(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 577 057**

(21) Número de solicitud: 201531609

(51) Int. Cl.:

G21B 1/05 (2006.01)

(12) SOLICITUD DE PATENTE A1

(22) Fecha de presentación:

06.11.2015

(43) Fecha de publicación de la solicitud:

12.07.2016

(71) Solicitantes:

CENTRO DE INVESTIGACIONES ENERGÉTICAS, MEDIOAMBIENTALES Y TECNOLÓGICAS (CIEMAT) (100.0%)
Avda Complutense, 40
28040 Madrid ES

(72) Inventor/es:

QUERAL MAS, Vicente Manuel

(74) Agente/Representante:

CARVAJAL Y URQUIJO, Isabel

(54) Título: **Método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma**

(57) Resumen:

Método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma, que comprende:

- obtener, a partir de una superficie de bobinado base (3) toroidal contorsionada y de una última superficie de flujo base (4) definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo, la estructura tridimensional de unas bobinas curvas (2) de un bobinado eléctrico base (1) dispuesto sobre dicha superficie de bobinado base (3);
- obtener la estructura tridimensional de unas bobinas curvas (2) de al menos un bobinado eléctrico adicional (1', 1'') dispuesto sobre una respectiva superficie de bobinado adicional (3', 3'') toroidal contorsionada, concéntrica con la superficie de bobinado base (3), y que genera, al superponerlo al campo magnético del bobinado base (1), una última superficie de flujo (4', 4'') cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base (4).

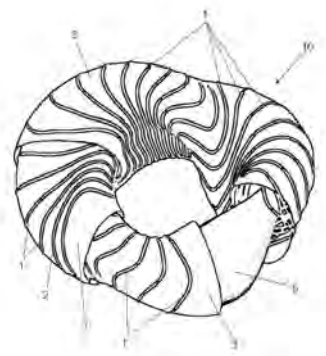

Fig. 1

ES 2 577 057 A1

Método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma

D E S C R I P C I Ó N

SECTOR DE LA TÉCNICA

La invención se enmarca en el sector de los bienes de equipo científicos para investigación y desarrollo en plasmas de fusión termonuclear, existiendo la posibilidad de aplicación futura para equipos industriales de ensayo y validación de configuraciones magnéticas por empresas constructoras de los futuros reactores de fusión.

La invención se refiere en concreto a un método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para un dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma. El método puede aplicarse por ejemplo para obtener la estructura de bobinas magnéticas en dispositivos de fusión del tipo llamado stellarator, con el fin de buscar y encontrar de forma rápida configuraciones magnéticas de excelentes propiedades, en especial configuraciones dotadas de bajo transporte turbulento.

ESTADO DE LA TÉCNICA

Los dos tipos de dispositivos de fusión por confinamiento magnético más desarrollados actualmente son los llamados tokamaks y stellarators. Ambos fueron inicialmente desarrollados en la década de 1950. En particular el concepto stellarator fue creado en 1951. Los stellarators se diferencian de los tokamaks, entre otros aspectos, en que el campo magnético confinante se puede producir únicamente por medio de bobinas y no requieren de corriente en el plasma. Ello les confiere ventajas respecto los tokamaks para dispositivos experimentales debido a que la configuración magnética puede controlarse de forma más exacta y sencilla debido a la no existencia de corriente del plasma. Una desventaja de los stellarators respecto los tokamaks es la mayor complejidad geométrica de las bobinas magnéticas.

La fusión termonuclear magnética aún no ha generado significativo interés en la industria debido fundamentalmente a la complejidad y gran tamaño de los dispositivos

involucrados. Ello implica un alto coste de un dispositivo grande, geométricamente complejo y preciso. Basado en el conocimiento actual, un reactor de fusión comercial necesariamente tendría que ser de gran tamaño, fundamentalmente debido al modesto confinamiento del plasma que se ha logrado hasta la actualidad. Sin embargo, hay que tener en cuenta que un confinamiento del plasma de solamente dos veces superior al máximo conseguido hasta la actualidad sería un resultado de impacto extraordinario para la energía de fusión.

El confinamiento del plasma depende, entre otros factores, de la configuración magnética, que en stellarators sin corriente en el plasma depende de la forma de la superficie exterior del plasma, que a su vez depende de las bobinas magnéticas que generan tal superficie, mientras que en tokamaks el perfil de corriente del plasma influye de forma decisiva en el confinamiento. Otros factores que influyen en el confinamiento del plasma son el perfil de densidad y temperatura del plasma. Los factores citados son esenciales pero existen otros factores independientes de los anteriores. En general, en tokamaks y en stellarators avanzados, el tipo de transporte que más influye en el confinamiento es el llamado transporte turbulento.

Actualmente existen programas informáticos de cálculo de transporte turbulento. Sin embargo los cálculos emplean decenas de miles de horas-procesador e incluyen hipótesis de trabajo simplificadoras que implican la obtención de resultados en muchas ocasiones escasamente parecidos a la realidad. Hay progreso en la velocidad de cálculo de los ordenadores y de los métodos matemáticos de cálculo, pero se desconoce cuándo los resultados de los cálculos de transporte turbulento predecirán con exactitud aceptable la realidad experimental o industrial.

La mayoría de los dispositivos experimentales para plasmas de fusión de tipo stellarator pueden cambiar ligeramente la configuración magnética energizando unos sistemas de bobinas u otros, pero no se conoce ningún antecedente de la especial estructura de bobinas concéntricas capaces de generar configuraciones magnéticas genéricas basadas en coeficientes de Fourier. La presente invención proporciona una estructura geométrica de bobinas concéntricas especiales generadas por un particular método de obtención, para un dispositivo de ensayo sistemático de configuraciones magnéticas, en particular para la mejora del transporte turbulento en plasmas.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCIÓN

La presente invención se refiere a una estructura de bobinas magnéticas concéntricas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma, y a un método de obtención de dicha estructura. La estructura consiste en varios bobinados eléctricos toroidales concéntricos, formado cada bobinado por una serie de bobinas curvas situadas sobre una superficie de bobinado contorsionada toroidal, de manera que cada bobinado eléctrico es capaz de generar una componente magnética individual correspondiente a uno de los coeficientes de Fourier generadores de la última superficie de flujo del plasma del stellarator, de manera que la inyección de un cierto valor de corriente en un bobinado se corresponde con un cierto valor del coeficiente de Fourier respectivo.

El método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma comprende las siguientes etapas:

- Obtener, a partir de una superficie de bobinado base toroidal contorsionada y de una última superficie de flujo base definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo, la estructura tridimensional de unas bobinas curvas de un bobinado eléctrico base dispuesto sobre dicha superficie de bobinado base. La última superficie de flujo base tiene preferiblemente forma de toroide cuyo corte poloidal es elipsoidal.

- Obtener la estructura tridimensional de unas bobinas curvas de al menos un bobinado eléctrico adicional, de forma que cada bobinado eléctrico adicional está dispuesto sobre una respectiva superficie de bobinado adicional toroidal contorsionada, concéntrica con la superficie de bobinado base, y que genera, al superponerlo al campo magnético del bobinado base, una última superficie de flujo cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base.

El método puede comprender también disponer los bobinados eléctricos sobre sus respectivas superficies de bobinado según la estructura tridimensional de las bobinas curvas previamente obtenida.

En una realización preferida la forma geométrica de una última superficie de flujo adicional resulta de añadir un solo coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base. En otra realización preferida la forma

geométrica de una última superficie de flujo adicional resulta de añadir dos coeficientes de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base.

La estructura tridimensional de las bobinas curvas de cada bobinado eléctrico adicional se obtiene preferentemente mediante una aplicación informática a partir de su correspondiente superficie de bobinado adicional, de una última superficie de flujo adicional y el bobinado eléctrico base. El coeficiente de Fourier de la forma geométrica de la última superficie de flujo a la que contribuye un bobinado eléctrico adicional es preferiblemente de orden más elevado que los coeficientes de Fourier correspondientes a la última superficie de flujo base.

La inyección de un valor de corriente diferente en todos y cada uno de los bobinados eléctricos puede generar una última superficie de flujo genérica cualquiera. Cualquier última superficie de flujo correspondiente a la combinación lineal de corrientes en los bobinados eléctricos está contenida sin contacto en el interior de la superficie de bobinado más interior.

Un segundo aspecto de la presente invención se refiere a una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma, que comprende:

- Un bobinado eléctrico base dispuesto sobre una superficie de bobinado base toroidal contorsionada y configurado para generar un campo magnético base que origina una última superficie de flujo base definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo.

- Al menos un bobinado eléctrico adicional dispuesto sobre una respectiva superficie de bobinado adicional toroidal contorsionada, concéntrica con la superficie de bobinado base, donde cada bobinado eléctrico adicional está configurado para generar un campo magnético que, superpuesto al campo magnético base, produce una última superficie de flujo cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base.

Las superficies de bobinado concéntricas son preferentemente equidistantes entre sí. En una realización preferida la superficie de bobinado base es la superficie más exterior del conjunto de superficies de bobinado del dispositivo.

Para entender mejor la descripción hay que tener en cuenta que los coeficientes de Fourier pertenecen a una serie de Fourier que define una superficie tridimensional toroidal en coordenadas cilíndricas. También, que en los stellarators sin corriente significativa en el plasma, la configuración magnética es definida esencialmente por la forma geométrica de la superficie exterior del plasma, llamada usualmente última superficie de flujo. Por ello, en la descripción se utilizan los términos de configuración magnética y de última superficie de flujo como términos equivalentes.

La estructura de bobinas magnéticas concéntricas está constituida a partir de varios bobinados eléctricos toroidales concéntricos. Los bobinados eléctricos se sitúan sobre una superficie de bobinado contorsionada toroidal y por tanto las bobinas curvas se encuentran sobre tal superficie de bobinado contorsionada y son curvas y retorcidas.

Existe un bobinado eléctrico base capaz de generar un campo magnético base que origina una configuración magnética base cuya última superficie de flujo base posee contornos suaves y es definida por pocos coeficientes de Fourier de bajo orden. Tal última superficie de flujo base posee forma de toroide cuyo corte poloidal es elipsoidal, lo cual incluye la forma circular. El bobinado eléctrico base genera un campo magnético en el interior de las bobinas cuya última superficie de flujo posee tal forma toroidal de contornos suaves.

El segundo bobinado eléctrico, situado concéntrico y aproximadamente equidistante al bobinado eléctrico base, es capaz de generar una sola componente magnética correspondiente a un solo coeficiente de Fourier. La definición de la serie de bobinas curvas correspondiente al segundo bobinado eléctrico se obtiene por medio del método descrito posteriormente. El segundo bobinado eléctrico puede, o bien situarse concéntrico al bobinado eléctrico base sobre una superficie de bobinado exterior al bobinado eléctrico base, o bien situado sobre una superficie de bobinado interior al bobinado eléctrico base. La diferencia entre ambas opciones reside en un ligero incremento en el grado de curvatura de las bobinas curvas situadas en la superficie de bobinado exterior. Debido que el número de capas concéntricas que puede construirse está limitado por cuestiones constructivas y de coste, los coeficientes de Fourier que se eligen para el segundo y todos los bobinados son de orden bajo, pudiendo utilizar todos los coeficientes de orden bajo si se desconoce totalmente el tipo de configuración a generar o ciertos coeficientes predefinidos.

El tercero y siguientes bobinados eléctricos se sitúan también concéntricos y aproximadamente equidistantes al bobinado eléctrico base y cada bobinado es capaz de generar una sola componente magnética correspondiente a un cierto coeficiente de Fourier definitorio de la forma tridimensional de la última superficie de flujo. El procedimiento para la obtención de las bobinas curvas correspondientes al tercero y siguientes bobinados eléctricos se describe posteriormente.

Cada bobinado eléctrico está dotado de un número elevado de bobinas curvas para disminuir el rizado magnético, número que orientativamente se encontraría entre 20 y 100 bobinas por bobinado eléctrico.

Las bobinas curvas de cada bobinado eléctrico se conectan en serie y por tanto existe sólo un valor de corriente eléctrica por bobinado eléctrico que se corresponde con el valor del particular coeficiente de Fourier a partir del cual se ha generado el bobinado eléctrico, de tal manera que el campo magnético generado por el bobinado eléctrico produce la componente magnética individual correspondiente al coeficiente de Fourier seleccionado. Aumentando el valor de la corriente en un particular bobinado eléctrico se incrementa la magnitud de la curvatura de la última superficie de flujo según el efecto geométrico del particular coeficiente de Fourier. Cambiando el sentido de la corriente en un particular bobinado eléctrico se genera un efecto contrario, similar al generado por un cambio de signo en el valor del particular coeficiente de Fourier. En el caso de que las deformaciones geométricas producidas en la forma de la última superficie de flujo sean relativamente grandes en relación a la forma de la última superficie de flujo base, entonces la relación entre el valor del coeficiente de Fourier y el valor de la corriente inyectada en el bobinado no es lineal.

Los bobinados eléctricos formados por bobinas curvas y la estructura de bobinas magnéticas concéntricas se producirán preferentemente por manufactura aditiva debido a su gran complejidad geométrica, aunque cualquier método de fabricación tradicional podría ser satisfactorio.

Para poder entender claramente la descripción del método de determinación de los bobinados eléctricos descrita a continuación, es conveniente conocer las expresiones matemáticas:

$r = \sum R_{mn} \cos 2\pi (m u + n v)$ $z = \sum Z_{mn} \operatorname{sen} 2\pi (m u + n v)$ $\varphi = 2\pi v / n_p$ $u,v \in [0,1]$

que expresan una superficie tridimensional toroidal periódica de n_p periodos en coordenadas cilíndricas como serie de Fourier. Tal expresión y un método genérico de obtención de bobinados para stellarators se describe en la publicación: P. Merkel, Solution of stellarator boundary value problems with external currents, Nuclear Fusion 27 867, 1987.

A efectos prácticos en su aplicación a estructuras de bobinas para stellarators, hay que tener en cuenta que los coeficientes de Fourier de orden bajo expresan la forma general del plasma o última superficie de flujo, mientras que los coeficientes de mayor orden (alto valor de n y m) pueden generar detalles y curvaturas más localizados de la última superficie de flujo.

El método de determinación de los bobinados comienza con la determinación del bobinado eléctrico base.

Se parte de una última superficie de flujo base de contornos suaves, superficie cuya geometría es generada por los mínimos coeficientes de Fourier de bajo orden, según la expresión indicada anteriormente, necesarios para generar un volumen. Tales coeficientes base mínimos para la última superficie de flujo base son R_{00} , R_{10} y Z_{10}. Debido a que existe la necesidad de reducir el número de bobinados eléctricos concéntricos por motivos constructivos y de coste, los siguientes coeficientes de orden bajo R_{11} y Z_{11}, importantes en configuraciones stellarator, pueden incluirse en la configuración magnética base. Un número mínimo de bobinados eléctricos concéntricos para poder generar cientos de configuraciones magnéticas serían 3 o 4 bobinados. El número de bobinados eléctricos concéntricos para poder generar decenas de miles de configuraciones magnéticas serían del orden de 6 a 10 bobinados eléctricos concéntricos.

Para la generación de la serie de bobinas curvas correspondiente al bobinado eléctrico base, y también para los otros bobinados eléctricos, puede utilizarse alguno de los códigos informáticos existentes, tales como NESCOIL que obtiene, a partir de una

última superficie de flujo y de una superficie de bobinado, la definición de las bobinas curvas como filamentos tridimensionales, o bien se pueden probar sucesivamente configuraciones de bobinas curvas sobre la superficie de bobinado hasta obtener la última superficie de flujo deseada.

Tras obtener el bobinado eléctrico base se obtiene el segundo bobinado eléctrico. El segundo bobinado eléctrico es aquel tal que, el campo magnético generado por el bobinado base al establecerle corriente sumado al campo generado por el segundo bobinado eléctrico situado sobre una superficie de bobinado concéntrica a la superficie de bobinado base, genera una última superficie de flujo igual a la forma geométrica obtenida al añadir un solo coeficiente de Fourier de orden bajo a los coeficientes base mínimos. Por ejemplo, se puede añadir el coeficiente R_{20} a la forma geométrica de la última superficie de flujo base para generar la última superficie de flujo que se pretende generar con la suma del efecto del segundo bobinado eléctrico y el bobinado eléctrico base.

El tercer y sucesivos bobinados eléctricos se obtienen por el mismo procedimiento que el indicado para el segundo bobinado eléctrico, es decir, se toma el campo magnético producido por el bobinado eléctrico base y se obtienen las bobinas curvas sobre otra superficie de bobinado contorsionada concéntrica que generan la última superficie de flujo igual a la forma geométrica obtenida al añadir un solo coeficiente de Fourier, diferente a los anteriores y de orden sucesivamente más elevado, a los coeficientes base mínimos.

Cuanto mayor número de capas de bobinas se utilizan mayor precisión se obtiene en la generación durante los ensayos de los miles de últimas superficies de flujo posibles, y permitiría encontrar configuraciones magnéticas de mayor calidad. Sin embargo, mayor es la complejidad y coste del dispositivo de ensayo.

Un posible procedimiento experimental para encontrar configuraciones magnéticas mejores o excelentes consiste en generar un pulso de plasma de larga duración o multitud de pulsos cortos consecutivos en un dispositivo dotado de tales estructuras de bobinado y los correspondientes sistemas auxiliares, especialmente fuentes de alimentación de corriente regulable para cada bobinado controlables por ordenador, según la descripción siguiente.

En una primera tanda de ensayos, durante cada pulso se inyecta un número limitado de corrientes preestablecidas en las superficies de bobinado preferentes, corrientes de magnitud espaciada entre un límite inferior y uno superior que definen un intervalo amplio de corrientes. Son bobinados preferentes el bobinado eléctrico base y los inmediatos siguientes. Se generan plasmas en el dispositivo bajo las mismas condiciones operativas, excepto las variables corrientes en los bobinados, midiendo al menos la temperatura y densidad del plasma en cada caso. Con ello se obtienen cientos o miles de resultados de la calidad de diferentes configuraciones magnéticas con formas aún suaves y poco definidas. Se eligen las configuraciones que obtengan mejor comportamiento del plasma para las mismas condiciones, esencialmente mayor temperatura y densidad.

En una segunda tanda de ensayos se establece un nuevo límite de corriente inferior y superior para cada superficie de bobinado preferente, en general, un intervalo de corrientes de amplitud menor que en la primera tanda de ensayos. Adicionalmente, se establecen límites amplios de corriente inferior y superior para cada superficie de bobinado menos preferente. Nuevamente, durante cada pulso se inyecta un número limitado de corrientes preestablecidas en las superficies de bobinado preferentes y menos preferentes. Se generan plasmas en el dispositivo, midiendo al menos la temperatura y densidad. Con ello se obtienen cientos o miles de resultados de la calidad de diferentes configuraciones ensayadas. Se eligen las configuraciones que obtengan mejor comportamiento del plasma para las mismas condiciones.

Se produce una tercera y subsecuentes tandas de ensayos hasta inyectar corrientes precisas en todos los bobinados eléctricos concéntricos del dispositivo, de manera que las configuraciones magnéticas dotadas de mejor confinamiento posean una última superficie de flujo con una forma geométrica muy definida.

Se establecen los métodos experimentales adecuados para evitar errores experimentales, por ejemplo, un doble ensayo con orden de generación de corrientes invertido temporalmente.

DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

La descripción de la estructura y método efectuada en el punto anterior está complementada con una serie de dibujos que destacan los aspectos y puntos más característicos del invento, dibujos que son ilustrativos y se recogen al final como parte integrante de la propia memoria descriptiva. Estos dibujos contribuyen a una mejor comprensión del alcance de la invención, a la vez que sirven como punto de referencia para comprender exactamente el método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma. Con este fin los dibujos que se acompañan representan:

La Figura 1 representa esquemáticamente una vista en perspectiva de un ejemplo de realización de la estructura de bobinas magnéticas concéntricas y superficies de bobinado del dispositivo de confinamiento magnético de la presente invención.

La Figura 2A muestra esquemáticamente una vista en planta de una posible configuración magnética base. La Figura 2B muestra un corte esquemático A-A' de la Figura 2A en la que se observan los contornos suaves de la última superficie de flujo base. Las Figuras 2C-2F muestran también esquemáticamente varios cortes, según el mismo plano de corte A-A' indicado de la Figura 2A, de últimas superficies de flujo obtenidas energizando diferentes bobinados eléctricos con diferentes corrientes, donde se incluyen también cortes de las superficies de bobinado.

REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN

La **Figura 1** muestra esquemáticamente una vista en perspectiva de un ejemplo de realización de la estructura de bobinas magnéticas 10 para un dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma de acuerdo a la presente invención. En la Figura se muestra la estructura de bobinas magnéticas 10 concéntricas y las superficies de bobinado para el dispositivo de ensayo, además de la última superficie de flujo o superficie exterior de un plasma. Parte de las superficies de bobinado y bobinas curvas han sido eliminadas en la figura para permitir la visión de las capas interiores de bobinas.

La estructura de bobinas magnéticas 10 concéntricas está constituida por varios bobinados eléctricos (1, 1', 1'') toroidales concéntricos contorsionados, formado cada uno por una serie de bobinas curvas 2 situadas sobre superficies de bobinados (3, 3', 3'') toroidales contorsionadas, de manera que los bobinados eléctricos (1, 1', 1'') se

encuentran situados aproximadamente equidistantes a una superficie de bobinado interior 3'' capaz de albergar en su interior el mayor número posible de formas diferentes de últimas superficies de flujo sin que exista contacto del plasma 5 con la superficie de bobinado interior 3''. La superficie de bobinado interior 3'' se obtiene como media aproximada de todas las posibles últimas superficies de flujo que podrá albergar el dispositivo de ensayo. Las superficies de bobinado (3, 3', 3'') son concéntricas y están separadas una distancia suficiente para albergar el ancho de las bobinas curvas 2.

En el ejemplo simplificado representado, la estructura de bobinas magnéticas 10 comprende una superficie de bobinado exterior 3, una superficie de bobinado intermedia 3' y la ya mencionada superficie de bobinado interior 3''.

La estructura de bobinados eléctricos concéntricos comprende un bobinado eléctrico base 1, un segundo bobinado eléctrico 1' y un tercer bobinado eléctrico 1''.

El bobinado eléctrico base 1 se encuentra situado sobre la superficie de bobinado base 3, que preferentemente es la superficie toroidal contorsionada más exterior del conjunto de superficies de bobinado concéntricas del dispositivo. El bobinado eléctrico base 1 genera un campo magnético base que origina una configuración magnética base cuya última superficie de flujo base 4 está dotada de contornos suaves, tales como formas elipsoidales. La **Figura 2A** muestra esquemáticamente una vista en planta de una posible configuración magnética base originada únicamente por el bobinado eléctrico base 1. La **Figura 2B** muestra un corte esquemático A-A' de la Figura 2A en la que se observan las formas elipsoidales de la última superficie de flujo base 4 originada por el bobinado eléctrico base 1.

El bobinado eléctrico base 1 se obtiene por medio de un programa informático o por medio de pruebas sucesivas de bobinados, de manera que una corriente eléctrica inyectada en el bobinado eléctrico base 1 genera la última superficie de flujo base 4 de contornos suaves definida por coeficientes de Fourier base mínimos. En particular, el caso de última superficie de flujo base 4 representado en las Figuras 2A y 2B se define por medio de cinco coeficientes de Fourier: R_{00} = 4 , R_{10} = 1.0 , Z_{10} =1.5 , R_{11} = 0.5 y Z_{11} =-0.5. Se trata de una forma geométrica simple genérica a la cual puede

superponerse el efecto magnético producido por los restantes bobinados eléctricos (1', 1'') concéntricos.

El segundo bobinado eléctrico 1' se obtiene al buscar o calcular un bobinado eléctrico situado sobre la superficie de bobinado 3' tal que al sumar el efecto del campo magnético producido por el bobinado eléctrico base 1 y el efecto del campo magnético del segundo bobinado eléctrico 1' se obtenga la última superficie de flujo definida por la adición de, preferentemente, un solo coeficiente de Fourier a la última superficie de flujo base. Las Figuras 2C-2F muestran esquemáticamente cortes A-A' de últimas superficies de flujo obtenidas energizando diferentes bobinados eléctricos con diferentes corrientes, donde se aprecian también los cortes de las superficies de bobinado (3, 3', 3''). En un ejemplo particular, el caso de última superficie de flujo 4' representada en la **Figura 2C** se define por adición del coeficiente de Fourier R_{20} = 0.25 a los coeficientes base mínimos, generada por la acción conjunta del bobinado eléctrico base 1 y por el segundo bobinado eléctrico 1'.

El tercer bobinado eléctrico 1'', que en el caso representado es el bobinado último y más interior de la serie de bobinados eléctricos concéntricos, se obtiene por el mismo procedimiento que el segundo bobinado eléctrico 1'. En un ejemplo particular, la última superficie de flujo 4'' representada en la **Figura 2D** se define por adición del coeficiente de Fourier R_{40} = 0.06 a los coeficientes base mínimos, generada por la acción conjunta del bobinado eléctrico base 1 y por el tercer bobinado eléctrico 1''.

La combinación de inyección de corriente en el bobinado eléctrico base 1, en el segundo bobinado eléctrico 1', y en el tercer bobinado eléctrico 1'', en el caso particular desarrollado anteriormente, da como resultado una última superficie de flujo compuesta 6, representada en la **Figura 2E**, más definida y compleja que la última superficie de flujo base 4 generada por una corriente base, y más definida que la última superficie de flujo (4', 4'') generada por sólo dos corrientes. Se ha denominado última superficie de flujo compuesta a aquella última superficie de flujo generada por todos los bobinados eléctricos.

Como ejemplo de otras posibilidades, se representa una última superficie de flujo 6' poco convencional, representada en la **Figura 2F**, correspondiente a añadir un bobinado eléctrico para generar el coeficiente de Fourier Z_{20} = 0.25.

El efecto de este bobinado eléctrico, ponderado con el valor de su corriente inyectada, y combinado con los dos anteriores bobinados eléctricos u otros numerosos bobinados, proporciona una infinidad de configuraciones magnéticas fácilmente controlables y definibles en base a las múltiples corrientes inyectadas controladas.

La inyección de corrientes diversas simultáneamente en todos y cada uno de los bobinados eléctricos, bien corrientes generadas aleatoriamente, bien corrientes establecidas por métodos de búsqueda evolutivos o métodos guiados, bien generando las corrientes de forma sencilla tal como se ha descrito en la descripción, generan una gran multitud de combinaciones y con ello de configuraciones magnéticas, alguna de las cuales podría proporcionar confinamiento turbulento mejorado u otras propiedades favorables del plasma.

Adicionalmente se dispone de los elementos complementarios para constituir la estructura de bobinas magnéticas concéntricas y su funcionamiento, tales como materiales de soporte, una serie de fuentes de alimentación independientes controlables por ordenador, una cámara de vacío interior a las bobinas, y tornillos y elementos de fijación.

No se considera necesario hacer más extensa esta descripción para que cualquier experto en la materia comprenda el alcance de la invención y las ventajas que de la misma se derivan.

Los materiales, forma, tamaño y disposición de los elementos serán susceptibles de variación siempre y cuando ello no suponga una alteración en la esencialidad del invento.

Los términos en que se ha redactado esta memoria deberán ser tomados siempre en sentido amplio y no limitativo.

REIVINDICACIONES

1. Método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma, caracterizado por que comprende:

- obtener, a partir de una superficie de bobinado base (3) toroidal contorsionada y de una última superficie de flujo base (4) definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo, la estructura tridimensional de unas bobinas curvas (2) de un bobinado eléctrico base (1) dispuesto sobre dicha superficie de bobinado base (3);

- obtener la estructura tridimensional de unas bobinas curvas (2) de al menos un bobinado eléctrico adicional (1', 1''), de forma que cada bobinado eléctrico adicional (1', 1'') está dispuesto sobre una respectiva superficie de bobinado adicional (3', 3'') toroidal contorsionada, concéntrica con la superficie de bobinado base (3), y que genera, al superponerlo al campo magnético del bobinado base (1), una última superficie de flujo (4', 4'') cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base (4);

- disponer los bobinados eléctricos (1, 1', 1'') sobre sus respectivas superficies de bobinado (3, 3', 3'') según la estructura tridimensional de las bobinas curvas (2) previamente obtenida.

2. Método según la reivindicación 1, caracterizado por que la última superficie de flujo base (4) tiene forma de toroide cuyo corte poloidal es elipsoidal.

3. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que la forma geométrica de una última superficie de flujo adicional (4', 4'') resulta de añadir un solo coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base (4).

4. Método según cualquiera de las reivindicaciones 1 a 2, caracterizado por que la forma geométrica de una última superficie de flujo adicional (4', 4'') resulta de añadir dos coeficientes de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base (4).

5. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que la estructura tridimensional de las bobinas curvas (2) de cada bobinado eléctrico

adicional (1’, 1’’) se obtiene mediante una aplicación informática a partir de su correspondiente superficie de bobinado adicional (3’, 3’’), de una última superficie de flujo adicional (4’, 4’’) y el bobinado eléctrico base (1).

6. Método según cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que el coeficiente de Fourier de la forma geométrica de la última superficie de flujo a la que contribuye un bobinado eléctrico adicional (1’, 1’’) es de orden más elevado que los coeficientes de Fourier correspondientes a la última superficie de flujo base (4).

7. Estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma, caracterizada por que comprende:

un bobinado eléctrico base (1) dispuesto sobre una superficie de bobinado base (3) toroidal contorsionada y configurado para generar un campo magnético base que origina una última superficie de flujo base (4) definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo; y

al menos un bobinado eléctrico adicional (1’, 1’’) dispuesto sobre una respectiva superficie de bobinado adicional (3’, 3’’) toroidal contorsionada, concéntrica con la superficie de bobinado base (3), donde cada bobinado eléctrico adicional (1’, 1’’) está configurado para generar un campo magnético que, superpuesto al campo magnético base, produce una última superficie de flujo (4’, 4’’) cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base (4).

8. Estructura de bobinas según la reivindicación 7, caracterizada por que las superficies de bobinado (3, 3’, 3’’) concéntricas son equidistantes entre sí.

9. Estructura de bobinas según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 8, caracterizada por que la superficie de bobinado base (3) es la superficie más exterior del conjunto de superficies de bobinado (3, 3’, 3’’) del dispositivo (10).

10. Estructura de bobinas según cualquiera de las reivindicaciones 7 a 9, caracterizada por que comprende un segundo bobinado eléctrico adicional (1’) y un tercer bobinado eléctrico adicional (1’’) dispuestos, respectivamente, sobre una superficie de bobinado intermedia (3’) y una superficie de bobinado interior (3’’).

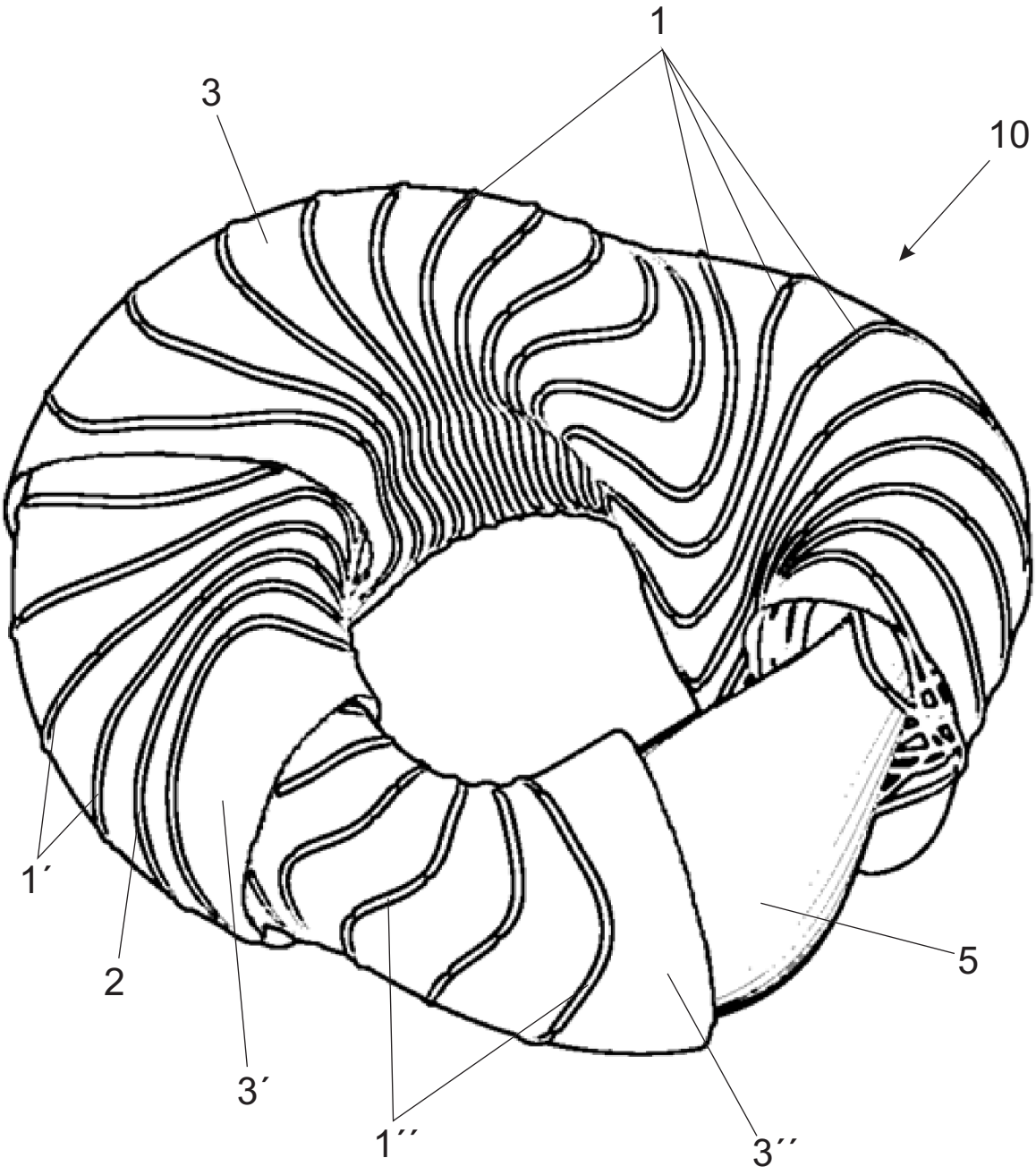

Fig. 1

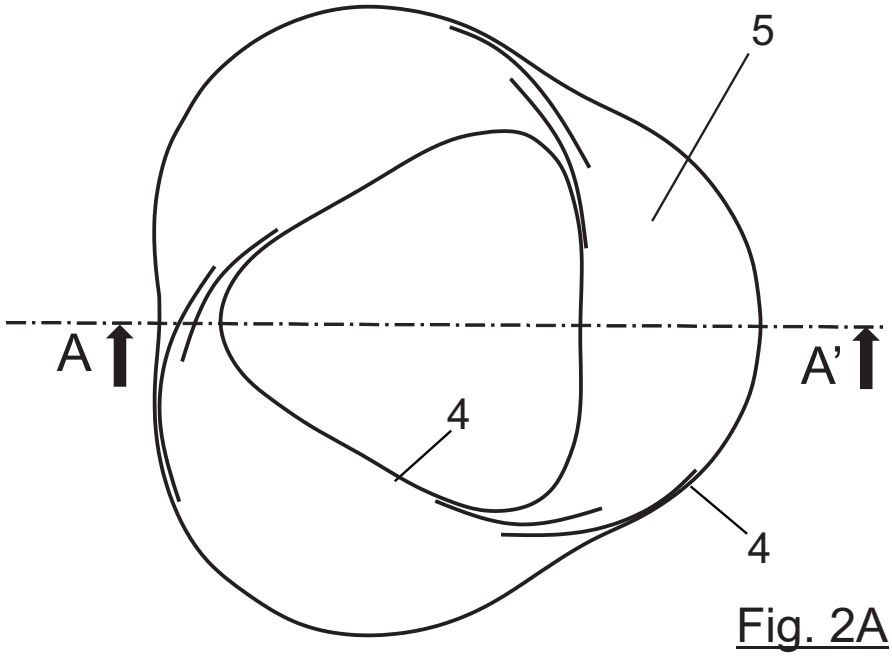

Fig. 2A

Fig. 2B

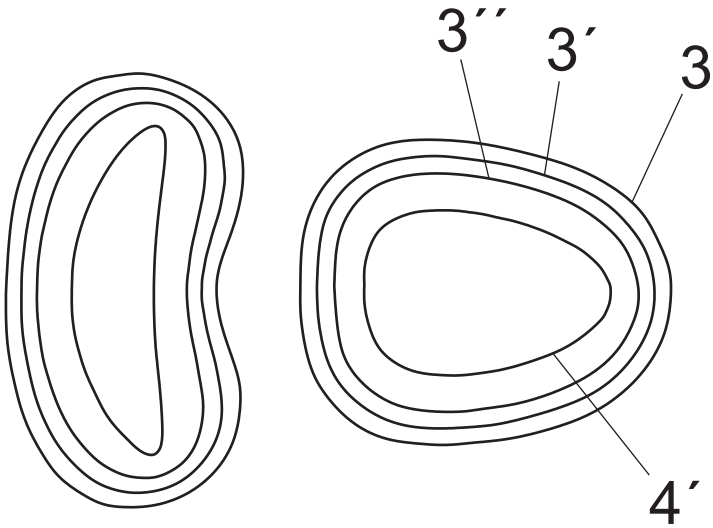

Fig. 2C

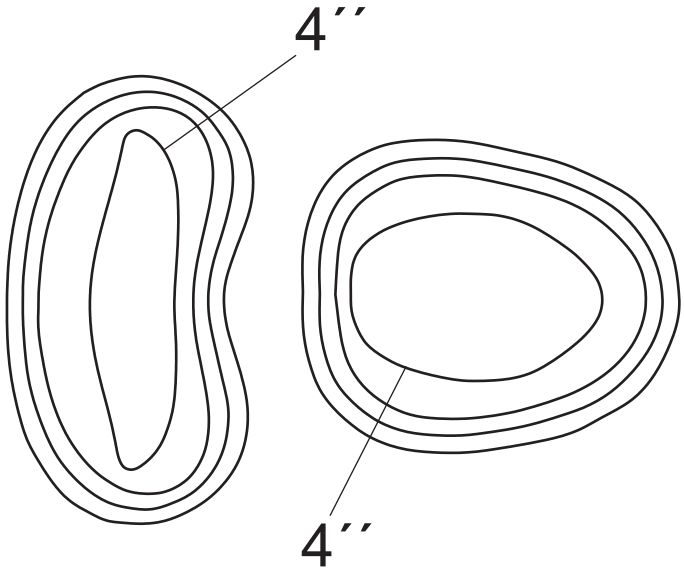

Fig. 2D

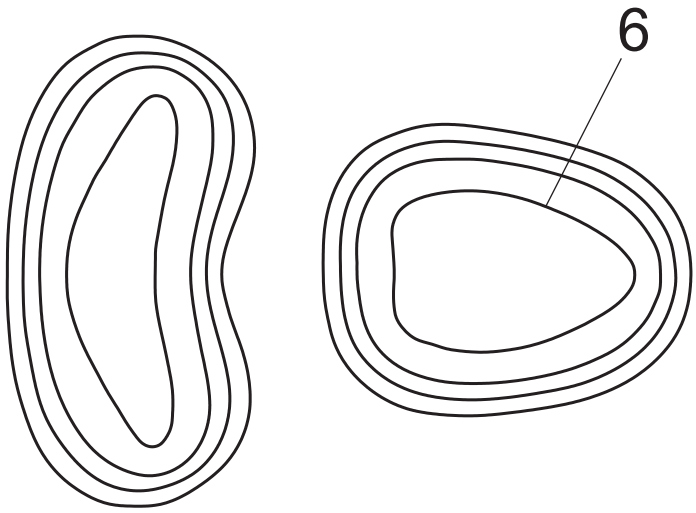

Fig. 2E

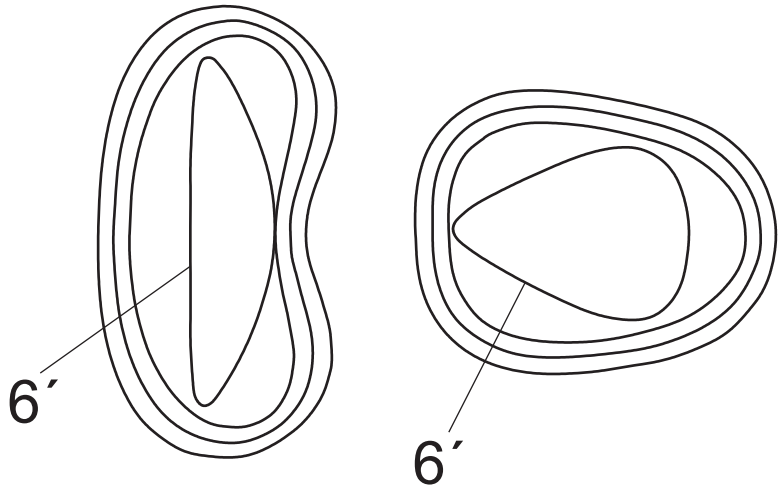

Fig. 2F

OFICINA ESPAÑOLA
DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(21) N.º solicitud: 201531609

(22) Fecha de presentación de la solicitud: 06.11.2015

(32) Fecha de prioridad:

INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TECNICA

(51) **Int. Cl. :** ***G21B1/05*** (2006.01)

DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	(56) Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	QUERAL MAS, Vicente Manuel. "Rapid manufacturing methods for geometrically complex nuclear fusion devices: the UST_2 stellarator". Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Física. Madrid, Abril 2015. URL: http://hdl.handle.net/10016/21727 Capítulos 3, 5 y 7.	1-10

Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia
Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría
A: refleja el estado de la técnica
O: referido a divulgación no escrita
P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud
E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

El presente informe ha sido realizado

☒ para todas las reivindicaciones ☐ para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe	Examinador	Página
04.07.2016	E. P. Pina Martínez	1/5

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

G21B, Y02E

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

INVENES, EPODOC, WPI, XPAIP, XPESP, XPI3E, XPIEE, XPOACNPL, INSPEC, NPL

Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 04.07.2016

Declaración

Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)	Reivindicaciones	1-10	**SI**
	Reivindicaciones		**NO**
Actividad inventiva (Art. 8.1 LP11/1986)	Reivindicaciones	1-10	**SI**
	Reivindicaciones		**NO**

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de aplicación industrial. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

Base de la Opinión.-

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como se publica.

1. Documentos considerados.-

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	QUERAL MAS, Vicente Manuel. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Física. Madrid, Abril 2015. URL: http://hdl.handle.net/10016/21727.	26.06.2015

2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de Patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración

Se considera D01 el documento del estado de la técnica anterior más próximo al objeto de la solicitud, si bien no afecta a la novedad y actividad inventiva de las reivindicaciones, tal y como se explicará a continuación.

Reivindicación 1

En relación con el contenido de la reivindicación 1, el documento D01 describe el siguiente método (entre paréntesis se incluyen referencias a D01):

Método de obtención de una estructura de bobinas magnéticas para dispositivo de ensayo de configuraciones de plasma que comprende las siguientes etapas (ver cap. 5.3):

- obtener, a partir de una superficie de bobinado base toroidal contorsionada (fig. 3.8) y de una última superficie de flujo base definida en coordenadas cilíndricas por coeficientes de Fourier de orden bajo, la estructura tridimensional de unas bobinas curvas de un bobinado eléctrico base dispuesto sobre dicha superficie de bobinado base.

- disponer los bobinados eléctricos sobre la superficie de bobinado según la estructura tridimensional de las bobinas curvas previamente obtenida (ver cap. 7.3.3, fig.7.37).

A la vista de lo anterior, la diferencia entre el método descrito en D01 y el método reivindicado en la solicitud reside en la etapa de obtención de una estructura de bobinas adicional dispuesta sobre una superficie concéntrica con la primera superficie de bobinado que genera, al superponerlo al campo magnético del bobinado base, una última superficie de flujo cuya forma geométrica resulta de añadir al menos un coeficiente de Fourier a los coeficientes de Fourier que definen la última superficie de flujo base.

El efecto técnico que se deriva de esta diferencia es la modificación de la geometría de la superficie exterior del plasma, es decir, la modificación de la configuración magnética del dispositivo de ensayo.

El problema técnico objetivo que se resuelve con esta diferencia es la mejora del confinamiento, en particular, la mejora del transporte turbulento en el plasma.

Una vez analizado el documento D01 se considera que, pese a existir características técnicas comunes con el método objeto de la reivindicación 1, no parece existir ninguna indicación en D01 que hubiera podido conducir al experto en la materia a incluir una etapa adicional consistente en añadir una estructura de bobinas concéntricas para modificar el método descrito en D01 y así llegar al método objeto de la reivindicación 1, obteniendo un campo magnético resultante de añadir una coeficiente de Fourier al campo magnético inicial.

En conclusión se considera que la reivindicación independiente 1 es nueva y tiene actividad inventiva de acuerdo con lo establecido en los artículos 6 y 8 de la Ley de Patentes 11/1986.´

Reivindicaciones 2-6

Las reivindicaciones 2-6 dependen de forma directa o indirecta de la reivindicación 1, que cumple los requisitos de novedad y actividad inventiva, por lo que cumplen a su vez dichos requisitos (art. 6.1 y 8 de la Ley 11/1986).

Reivindicación 7-10

Siguiendo las argumentaciones dadas para la reivindicación 1, se concluye que la reivindicación 7, que define la estructura de bobinas magnéticas obtenida mediante el método reivindicado, satisface igualmente los requisitos de novedad y actividad inventiva, establecidos en los art. 6.1 y 8.1 de la Ley de Patentes 11/86, respectivamente.

Análogamente, las reivindicaciones 8-10, que dependen de forma directa o indirecta de la reivindicación 7, cumplen a su vez los requisitos de novedad y actividad inventiva (art. 6.1 y 8 de la Ley 11/1986).

En conclusión, a la vista del estado de la técnica anterior, la solicitud satisface los requisitos de patentabilidad establecidos en el Art. 4.1 de la ley de Patentes 11/86.

NOTA: Se recomienda la inclusión del documento D01, citado en el presente informe en la memoria de la solicitud, en la parte correspondiente al "Estado de la técnica".