendicular a la sección constante, preferiblemente circular o rectangular, de este conductor 7) está completamente situado en el interior del conductor 7 determinado y también situado en este plano, posiblemente con una tolerancia de posición normalmente inferior a $\pm 0,1\ \text{mm}$.

40 Cada plano 91, 92 estructural principal lleva al menos cuatro conductores cableados 7 y lleva en este modo de realización 5 conductores cableados 7.

Los dos planos 91, 92 estructurales principales están separados (a lo largo de la dirección Z perpendicular a Y) por una distancia entre ellos superior o igual a $7\ \text{mm}$.

45 Cada plano 91, 92 estructural principal comprende únicamente conductores cableados 7 que se suceden uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y luego respectivamente uno o dos conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

50 Más concretamente, cada plano 91, 92 estructural principal comprende únicamente conductores cableados 7 que se suceden uno tras otro según una alternancia entre, respectivamente, un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y, respectivamente, un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

55 El electroimán 1 comprende medios motorizados (no ilustrados) para desplazar los planos 93, 94 estructurales de ajuste en paralelo y/o perpendicular al primer plano 8 de simetría.

Cada plano 93, 94 estructural de ajuste lleva al menos un (y en el caso de este modo de realización exactamente un) conductor cableado 7.

60 El sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7, 73 en los extremos de la sucesión de conductores cableados 7 que llevan los planos 91, 92 estructurales principales es opuesto al sentido de la corriente eléctrica que recorre el conductor cableado 7, 74 que lleva cada uno de los planos 93, 94 estructurales de ajuste.

65 Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 son simétricos con respecto a un segundo plano 88 de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco 3 y es perpendicular al primer plano 8 de simetría.

El hueco 3 tiene:

- 5 - según una dirección o eje vertical Z (también con el número de referencia 6) que une los dos planos 91, 92 estructurales principales (es decir, perpendicular a los dos planos 91, 92 principales), una dimensión de al menos 6 mm,
- 10 - según una dirección o eje horizontal X (también con el número de referencia 4) perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y, una dimensión de 6 mm o incluso de al menos 15 mm.
- Un valor $Z=$ o $z=$ define una posición a lo largo de la dirección o el eje Z.
- Un valor $X=$ o $x=$ define una posición a lo largo de la dirección o el eje X.
- 15 El electroimán 1 comprende medios (no ilustrados) para generar la corriente eléctrica, que recorre los conductores cableados 7, siendo esta corriente:
 - 20 - preferiblemente pulsada (el carácter pulsado está posiblemente recomendado por dos factores: es preferible que el electroimán 1 se apague antes de pasar por el haz inyectado 107 después de una revolución en el anillo de almacenamiento. Entonces, como es necesario tener corrientes altas para obtener los campos magnéticos B_z deseados, es preferible recurrir a corrientes pulsadas, de lo contrario el imán 1 correría el riesgo de ser destruido), y
 - 25 - superior a 500 amperios (y preferiblemente inferior a 10.000 amperios: las limitaciones de corriente de pico se deben al calentamiento del imán (efecto fusible de los conductores 7), a la inductancia del imán 1 y a su resistencia a la alta tensión, inducida por el carácter pulsado).
- El número de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto 2 y conectados en serie es superior o igual a 12.
- 30 El número de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto 2 y conectados en serie es inferior o igual a 32.
- El número de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto 2 y conectados en serie es igual a 12.
- 35 Por lo tanto, este modo de realización comprende 12 conductores 7.
- Estos conductores se disponen en 2 conjuntos (un conjunto por plano 91 o 92) de varios (cinco) conductores 7 paralelos o sustancialmente paralelos (y coplanares) y 2 conjuntos (un conjunto por plano 93, 94) de al menos un (exactamente un) conductor 7 externo, denominado de ajuste. La longitud del imán 1 es normalmente de 250 mm.
- 40 Las características estructurales detalladas de este modo de realización son las siguientes:
 - 45 - longitud de los conductores 7 a lo largo del eje Y: 250 mm (pero puede variar según la longitud deseada)
 - abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje X: 20 mm (pero puede variar según las necesidades)
 - abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje Z: al menos 6 mm, preferiblemente 8 mm
 - 50 - periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 91, 92 a lo largo de la dirección o el eje X: 2,337 mm
 - periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 93, 94 a lo largo de la dirección o el eje X: No aplicable
 - 55 - distancia entre los planos 91 y 92 a lo largo de la dirección o el eje Z: 8,308 mm
 - distancia entre los planos 91 y 93 a lo largo de la dirección o el eje Z, para al menos una posición de los medios para desplazar los planos: 8.536 mm
 - 60 - recorrido de cada uno de los planos 93 y 94 a lo largo de la dirección o el eje Z y/o del eje X: al menos 1 mm, normalmente 2 mm
- 65 Se considera el punto $X=0$ y $Z=0$ el centro del hueco 3, es decir, el centro del disco que forma su sección circular (perpendicular a Y) o la intersección de las diagonales del rectángulo que forma su sección rectangular (perpendicular a Y).

Los haces almacenados 106 e inyectados 107 están normalmente en $Z = 0$.

El haz almacenado 106 está en $X = 0$.

Con referencia a la Figura 9, los conductores cableados 7 y su corriente 71, 72 están dispuestos para generar un campo magnético cuya componente $B_z(X)$ según la dirección Z (que une los dos planos 91, 92 estructurales principales y perpendicular a los planos 91, 92 principales) y que varía en función de la coordenada según la dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y :

- tiene un valor cero para una posición de campo cero 10 situada en el hueco 3 del conducto, preferiblemente situada en el centro ($X=0$, $Z=0$) o sustancialmente en el centro (es decir, preferiblemente $Z=0$ (o $-1 \text{ mm} < Z < 1 \text{ mm}$) y $-7 \text{ mm} < X < 7 \text{ mm}$) de una sección transversal (perpendicular a Y) del hueco 3 del conducto, y tiene un campo inferior a $5 \mu\text{T}$ (preferiblemente $2 \mu\text{T}$) en un intervalo según la dirección X de al menos $0,05 \text{ mm}$ alrededor de la posición del campo cero (lo que permite garantizar la transparencia de la inyección frente al haz almacenado) para esta realización que presenta una forma de campo cero de tipo octupolar, y

- tiene un valor de al menos un pico, preferiblemente de al menos dos picos a ambos lados de la posición de campo cero, de al menos 10 mT , preferiblemente de al menos 15 mT , para una posición 11, 12 en $Z=0$ y a una distancia A de la posición de campo cero a lo largo de la dirección X o el eje X y para un pico de corriente eléctrica de 1 kA en los conductores cableados, estando este pico de campo magnético situado en el hueco del conducto, y preferiblemente con A superior o igual a 3 mm y/o inferior o igual a 7 mm (o incluso inferior o igual a 5 mm).

Por pico de $B_z(x)$ se entiende una posición del campo $B_z(x)$ para la cual:

- la derivada $d(B_z(X))/dX=0$
- la derivada segunda $d^2(B_z(X))/dX^2 < 0$ si $B_z(X) > 0$
- la derivada segunda $d^2(B_z(X))/dX^2 > 0$ si $B_z(X) < 0$

La componente $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 10, preferiblemente un perfil:

- cuadrupolar (en $B_z(X)$ localmente proporcional a X en primer orden en la posición de campo cero 10), o
- sextupolar (en $B_z(X)$ localmente proporcional a X^2 en primer orden en la posición de campo cero 10), u
- octupolar (en $B_z(X)$ localmente proporcional a X^3 en primer orden en la posición de campo cero 10).

La componente $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 10, preferiblemente un perfil sextupolar o de orden magnético superior.

En el presente modo de realización, $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 10, un perfil octupolar.

Como se ilustra en la Figura 9, el cero de campo magnético 10 de forma octupolar se encuentra en $X = 0 \text{ mm}$. Los picos 11, 12 para inyectar en el marco de nuestras especificaciones están situados en $X = \pm 3,5 \text{ mm}$.

Los picos más alejados en $X = \pm 8,8 \text{ mm}$ no son utilizables para especificaciones de baja abertura dinámica, pero podrían ser adecuados para otros anillos de almacenamiento. Por homotecia de esta topología, la transición pico-cero más pequeña también sería de 3 mm , con una reducción de la abertura del haz a 6 mm en vertical.

Los dos conductores 7 de ajuste de los planos 93 y 94 solo sirven para afinar la forma del cero de campo magnético, no alteran significativamente la posición del pico a $3,5 \text{ mm}$ del mapa de campo magnético.

Como se ha descrito anteriormente, este modo de realización del electroimán 1 consta de dos conductores 7 de ajuste (en los planos 93 y 94) que permiten ajustar la forma del campo magnético en el centro (valor dipolar y cuadrupolar), sin afectar significativamente la distribución global del campo magnético B_z : el pico del campo magnético siempre se coloca a $3,5 \text{ mm}$.

Para ilustrar este ajuste, se supone en las Figuras 10a) y 10b) que los cinco conductores 7 coplanares del medio imán superior del plano 91 ya no son perfectamente paralelos a los cinco conductores 7 inferiores del plano 92, que permanecen en sus posiciones nominales. Es decir, que los cinco conductores 7 superiores tienen una rotación con respecto al conductor 7 C1 (el que está en el centro de los cinco) de $0,6$ grados, lo que representa un defecto típico de montaje del imán.

La Figura 10a) representa la superposición del campo Bz de referencia 17 (es decir, con un imán ideal sin defectos mecánicos), el campo Bz 18 con los defectos mecánicos ("Bz(X) Defecto") y el campo Bz 19 corregido por el desplazamiento de los conductores 7 de ajustes de los planos 93 y 94 ("Bz(X) Corrección").

- 5 Se constata que las curvas superpuestas son casi idénticas. Los picos de 3,5 mm no se ven afectados globalmente por estos defectos mecánicos.

10 En la Figura 10a), la atención se centra en el campo Bz en el centro del imán, en la ubicación del haz almacenado ($X = 0$ mm). El campo Bz de defecto antes de la corrección muestra un defecto dipolar importante (aproximadamente 200 μ T). La corrección permite encontrar un nivel de campo magnético prácticamente idéntico al campo Bz de referencia.

15 Se observa que, para este ejercicio, los conductores 7 superior del plano 93 e inferior del plano 94 se desplazaron respectivamente en una sola dirección: el conductor 7 superior del plano 93 solo podía desplazarse según la dirección o el eje vertical Z y el conductor 7 inferior del plano 94 solo podía desplazarse según la dirección o el eje horizontal X.

Para lograr esta corrección, ha sido necesario un desplazamiento del conductor 7 superior del plano 93 de 0,5 mm (en vertical según Z) y del conductor 7 inferior del plano 94 bajo de -0,1 mm (en horizontal según X).

20 Fijar así los grados de libertad permite corregir rápidamente el campo Bz. De ello se desprende, con referencia a la Figura 10b), que la otra componente Bx según la dirección o el eje X del campo está degradada por esta corrección. La Figura 10b) representa la superposición del campo Bx de referencia 170 (es decir, con un imán ideal sin defectos mecánicos), el campo Bx 180 con defectos mecánicos y el campo Bx 190 corregido por el desplazamiento de los conductores 7 de ajustes de los planos 93 y 94 ("Bz(X) Corrección").

25 Sin embargo, también se pueden corregir Bz y Bx conjuntamente con desplazamiento de los conductores 7 de ajuste en todas las direcciones vertical Z y horizontal X para cada uno de estos conductores 7 de ajuste.

30 En cada extremo 21, 22 del imán 1 a lo largo de Y, los conductores 7 se conectan de dos en dos para formar un único circuito eléctrico. Por lo tanto, la corriente eléctrica (pulsada) es idéntica en todos los conductores 7.

Este imán 1 se alimenta con un pulso de corriente eléctrica de 1 kA.

35 Como se ilustra en la Figura 15, en cada uno de los dos extremos 21, 22 del electroimán 1 a lo largo del eje longitudinal Y, los conductores cableados 7 vecinos se conectan por pares mediante una conexión en serie, comprendiendo esta conexión en serie un bucle 30 que se extiende por un plano perpendicular al primer plano 8 de simetría, comprendiendo este bucle cerrado 30:

- 40 - una primera parte 31 del bucle que parte de un primer conductor cableado 7 del par, en perpendicular al eje longitudinal Y, y al plano 8
- una tercera parte 33 del bucle que se une a un segundo conductor cableado 7 del par, en perpendicular al eje longitudinal Y, y al plano 8
- 45 - una segunda parte 32 del bucle que une la primera parte 31 del bucle con la tercera parte 33 del bucle, en paralelo o sustancialmente en paralelo a la dirección o al eje X y al plano 8

50 estando las segundas partes 32 de todos estos bucles 30, para un extremo 21 o 22 dado de los conductores cableados 7, recorridas por la corriente eléctrica en un mismo sentido. Se observa incluso que las segundas partes 32 de todos estos bucles 30 están, para el conjunto de los dos extremos 21 y 22, recorridas por la corriente eléctrica en un mismo sentido.

55 En cada uno de los dos lados del primer plano 8 de simetría, el electroimán 1 comprende un conductor auxiliar 40 que conecta eléctricamente en serie un conductor cableado 7 a otro conductor cableado 7 o a uno de entre dos terminales 45 de alimentación eléctrica, de un primer extremo 21 o 22 respectivamente del electroimán 1 a lo largo de la dirección longitudinal Y a un segundo extremo 22 o 21 respectivamente del electroimán 1 a lo largo de la dirección longitudinal Y, comprendiendo este conductor auxiliar 40, en cada uno de los dos extremos 21, 22 del electroimán 1 a lo largo de la dirección Y, las siguientes partes conectadas en serie, en este orden:

- 60 - una primera parte 41 conectada eléctricamente a un conductor cableado 7 o a uno de los dos terminales 45 y que se extiende preferiblemente en perpendicular al primer plano 8 de simetría
- una segunda parte 42 que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo a la dirección o al eje X y al plano 8 y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un sentido opuesto a las segundas partes 32 de bucles situadas en el mismo extremo 21 o 22 del electroimán 1 a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que

estas segundas partes 32 de bucles estén situadas entre el primer plano 8 de simetría y la segunda parte 42 del conductor auxiliar 40,

- opcionalmente, una tercera parte 43 que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo a la dirección o al eje X y al plano 8 y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un mismo sentido que las segundas partes 32 de bucles situadas en el mismo extremo 21 o 22 del electroimán 1 a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que la segunda parte 42 del conductor auxiliar 40 esté situada entre el primer plano 8 de simetría y la tercera parte 43 del conductor auxiliar 40,

- una cuarta o última parte 44 que conecta los dos extremos 21, 22 del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, más exactamente que conecta una segunda 42 o tercera 43 parte de conductor auxiliar 40 en el extremo 21 a una segunda 42 o tercera 43 parte de conductor auxiliar 40 en el otro extremo 22.

Las partes 41, 42, 43 y 44 pueden estar conectadas en serie entre sí por partes intermedias, pero únicamente por partes intermedias paralelas o sustancialmente paralelas a la dirección o el eje Z.

Esta disposición permite minimizar la generación de campos magnéticos (B_x a lo largo de X, B_z a lo largo de Z y $B_s=B_y$ a lo largo de S o Y) parásitos por las conexiones en serie entre los conductores 7; estos campos magnéticos parásitos pueden perturbar el haz almacenado y, por lo tanto, reducir la transparencia de la inyección.

La Figura 16 ilustra, en un caso en el que las conexiones no optimizadas de los bucles 30 entre los conductores 7 estarían contenidas en plano en cada uno de los planos 91, 92, 93 y 94, el campo magnético vertical B_z según la dirección o el eje Z en función de la coordenada "S" o Y longitudinal para diferentes posiciones X interesantes, a saber, posiciones de los haces inyectados 107 en $X=+3,5$ mm y $X=-3,5$ mm y la posición del haz almacenado en $X=0$ mm ($Z=0$ en todos los casos). El imán 1 se extiende de $Y=-125$ mm a $Y=+125$ mm. Debido a esta conexión simplista entre conductores 7, se generan en el haz almacenado ($X=0$ mm) picos de campo magnético B_z parásitos no deseados, que afectarían a la transparencia del modo de inyección Top-Up (es decir, que en el haz almacenado 106 no se debe ver ninguna perturbación relacionada con la reinyección de haces). También se constatan picos en las posiciones de los haces inyectados ($X = \pm 3,5$ mm), lo que no es muy deseable.

Con referencia a la Figura 17, se representan de nuevo en gráficos las tres curvas $B_z(S)$ con las mismas posiciones X que para el caso no optimizado de la Figura 16, pero esta vez en el caso de conexiones optimizadas entre conductores 7 como se ilustra en la Figura 15. Se constata que en el haz almacenado ($X=0$ mm), el campo residual se minimiza en gran medida con respecto al caso inicial. En los haces inyectados 107, se encuentra un perfil de campo magnético longitudinal de mejor calidad con picos de mucha menor amplitud.

Como se ilustra en la Figura 9, el electroimán 1 según este primer modo de realización permite generar por lo tanto un pico de campo magnético B_z cerca del eje (normalmente de 3 a 4 mm con respecto a las necesidades actuales), con un campo cero en el centro de perfil sextupolar u octupolar y con una abertura vertical libre de cámara de vacío aceptable para las nuevas máquinas (mínimo 6 mm).

Por lo tanto, el electroimán 1 es un MIK:

- cuyo pico 11 y/o 12 de campo magnético B_z está en la abertura dinámica (entre 3 y 5 mm),
- que deja una abertura consiguiente para el haz almacenado 106 (normalmente 6 mm (vertical Z) $\times$ 6 a 15 mm (horizontal X))
- que genera una desviación suficiente del haz inyectado (1 a 3 mrad normalmente, preferiblemente 1 mrad $\pm 0,5$ mrad para una energía nominal del haz de 2,75 GeV ± 6 %)
- que mantiene un campo magnético B_z cero o casi cero en el centro del imán 1 para no perturbar el haz almacenado.

Con referencia a la Figura 9, se constata que las evoluciones de campo magnético con respecto a la posición transversal X son grandes, que es el objetivo buscado para este tipo de imanes. Por lo tanto, se puede colocar el haz almacenado 106 en $X=0$ mm, y colocar el haz inyectado 107 en $X=\pm 3,5$ mm donde se encuentra sobre un pequeño pico local de campo magnético.

El interés por el haz almacenado 106 es obviamente tener un campo magnético B_z cero (aquí con una forma octupolar). El interés por el haz inyectado 107 es disponer de un pico 11, 12 de campo magnético B_z , a una distancia fija del haz almacenado 106. El valor de pico (aproximadamente 18 mT) para el haz inyectado 107 es interesante, dada la necesidad de tener una rápida progresión desde la zona de no campo (haz almacenado) a la zona de campo fuerte y "plana" para el haz inyectado.

El hecho de que el número de conductores 7 sea reducido es interesante, porque para una inducción magnética equivalente, se tiene una inductancia del imán más débil, siempre apreciable en el campo de los sistemas pulsados.

Como se muestra en la Figura 5, que es una vista superior de una sección de inyección que utiliza el imán 1 en un anillo de almacenamiento de 4ª generación, se constata el ahorro de espacio de esta solución en comparación con una sección recta provista de cuatro imanes kickers.

Como se muestra en la Figura 6, en comparación con la inyección con cuatro kickers, el imán 1 logra desviar el haz inyectado 107 directamente en la abertura dinámica sin tener que desviar el haz almacenado 106 mediante una desviación de órbita cerrada.

En la Figura 6 se encuentra el espacio de las fases x y x' , sobre el que se añade la abertura dinámica. A la salida del septum 109, el haz inyectado 107b está todavía momentáneamente fuera de la abertura dinámica. Obviamente, si no se hace nada, no será capturado por la abertura dinámica y, por lo tanto, se perderá rápidamente. Por lo tanto, el imán MIK 1 desviará el haz inyectado, para que se capture en esta abertura dinámica en la posición 107c. A partir de ahí, este último sufrirá una oscilación betatrónica y se amortiguará en el haz ya almacenado.

El MIK con número de referencia 1 no perturba el haz almacenado 106 (ya que no genera un campo magnético en el centro del imán 1); este tipo de inyección garantiza una excelente transparencia del proceso de inyección Top-Up.

El imán 1 genera un campo magnético del que una de las componentes, B_z , es decir, el campo magnético vertical, permite desviar en una trayectoria estable los haces de electrones inyectados 107 procedentes de un booster sin perturbar los paquetes de electrones 106 que ya circulan por su trayectoria normal en el anillo de almacenamiento. De este modo, se obtiene una inyección Top-Up transparente, es decir, se mantiene constante la corriente de electrones almacenados mediante la inyección regular de paquetes de electrones “frescos” sin una perturbación notable en el haz de electrones almacenado y, por lo tanto, en los haces de fotones producidos para las líneas de luz.

A continuación, se presentará, con referencia a las Figuras 11 y 12, un segundo modo de realización del electroimán 1 según la invención.

Solo se describirán sus diferencias con respecto al primer modo de realización de las Figuras 5 a 10 y 15 a 17.

Como se muestra en la Figura 11, cada plano 91, 92 estructural principal lleva 14 conductores cableados 7.

Cada plano 91, 92 estructural principal comprende únicamente conductores cableados 7 que se suceden uno tras otro según una alternancia entre, respectivamente, dos conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y luego, respectivamente, uno o dos conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

Cada plano 93, 94 estructural de ajuste lleva exactamente 2 conductores cableados 7.

Cada plano 93, 94 estructural de ajuste comprende conductores cableados 7 que conducen únicamente la corriente eléctrica en el primer sentido 71.

El número de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie es igual a 32.

Por lo tanto, este modo de realización comprende 32 conductores 7 dispuestos en 2 conjuntos de 14 conductores 7 paralelos o sustancialmente paralelos (y coplanares) y 4 conductores 7 externos, denominados de ajuste. La longitud del imán es normalmente de 250 mm.

Los sentidos 72 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7, 73 alambre en los extremos de la sucesión de conductores cableados 7 que llevan los planos 91, 92 estructurales principales son opuestos al sentido 71 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7, 74 en los extremos de la sucesión de conductores cableados 7 que llevan los planos 93, 94 estructurales de ajuste.

Como se muestra en la Figura 12, el haz almacenado 106 no pasa al centro geométrico del imán 1. El imán 1 se desplaza según la dirección o el eje X para que su cero de campo magnético 10 coincida con la posición del haz almacenado 106.

Los ceros 10, 15 de campo magnético de forma sextupolar se encuentran en $X = \pm 5,82$ mm (referencias 10 y 15). Los picos (referencias 11 y 13) para inyectar en el marco de nuestras especificaciones están situados en $X = \pm 2,32$ mm, es decir, se obtiene una transición efectiva de pico a cero de 3,5 mm como se ha especificado. El imán 1 está descentrado con respecto al haz almacenado 106, pero esto no es a priori un problema; la referencia 10 se puede desplazar en $X=0$ si, con respecto a la Figura 12, los conductores 7 se desplazan con respecto a la cámara 3 en paralelo o sustancialmente en paralelo a X.

Los dos picos 11 y 12 son aprovechables para el cero de la referencia 10.

Los otros picos 13, 16 también son aprovechables, en función de la posición de campo cero 10, 14 o 15 utilizada.

Los conductores 7 de ajuste solo sirven para afinar la forma del cero de campo magnético, no alteran la estructura de “montaña rusa” del mapa de campo magnético. Ajustar el cero de campo magnético finamente mediante el desplazamiento fino de estos conductores 7 de ajuste permite mejorar en última instancia la transparencia de la inyección Top-Up para compensar los defectos mecánicos de fabricación del imán.

En el presente modo de realización, $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 10, un perfil sextupolar.

En el presente modo de realización, $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 15, un perfil sextupolar.

En el presente modo de realización, $B_z(X)$ tiene, para la posición de campo cero 14, un perfil cuadrupolar.

Por homotecia de esta topología, la transición de pico a cero más pequeña sería de 3 mm.

Con referencia a la Figura 12, se constata que las evoluciones de campo magnético con respecto a la posición transversal X son grandes, que es el objetivo buscado para este tipo de imanes. Por lo tanto, se puede colocar el haz almacenado en $X = \pm 5,82$ mm (donde el campo magnético B_z es cero), y colocar el haz inyectado en $\pm 2,32$ mm donde se encuentra en un pequeño pico local de campo magnético B_z .

El interés por el haz almacenado 106 es obviamente tener un campo magnético B_z cero (aquí con una forma sextupolar). El interés por el haz inyectado 107 es disponer de un pico de campo magnético B_z , a una distancia fija del haz almacenado 106. El valor de pico (poco más de 20 mT) para el haz inyectado 107 es interesante, dada la necesidad de tener una rápida progresión desde la zona de no campo (haz almacenado 106) a la zona de campo fuerte y “plana” para el haz inyectado 107.

La separación entre haces almacenados 106 e inyectados 107 es de 3,5 mm y, por lo tanto, es una de las motivaciones para concebir estos nuevos imanes 1.

El otro pico 12 (a 48 mT) no es fácilmente aprovechable en su estado, ya que la distancia que separa el pico del cero de campo magnético es de 4,1 mm. Sin embargo, se puede modificar el imán 1 por homotecia y o rotación de conductores 7 para aprovechar este pico lo mejor posible, en detrimento de la abertura física para el paso de los haces.

Con respecto al modo de realización de la Figura 7, el modo de realización de la Figura 11, debido a su alto número de conductores 7, generará una inductancia importante, perjudicial para el funcionamiento pulsado del imán: por lo tanto, demandará preferiblemente tensiones elevadas (normalmente de al menos 6 kV o 10 kV) que complicarán su diseño mecánico.

Las características estructurales detalladas de este modo de realización son las siguientes:

- longitud de los conductores 7 a lo largo del eje Y: 250 mm (pero puede variar según la longitud deseada)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje X: 20 mm (pero puede variar según las necesidades)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje Z: al menos 6 mm, preferiblemente 8 mm
- periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 91, 92 a lo largo de la dirección o el eje X: 2.046 mm
- periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 93, 94 a lo largo de la dirección o el eje X: 30,88 mm
- distancia entre los planos 91 y 92 a lo largo de la dirección o el eje Z: 10.234 mm
- distancia entre los planos 91 y 93 a lo largo de la dirección o el eje Z, para al menos una posición de los medios para desplazar los planos: 10.323 mm
- recorrido de cada uno de los planos 93 y 94 a lo largo de la dirección o del eje Z y/o del eje X: al menos 1 mm, normalmente 2 mm

A continuación, se presentará, con referencia a la Figura 13, un tercer modo de realización del electroimán 1 según la invención.

Solo se describirán sus diferencias con respecto al primer modo de realización de las Figuras 5 a 10 y 15 a 17.

Como se ilustra en la Figura 13a), cada plano 91, 92 estructural principal lleva 4 conductores cableados 7.

Cada plano 91, 92 estructural principal comprende únicamente conductores cableados 7 que se suceden uno tras otro según una alternancia entre un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y, respectivamente, un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

Cada plano 93, 94 estructural de ajuste lleva exactamente 4 conductores cableados 7.

Cada plano 93, 94 estructural de ajuste comprende conductores cableados 7 que se suceden uno tras otro según una alternancia entre un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y luego un conductor cableado 7 que conduce la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

Los sentidos 71 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7, 73 alambre en los extremos de la sucesión de conductores cableados 7 que llevan los planos 91, 92 estructurales principales son opuestos al sentido 72 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7, 74 en los extremos de la sucesión de conductores cableados 7 que llevan los planos 93, 94 estructurales de ajuste.

El número de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto y conectados en serie es igual a 16.

Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 son antisimétricos con respecto al plano 88 paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco 3 y es perpendicular al primer plano 8 de simetría.

Como se ilustra en la Figura 13b), en el presente modo de realización, Bz(X) tiene, para la posición de campo cero 10, un perfil sextupolar.

Las características estructurales detalladas de este modo de realización son las siguientes:

- longitud de los conductores 7 a lo largo del eje Y: 250 mm (pero puede variar según la longitud deseada)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje X: 20 mm (pero puede variar según las necesidades)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje Z: al menos 6 mm, preferiblemente 8 mm
- periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 91, 92 a lo largo de la dirección o el eje X: 2,286 mm
- periodicidad espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 93, 94 a lo largo de la dirección o el eje X: 2,286 mm
- distancia entre los planos 91 y 92 a lo largo de la dirección o el eje Z: 9.542 mm
- distancia entre los planos 91 y 93 a lo largo de la dirección o el eje Z, para al menos una posición de los medios para desplazar los planos: 2,286 mm
- recorrido de cada uno de los planos 93 y 94 a lo largo de la dirección o del eje Z y/o del eje X: al menos 1 mm, normalmente 2 mm

A continuación, se presentará, con referencia a la Figura 14, un cuarto modo de realización del electroimán 1 según la invención.

Solo se describirán sus diferencias con respecto al modo de realización de la Figura 13.

En el presente modo de realización, Bz(X) tiene, para la posición de campo cero 10, un perfil cuadrupolar.

Además, este modo de realización comprende solo un pico 11 de al menos 10 mT.

A diferencia de las realizaciones anteriores, los conductores cableados 7 de cada uno de los planos 91, 92 no se distribuyen con una periodicidad espacial a lo largo de la dirección X o del eje X.

A diferencia de las realizaciones anteriores, los conductores cableados 7 de cada uno de los planos 93, 94 no se distribuyen con una periodicidad espacial a lo largo de la dirección X o del eje X.

Las características estructurales detalladas de este modo de realización ilustrado en la Figura 14a) son las siguientes:

- longitud de los conductores 7 a lo largo del eje Y: 250 mm (pero puede variar según la longitud deseada)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje X: 20 mm (pero puede variar según las necesidades)
- abertura de la cámara 3 a lo largo de la dirección o el eje Z: al menos 6 mm, preferiblemente 8 mm
- posición espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 91, 92 a lo largo de la dirección o el eje X: cada uno de los dos conductores 7 más cercanos al plano 88 está situado a 0,7448 mm del plano 88; cada uno de los dos conductores 7 más alejados del plano 88 está situado a 2,234 mm del plano 88, siendo el imán 1 simétrico con respecto al plano 88 para las posiciones de sus conductores 7 y antisimétrico con respecto al plano 88 para la orientación de las corrientes en estos conductores 7.
- posición espacial de los conductores 7 en cada uno de los planos 93, 94 a lo largo de la dirección o el eje X: cada uno de los dos conductores 7 más cercanos al plano 88 está situado a 0,7448 mm del plano 88; cada uno de los dos conductores 7 más alejados del plano 88 está situado a 2,234 mm del plano 88, siendo el imán 1 simétrico con respecto al plano 88 para las posiciones de sus conductores 7 y antisimétrico con respecto al plano 88 para la orientación de las corrientes en estos conductores 7.
- distancia entre los planos 91 y 92 a lo largo de la dirección o el eje Z: 7.612 mm
- distancia entre los planos 91 y 93 a lo largo de la dirección o el eje Z, para al menos una posición de los medios para desplazar los planos: 1.489 mm
- recorrido de cada uno de los planos 93 y 94 a lo largo de la dirección o del eje Z y/o del eje X: al menos 1 mm, normalmente 2 mm

Como se ilustra en la Figura 14b), su ventaja es que se consigue generar una verdadera meseta de campo magnético Bz (con una derivada espacial cero o sustancialmente cero en aproximadamente 1 mm), con una distancia A entre el centro de la meseta 11 y el punto de campo magnético cero 10 de 3,5 mm.

A continuación, se describirá, con referencia a la Figura 6, un acelerador de partículas según la invención, preferiblemente de electrones o positrones, que comprende una fuente de radiación de sincrotrón, un anillo de almacenamiento 106 de partículas cargadas que circulan por este anillo, y un electroimán 1 según una cualquiera de las realizaciones descrito anteriormente y dispuesto para la inyección de nuevas partículas 107 en el anillo.

A continuación, se describirá un modo de realización del procedimiento según la invención implementado en cualquiera de las realizaciones del electroimán 1 o acelerador de partículas descrito anteriormente.

Este procedimiento comprende una generación de corriente eléctrica, preferiblemente pulsada, que recorre los conductores cableados 7 y normalmente superior a 500 amperios y/o inferior a 10.000 amperios.

Este procedimiento comprende:

- una etapa de conducción de partículas, preferiblemente electrones o positrones, al interior del hueco 3 del conducto 2 hueco, extendiéndose este hueco según el eje longitudinal Y 5,
- una etapa de conducción de la corriente eléctrica en la pluralidad de conductores cableados 7 colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, y conectados eléctricamente en serie.

El sentido 71, 72 de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 no es el mismo para todos los conductores cableados 7.

El electroimán 1 comprende tanto conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido 71 como conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.

Los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados 7 son simétricos con respecto al primer plano 8 de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco 3.

- Los conductores cableados 7 se distribuyen en varios planos 9 estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano 8 de simetría, de los que los dos planos 91, 92 estructurales principales son simétricos con respecto al primer plano 8 de simetría y están situados en el exterior del hueco 3, llevando cada plano 91, 92 estructural principal conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido 71 y conductores cableados 7 que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido 72 opuesto al primer sentido.
- El procedimiento comprende un desplazamiento, por los medios de desplazamiento, de los planos 93, 94 estructurales de ajuste en paralelo y/o perpendicular al primer plano 8 de simetría a lo largo de X y/o Z.
- Los conductores cableados 7 y su corriente generan un campo magnético cuya componente $B_z(X)$ según una dirección Z que une los dos planos 91, 92 estructurales principales y que varía en función de la coordenada según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y es tal como se ha descrito anteriormente según el modo de realización considerado, y en particular:
- tiene un valor cero para una posición de campo cero 10 situada en el hueco del conducto, preferiblemente situada sustancialmente en el centro de una sección transversal (perpendicular a Y) del hueco 3 del conducto 2, y tiene un campo inferior a $5 \mu T$ (preferiblemente $2 \mu T$) en un intervalo según la dirección X de al menos 0,05 mm alrededor de la posición de campo cero, para una disposición de los conductores 7 que da lugar a una forma de campo cero de forma sextupolar u octupolar (que permite garantizar la transparencia de la inyección frente al haz almacenado), y
 - tiene un valor de al menos un pico, preferiblemente de al menos dos picos a ambos lados de la posición de campo cero 10, de al menos 10 mT, preferiblemente de al menos 15 mT, para al menos una posición 11, 12 a una distancia A de la posición de campo cero 10 a lo largo de la dirección o el eje X y para un pico de corriente eléctrica de 1 kA en los conductores cableados, estando esta posición de pico 11, 12 de campo magnético situada en el hueco 3 del conducto 2, y preferiblemente con A superior o igual a 3 mm y/o inferior o igual a 7 mm (o incluso inferior o igual a 5 mm)
- Evidentemente, la invención no se limita a los ejemplos que acaban de describirse, y pueden aportarse a estos ejemplos numerosas modificaciones, sin salirse del alcance de la invención tal como se define en las reivindicaciones adjuntas.
- Por supuesto, las diferentes características, formas, variantes y modos de realización de la invención pueden asociarse entre sí en diversas combinaciones, siempre que no sean mutuamente incompatibles o excluyentes.

REIVINDICACIONES

1. Electroimán (1) multipolar para la inyección de partículas, preferiblemente electrones o positrones, que comprende:
 - un conducto (2) hueco, dispuesto para la conducción de partículas al interior de su hueco (3), extendiéndose este hueco según un eje longitudinal Y (5),
 - una pluralidad de conductores (7) cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, conectados eléctricamente en serie y dispuestos para conducir corriente eléctrica no siendo el sentido (71, 72) de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados idéntico para todos los conductores cableados, comprendiendo el electroimán tantos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en un primer sentido (71) como conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en un segundo sentido (72) opuesto al primer sentido, siendo los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados simétricos con respecto a un primer plano (8) de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal y que pasa por el hueco, **caracterizado por que** los conductores cableados se distribuyen en varios planos (9) estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano de simetría, de los que dos planos (91, 92) estructurales principales son simétricos con respecto al primer plano de simetría y están situados en el exterior del hueco, llevando cada plano estructural principal conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido y conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.
2. Electroimán según la reivindicación 1, **caracterizado por que** cada plano (91, 92) estructural principal lleva al menos cuatro conductores cableados, y preferiblemente lleva 4, 5 o 14 conductores cableados.
3. Electroimán según la reivindicación 1 o 2, **caracterizado por que** los dos planos (91, 92) estructurales principales están separados a una distancia entre ellos superior o igual a 7 mm.
4. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** cada plano (91, 92) estructural principal comprende únicamente conductores cableados que se suceden uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido (71) y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido (72) opuesto al primer sentido.
5. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** los planos estructurales comprenden además dos planos (93, 94) estructurales de ajuste, simétricos con respecto al primer plano de simetría y situados en el exterior del hueco (3) de manera que los planos (91, 92) estructurales principales estén situados entre los planos (93, 94) estructurales de ajuste.
6. Electroimán según la reivindicación 5, **caracterizado por que** comprende medios para desplazar los planos (93, 94) estructurales de ajuste en paralelo y/o perpendicular al primer plano (8) de simetría.
7. Electroimán según la reivindicación 5 o 6, **caracterizado por que** cada plano (93, 94) estructural de ajuste lleva al menos o exactamente 1, 2 o 4 conductores cableados.
8. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 7, **caracterizado por que** cada plano (93, 94) estructural de ajuste comprende conductores cableados que se suceden uno tras otro según una alternancia entre respectivamente uno o dos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido y luego respectivamente uno o dos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.
9. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones 5 a 8, **caracterizado por que** el sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados (73) en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos (91, 92) estructurales principales es opuesto al sentido de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados (74) en los extremos de la sucesión de conductores cableados que llevan los planos (93, 94) estructurales de ajuste.
10. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados (7) son simétricos con respecto a un segundo plano (88) de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal Y, y que pasa por el hueco y perpendicular al primer plano (8) de simetría.
11. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el hueco (3) tiene

- según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales, una dimensión de al menos 6 mm,
 - según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y, una dimensión de al menos 6 mm

12. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** los conductores cableados y su corriente se disponen para generar un campo magnético cuya componente $B_z(x)$ según una dirección Z que une los dos planos estructurales principales y que varía en función de la coordenada según una dirección X perpendicular a la dirección Z y al eje longitudinal Y:

 - tiene un valor cero para una posición de campo cero (10) situada en el hueco del conducto, preferiblemente situada sustancialmente en el centro de una sección transversal del hueco del conducto, y tiene un campo inferior a 5 μT , y
 - tiene un valor de al menos un pico, preferiblemente de al menos dos picos a ambos lados de la posición de campo cero, de al menos 10 mT, preferiblemente de al menos 15 mT, para una posición (11, 12) a una distancia A de la posición de campo cero a lo largo de la dirección X y para un pico de corriente eléctrica de 1 kA en los conductores cableados, estando este pico de campo magnético situado en el hueco del conducto, y preferiblemente con A superior o igual a 3 mm y/o inferior o igual a 7 mm

13. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** comprende medios para generar la corriente eléctrica, preferiblemente pulsada, que recorre los conductores cableados y es superior a 500 amperios y/o inferior a 10.000 amperios.

14. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal a lo largo del conducto y conectados en serie es superior o igual a 12.

15. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal a lo largo del conducto y conectados en serie es inferior o igual a 32.

16. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que** el número de conductores cableados colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal a lo largo del conducto y conectados en serie es igual a 12, 16 o 32.

17. Electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, **caracterizado por que**, en cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo del eje longitudinal Y, unos conductores cableados vecinos están conectados por pares mediante una conexión en serie, comprendiendo esta conexión en serie un bucle (30) que se extiende por un plano perpendicular al primer plano de simetría, comprendiendo este bucle cerrado:

 - una primera parte (31) del bucle que parte de un primer conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano (8) de simetría
 - una tercera parte (33) del bucle que se une a un segundo conductor cableado del par, en perpendicular al primer plano (8) de simetría
 - una segunda parte (32) del bucle que conecta la primera parte del bucle con la tercera parte del bucle, en paralelo o sustancialmente en paralelo, al primer plano (8) de simetría

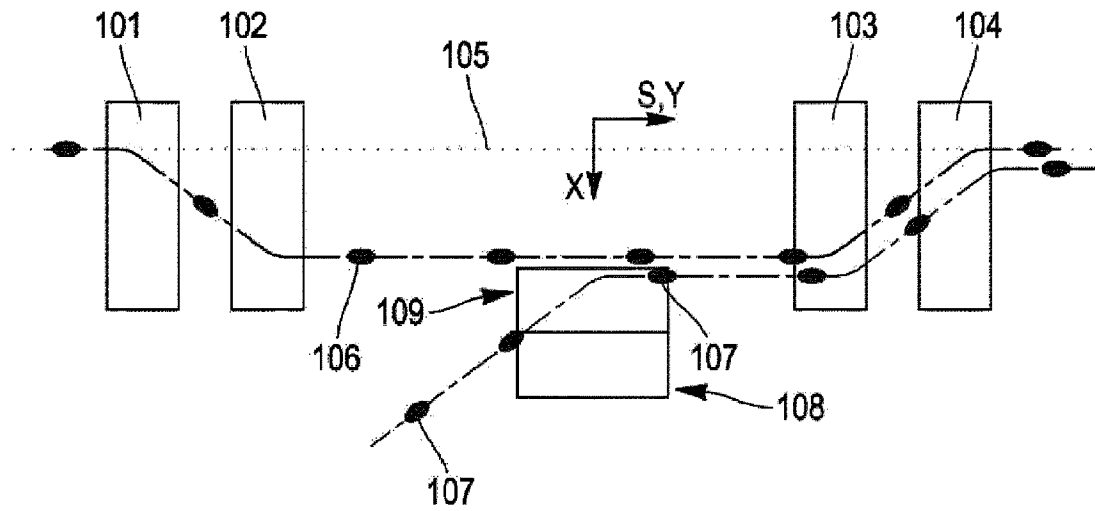
estando las segundas partes de todos estos bucles, para un extremo determinado de los conductores cableados, recorridas por la corriente eléctrica en un mismo sentido,

y por que, a ambos lados del primer plano de simetría, el electroimán comprende un conductor auxiliar (40) que conecta eléctricamente en serie un conductor cableado a otro conductor cableado o a un terminal de alimentación eléctrica, desde un primer extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y hasta un segundo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal, comprendiendo este conductor auxiliar, en cada uno de los dos extremos del electroimán a lo largo de la dirección Y, las siguientes partes conectadas en serie, en este orden:

 - una primera parte (41) conectada eléctricamente a un conductor cableado o a uno de los dos terminales (45) de alimentación eléctrica
 - una segunda parte (42) que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano (8) de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un sentido opuesto a las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que estas segundas partes de bucles se sitúen entre el primer plano de simetría y la segunda parte del conductor auxiliar,

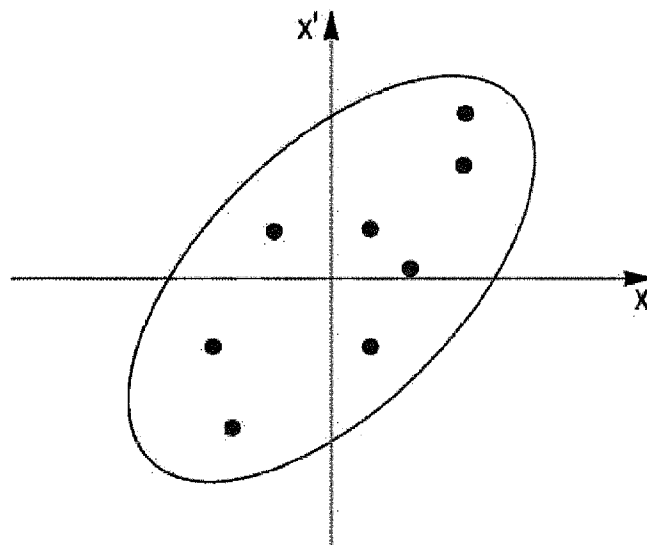
- 5 - opcionalmente, una tercera parte (43) que se extiende en paralelo o sustancialmente en paralelo al primer plano (8) de simetría y dispuesta para ser recorrida por una corriente eléctrica en un mismo sentido que las segundas partes de bucles situadas en el mismo extremo del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y, de manera que la segunda parte del conductor auxiliar esté situada entre el primer plano de simetría y la tercera parte del conductor auxiliar,
- una cuarta parte (44) que conecta los dos extremos (21, 22) del electroimán a lo largo de la dirección longitudinal Y.
- 10 18. Acelerador de partículas, preferiblemente electrones o positrones, que comprende una fuente de radiación de sincrotrón, un anillo de almacenamiento de partículas cargadas que circulan por este anillo y un electroimán según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores.
- 15 19. Procedimiento implementado en un electroimán (1) multipolar para la inyección de partículas que comprende:
- una etapa de conducción de partículas, preferiblemente electrones o positrones, al interior del hueco (3) de un conducto (2) hueco, extendiéndose este hueco según un eje longitudinal Y (5),
- una etapa de conducción de una corriente eléctrica en la pluralidad de conductores cableados (7) colocados en paralelo o sustancialmente en paralelo al eje longitudinal Y a lo largo del conducto, y
20 conectados eléctricamente en serie
no siendo el sentido (71, 72) de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados idéntico para todos los conductores cableados,
comprendiendo el electroimán tantos conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en un primer sentido (71) como conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en un
25 segundo sentido (72) opuesto al primer sentido,
siendo los sentidos de la corriente eléctrica que recorre los conductores cableados simétricos con respecto a un primer plano (8) de simetría paralelo o sustancialmente paralelo al eje longitudinal y que pasa por el hueco, **caracterizado por que** los conductores cableados se distribuyen en varios
30 planos (9) estructurales paralelos o sustancialmente paralelos al primer plano de simetría, de los que dos planos (91, 92) estructurales principales son simétricos con respecto al primer plano de simetría y están situados en el exterior del hueco, llevando cada plano estructural principal conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el primer sentido y conductores cableados que conducen la corriente eléctrica en el segundo sentido opuesto al primer sentido.

[Figura 1]



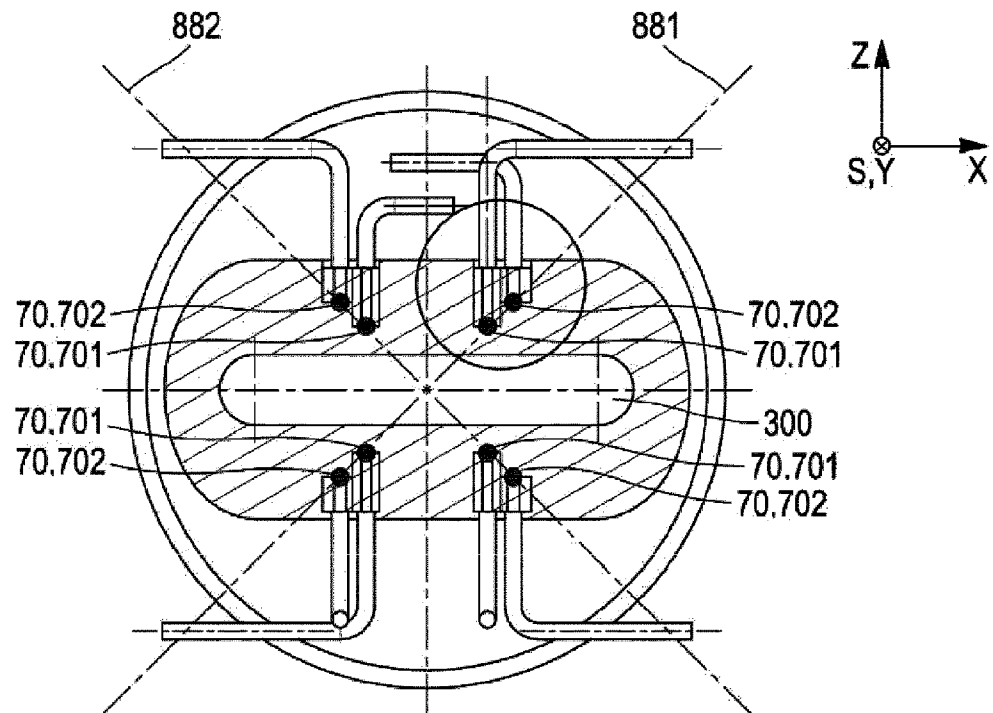
Técnica anterior

[Figura 2]



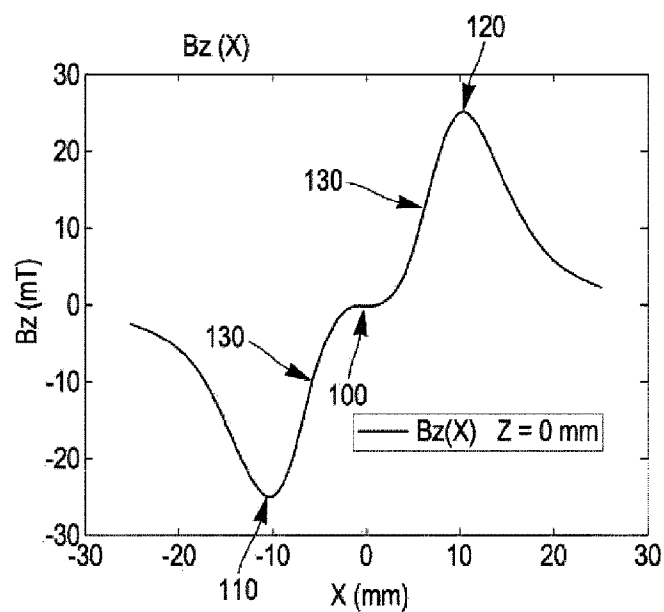
Técnica anterior

[Figura 3]



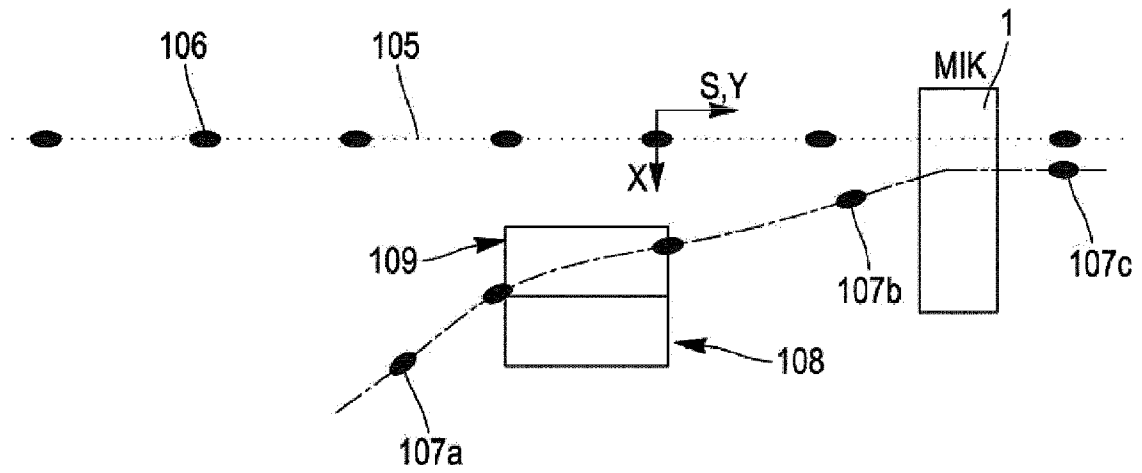
Técnica anterior

[Figura 4]

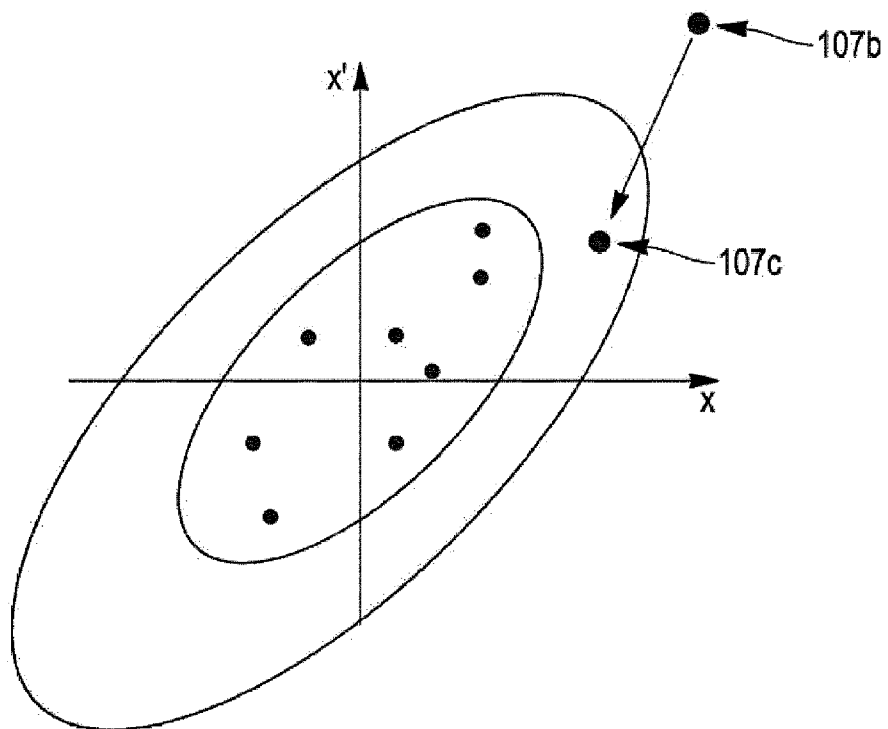


Técnica anterior

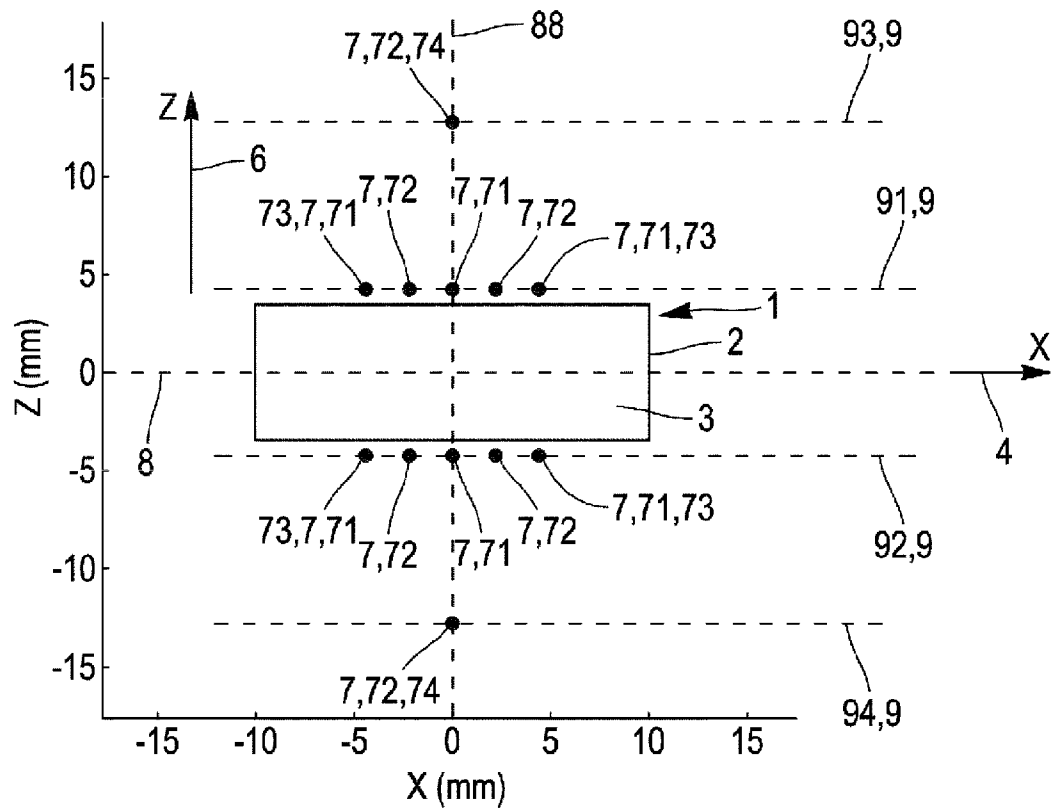
[Figura 5]



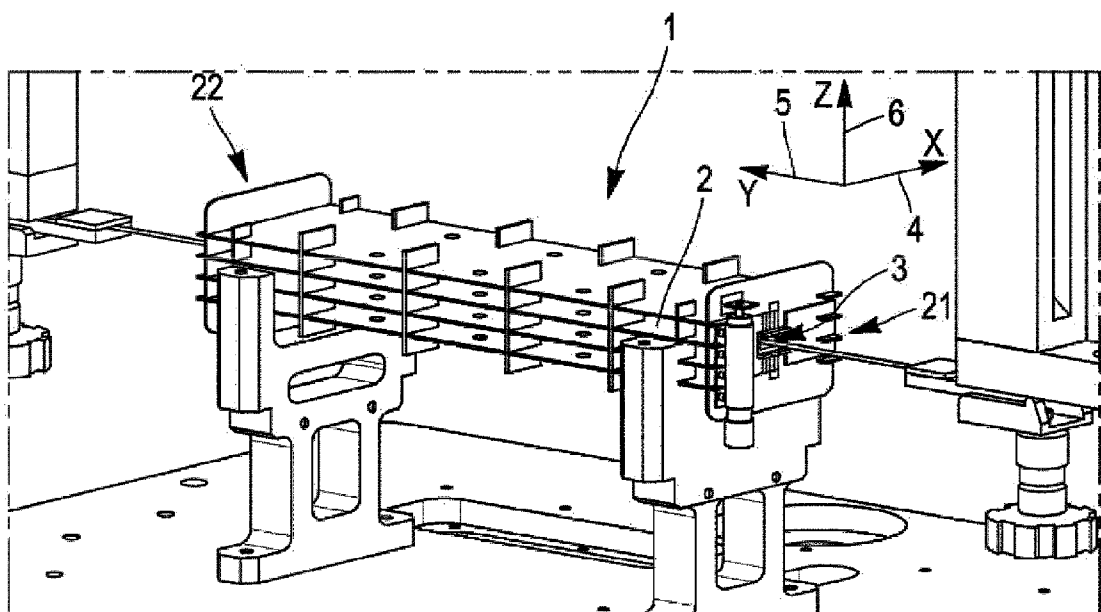
[Figura 6]



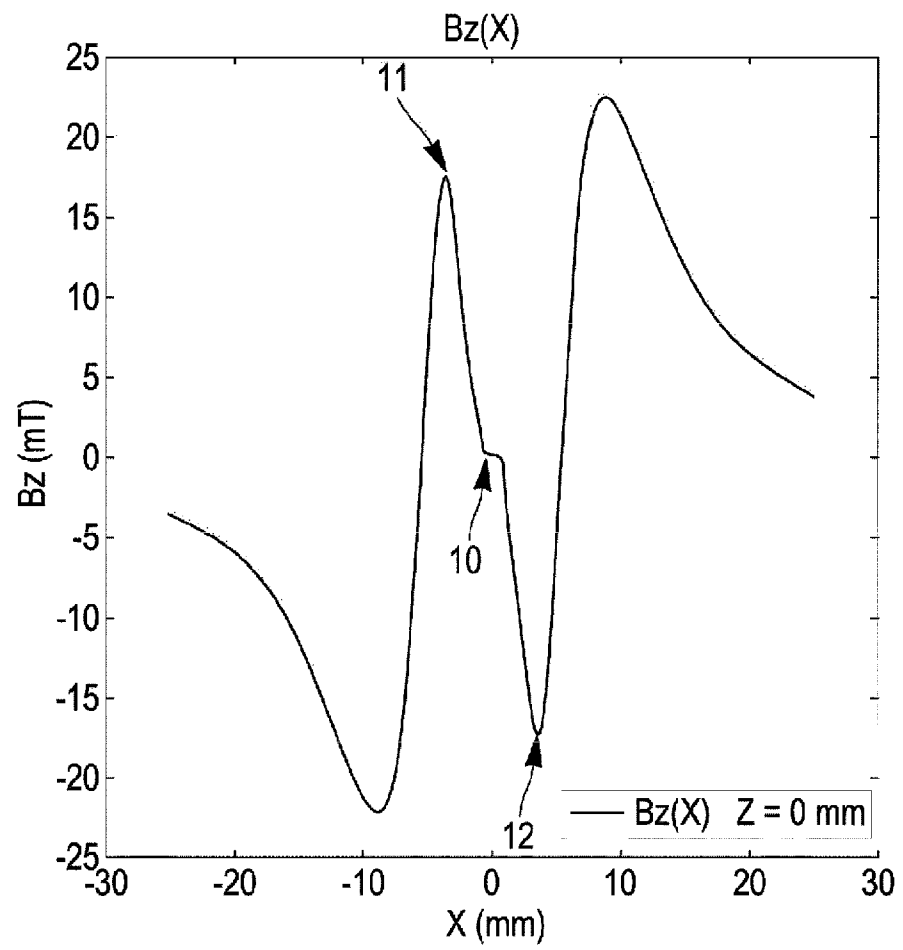
[Figura 7]



[Figura 8]



[Figura 9]



[Figura 10]

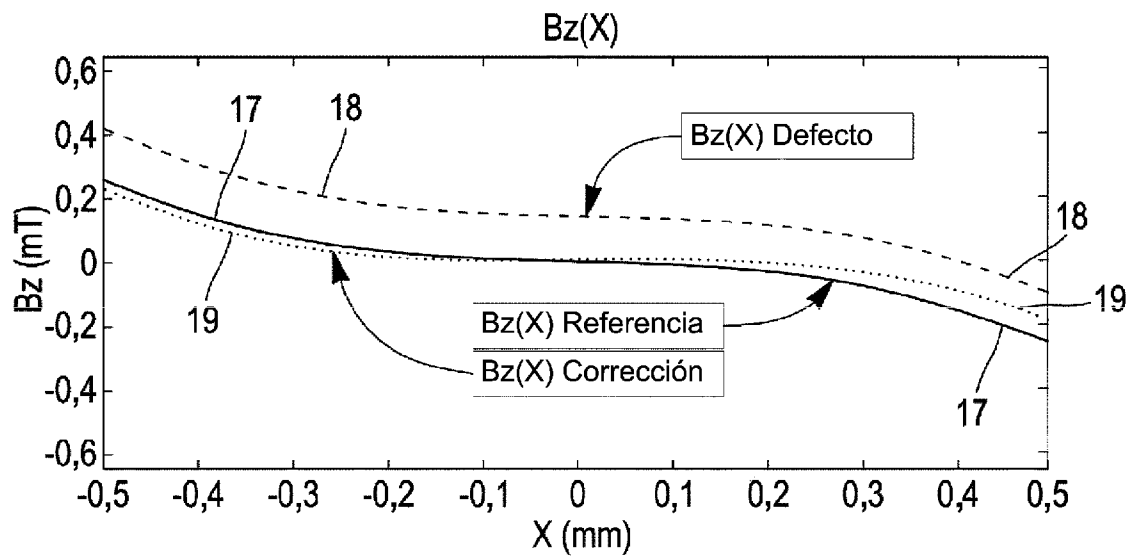


Figura 10a

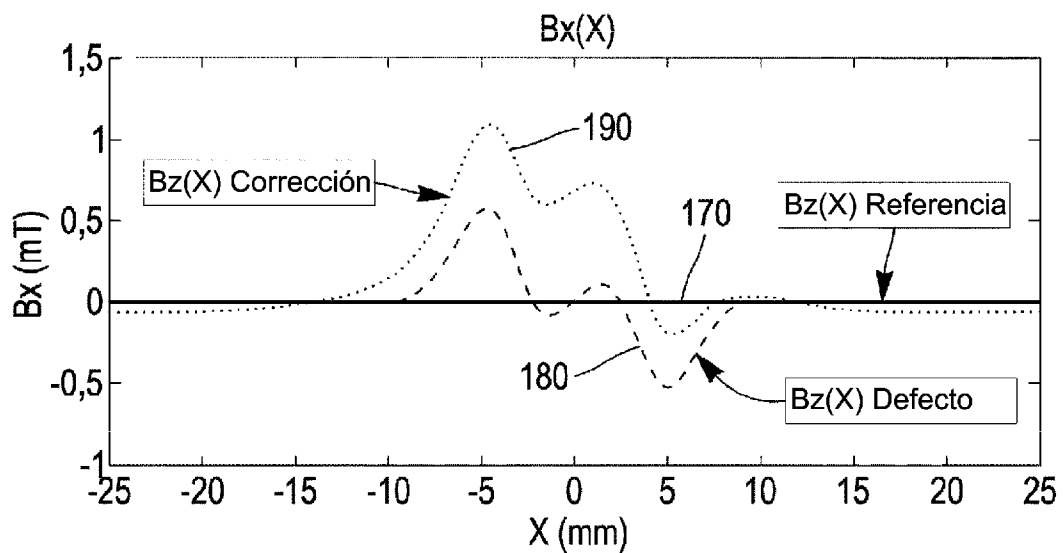
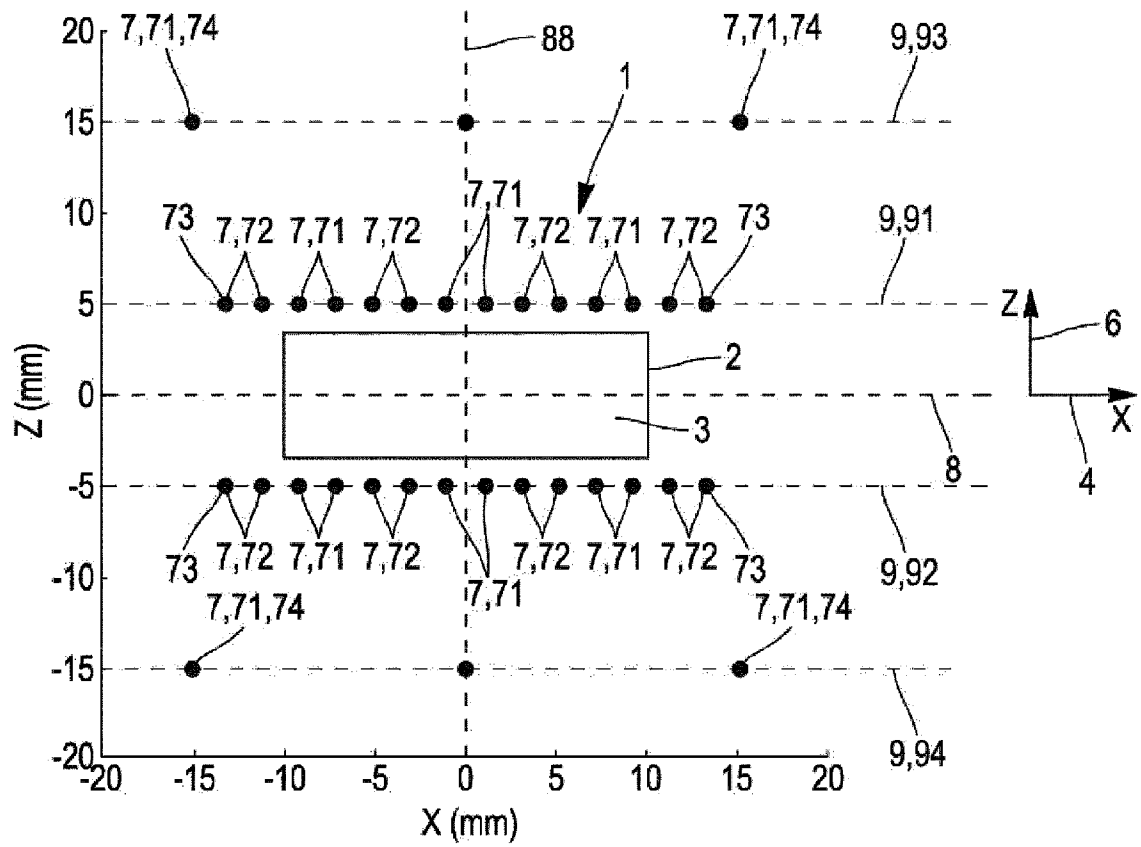
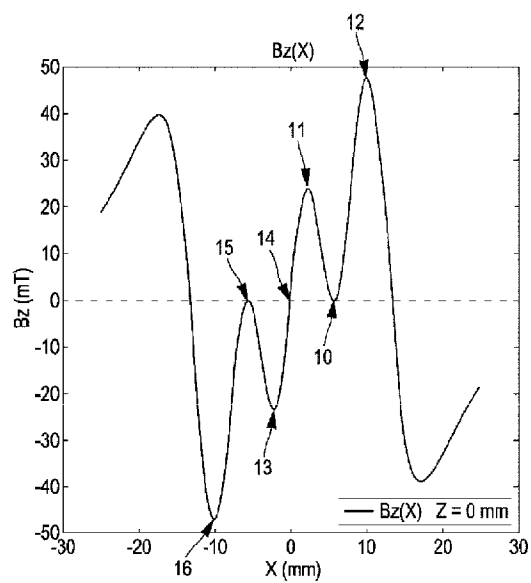


Figura 10b

[Figura 11]



[Figura 12]



[Figura 13]

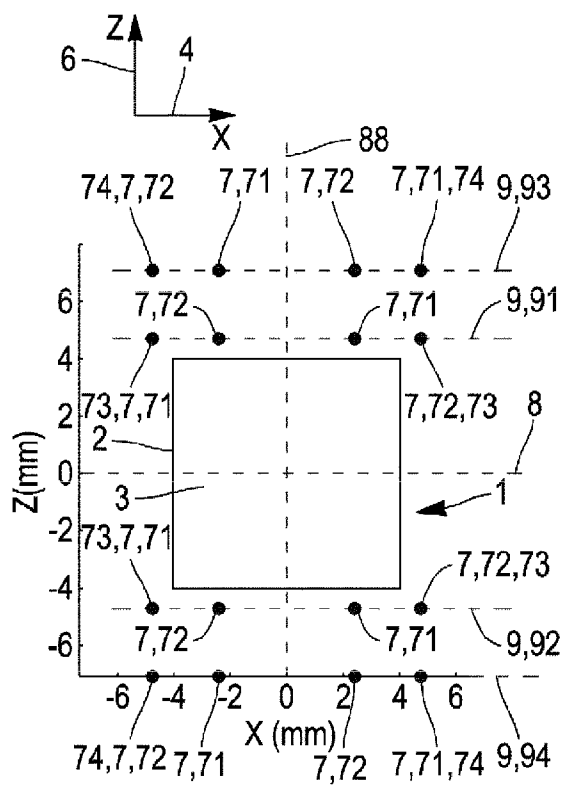


Figura 13a

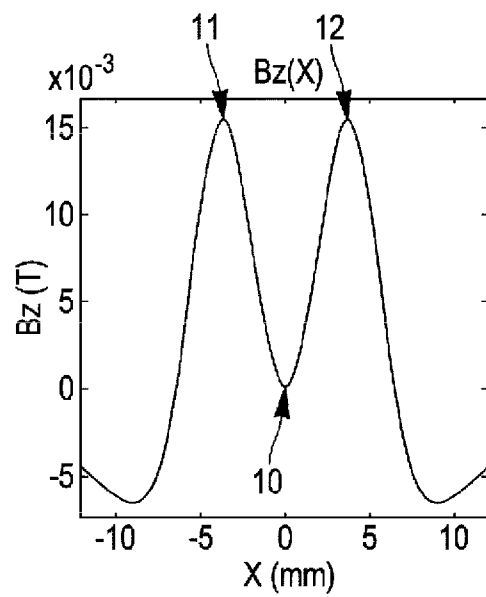


Figura 13b

[Figura 14]

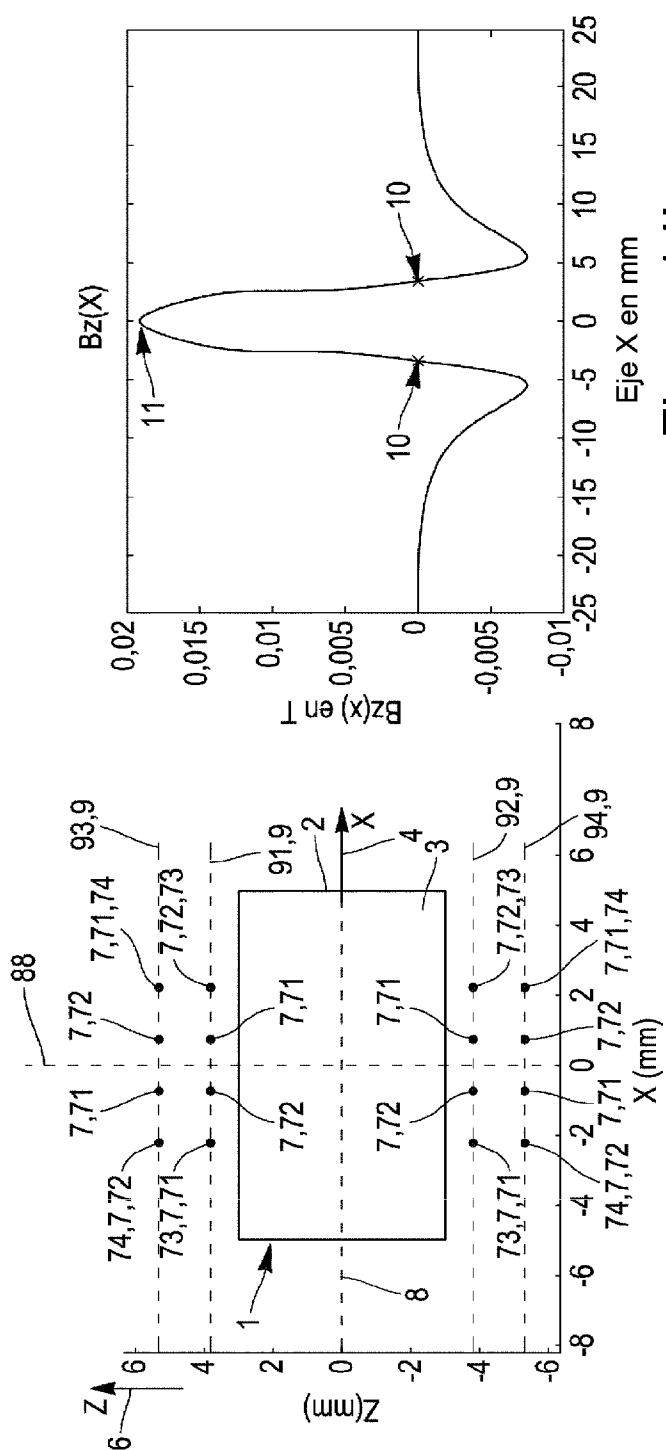
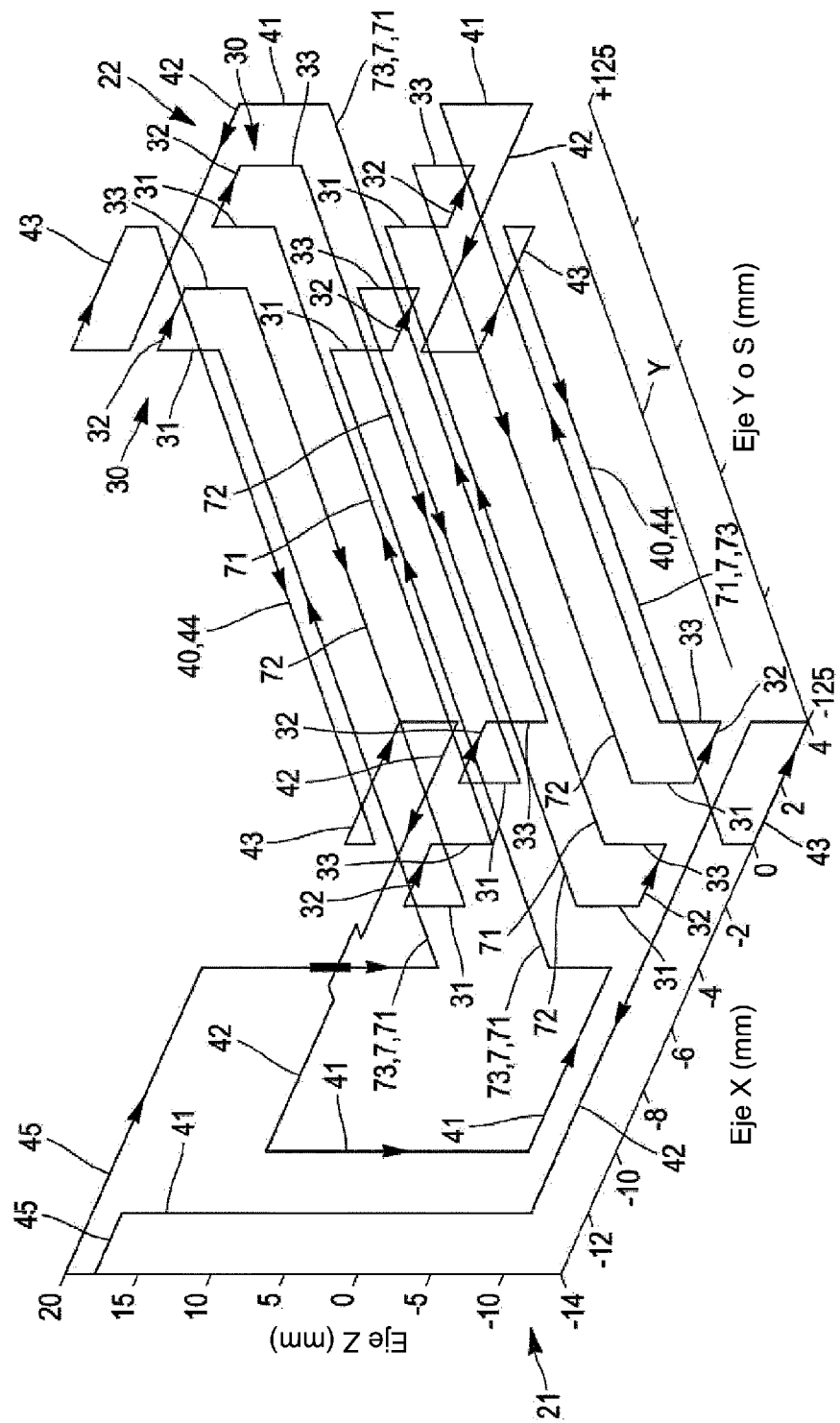


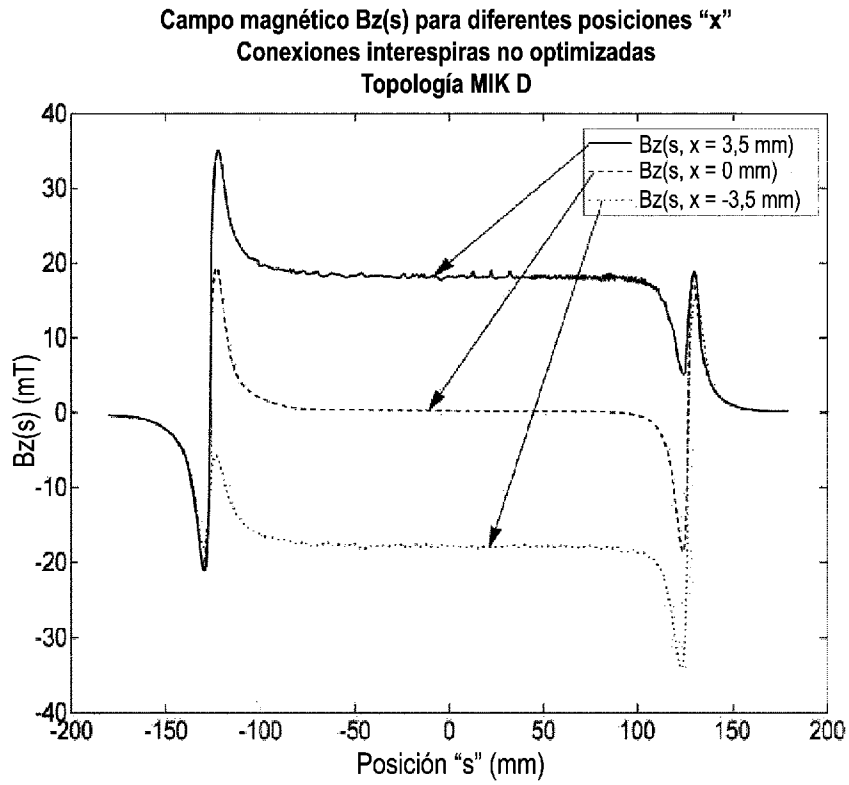
Figura 14b

Figura 14a

[Figura 15]



[Figura 16]



[Figura 17]

