

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 368 113**

51 Int. Cl.:

**A61N 5/10** (2006.01)

**G21K 1/093** (2006.01)

**G21K 5/04** (2006.01)

**G21K 5/10** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Número de solicitud europea: **09171550 .8**

96 Fecha de presentación: **28.09.2009**

97 Número de publicación de la solicitud: **2308561**

97 Fecha de publicación de la solicitud: **13.04.2011**

54 Título: **PÓRTICO COMPACTO PARA TERAPIA DE PARTÍCULAS.**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**14.11.2011**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**14.11.2011**

73 Titular/es:  
**Ion Beam Applications  
Chemin du Cyclotron, 3  
1348 Louvain-la-Neuve, BE**

72 Inventor/es:  
**Jongen, Yves**

74 Agente: **Pérez Barquín, Eliana**

ES 2 368 113 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

Pórtico compacto para terapia de partículas

5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere a un aparato para terapia de partículas cargadas utilizado para terapia de radiación. Más concretamente, esta invención se refiere a un pórtico compacto para suministrar haces de partículas de barrido.

10 **Estado de la técnica**

La radioterapia que utiliza partículas cargadas (por ejemplo, protones, iones de carbono...) ha demostrado ser una técnica de terapia de radiación precisa y conforme, en la que se puede suministrar una elevada dosis a un volumen de blanco mientras se minimiza la dosis a los tejidos sanos circundantes. Un aparato de terapia de partículas comprende un acelerador que produce partículas energéticas cargadas, un sistema de transporte del haz para guiar el haz de partículas a una o más salas de tratamiento y, en cada sala de tratamiento, un sistema de suministro del haz de partículas. Se puede distinguir entre dos tipos de sistemas de suministro del haz: sistemas fijos de suministro del haz que suministran el haz al blanco desde una dirección de irradiación fija, y sistemas giratorios de suministro del haz capaces de suministrar el haz a un blanco desde múltiples direcciones de irradiación. Tal sistema giratorio de suministro del haz se denomina también pórtico. El blanco se sitúa generalmente en una posición fija definida por el cruce del eje de rotación del pórtico y el eje central del haz. Este punto de cruce se denomina isocentro, y los pórticos de este tipo capaces de suministrar haces desde diversas direcciones al isocentro se denominan pórticos isocéntricos.

El sistema de suministro del haz de tipo pórtico comprende dispositivos para conformar el haz en correspondencia con el blanco. Existen dos técnicas principales utilizadas en la terapia por haz de partículas para conformar el haz: las técnicas de barrido pasivas, más comunes, y las técnicas de radiación dinámicas, más avanzadas. Un ejemplo de una técnica de radiación dinámica es la técnica denominada de barrido de haz filiforme (PBS). En el PBS, un haz filiforme estrecho es barrido magnéticamente sobre un plano ortogonal a la dirección central del haz. Se obtiene una conformidad lateral en el volumen del blanco mediante el control adecuado de los imanes de barrido. Al variar la energía del haz de partículas, se pueden irradiar subsecuentemente diferentes capas en el volumen del blanco, caracterizadas por su energía de partícula fija. De este modo, la dosis de radiación de partículas puede ser suministrada a todo el volumen del blanco tridimensional.

Las energías del haz de partículas requeridas para tener una profundidad de penetración suficiente en el paciente dependen del tipo de partículas utilizadas. Por ejemplo, para terapia de protones las energías del haz se encuentran típicamente entre los 70 MeV y los 250 MeV. El solicitante ha construido pórticos de protones para su uso con haces de protones con energías de hasta 235 MeV. Tal pórtico se muestra en la figura 1A y esta configuración de pórtico es descrita por J. B. Flanz en "Large Medical Gantries", Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference, volumen 3, páginas 2007-2008. En este pórtico, el haz se enfoca primero mediante una serie de cuadrupolos antes de ser desviado mediante un dipolo magnético 12 de 45°, a continuación el haz es focalizado adicionalmente mediante cinco cuadrupolos magnéticos 19 antes de ser curvado mediante un dipolo magnético 15 de 135° y dirigido hacia el isocentro (perpendicular al eje de rotación). Este pórtico comprende asimismo dos imanes de barrido 18 para barrer el haz en dos direcciones perpendiculares para su uso con un barrido de haz filiforme. Gracias a la gran distancia de 3 m entre el último imán de curvado de 135° y el isocentro, estos imanes de barrido 18 se montan aguas abajo del último imán de curvado. Entre el último imán de curvado 15 y los imanes de barrido 18 se instalan dos cuadrupolos magnéticos 19 adicionales. El inconveniente de este pórtico es sus grandes dimensiones: un diámetro de, aproximadamente, 10 m y una longitud superior a 10 m. Este pórtico tiene asimismo un elevado coste de fabricación.

Una revisión más reciente de pórticos para terapia de protones y de carbono se ofrece por U. Weinrich en "Gantry design for proton and carbon hadrontherapy facilities", Proceedings of EPAC 2006 (European Particle Accelerator Conference), Edimburgo, Escocia. Como se muestra, todos los pórticos isocéntricos de protones tienen dimensiones longitudinales entre 9 y 12 metros, y un desplazamiento radial máximo del haz respecto al eje de rotación del pórtico que varía entre 3,2 m y 5 m.

Un haz giratorio de partículas tiene una línea de haz giratoria que comprende en general un tubo de vacío para transportar el haz de partículas en vacío, varios cuadrupolos magnéticos para enfocar y desenfocar el haz de partículas, varios dipolos magnéticos para curvar el haz de partículas y monitores del haz para monitorizar el haz. La categoría de pórticos giratorios que se aborda en la presente solicitud se denomina pórticos giratorios de plano simple, que comprende dipolos magnéticos configurados de tal modo que el curvado en cada dipolo magnético de la línea de haz del pórtico tiene lugar en el mismo plano. Esta categoría de pórtico de plano simple se distingue de otras categorías de pórticos, los denominados pórticos "de sacacorchos", que tienen dos planos de curvado perpendiculares. En la categoría de pórticos de plano simple existen actualmente dos configuraciones principales, que se ilustran esquemáticamente en la figura 1B, que muestra las trayectorias centrales del haz que sigue el haz en estos pórticos. El haz entra en el pórtico esencialmente

en paralelo con el eje de rotación en el punto de acoplamiento o punto de entrada 11, y comienza con una primera sección recta de línea de haz antes de entrar en un primer dipolo magnético 12, 13. Este punto de acoplamiento o punto de entrada se define como la transición entre la parte fija de una línea de haz y la línea de haz del pórtilo giratorio. La diferencia entre las dos principales configuraciones de pórtilos de plano simple se relaciona con el número de dipolos magnéticos instalados en el pórtilo. El plano de curvado de los dipolos de un pórtilo de plano simple se denomina asimismo plano "horizontal", y el plano sin curvado se denomina plano "vertical" o plano Y.

La primera configuración principal en la categoría de pórtilos de plano simple se denomina pórtilo cónico. Un ejemplo es el pórtilo de protones construido por el solicitante y mostrado en la figura 1A. La trayectoria central del haz seguida por un haz de protones en tal pórtilo se muestra en la figura 1B como línea de puntos. Un primer dipolo magnético 12 de 45° curva el haz alejándolo del eje de rotación del pórtilo, y a continuación el haz sigue asimismo una segunda sección recta de línea de haz antes de entrar en el segundo dipolo magnético 15 de 135°, que curva y dirige el haz de modo esencialmente perpendicular al eje de rotación. El cruce del haz y el eje de rotación del pórtilo se denomina isocentro de tratamiento 17. El blanco que va a ser irradiado se ubica en el isocentro de tratamiento. En la configuración de pórtilo cónico construido por el solicitante (figura 1A), la sección recta de línea de haz entre el punto de acoplamiento 11 y el primer dipolo magnético 12 de 45° comprende cuatro cuadrupolos magnéticos, y la segunda sección recta entre los dipolos magnéticos primero 12 y segundo 15 comprende cinco cuadrupolos magnéticos (no se muestran cuadrupolos magnéticos en la figura 1B). La configuración de pórtilo cónico construido por el solicitante se ha divulgado asimismo por Pavlovic en "Beam optic study of the gantry beam delivery system for light-ion cancer therapy", Nucl. Instr. Meth. Inn Phys. Res. A 399 (1927) en la página 440.

La segunda configuración principal en la categoría de pórtilos de plano simple es el denominado pórtilo cilíndrico, llamado igualmente pórtilo de barril. La trayectoria central del haz del haz en un pórtilo cilíndrico se ilustra asimismo en la figura 1B, en la que el haz, representado en línea continua, entra en el pórtilo en el punto de acoplamiento 11 y viaja a través de una primera sección recta de línea de haz antes de entrar en el primer dipolo magnético 13, por ejemplo un primer imán de 60°, que curva el haz alejándolo del eje de rotación, y continúa en una segunda sección recta de línea de haz antes de entrar en el segundo dipolo magnético 14 que tiene el mismo ángulo de curvado pero dirección opuesta, lo que da como resultado una haz que se propaga en una tercera sección recta de línea de haz que es paralela al eje de rotación del pórtilo. Un tercer dipolo magnético 16 de 90° se utiliza a continuación para curvar el haz en una dirección perpendicular al eje de rotación. Las tres secciones rectas de línea de haz comprenden respectivamente dos, dos y tres cuadrupolos magnéticos (no mostrados en la figura 1B). Esta configuración de pórtilo cilíndrico, ilustrada en la figura 1B, corresponde a la geometría propuesta para el pórtilo de protones PSI 2 que es divulgado por Weinrich (páginas 966-967 y figura 8, página 966). Para todas las configuraciones de pórtilo isocéntrico divulgadas por Weinrich, el pórtilo con el desplazamiento radial del haz máximo respecto al eje de rotación del pórtilo más pequeño (que se denominará asimismo radio del pórtilo), se obtiene con el diseño propuesto para el pórtilo de protones PSI 2 divulgado anteriormente. Con esta geometría, se obtiene un radio de pórtilo de 3,2 m (última columna de la tabla 2, página 967).

Una variante del pórtilo cilíndrico es el denominado pórtilo oblicuo, divulgado por M. Pavlovic en "Oblique Gantry: an alternative solution for a beam delivery system for heavy ion cancer therapy", Nucl. Instr. Meth. In Phys. Res. A 434 (1999), en las páginas 454-466. Como en el caso de un pórtilo cilíndrico estándar, este pórtilo oblicuo comprende asimismo tres dipolos magnéticos, de los cuales los primeros dos dipolos magnéticos tienen los mismos ángulos de curvado pero signos opuestos, dando como resultado una haz que se propaga en una dirección entre el segundo y el tercer dipolo que es paralela al eje de rotación del pórtilo (véase Pavlovic y otros, figura 3 en la página 460). El tercer dipolo magnético tiene un ángulo menor de 90° (por ejemplo, 60°), y como resultado el haz final no se suministra perpendicularmente al eje de rotación del pórtilo como en el caso del pórtilo cilíndrico estándar descrito anteriormente. Por el contrario, el haz final se suministra en el isocentro bajo un ángulo con relación al eje del pórtilo diferente a 90°. Por ejemplo, el haz se suministra bajo un ángulo de 60° en caso de que el ángulo de curvado del tercer dipolo magnético sea 60°. La desventaja de tal pórtilo oblicuo es que no se pueden cubrir todos los ángulos de tratamiento sin mover al paciente. Por ejemplo, para un pórtilo oblicuo de 60°, el ángulo de tratamiento está limitado a un sector de -60° a +60° (véase la página 463, sección 4, primera frase).

En el documento EP 1041579 A1, se divulgan ejemplos adicionales de configuraciones de pórtilo cilíndrico. En la figura 1 de esta solicitud de patente, se muestra un pórtilo cilíndrico, y como se especifica en la tabla 2, los dipolos magnéticos primero y segundo tienen un ángulo de curvado de 42°, y el tercer dipolo magnético tiene un ángulo de curvado de 90°. Como se mencionó en el resumen de esta solicitud de patente, se anticipan otras configuraciones, esto es, un primer dipolo magnético que tiene un ángulo de curvado en el intervalo de 40° a 45°, y un segundo dipolo magnético que tiene un ángulo de curvado idéntico al del primer dipolo magnético para curvar el haz paralelamente al eje de rotación del pórtilo. El tercer imán de curvado tiene un ángulo de curvado en el intervalo de 45° a 90° para curvar el haz hacia el eje de rotación del pórtilo, y para que se cruce con el mismo. Como se discutió anteriormente, si el último imán de curvado tiene un ángulo de curvado menor de 90° (éste es el denominado pórtilo oblicuo), el haz no es suministrado perpendicularmente al eje de rotación del pórtilo. De nuevo, las desventajas de tal configuración de pórtilo oblicuo es que no se pueden cubrir todos los ángulos de tratamiento.

Tanto el pórtilo cónico desarrollado por el solicitante y mostrado la figura 1A como la configuración de pórtilo cilíndrico del pórtilo PSI 2 (véase Weinrich, figura 8, página 966) estaban diseñados para su uso con un sistema de barrido de haz filiforme. En la configuración de pórtilo cónico de 45°-135°, los imanes de barrido 18 para el barrido de haz en el plano horizontal (denominado asimismo dirección X) y el plano vertical (denominado asimismo dirección Y) se instalan aguas abajo del dipolo magnético a 135°. Una desventaja de tal configuración de pórtilo es la necesidad de disponer de un gran espacio entre la salida del último imán de curvado (en este ejemplo, el imán de 135°) y el isocentro del pórtilo, lo que da como resultado un radio del pórtilo R grande. Los imanes de barrido necesitan ser instalados lo suficientemente lejos del isocentro (por ejemplo, a dos o más metros) con el fin de tener una SAD (distancia de la fuente al eje) suficientemente grande. Cuanto más grande sea la SAD menor es la carga dérmica. Como se muestra en la figura 1B, el radio del pórtilo, definido como la distancia máxima del haz al centro de rotación del pórtilo, es de aproximadamente 4,5 m para este pórtilo cónico.

En la configuración de pórtilo PSI cilíndrico 2, los imanes de barrido 18 están instalados entre el segundo dipolo magnético 14 de 60° y el último dipolo magnético 16 de 90°. Una desventaja principal de esta configuración de pórtilo es que el último imán de curvado 16 de 90° necesita tener un gran entrehierro (vertical) y una gran anchura de polo (horizontal) con el fin de poder barrer el haz sobre una gran área de blanco en el isocentro (por ejemplo, 25 cm x 20 cm o 40 cm x 30 cm). Como consecuencia, el tamaño y peso de tal dipolo magnético de 90° es grande, y además el consumo de potencia es elevado. Tal imán de 90° puede pesar hasta 20 t. Una segunda desventaja es que la sección recta paralela entre el segundo dipolo magnético de 60° y el último imán de curvado de 90° es relativamente larga, lo que da como resultado unas dimensiones axiales del pórtilo largas. Este pórtilo PSI 2 tiene una longitud axial, definida como la distancia axial entre el punto de acoplamiento 11 y el isocentro, de 11,6 m, como se divulgó por Weinrich (tabla 2, página 966). Tal configuración de pórtilo cilíndrico con un último imán de curvado de 90° se divulga asimismo en la patente US 7348579.

La presente invención tiene como objetivo proporcionar un dispositivo que supere los problemas del estado de la técnica anterior. Es un objetivo de la presente invención diseñar un pórtilo de partículas de barrido que pueda ser construido a un coste reducido en comparación con los pórticos del estado de la técnica anterior, y en el que el consumo de potencia del último dipolo magnético se reduzca. Un objetivo adicional es reducir asimismo el tamaño global del pórtilo, de tal modo que el volumen de la sala de tratamiento, y de aquí los costes del edificio, puedan ser igualmente reducidos.

### Sumario de la invención

La presente invención se establece y caracteriza por las reivindicaciones adjuntas.

De acuerdo con un primer aspecto de la invención, se proporciona un pórtilo isocéntrico diseñado para girar alrededor de un eje de rotación y para suministrar un haz de partículas para su uso en terapia de partículas. Este pórtilo isocéntrico comprende:

- una línea de haz de pórtilo que tiene un punto (25) de entrada al pórtilo para la entrada de dicho haz de partículas en el pórtilo en una dirección esencialmente paralela al eje de rotación,

- unos dipolos magnéticos primero (20), segundo (21) y tercero (22) dispuestos secuencialmente para curvar sucesivamente el haz de partículas en un único plano y para suministrar dicho haz de partículas a un isocentro (27) en una dirección esencialmente perpendicular al eje de rotación,

- cuadrupolos magnéticos para enfocar y desenfocar dicho haz de partículas,

- medios de barrido de haz de partículas instalados entre dicho segundo dipolo magnético y dicho tercer dipolo magnético, y configurados para barrer un haz de partículas sobre un área de blanco en el isocentro;

y dicho pórtilo isocéntrico se caracteriza además porque dicho tercer dipolo magnético tiene un ángulo de curvado menor de 80°.

De acuerdo con un modo de realización de la invención, el pórtilo isocéntrico se caracteriza además porque la sección de línea de haz entre dicho punto de entrada del pórtilo y la entrada del primer dipolo magnético es una sección de deriva corta. Esto significa que entre el punto de entrada y la entrada del primer dipolo magnético no se instalan cuadrupolos magnéticos.

De acuerdo con una configuración de pórtilo preferida, la sección de línea de haz entre dichos dipolos magnéticos primero y segundo comprende cinco cuadrupolos magnéticos, y la sección de línea de haz entre dichos dipolos magnéticos segundo y tercero no comprende ningún cuadrupolo magnético.

Ventajosamente, los medios de barrido instalados entre dicho segundo dipolo magnético y dicho tercer dipolo magnético comprenden un imán de barrido combinado X-Y.

- 5 Para todos los modos de realización de la invención, el pórtico isocéntrico comprende medios para girar el pórtico en un intervalo angular de al menos 180°.

En un modo de realización preferido de la invención, el mencionado tercer dipolo magnético del pórtico isocéntrico tiene un ángulo de curvado de 60°.

- 10 De acuerdo con un segundo aspecto de la invención, se proporciona un aparato de terapia de partículas. Este mencionado aparato de terapia de partículas comprende un acelerador de partículas, medios para variar la energía de las partículas, un sistema de transporte del haz y un pórtico isocéntrico de acuerdo con el primer aspecto de la invención.

### 15 **Breve descripción de los dibujos**

La figura 1A muestra una representación de una configuración de pórtico cónico.

- 20 La figura 1B muestra una representación esquemática de las trayectorias seguidas por un haz de partículas para dos configuraciones de pórtico del estado de la técnica anterior.

La figura 2 muestra una representación esquemática de un plano de un pórtico de acuerdo con la invención.

- 25 La figura 3 muestra los resultados de un cálculo de la óptica del haz para una configuración de pórtico de acuerdo con la invención.

La figura 4 muestra los resultados de un cálculo de la óptica del haz durante el barrido de haz de acuerdo con la invención.

- 30 La figura 5 muestra una vista conceptual de una estructura mecánica del pórtico de acuerdo con la invención.

La figura 6 muestra un plano de la sala de tratamiento del pórtico de acuerdo con el estado de la técnica anterior, junto con un plano de una sala de tratamiento del pórtico de acuerdo con la invención.

- 35 La figura 7 muestra la trayectoria central del haz seguida por un haz de protones para diversas configuraciones del pórtico de acuerdo con la invención.

### **Descripción detallada de modos de realización preferidos de la presente invención**

- 40 La presente invención se describirá a continuación en detalle con relación a los dibujos adjuntos. Sin embargo, es evidente que una persona experta en la técnica puede concebir diversos modos de realización equivalentes u otros modos de ejecutar la presente invención.

- 45 Con la presente invención, se divulga un pórtico de plano simple para su uso con un sistema de barrido de haz filiforme, que es a la vez compacto, tiene un peso reducido, tiene un coste de producción reducido y tiene un menor consumo de potencia. La figura 2 muestra un plano preferido de un pórtico de acuerdo con la invención. El pórtico se representa en una posición angular de 90° (esto es, mirando en una dirección paralela al eje del pórtico, desde el isocentro hacia el primer dipolo magnético 20, el pórtico se encuentra a las 3:00). El pórtico tiene tres dipolos magnéticos 20, 21, 22, y tiene medios 23 de barrido de haz en X e Y, los cuales están instalados entre los dipolos magnéticos segundo y tercero. Entre los dipolos magnéticos primero y segundo se instala un número de cuadrupolos magnéticos 24. La sección de línea de haz entre el punto (25) de entrada al pórtico y la entrada del primer dipolo magnético (20) es una corta sección de deriva que no comprende ningún cuadrupolo magnético. Como se ilustra en la figura 2 en línea mixta, la forma global que describe este pórtico cuando gira puede ser aproximada por un doble cono, un primer cono que tiene su vértice en el nivel del punto de acoplamiento y que tiene una base perpendicular al eje de rotación del pórtico y que cruza el segundo dipolo magnético en una posición en la que el haz ha realizado una primera rotación angular igual al ángulo del primer dipolo magnético. El segundo cono es un cono truncado que tiene su base en coincidencia con la base del primer cono y que tiene su vértice seccionado por un plano paralelo al plano de la base, como se ilustra en la figura 2.

- 60 En un modo de realización preferido de la invención, el tercer dipolo magnético 22 tiene un ángulo de curvado de 60°, y el primer dipolo magnético 20 tiene un ángulo de curvado de 36°. Por tanto, el ángulo de curvado del segundo imán se calcula que será  $36^\circ + 90^\circ - 60^\circ = 66^\circ$ . Entre los dipolos magnéticos segundo y tercero, se pueden proporcionar los medios de barrido en X e Y por medio de un imán de barrido combinado en X e Y que ocupa menos espacio que instalar dos imanes de barrido separados para las direcciones X e Y. La longitud de la primera sección recta de línea de haz entre

el punto (25) de entrada al p3rtico y el primer dipolo magn3tico (20) es de, aproximadamente, 0,4 m de largo, y es una pura secci3n de deriva (esto es, no se instala ning3n cuadrupolo magn3tico en esta secci3n). En el modo de realizaci3n preferido de la invenci3n, se instalan cinco cuadrupolos magn3ticos entre el primer dipolo magn3tico 20 de 36° y el segundo dipolo magn3tico 21 de 66°. El espacio disponible para instalar estos cuadrupolos magn3ticos, esto es, la longitud de la secci3n recta entre los dipolos magn3ticos primero y segundo, es de, aproximadamente, 3,5 m. La longitud de la secci3n recta de l3nea de haz entre el segundo dipolo magn3tico de 66° y el tercer dipolo magn3tico de 60° es de, aproximadamente, 0,8 m. La distancia entre la salida del 3ltimo im3n de curvado de 60° y el isocentro es de, aproximadamente, 1 m, lo que permite que haya suficiente espacio para instalar no s3lo al paciente sino para instalar, asimismo, por ejemplo detectores de monitor entre la salida del dipolo de curvado de 60° y el paciente (por ejemplo, detectores de monitorizaci3n de dosis y/o detectores de monitorizaci3n de la posici3n del haz). Las principales caracter3sticas de un im3n dise1ado para su uso como el 3ltimo dipolo magn3tico del p3rtico de acuerdo con el modo de realizaci3n preferido de la invenci3n se resumen en la tabla 1. El ejemplo presentado es para un dise1o para un haz de part3culas con una rigidez magn3tica de 2,3 Tm (por ejemplo, 235 MeV de protones). Para limitar el consumo de potencia, este im3n utiliza unas bobinas de gran secci3n transversal, en forma de silla de montar (conocidas asimismo como bobinas de cama).

Como se muestra en la tabla 1, el peso del im3n es de, aproximadamente, 9,17 t (incluyendo 2,05 t de las bobinas), y la potencia magn3tica total a una energ3a del haz de 235 MeV es de 226 kW. Este dipolo magn3tico de 60° tiene caras de polo giradas 17° con el fin de proporcionar un enfoque vertical adicional, como se discutir3 a continuaci3n.

Tabla 1

Caracter3sticas generales	Valor	Unidades
3ngulo de desviaci3n	60	°
Rotaci3n de la cara del polo	17	°
Radio de curvado	120	cm
Entrehierro (vertical)	20,00	cm
Anchura de polo (horizontal)	22,00	cm
Grosor radial de bobina	25,00	cm
Grosor de flujo de retorno	24	cm
Campo promedio	1,92	T
Altura total de las bobinas	35,00	cm
Grosor de polo	7,50	cm
Altura total del im3n	83,00	cm
Peso de acero	6866,97	kg
Peso de una bobina	1024,4	kg
Peso total	9,17	Tons
Potencia total	225,3	kW

La 3ptica del haz del p3rtico preferida del p3rtico de acuerdo con la invenci3n se discute a continuaci3n. La entrada del p3rtico, en el nivel del punto de acoplamiento, est3 definida a 0,4 m aguas abajo de la entrada del primer dipolo magn3tico 20. En la entrada al p3rtico, el haz debe tener la misma emitancia en X y en Y con el fin de tener una soluci3n de 3ptica del haz del p3rtico que sea independiente del 3ngulo de rotaci3n del p3rtico. Los ejes X e Y se definen aqu3 como el cruce de un plano perpendicular al eje de la trayectoria central del haz con el plano horizontal y el plano vertical, respectivamente. Adem3s de la misma emitancia en X y en Y, una cintura de id3ntico tama1o en X e Y se especifica en el punto de entrada. Comenzando con estas condiciones de haz a la entrada del p3rtico, se necesita cumplimentar un conjunto de condiciones adicionales:

1. En el isocentro, el haz debe tener una peque1a cintura, de tama1o id3ntico en X y en Y.
2. El sistema de la 3ptica del haz del p3rtico debe ser doble acrom3tico, esto es, las propiedades de imagen del haz deben ser independientes del momento (sin dispersi3n) e independientes de la posici3n.
3. El tama1o m3ximo del haz (un sigma) dentro de los cuadrupolos no debe superar los 2 cm con el fin de mantener una

eficiencia de transmisión razonable en el pórtilo.

Con el fin de cumplir estas diversas condiciones ópticas, se define el campo magnético en los cinco cuadrupolos magnéticos instalados entre los dipolos magnéticos primero y segundo. Otros parámetros que pueden ser utilizados para encontrar una solución óptica óptima son los ángulos de las caras de polo de los dipolos magnéticos. Un cálculo de la óptica del haz se realiza para un haz de protones de 170 MeV. El radio de curvado para los dipolos magnéticos primero y segundo se especifica que sea 1,5 m. En el punto de entrada del pórtilo se comienza con un haz circular que tiene una doble cintura de 12,5 m de tamaño, y una divergencia de 0,6 mrad. Este tamaño y divergencia corresponden con una emitancia de  $7,5 \text{ Pi mm mrad}$ , que es un valor típico de la emitancia de haz obtenido con los sistemas de terapia de protones actuales desarrollados por el solicitante. Para el dipolo magnético de  $36^\circ$  se adoptó un polo rectangular (caras del polo giradas  $18^\circ$ ), y para el segundo dipolo magnético de  $66^\circ$  se utiliza un giro de las caras de polo de  $15^\circ$  y  $21^\circ$ , respectivamente para la entrada y la salida. La trayectoria del haz resultante en X e Y calculada con el código de óptica de haz TRANSPORT se muestra la figura 3. La información sobre el código TRANSPORT puede ser encontrada en D. C. Carey, K. L. Brown y F. Rothacker, "Third-Order TRANSPORT: A computer program for designing charged particle beam transport systems", SLAC-R-95-462 (1995). Las posiciones relativas del haz con relación a la trayectoria central del haz se grafican para las direcciones X e Y en el panel inferior y el panel superior, respectivamente. Las posiciones a lo largo de la trayectoria del haz de los cuadrupolos magnéticos 24 y los dipolos magnéticos 20, 21, 22 están indicadas. En la figura 3, la posición de los imanes 23 de barrido se representa tan sólo a efectos informativos, en este cálculo los imanes de barrido están apagados (el efecto de los imanes de barrido se discutirá a continuación). En el isocentro 27, se obtiene una mancha circular del haz, con una cintura en X e Y que tiene un tamaño de, aproximadamente, 3,5 mm y una divergencia de, aproximadamente, 2,2 mrad, que es un tamaño de haz adecuado para el barrido de haz filiforme. Esta solución óptica del haz satisface asimismo las condiciones de un doble acromático.

Además de la necesidad de obtener un tamaño de mancha de haz el isocentro que sea adecuado para su uso en barrido de haz filiforme, se debe asegurar asimismo que con la geometría de línea de haz propuesta se puede obtener una gran área de barrido en el isocentro. Las especificaciones adaptadas para tamaños de campo son que un campo de 25 cm (X) x 20 cm (Y) necesita ser cubierto en el plano isocéntrico y preferentemente se requiere una SAD suficientemente grande (esto es, igual o superior a 2 m). La geometría de línea de haz mostrada en la figura 2 y la solución óptica del haz presentada en la figura 3 satisfacen estos requerimientos con respecto al tamaño de campo y SAD. Esto se demuestra en la figura 4, en la que se calcula la trayectoria de un haz de protones de 170 MeV que viaja entre los imanes de barrido y el isocentro, mientras que el haz está siendo barrido a una amplitud máxima en X e Y. En este cálculo, los imanes de barrido están desviando el haz en 66 mrad en X y 50 mrad en Y, respectivamente, lo que se considera unos ángulos de curvado moderados que pueden obtenerse fácilmente con la tecnología de imanes de barrido conocida. En la figura 4, se muestran las posiciones de los imanes 23 de barrido en X e Y, el último dipolo magnético 22 de  $60^\circ$  y el isocentro 27. Las especificaciones del dipolo de  $60^\circ$  en lo relativo a los bordes de polo, radio de curvado, entrehierro y anchura de polo son las ofrecidas en la tabla 1. La distancia entre el centro del imán de barrido y la entrada del dipolo magnético de  $60^\circ$  es de, aproximadamente, 0,4 m, la longitud de viaje del haz central en el dipolo de  $60^\circ$  es de, aproximadamente, 1,25 m, y la distancia entre la salida del dipolo de  $60^\circ$  y el isocentro se toma para que sea 1,0 m. Los cálculos muestran que en el plano isocéntrico perpendicular al haz central, el tamaño del haz es 25 cm en X y 22 cm en Y, y el tamaño del haz a la salida del dipolo magnético de  $60^\circ$  es 17,2 cm en X y 22 cm en Y, respectivamente. Se puede calcular la SAD virtual, esto es, la SAD obtenida si el haz se hubiera originado de una fuente puntual sin ningún elemento magnético entre la fuente puntual y el isocentro. Con la geometría propuesta, esto da como resultado una SAD virtual en X e Y superior a 3 m.

A continuación se discute el diseño mecánico conceptual del pórtilo, que soporta la configuración de pórtilo de doble cono, y se ilustra esquemáticamente en la figura 5. Una estructura plana fabricada por ejemplo de vigas metálicas 51 puede ser utilizada para encapsular todos los imanes del pórtilo conjuntamente con un contrapeso 52. Dos rodamientos de rodillos 53 comerciales, esféricos y autoalineados se utilizan como medios de rotación. Para el segundo rodamiento de rodillos, en el lado del paciente, se utiliza una estructura fija 54 en voladizo para soportar el rodamiento de rodillos principal mientras se permite que la estructura de pórtilo pase bajo el rodamiento para alcanzar ángulos extremos del pórtilo, de hasta  $180^\circ$  (haz vertical hacia arriba). En el nivel del primer dipolo magnético, una estructura de tambor 55 se instala para soportar la bobina de cable. Además, lo que no se muestra en la figura 5, el pórtilo está equipado con un sistema de accionamiento y frenado del pórtilo, que consiste en un único conjunto de motor-caja de engranajes conectado al pórtilo mediante un accionamiento de cadena. Una ventaja de la configuración de pórtilo de acuerdo con la invención es que el centro de gravedad del último dipolo magnético está más cerca del eje de rotación (por ejemplo, en comparación con una configuración de pórtilo basada en un último dipolo magnético de  $90^\circ$ , véase la figura 8 de la publicación de Weinrich), lo que da como resultado una reducción de limitaciones en lo que se refiere a la estructura mecánica (por ejemplo, el contrapeso puede ser situado más cerca del eje de rotación, reduciendo el tamaño del pórtilo). El pórtilo puede ser girado preferentemente  $190^\circ$ , esto es, dependiendo del plano del edificio, bien en una configuración de giro horario de  $180^\circ$  a  $10^\circ$ , o en una configuración de giro contrahorario de  $350^\circ$  a  $180^\circ$  (los ángulos se definen de acuerdo con el ICE International Standard 61217, Radiotherapy equipment: coordinates, movements and scales, 1996).

Este concepto mecánico pretende reducir los costes de la estructura mecánica del pórtilo, a la vez que permite una buena

accesibilidad del paciente. Uno de los factores de coste principales en las estructuras de pórtico actuales (tales como, por ejemplo, la configuración c nica 45 -135 ) es la necesidad de hacer rodar el pórtico sobre anillos de pórtico grandes, muy precisos, que necesitan ser fabricados a medida en acero resistente al desgaste, de alta resistencia, y que est n soportados sobre bogies complejos. Otro de los factores de coste son los mecanismos de accionamiento y frenado realizados mediante los rodillos de bogies del pórtico y en los que el par se ve severamente limitado por el deslizamiento de los rodillos, y finalmente la estructura de bastidor tridimensional del pórtico.

Un aparato de terapia de partículas comprende un acelerador que produce partículas energéticas cargadas, medios para variar la energía de las partículas, un sistema de transporte del haz para guiar el haz hasta una o más salas de tratamiento y, para cada sala de tratamiento, un sistema de suministro del haz de partículas. El sistema de suministro del haz de partículas es bien un pórtico o un denominado sistema fijo de suministro del haz. Las salas de tratamiento de pórtico requieren en general una huella y un volumen de edificio grandes. Con el diseño de pórtico de acuerdo con la invención, se puede utilizar una sala de pórtico más pequeña en comparación, por ejemplo, con una configuración de pórtico cónico de 45 -135 . Esto se ilustra en la figura 6, en la cual se muestran, en la misma escala, una huella 61 de una sala de tratamiento que comprende un pórtico cónico junto con una huella 62 de una sala de tratamiento que comprende un pórtico compacto de doble cono de acuerdo con la invención. Con el pórtico de acuerdo con la invención, se puede utilizar una sala de tratamiento de pórtico que tiene una huella de 10,5 m por 6,4 m, como se muestra en la figura 6, mientras que las salas de tratamiento de pórtico que utilizan una configuración c nica de 45 -135 , como las suministradas por el solicitante, requiere una huella de 13,7 m por 10,7 m.

A continuación se discute cómo se ven influidas las dimensiones geométricas, tales como el radio de pórtico y la longitud de pórtico, por el cambio de ciertos parámetros de la configuración de pórtico preferida. Con la configuración de pórtico preferida de la invención, que comprende tres dipolos de 36  (=B1), 66  (=B2) y 60  (=B3), la longitud del pórtico, definida como la distancia axial entre el punto de acoplamiento 25 y el isocentro 27, es de, aproximadamente, 7,05 m, y el radio de pórtico, definido como la distancia máxima de la trayectoria central del haz hasta el eje de rotación del pórtico es de, aproximadamente, 2,64 m. Este radio está definido de hecho, por un lado, por la selección del ángulo de curvado del último dipolo magnético 22, y por el otro lado, por la separación entre la salida del último dipolo magnético 22 y el isocentro (altura del isocentro), y la separación entre el segundo dipolo magnético 21 y el último tercer dipolo magnético 22 (separación B2-B3). En la geometría preferida, estas separaciones son iguales a, aproximadamente, 1 m (altura del isocentro), y a, aproximadamente, 0,8 m (separación B2-B3). Cuando el radio del pórtico se define de este modo, el único parámetro que influye adicionalmente en la longitud del pórtico es la elección del ángulo de curvado del primer dipolo magnético. Una vez que el ángulo de curvado del primer dipolo magnético y el radio del pórtico han sido especificados, la distancia L1 entre el primer dipolo magnético 20 y el segundo dipolo magnético 21 queda igualmente fijada. En la geometría preferida, esta distancia es de, aproximadamente, 3,5 m. Por supuesto, se pueden ejecutar otros modos de realización ajustando estos parámetros que definen la geometría del pórtico. Por ejemplo, el panel superior de la figura 7 muestra la geometría de la configuración 36 -66 -60  preferida. Por ejemplo, se puede aumentar o disminuir ligeramente el ángulo del primer dipolo magnético 20, lo que da como resultado una disminución y aumento, respectivamente, de la longitud del pórtico, como se muestra en la figura. Los cambios correspondientes en el valor de la distancia L1 se mencionan en la figura. En el panel intermedio de la figura 7, el ángulo del último imán de curvado ha sido ajustado a 45 , mientras se mantiene la misma anchura de isocentro y distancia B2-B3 que en la configuración de B3= 60 . Como consecuencia de la reducción del ángulo de curvado del último dipolo magnético 22, el radio del pórtico aumenta en, aproximadamente, 0,2 m. Con una configuración de pórtico de 38  (B1)-83  (B2)-45  (B3), la longitud del pórtico se mantiene en, aproximadamente, 7 m. En el tercer panel de la figura 7, el ángulo del último dipolo magnético se ajusta a 70 . Manteniendo la altura del isocentro y la separación B2-B3 igual a los valores de los casos anteriores, debido al mayor ángulo de curvado de B3, el radio del pórtico disminuye en, aproximadamente, 0,15 m en comparación con la solución preferida. Con una configuración de 34  (B1)-54  (B2)-70  (B3), la longitud del pórtico es de, aproximadamente, 7 m.

La configuración de pórtico de doble cono óptima es un compromiso entre, por un lado, la viabilidad técnica y el coste del último dipolo magnético 22 y, por el otro lado, entre las dimensiones máximas (radio del pórtico, longitud del pórtico) aceptables. Un buen compromiso es, por ejemplo, la selección de un último dipolo magnético 22 de 60 , con las especificaciones ofrecidas en la tabla 1, que puede ser construido a un costo razonable y que tiene una reducción importante en tamaño y peso en comparación, por ejemplo, con un último dipolo magnético de 90  como el usado en el estado de la técnica anterior. Como se descubrió anteriormente, esta solución preferida encaja en una sala de tratamiento con una huella de 6,4 m por 10,5 m, como se ilustra en la figura 6. Sin embargo, el experto en la técnica reconocerá que la ventaja de la invención se obtendrá en tanto en cuanto el último dipolo magnético 22 tenga un ángulo de curvado menor de 80 . Más preferiblemente, el último dipolo magnético 22 tiene un ángulo de curvado menor de 70 .

Aunque los modos de realización descritos se centran en pórtico de protones, la invención no se limita a pórticos de protones. El experto en la técnica puede aplicar fácilmente la geometría de pórtico de acuerdo con la invención a pórticos utilizados con cualquier otro tipo de partículas cargadas, tales como, por ejemplo, un pórtico para iones de carbono u otros iones ligeros. La misma configuración óptica del haz es aplicable independientemente de la rigidez magnética del haz; simplemente hay que escalar los campos magnéticos en los diversos imanes de la línea de haz.

5 Pórticos para terapia de partículas han sido diseñados desde hace muchos años, pero hasta ahora no se ha propuesto ninguna solución para abordar los problemas de los diseños de pórticos del estado de la técnica anterior. De acuerdo con la presente invención, se proporciona un nuevo diseño de pórticos de barrido que da como resultado unos resultados notables que proporcionan una solución para superar los problemas del estado de la técnica anterior. El nuevo diseño de pórtico de acuerdo con la invención presenta ventajas importantes en comparación con los diseños de pórtico actuales (por ejemplo, pórticos cónicos, pórticos cilíndricos...).

10 En comparación con los pórticos cónicos en los que el barrido se realiza tras el último dipolo magnético, se pueden distinguir las siguientes ventajas principales que se obtienen con el pórtico de acuerdo con la invención:

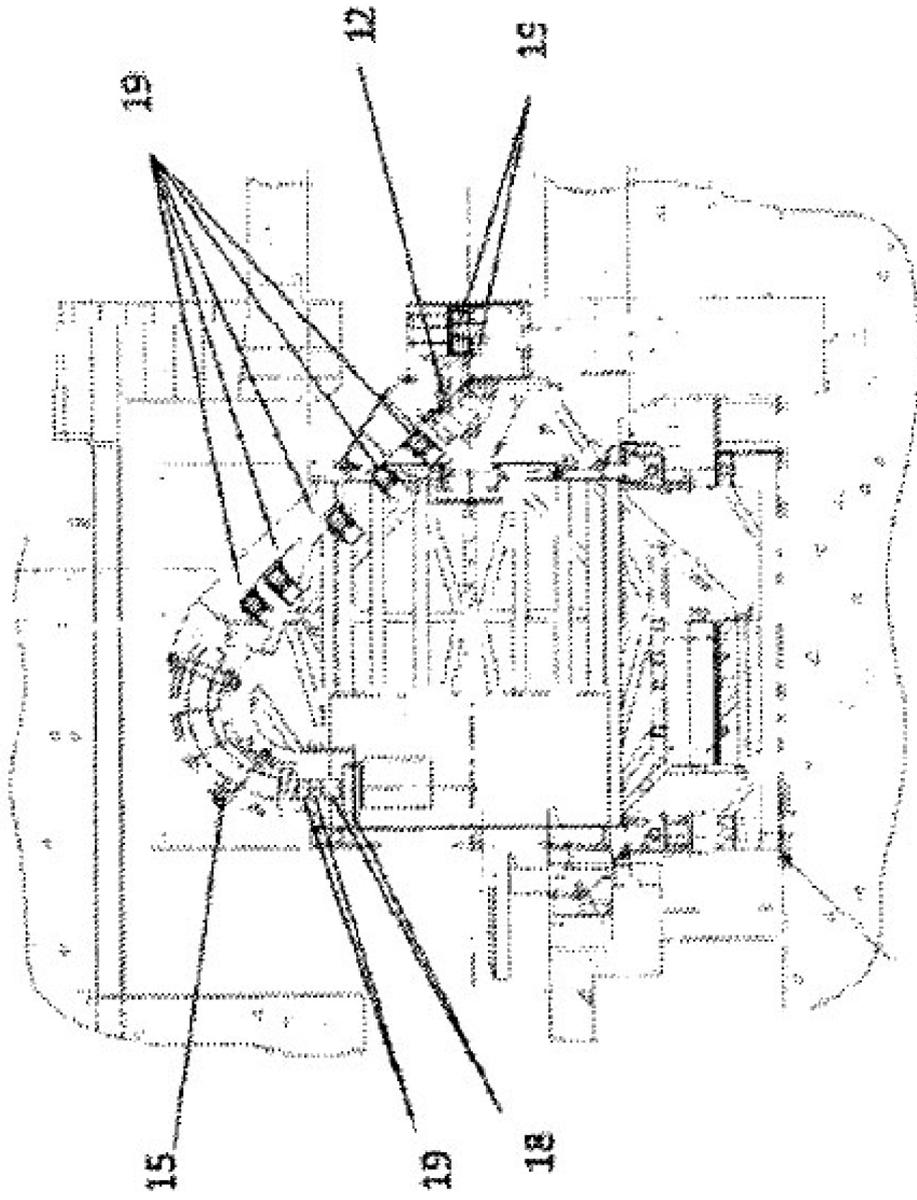
- el diámetro y longitud del pórtico se reducen fuertemente,
- los elementos pesados del pórtico se ubican más cerca del eje de rotación,
- 15 - la configuración mecánica del pórtico es menos cara.

20 En comparación con los pórticos cilíndricos (por ejemplo el pórtico PSI 2 o el pórtico de carbono de Heidelberg, como se divulgó por Weinrich en las páginas 966 (figura 8) y las páginas 967 a 968, respectivamente), se pueden distinguir las siguientes ventajas principales que se obtienen con el pórtico de acuerdo con la invención:

- el último imán de curvado con gran entrehierro y grandes superficies de polo es menos pesado y tiene un menor consumo de energía,
- 25 - el centro de gravedad del último imán de curvado está más cerca del eje de rotación, lo que da como resultado menos limitaciones mecánicas para la estructura mecánica del pórtico,
- la configuración de barrido requiere imanes de barrido menos potentes para cubrir una misma área de barrido en el isocentro.
- 30

**REIVINDICACIONES**

1. Un pórtilco isocéntrico diseñado para girar alrededor de un eje de rotación y para suministrar un haz de partículas para uso en terapia de partículas, que comprende:
- 5
- una línea de haz de pórtilco que tiene un punto (25) de entrada al pórtilco para introducir dicho haz de partículas en el pórtilco en una dirección esencialmente paralela al eje de rotación,
  - unos dipolos magnéticos primero (20), segundo (21) y tercero (22) dispuestos de modo secuencial para curvar de modo sucesivo el haz de partículas en un único plano y para suministrar dicho haz de partículas a un isocentro (27) en una dirección esencialmente perpendicular al eje de rotación,
  - cuadrupolos magnéticos (24) para enfocar y desenfocar dicho haz de partículas,
  - 15 - medios (23) de barrido de haz de partículas instalados entre dicho segundo dipolo magnético (21) y dicho tercer dipolo magnético (22) y configurados para barrer dicho haz de partículas sobre un área de blanco en el isocentro (27);
- caracterizado porque:
- 20
- dicho tercer dipolo magnético (22) tiene un ángulo de curvado menor de 80°.
2. Un pórtilco isocéntrico de acuerdo con la reivindicación 1, caracterizado porque una sección de línea de haz entre dicho punto (25) de entrada al pórtilco y una entrada del primer dipolo magnético (20) es una sección de deriva corta.
- 25
3. Un pórtilco isocéntrico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque una sección de línea de haz entre dicho primer dipolo magnético (20) y dicho segundo dipolo magnético (21) comprende cinco cuadrupolos magnéticos (24), y porque una sección de línea de haz entre dicho segundo dipolo magnético (21) y dicho tercer dipolo magnético (22) no comprende ningún cuadrupolo magnético (24).
- 30
4. Un pórtilco isocéntrico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dichos medios (23) de barrido de haz comprenden un imán de barrido X-Y combinado.
5. Un pórtilco isocéntrico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además medios para girar dicho pórtilco en un intervalo angular de al menos 180°.
- 35
6. Un pórtilco isocéntrico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado porque dicho tercer dipolo magnético (22) tiene un ángulo de curvado de 60°.
7. Un aparato de terapia de partículas que comprende un acelerador de partículas, medios para variar la energía de las partículas, un sistema de transporte del haz y un pórtilco isocéntrico de acuerdo con cualquiera de las reivindicaciones 1 a 6.
- 40



**Fig. 1A** (técnica anterior)

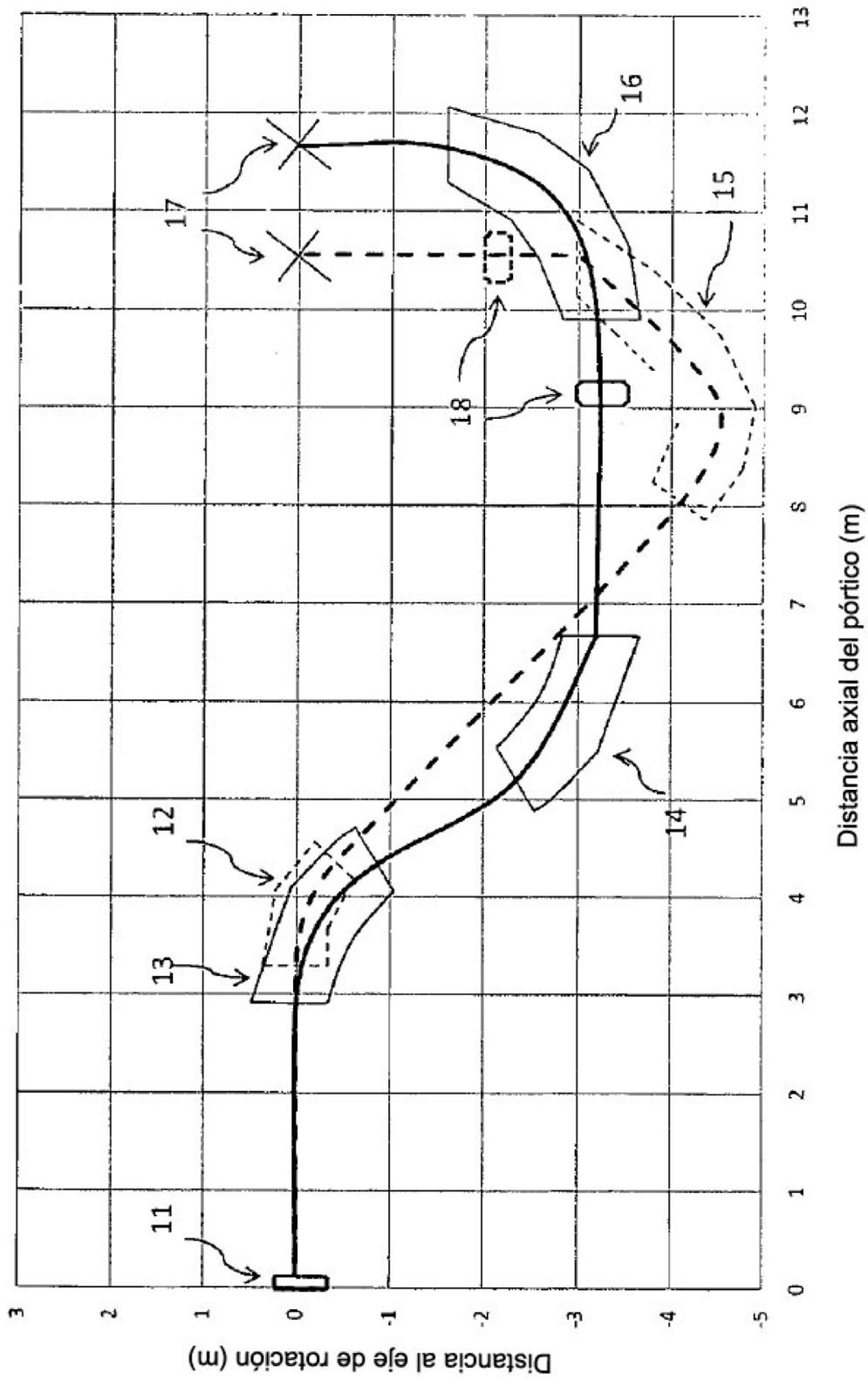


Fig. 1B (técnica anterior)

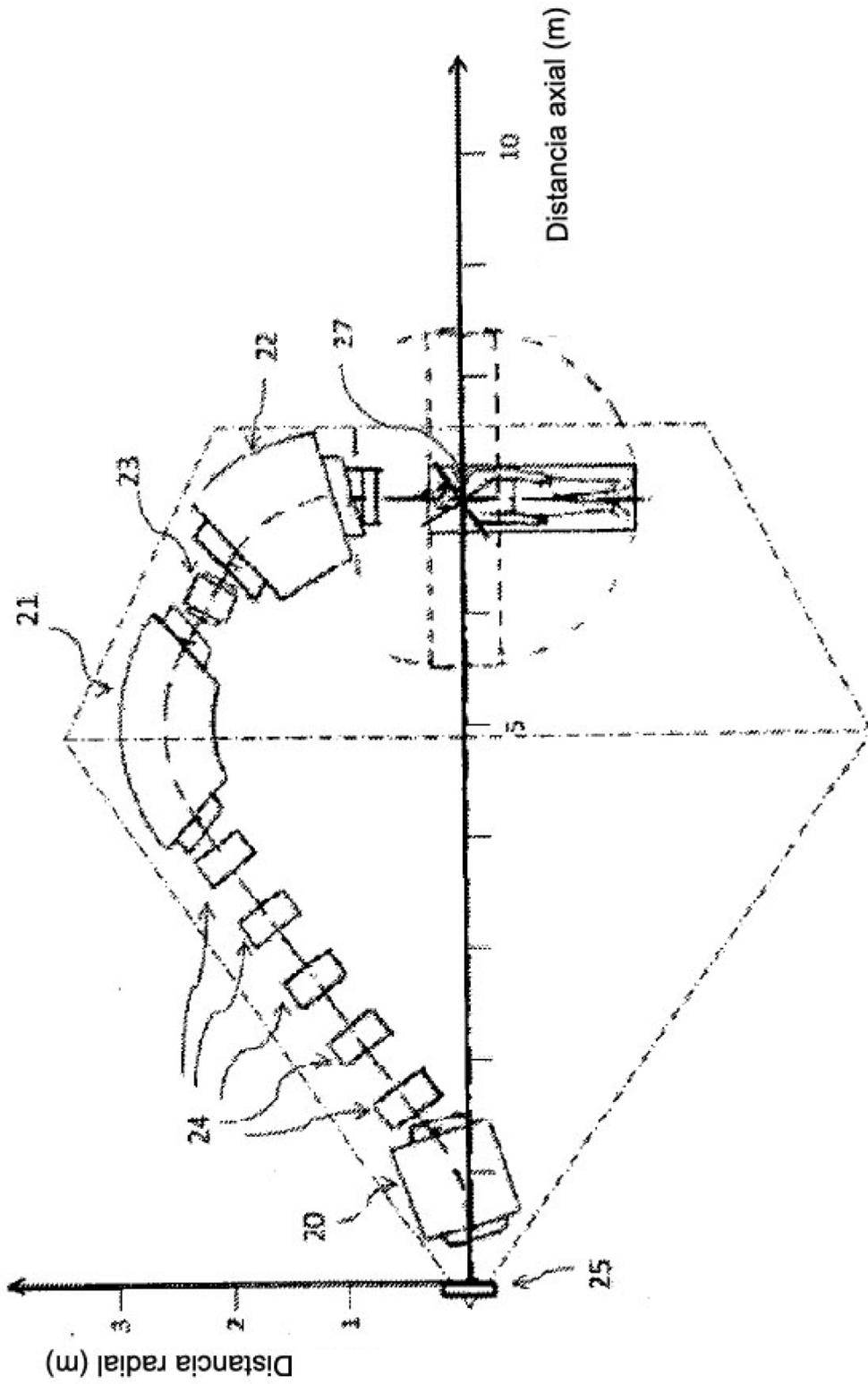


Fig. 2

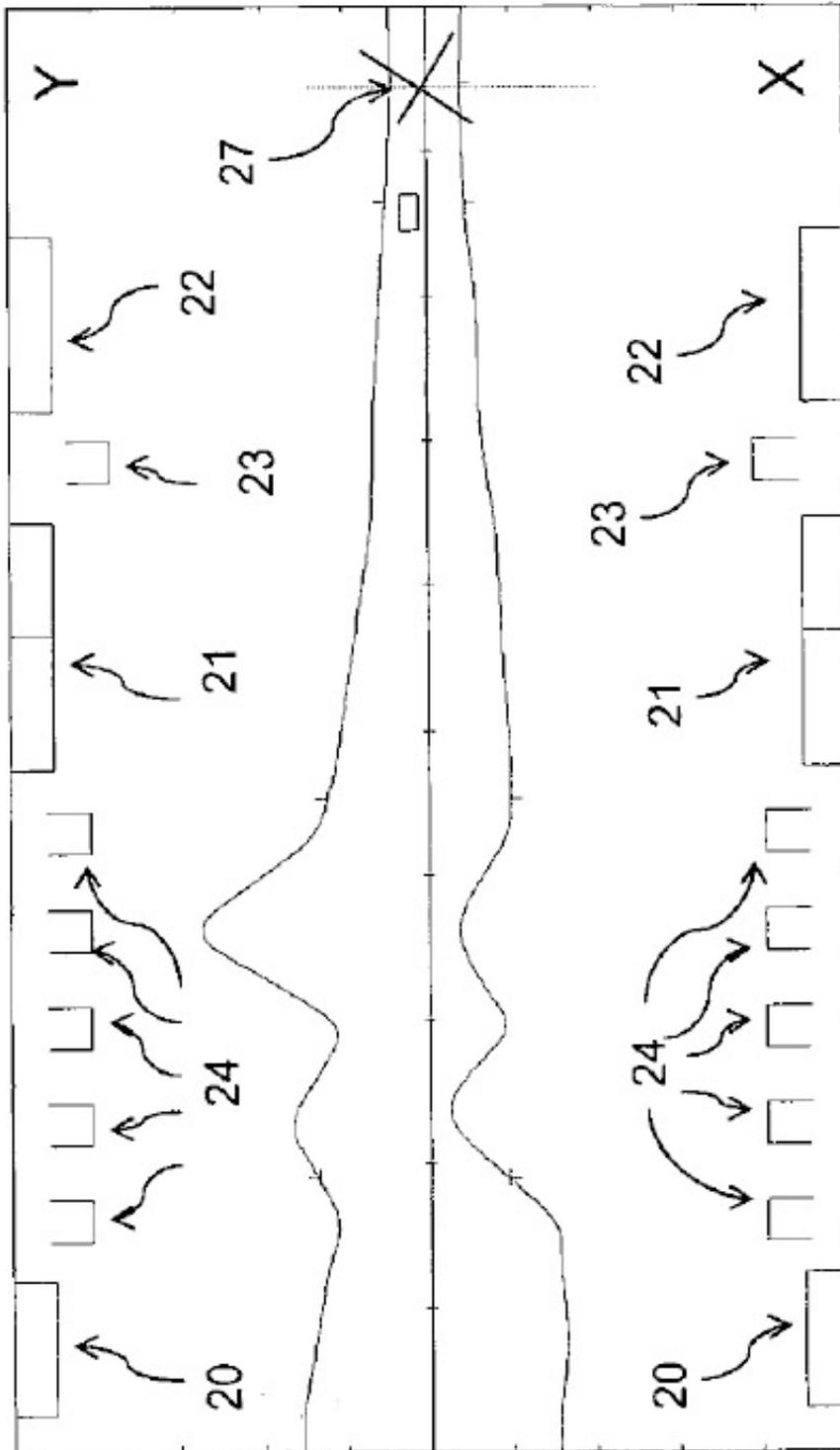


Fig. 3

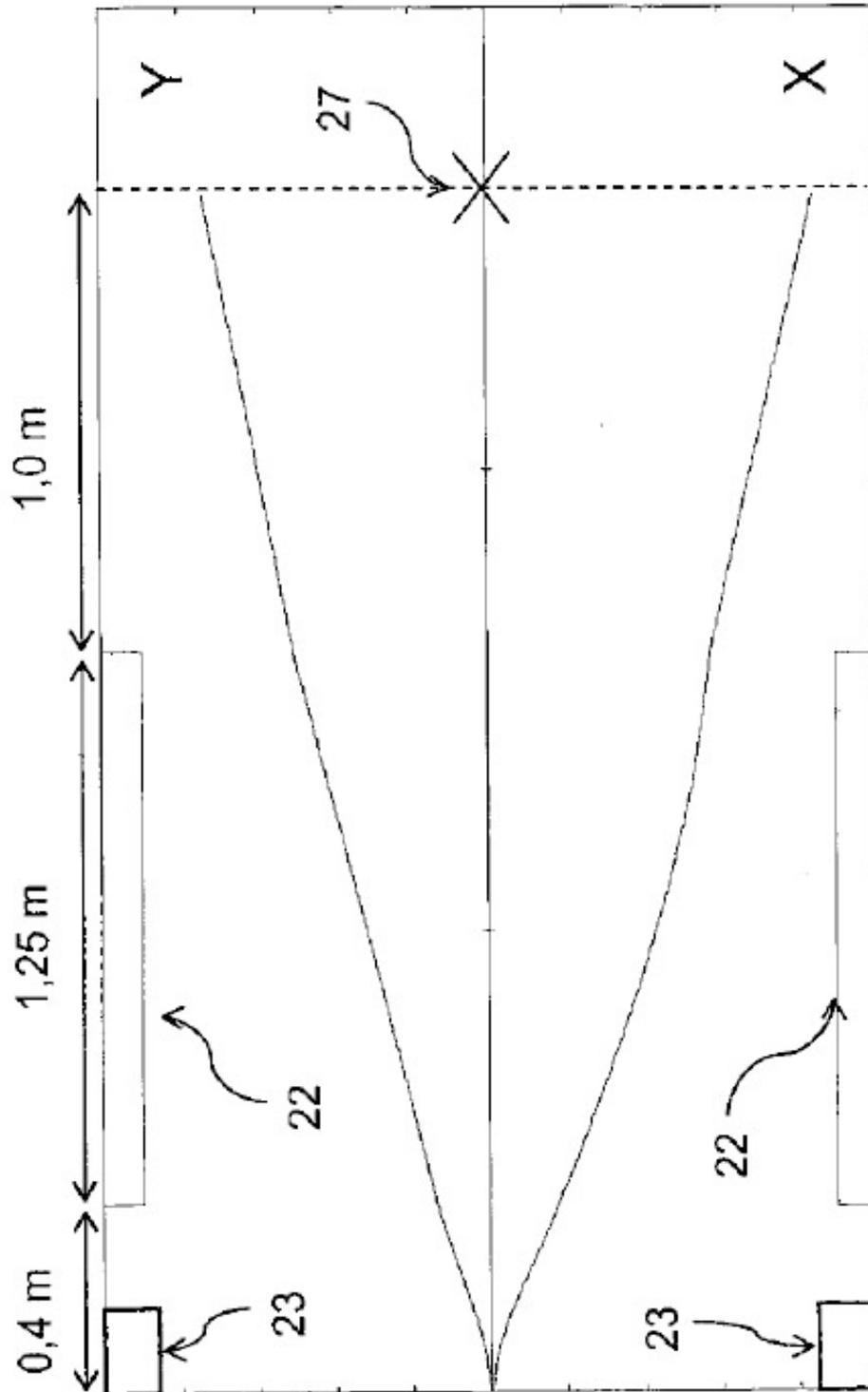


Fig. 4

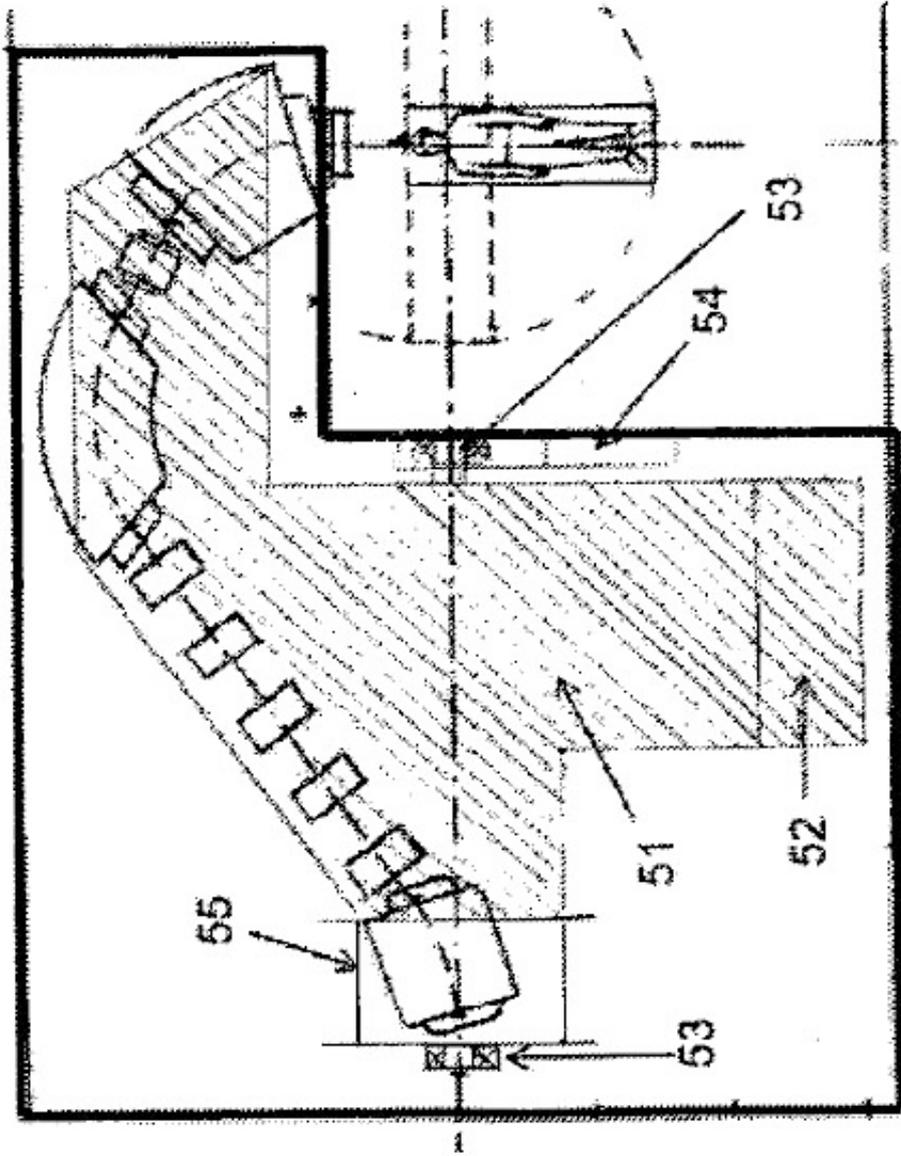


Fig. 5

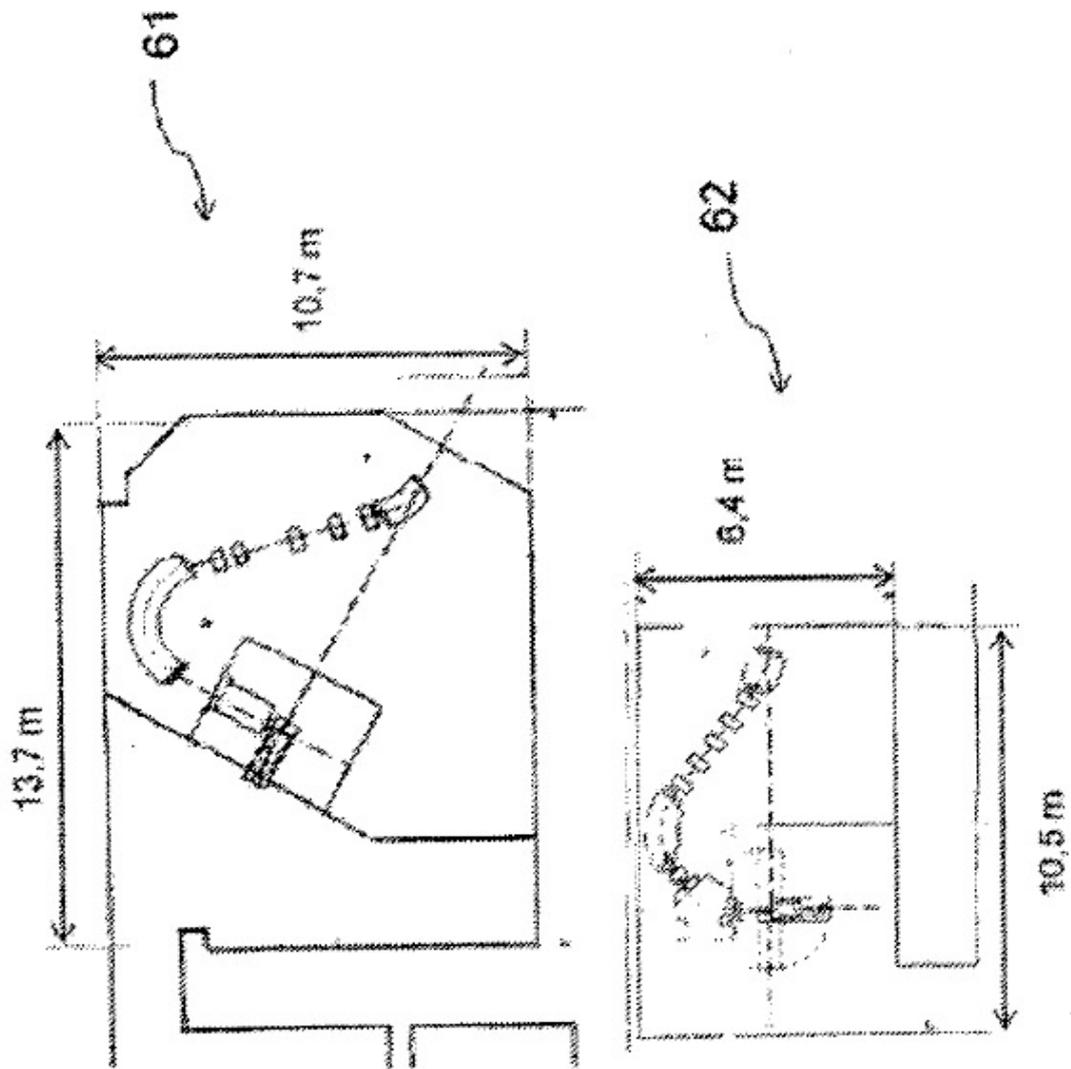


Fig. 6

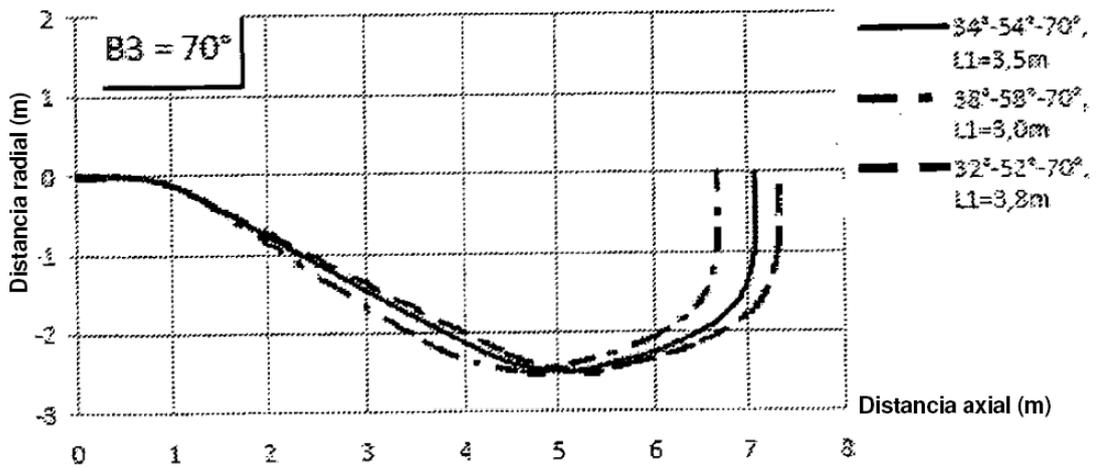
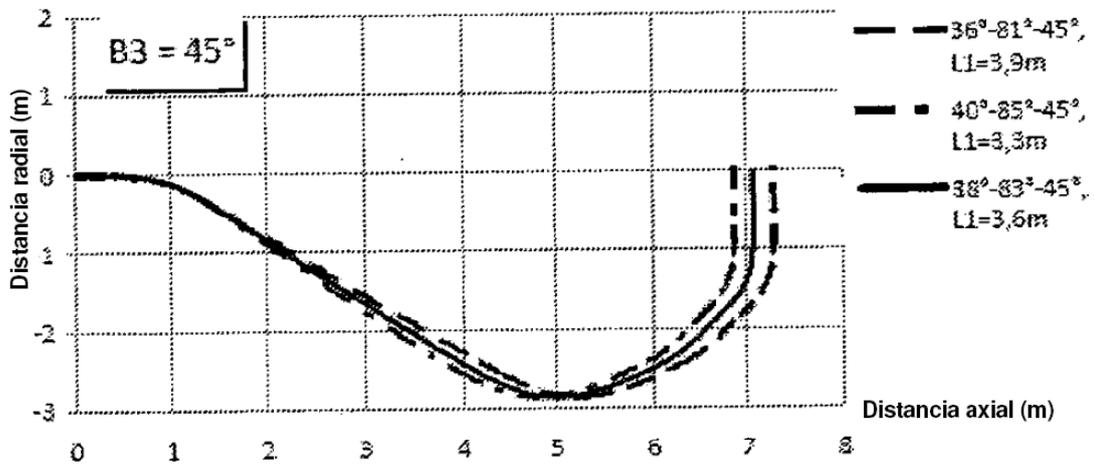
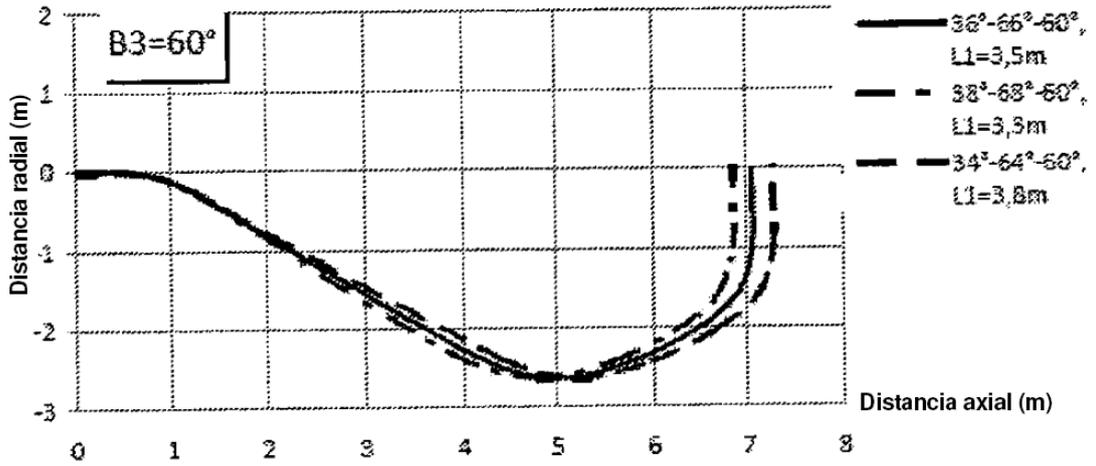


Fig. 7