

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 644 251**

21 Número de solicitud: 201630524

51 Int. Cl.:

A61B 6/03 (2006.01)

G01T 1/29 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

25.04.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

28.11.2017

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2017/070248

71 Solicitantes:

**GENERAL EQUIPMENT FOR MEDICAL IMAGING,
S.A. (60.0%)**

**C/ Jerónimo de Monsoriu, 92, bajo izqda.
46022 València ES;**

**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
(20.0%) y**

**CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS (CSIC) (20.0%)**

72 Inventor/es:

BENLLOCH BAVIERA, José María;

GONZÁLEZ MARTÍNEZ, Antonio Javier;

MOLINER MARTÍNEZ, Laura;

CATRET MASCARELL, Juan Vicente y

CORRECHER SALVADOR, Carlos

74 Agente/Representante:

CUETO PRIEDE, Sénida Remedios

54 Título: **UN DISPOSITIVO DE IMAGEN PET DEDICADO A LA OBSERVACIÓN DEL CEREBRO**

57 Resumen:

Un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro.

La presente invención se refiere a un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro, caracterizado porque en su conjunto tiene una estructura con una forma capaz de albergar una cabeza, que comprende módulos independientes de detección de rayos gamma, dichos módulos de detección comprenden cristales continuos de centelleo de sección principal poligonal, en el que los módulos de detección forman en su conjunto una estructura tridimensional hueca capaz de circundar la cabeza, y siendo dicha estructura tridimensional elongada con un eje mayor en la dirección correspondiente a la dirección frente-nuca y un eje más corto en la dirección correspondiente a la línea recta que une las orejas, y estando dispuestos los cristales de centelleo adyacentes encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor, constituyendo un mosaico, es decir, sin dejar huecos y sin solaparse entre sí.



Fig. 22

ES 2 644 251 A1

DESCRIPCIÓN

Un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro

SECTOR DE LA TÉCNICA

- 5 La presente invención tiene aplicación en el sector de los dispositivos médicos para diagnóstico por imagen, concretamente en los dispositivos de tomografía por emisión de positrones (PET).

ANTECEDENTES DE LA INVENCION

- 10 La Tomografía por Emisión de Positrones es una técnica de diagnóstico e investigación "in vivo" por imagen, capaz de medir la actividad metabólica del cuerpo humano. La técnica PET se basa en detectar y analizar la distribución tridimensional que adopta en el interior del cuerpo un radiofármaco de vida media ultracorta administrado a través de una inyección intravenosa. Según qué se desee estudiar, se
15 usan diferentes radiofármacos.

- La imagen se obtiene gracias a que los dispositivos son capaces de detectar los fotones gamma emitidos por el paciente. Estos fotones gamma de 511keV son el producto de una aniquilación entre un positrón, emitido por el radiofármaco, y un electrón cortical del cuerpo del paciente. Esta aniquilación da lugar a la emisión,
20 fundamentalmente, de dos fotones. Para que estos fotones acaben por conformar la imagen deben detectarse "en coincidencia", es decir, al mismo tiempo; en una ventana de tiempo adecuada (nanosegundos), además deben provenir de la misma dirección y sentidos opuestos, pero además su energía debe superar un umbral mínimo que certifique que no ha sufrido dispersiones energéticas de importancia en su trayecto (fenómeno de *scatter*) hasta los detectores. Los detectores de un
25 tomógrafo PET están dispuestos en una estructura con forma de anillo alrededor del paciente, y gracias a que detectan en coincidencia los fotones generados en cada aniquilación conformarán la imagen. Para la obtención de la imagen estos fotones detectados son convertidos en señales eléctricas. Esta información posteriormente se
30 somete a procesos de filtrado y reconstrucción, gracias a los cuales se obtiene la imagen.

- El PET dedicado de cerebro tiene utilidad para la medición de la actividad del cerebro y es eficaz para el diagnóstico precoz de enfermedades neurodegenerativas como la enfermedad de Parkinson o la enfermedad de Alzheimer, así como otras
35 enfermedades mentales como la esquizofrenia o la depresión severa. Para un diagnóstico preciso se requieren imágenes de gran calidad, por lo tanto, el dispositivo debe concebirse con gran resolución espacial y sensibilidad. La sensibilidad puede mejorarse aumentando el espesor de los cristales, disminuyendo la distancia del

detector al paciente y/o cubriendo la máxima superficie posible del cráneo del paciente.

Se han propuesto diversas aproximaciones para solucionar el problema de mejorar la sensibilidad del PET de cerebro, como la solicitud de patente WO2010/033159, donde
5 Majewski et al. proponen un simple anillo esférico alrededor de la cabeza para generar la imagen. La invención descrita en esta solicitud tiene los inconvenientes de que el anillo no cubre la totalidad del cerebro y, al tener forma circular, no se encuentra optimizado para la forma típicamente ovalada de la cabeza humana. Igualmente, en 2011, se publica en la revista *IEEE Transactions on Nuclear Science*
10 (vol. 58, pp. 668 to 673) el artículo de S. Yamamoto et al. "Development of a Brain PET system, PET-Hat: A Wearable PET System for Brain Research" donde se describe un dispositivo PET igualmente circular y de un solo anillo, no presentando ningún avance en el aspecto de la sensibilidad respecto a la patente anteriormente citada. En 2013, Weinberg I. et al describen en la patente US2013218010 un
15 dispositivo de múltiples anillos de sección circular que incluye anillos parciales de detectores, que no llegan a completar el anillo, con el fin de aumentar la sensibilidad. Todos estos trabajos tienen en común que se basan en anillos de sección circular utilizando detectores cuadrados.

En 2015, Tashima et al. describen en la patente US9226717 B2 (US20150115162 A1)
20 un dispositivo PET, de sección igualmente circular, pero organizado en forma de semiesfera en vez de cilíndrico, a la que se le incorpora un elemento no físicamente acoplado al casco principal con el fin de aumentar su sensibilidad.

La construcción de un dispositivo que optimice la sensibilidad de un PET dedicado de cerebro, que al mismo tiempo minimice el número de detectores utilizados, requeriría
25 construir una superficie que se adaptase por completo, en forma y tamaño, a la cabeza, en particular la cabeza humana. Sin embargo, existen limitaciones importantes en cuanto a cómo generar esta superficie debido al procedimiento que se emplea para fabricar los cristales continuos centelleantes que se incluyen en estos dispositivos. Estas limitaciones están relacionadas con el tamaño máximo y forma en
30 la que se pueden tallar dichos cristales.

Es imposible además realizar de forma exacta una superficie curva elongada tridimensional (tal como un elipsoide) a partir de superficies planas en forma de polígonos. No obstante, aunque no resulta trivial, es posible aproximar esas superficies curvas a un poliedro construido a partir de superficies planas en forma de
35 polígonos. El objeto de la presente invención es precisamente conseguir un dispositivo de imagen PET con la máxima cobertura angular del cerebro mediante módulos de detección independientes de sección principal poligonal y constituyendo en conjunto una forma elongada tridimensional adaptada a la cabeza, en particular la cabeza, en particular la cabeza humana y lo más próximo a la misma, para minimizar
40 el número de detectores.

Teniendo en cuenta las limitaciones existentes en la fabricación de cristales, y utilizando las formas geométricas regulares previamente propuestas en el estado de la técnica, el dispositivo resulta o bien demasiado alejado de la geometría real de la cabeza (como se observa en la Fig. 1, o el icosaedro truncado que ilustra el estado de la técnica), o demasiado pequeño debido al número de caras y tamaño máximo de cada cara (típicamente 70mm), como en el caso del icosaedro truncado.

La presente invención resuelve los problemas del estado de la técnica mediante un dispositivo PET dedicado para cerebro con una forma geométrica diferente de las anteriormente propuestas y que mejora la sensibilidad del equipo respecto a otras configuraciones basadas en anillos o cascos esféricos.

También se proponen detectores de forma diferente de la cuadrada (triangular, pentagonal o hexagonal) de forma que a partir de superficies planas realizadas mediante diversos polígonos regulares el conjunto se aproxima idealmente a una esfera.

El dispositivo de la presente invención comprende detectores con formas de pentágonos y hexágonos, formando geometrías que, al contrario que otras formas más comunes, como el icosaedro truncado, permiten generar diámetros mayores de dispositivo detector, para un tamaño máximo dado de cristal centelleante. Igualmente, permiten generar formas elongadas, con perímetros no circulares, mejor adaptadas a la morfología de la cabeza, en particular la cabeza humana.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

El dispositivo de la presente invención es un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro, caracterizado porque en su conjunto tiene una estructura con una forma capaz de albergar una cabeza, que comprende módulos independientes de detección de rayos gamma, dichos módulos de detección comprenden cristales continuos de centelleo de sección principal poligonal, en el que los módulos de detección forman en su conjunto una estructura tridimensional hueca capaz de circundar la cabeza, y siendo dicha estructura tridimensional elongada con un eje mayor en la dirección correspondiente a la dirección frente-nuca y un eje más corto en la dirección correspondiente a la línea recta que une las orejas, y estando dispuestos los cristales de centelleo adyacentes encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor, constituyendo un mosaico, es decir, sin dejar huecos y sin solaparse entre sí. Preferentemente los cristales de centelleo adyacentes son del mismo espesor encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor.

Los módulos de detección pueden tener forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma tumbado de base rectangular capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la base posterior del prisma

está en la zona que corresponde a la parte de atrás de la cabeza, en la parte posterior de la estructura susceptible de ser enfrentada al hueso occipital. Otras alternativas para esta realización se definen en las reivindicaciones dependientes.

5 Los módulos de detección pueden tener también forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco de bases de sección pentagonal, hexagonal, u octogonal capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la otra base del prisma en la parte posterior de la estructura que se enfrentaría a la parte de atrás de la cabeza susceptible de ser enfrentada al hueso occipital.

Alternativas adicionales se refieren a un dispositivo de imagen PET que comprende módulos de detección de forma triangular, cuadrada, rectangular o combinaciones de ellas, y que forman en conjunto un prisma hueco con una base en forma de cúpula poligonal, por ejemplo cuadrada, pentagonal, hexagonal, heptagonal u octogonal.

15 Alternativas adicionales se refieren a un dispositivo de imagen PET que comprende módulos de detección de forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco capaz de albergar una cabeza cuyas bases están formadas por cúpulas poliédricas. Según otra variante, los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma octaédrico hueco capaz de albergar una cabeza, y con una base en forma de cúpula cuadrada.

Los módulos de detección pueden también formar un prisma hueco cuyas caras laterales son las caras susceptibles de estar dispuestas entre la nuca y la frente y las bases del prisma son las caras susceptibles de estar dispuestas paralelas a las orejas. Por ejemplo el prisma puede estar formado por ocho lados incluyendo un lado susceptible de estar enfrentado a la barbilla de un sujeto y los lados ausentes - susceptibles de estar enfrentados al cuello y la zona ocular - y las bases están formadas por un cuadrado constituido por varios detectores, por ejemplo 9 detectores.

Según otras alternativas, los módulos detectores pueden formar una estructura tridimensional hueca con forma elongada que además es más estrecha en la parte anterior correspondiente a la zona de la frente cuando el dispositivo está en uso que en la parte posterior correspondiente a la zona de la nuca cuando el dispositivo está en uso, de modo que dicha estructura es capaz de ser adaptada a la forma de la cabeza. Por ejemplo, los módulos detectores pueden formar una estructura tridimensional hueca que comprende 76 vértices o 84 vértices, y tener superficies planas de sección - que en al menos parte de dichos módulos detectores - es pentagonal o sección hexagonal, regulares o irregulares.

El dispositivo de imagen PET puede comprender además una matriz mecánica de estructura opaca a la luz visible, rígida, a modo de panel donde se alojan cada uno los módulos de detección en su posición y orientación preestablecida, y un interfaz mecánico para poder enlazar un módulo con los otros módulos. La matriz mecánica

abarcará por lo tanto todos los módulos, y cada uno de los módulos, a su vez, puede estar encapsulado o no.

En los módulos de detección los cristales continuos de centelleo pueden tener la misma anchura para todos los detectores independientemente de su forma poligonal.

- 5 El dispositivo de imagen PET también puede comprender módulos de detección de dos tamaños distintos.

De forma alternativa cada módulo de detección posee una única cara donde se sitúan los foto-detectores y tal que la superficie opuesta a la de foto-detección está completamente pulida y cubierta por un retro-reflector.

- 10 El dispositivo de imagen PET también puede comprender una lámina difusora de la luz o una guía de luz entre cada cristal continuo de centelleo y los foto-detectores.

Los módulos de detección están preferentemente configurados de forma que los rayos gamma entran por la cara opuesta a donde se sitúan los foto-detectores, aunque también podrían configurarse de forma que los rayos gamma entran por la cara donde se sitúan los foto-detectores,.

15 El dispositivo de imagen PET también puede comprender un elemento protector susceptible de ser accionado mecánica o manualmente para producir una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma de un objeto – en particular una cabeza humana - cuya imagen se pretende obtener e inmovilizar dicho objeto. El elemento protector puede ser un sistema de colchón de aire, adosado al conjunto de módulos de detección que mediante un sistema de inflado, rellena la separación entre el dispositivo de imagen PET y el objeto cuya imagen se pretende obtener, o un sistema de contenedores elásticos, rellenos de pequeñas partículas esféricas o con cualquier otra geometría de baja densidad que al ser presionadas mecánicamente provocan la adaptación del dispositivo de imagen PET a la forma del objeto cuya imagen se pretende obtener.

20 La invención también tiene como objeto un método para realizar una toma de imágenes con un dispositivo de imagen PET definido anteriormente que comprende disponer un elemento protector como el definido anteriormente entre el dispositivo de imagen PET y el objeto cuya imagen se pretende obtener (en particular una cabeza humana), de modo que dicho elemento protector al ser accionado mecánica o manualmente produce una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma del objeto cuya imagen se pretende obtener. Otras alternativas para esta realización se definen en las reivindicaciones dependientes.

- 30 En la presente memoria, salvo que se indique explícitamente otra cosa, el término “cristal” equivale a la expresión “cristal continuo”.

La expresión “módulo detector” es equivalente a “módulo de detección”, “foto-detector”, “foto-sensor”, o simplemente “módulo”, salvo que se indique explícitamente otra cosa.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

Figura 1: muestra una configuración de módulos de detección que forman múltiples anillos, de sección circular, perteneciente al estado de la técnica, comparada con la morfología de la cabeza humana y en la que se aprecia una separación importante entre los detectores y la cabeza.

Figura 2: Izquierda: muestra una cabeza humana real y la línea sobre la que se calculará la sección a la que deberá aproximarse el dispositivo PET para aumentar su eficiencia. Derecha: Muestra un elipsoide que representa la evolvente de una cabeza humana real.

Figura 3: ilustra una realización de módulo de detección, que comprende un cristal continuo de centelleo, un conjunto de foto-detectores, la electrónica de lectura, y un encapsulamiento mecánico de todo el conjunto. 1: rayo gamma, 2: punto de emisión de la luz de centelleo; 3: matriz de foto-sensores; 4: cristal de centelleo; 5: tratamiento de la superficie de entrada del cristal, preferiblemente retro-reflector; 6: tratamiento de la superficie lateral del cristal mediante reflector especular, pintura negra u otra pintura absorbente, o una combinación de ellas; 7: difusor de la luz o guía de luz.

Figura 4: ilustra realizaciones de la forma de los cristales continuos de centelleo de los módulos de detección, de sección principal poligonal. Prismas de sección triangular, cuadrada, pentagonal, hexagonal, heptagonal y octogonal. Pirámides truncadas por un corte paralelo a la base de sección triangular, cuadrada, pentagonal, hexagonal, heptagonal y octogonal.

Figura 5: muestra un ejemplo de configuración del dispositivo de imagen PET en forma de prisma hueco tumbado de base cuadrada. Dicho prisma cubre de forma prácticamente completa la cabeza dejando únicamente un hueco para el cuello y para los ojos. Los lados correspondientes a la zona inferior de la mandíbula tan sólo tienen detectores en esa región para dejar un espacio holgado para el cuello. La base trasera o posterior ha sido totalmente cubierta con detectores cuadrados e incluso se ha prolongado hacia la espalda para aumentar la sensibilidad. La base delantera se ha cubierto tan sólo parcialmente, en la zona de la barbilla y la frente, para permitir a los ojos una visión cómoda. El lado inferior del prisma que es el que corresponde a la zona del cuello cuando el dispositivo de imagen está en uso, solo tiene un fragmento de modo que forma una "L" con la base delantera del prisma. La parte de la base delantera en forma de L correspondiente a la zona de la barbilla se ajusta en posición para cada sujeto después de haber situado el dispositivo de imagen PET en la cabeza.

Figura 6: muestra un ejemplo de realización de módulos de detección con cristales continuos centelleantes cuadrados en forma de prisma tumbado irregular de ocho lados. Los lados correspondientes a la zona inferior de la mandíbula tan sólo tienen

detectores en esa región para dejar un espacio holgado para el cuello. La base trasera o posterior ha sido totalmente cubierta con detectores cuadrados. La base delantera se ha cubierto tan sólo parcialmente, en la zona de la barbilla y la frente, para permitir a los ojos una visión cómoda.

5 **Figura 7:** muestra un ejemplo de base en forma de cúpula cuadrada. Esta base se adapta mejor a la forma de la parte posterior de la cabeza. Esta base introduce cristales de centelleo de superficie triangular. Otras bases similares en forma de cúpula pentagonal, hexagonal, etc., se implementan también de forma análoga.

10 **Figura 8:** muestra un ejemplo de disposición de los cristales continuos centelleantes cuadrados en forma de prisma irregular de ocho lados. La parte trasera ha sido totalmente cubierta mediante una cúpula cuadrada. Alternativamente, se utilizan otras bases similares en forma de cúpula pentagonal, hexagonal, etc. Igualmente, la parte delantera también se ha cubierto, aunque tan sólo parcialmente, en la zona de la barbilla y la frente, para permitir a los ojos una visión cómoda, mediante una base del
15 prisma en forma de cúpula cuadrada.

Figura 9: muestra un ejemplo de configuración del dispositivo de imagen PET en la que las bases del prisma hueco se encuentran paralelas a las orejas. En este caso el prisma está formado por ocho lados (prisma octogonal), incluyendo el lado correspondiente a la barbilla del sujeto e incluyendo también los lados ausentes del
20 cuello y la zona ocular. Las bases, en lugar de estar formadas por decágonos irregulares, están formadas por un cuadrado grande que está constituido por 9 detectores.

Figura 10: muestra ejemplos de formas elongadas con mayor o menor número de caras a partir de pentágonos regulares, hexágonos regulares e irregulares. Esta
25 configuración se adapta mejor a la forma de la cabeza que el icosaedro truncado o cualquier otra forma que imita la esfera. La forma de la izquierda contiene 70 vértices y la de la derecha 80. La configuración de la izquierda contiene 12 pentágonos regulares, 10 hexágonos regulares y 15 irregulares y 105 aristas. La configuración de la derecha contiene 12 pentágonos regulares, 10 hexágonos regulares y 20
30 irregulares y 120 aristas, y presenta simetría del grupo D5d.

Figura 11. Muestra ejemplos de estructuras tridimensionales huecas con formas elongadas y más estrechas en la parte anterior correspondiente a la zona de la frente cuando el dispositivo está en uso que en la parte posterior correspondiente a la zona de la nuca cuando el dispositivo está en uso, de modo que son capaces de ser
35 adaptadas a la forma de la cabeza humana. Estas estructuras son realizadas a partir de pentágonos regulares, hexágonos regulares e irregulares. Estas configuraciones se adaptan perfectamente a la forma de la cabeza, más estrecha en la parte frontal que en la parte de atrás. La forma de la izquierda contiene 76 vértices, presentando el grupo de simetría T_d , y la de la derecha 84.

Figura 12: muestra un ejemplo de dispositivo de imagen PET de la figura anterior perfectamente adaptado a la forma de la cabeza.

Figura 13: muestra un ejemplo de disposición de hexágonos en “zig-zag” o en “sillón” formando un cilindro de longitud arbitraria al que se le acopla, para cerrar el cilindro por ambas caras una semiesfera formada mediante hexágonos regulares y pentágonos, tal como en un icosaedro truncado. Alternativamente, el cilindro se cierra mediante una cúpula como en la figura 7.

Figura 14: Izquierda. Muestra un ejemplo de disposición de los foto-detectores de dos tamaños (en este caso se trata de foto-detectores cuadrados en los que uno posee lados de la mitad de tamaño que el otro) para cubrir un área mayor del cristal continuo centelleante de sección triangular sin sobrepasar a ésta, ya que colisionaría con los foto-detectores de cristales adyacentes. Nótese que todos los foto-detectores de tamaño grande están alineados entre sí formando una matriz para facilitar la lectura mediante filas y columnas, tal como se muestra en la figura de la derecha.

Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo fuera en forma de pentágono, hexágono, etc.

Derecha. Lectura mediante filas y columnas de los foto-detectores de la figura de la izquierda. Las señales de los foto-detectores de cada fila o columna se suman mediante electrónica analógica antes de digitalizar. Las señales de todos los detectores de tamaño inferior correspondientes a cada fila o columna también son sumadas analógicamente junto con las señales correspondientes de los foto-detectores de tamaño grande de la misma fila o columna antes de digitalizar. Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal continuo de centelleo tenga forma de pentágono, hexágono, etc.

Figura 15: muestra un ejemplo de disposición de los foto-detectores para cubrir una mayor área del cristal continuo centelleante sin la restricción del alineamiento en filas y columnas. Ello implica la lectura individual de cada uno de los foto-detectores y su digitalización mediante, por ejemplo, un ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Esta disposición sin restricciones de alineamiento aumenta ligeramente el área cubierta por los foto-detectores. Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo tenga forma de pentágono, hexágono, etc.

Figura 16: muestra un ejemplo de disposición de los foto-detectores para cubrir completamente la superficie del cristal continuo de centelleo sobrepasando el área de la superficie del triángulo. La colisión con los foto-detectores de cristales adyacentes, si éstos últimos son de sección cuadrada o rectangular, se evita mediante el aumento del grosor del cristal de centelleo triangular, o desplazando ligeramente (unos pocos milímetros) dicho cristal hacia el exterior o mediante la utilización de una lámina gruesa de material transparente a la luz que actúe como difusor de la luz o como guía de luz, tal como se muestra en la figuras siguientes. Disposiciones análogas se

realizan en el caso de que la superficie del cristal continuo de centelleo tenga forma de pentágono, hexágono, etc.

Figura 17: muestra un ejemplo de disposición de los foto-detectores para cubrir completamente la superficie del cristal continuo de centelleo sobrepasando el área de la superficie del triángulo, sin la restricción del alineamiento en filas y columnas. Ello implica la lectura individual de cada uno de los foto-detectores y su digitalización mediante, por ejemplo, un ASIC (Application Specific Integrated Circuit). Esta disposición sin restricciones de alineamiento minimiza el número de foto-detectores que se precisan para cubrir completamente el área del cristal. Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo tenga forma de pentágono, hexágono, etc.

Figura 18: vista de perfil de dos cristales continuos de centelleo adyacentes, el de la izquierda de sección cuadrada o rectangular y el de la derecha de sección triangular, pentagonal, hexagonal, etc. En línea discontinua se muestran los foto-detectores. Los foto-detectores (9) asociados al cristal de la derecha (11) sobrepasan el área de la superficie del triángulo para cubrir completamente la superficie del cristal de centelleo. La colisión con los foto-detectores (8) del cristal de la izquierda (10) se evita porque el cristal de la derecha (11) es ligeramente (unos pocos milímetros) más grueso.

Figura 19: vista de perfil de dos cristales continuos de centelleo adyacentes, el de la izquierda de sección cuadrada o rectangular y el de la derecha de sección triangular, pentagonal, hexagonal, etc. En línea discontinua se muestran los foto-detectores. Los foto-detectores (9) asociados al cristal de la derecha (11) sobrepasan el área de la superficie del triángulo para cubrir completamente la superficie del cristal de centelleo. La colisión con los foto-detectores (8) del cristal de la izquierda (10) se evita porque el cristal de la derecha (11) se desplaza ligeramente (unos pocos milímetros) hacia el exterior.

Figura 20: vista de perfil de dos cristales continuos de centelleo adyacentes, el de la izquierda de sección cuadrada o rectangular y el de la derecha de sección triangular, pentagonal, hexagonal, etc. En línea discontinua se muestran los foto-detectores. Los foto-detectores (9) asociados al cristal de la derecha (11) sobrepasan el área de la superficie del triángulo del para cubrir completamente la superficie del cristal de centelleo. La colisión con los foto-detectores (8) del cristal de la izquierda (10) se evita porque se ha instalado una lámina fina (de unos pocos milímetros de espesor más gruesa que la lámina del cristal de la izquierda) de material transparente y difusor de la luz o guía de luz (7) entre el cristal de la derecha (11) y sus foto-detectores asociados.

Figura 21: muestra guías de luz en forma de pirámides truncadas (cola de pez) de base más ancha en la parte del cristal de centelleo (como se muestra por ejemplo en la figura 21) y con la forma del polígono de dicho cristal para evitar la colisión con los foto-detectores de cristales adyacentes, independientemente de la forma del polígono.

Figura 22: ejemplo de realización preferente en el que los módulos de detección forman en su conjunto una estructura compuesta de tres partes: la central es un prisma de base octogonal elongada cuyos lados enfrentados a las orejas están formados por más módulos que los otros lados del octógono, la superior es una

5 cúpula de base rectangular que sustituye la base superior del prisma, cubriéndolo, que cierra exactamente el prisma anterior y es por tanto de planta octogonal alargada por los lados de las orejas, y que se dispone en la zona correspondiente a la parte superior de la cabeza cuando el dispositivo de imagen PET está en uso, y la tercera es una parte inferior con forma de anillo o puente perpendicular al prisma, que

10 sustituye a la base inferior del prisma, y que es un conjunto de varios módulos dispuestos en cadena, que unen dos caras del prisma enfrentadas y paralelas entre sí, y de modo que esta parte inferior queda enfrentada a la barbilla de un sujeto cuando el dispositivo está en uso. Cada lado del prisma octogonal o de la cúpula puede estar formado por uno o más módulos de detección. En conjunto, el prisma y la

15 cúpula forman una forma parecida al sólido de Johnson llamado cúpula cuadrada elongada, también llamada rombicuboctaedro disminuido, excepto que los lados de las orejas han sido alargados en la dirección nuca-frente y, por tanto, la cúpula no es cuadrada sino rectangular. En conjunto, el prisma y la cúpula poseen 17 caras: 5 rectángulos, 8 cuadrados (que también podrían ser reemplazados por rectángulos) y 4

20 triángulos. La parte inferior que se dispone enfrentada a la barbilla puede estar desplazada hacia la mitad anterior del prisma (de modo que cubre la zona lateral de la cabeza coincidiendo con los ojos) como se ve en la figura 22, o puede estar centrada respecto al prisma y la cúpula que cubre el prisma octogonal, de modo que cubre la parte lateral central de la cabeza. En la figura 22, dibujo central, esta disposición –

25 que no se muestra en las figuras – se vería el módulo de detección de la parte inferior en contacto con la mitad de cada lado de los módulos inmediatamente encima, que constituyen caras del prisma. Esta configuración, con la parte inferior de la estructura centrada tiene la ventaja de que permite observar la zona central del cerebro, y en particular la zona del hipocampo, cortex entorrinal y amígdala.

30 **Figura 23:** Dado que el cuello presenta una superficie con curvatura negativa tal como un hiperboloide (una silla de montar a caballo) no es sencillo aproximar dicha superficie mediante polígonos. Esta figura muestra el ejemplo de realización preferente mostrado en la figura anterior, pero en el que la parte del dispositivo de imagen que se dispone enfrentada a la barbilla se utilizan cristales en forma de

35 heptágonos y hexágonos.

Figura 24: ejemplo de estructura mecánica a base de fibra de carbono sobre la que se colocan los distintos módulos de sección hexagonal, pentagonal, etc. El grosor de la estructura entre cristales está exagerado en la figura para que se pueda visualizar, pero obviamente en la implementación real es mínimo para minimizar la distancia

40 entre cristales de centelleo y maximizar la sensibilidad.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LA INVENCION

El objeto de la presente invención es un dispositivo de imagen PET dedicado al examen del cerebro, que puede ser el de un mamífero tal como un primate, y preferentemente será un cerebro humano, para el diagnóstico y seguimiento de enfermedades neurológicas, maximizando la sensibilidad y al mismo tiempo minimizando el número de detectores utilizados y, por tanto, el coste, peso y complejidad.

La sensibilidad se optimiza mediante una mayor cobertura angular de los detectores que permita detectar la coincidencia de rayos gamma emitidos en el área del cerebro en direcciones opuestas, tal como sucede en los eventos de emisión por radioisótopos PET.

El Instituto Valenciano de Biomecánica (IBV) realizó un estudio estadístico de la forma y tamaño de la cabeza humana. El resultado del mismo es que el tamaño varía de forma significativa según las diferentes nacionalidades y sexos, y de forma individual dentro de cada país. Sin embargo, una característica común es que la forma de la cabeza humana no es esférica sino que es más estrecha en la dirección que va entre las dos orejas, comparada con las otras dos direcciones perpendiculares a ésta (ver figuras 1 y 2). Ello aconseja el diseño de un dispositivo de imagen PET de geometría elongada para adaptarse mejor a la forma de la cabeza humana. El objeto de la presente invención es un dispositivo PET que cumpla estas condiciones, es decir, máxima cobertura angular para maximizar la sensibilidad, y forma elongada, parecida a la cabeza, en particular la cabeza humana, situando el dispositivo de imagen PET lo más cerca posible del cerebro, para minimizar el número de detectores utilizados. Otra característica común es que la cabeza es más estrecha en la parte frontal que en la parte de atrás (figura 2 derecha).

Una característica esencial de los dispositivos de imagen PET de la invención es por lo tanto que los módulos de detección gamma están dispuestos de modo que pueden rodear la cabeza del sujeto formando en conjunto una superficie elongada, no esférica, para adaptarse mejor a la forma tridimensional de la cabeza, en particular la cabeza humana. Ello permite obtener una sensibilidad máxima minimizando al mismo tiempo el número de detectores utilizados y, por tanto, el coste del dispositivo de imagen PET.

Sin embargo, y dado que el dispositivo de imagen PET está diseñado para el diagnóstico de enfermedades neurológicas, muchos pacientes serán personas de edad avanzada y algunos de ellos u otros más jóvenes pueden presentar enfermedades mentales, como la esquizofrenia, resulta crítico para un examen correcto que el paciente se encuentre cómodo y pueda ver, oír y respirar sin ninguna dificultad. Por otro lado, los tamaños y formas de las cabezas difieren en promedio entre diferentes continentes y nacionalidades, y de forma individual dentro de cada país, con variabilidades totales en el tamaño de hasta alrededor del 5%. Por ello, los

diseños propuestos deberán permitir un espacio entre el dispositivo de imagen y la cabeza lo suficientemente holgado para acoplar diferentes tamaños y formas de cabezas.

5 El dispositivo de la presente invención es un dispositivo de la presente invención es un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro, caracterizado porque en su conjunto tiene una estructura con una forma capaz de albergar una cabeza, que comprende módulos independientes de detección de rayos gamma, dichos módulos de detección comprenden cristales continuos de centelleo de sección principal poligonal, en el que los módulos de detección forman en su conjunto una
10 estructura tridimensional hueca capaz de circundar la cabeza, y siendo dicha estructura tridimensional elongada con un eje mayor en la dirección correspondiente a la dirección frente-nuca y un eje más corto en la dirección correspondiente a la línea recta que une las orejas, y estando dispuestos los cristales de centelleo adyacentes encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor,
15 constituyendo un mosaico, es decir, sin dejar huecos y sin solaparse entre sí. Preferentemente los cristales de centelleo adyacentes son del mismo espesor encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor.

Según realizaciones particulares, en el dispositivo de imagen PET los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco
20 tumbado de base rectangular (como se muestra por ejemplo en la figura 5) capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la base posterior del prisma está en la zona que corresponde a la parte de atrás de la cabeza, en la parte posterior de la estructura susceptible de ser enfrentada al hueso occipital;
25 y opcionalmente, la base posterior puede ser prolongada con módulos de detección adicionales hacia la zona que corresponde a la espalda cuando el dispositivo está colocado sobre la cabeza de un sujeto.

Según realizaciones particulares adicionales, en el dispositivo de imagen PET los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un
30 prisma hueco tumbado de base rectangular capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la base posterior del prisma está en la zona que corresponde a la parte de atrás de la cabeza, en la parte posterior de la estructura susceptible de ser enfrentada al hueso occipital, estando cada lado de dicho prisma
35 recubierto con detectores con cristales continuos de sección cuadrada, de forma que el lado del prisma susceptible de ser enfrentado al cuello, y la base frontal, están cubiertos únicamente de forma parcial, de modo que el cuello quepa de forma holgada y no se obstruya la vista, mientras que la base posterior y todos los lados restantes del prisma están completamente cubiertos por detectores; y opcionalmente,
40 la base trasera puede ser prolongada con módulos de detección adicionales hacia la

zona que corresponde a la espalda cuando el dispositivo está colocado sobre la cabeza de un sujeto.

Para cualquiera de estas realizaciones descritas del dispositivo de imagen PET en el que los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco tumbado de base rectangular capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la base posterior del prisma está en la zona que corresponde a la parte de atrás de la cabeza, en la parte posterior de la estructura susceptible de ser enfrentada al hueso occipital, en el que lado del prisma susceptible de ser enfrentado al cuello cuando el dispositivo de imagen está en uso, y que solo está cubierto parcialmente con módulos de detección, forma con la base delantera del prisma un fragmento del mismo en forma de "L", y este fragmento en forma de L correspondiente a la zona de la barbilla cuando el dispositivo está en uso, es ajustable en posición para cada sujeto después de haber colocado el dispositivo de imagen PET en la cabeza. En la operación de ajuste de la posición para un sujeto concreto, todo el fragmento en forma de "L" es susceptible de ser desplazado.

Según realizaciones particulares adicionales, los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco de bases de sección pentagonal, hexagonal, octogonal, etc., capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la otra base del prisma en la parte posterior de la estructura que se enfrentaría a la parte de atrás de la cabeza susceptible de ser enfrentada al hueso occipital. Un ejemplo de esta realización se muestra en la figura 6, en la que los cristales continuos centelleantes cuadrados se han dispuesto en forma de prisma irregular de ocho lados. Los lados correspondientes a la zona inferior de la mandíbula tan sólo tienen detectores en esa región para dejar un espacio holgado para el cuello. La base trasera ha sido totalmente cubierta con detectores cuadrados. La base delantera se ha cubierto tan sólo parcialmente, en la zona de la barbilla y la frente, para permitir a los ojos una visión cómoda.

Según realizaciones particulares adicionales el dispositivo de imagen PET puede comprender módulos de detección de forma triangular, cuadrada y rectangular, y que forman en conjunto un prisma hueco con una base en forma de cúpula poligonal, por ejemplo cuadrada, pentagonal, hexagonal u octogonal.

Según realizaciones particulares adicionales, los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco capaz de albergar una cabeza cuyas bases están formadas por cúpulas poliédricas. De manera particular, para esta alternativa de la invención, los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma octaédrico capaz de albergar una cabeza, y una base en forma de cúpula cuadrada.

En otra realización de la presente invención, las bases de los prismas tienen forma de cúpula poligonal. Un ejemplo de cúpula cuadrada se muestra en la figura 7. Esta base se adapta mejor a la forma de la parte posterior de la cabeza (figura 8), permitiendo disminuir significativamente el número de cristales continuos de centelleo utilizados.

5 Sin embargo, presenta la desventaja de añadir cristales continuos de centelleo de superficie triangular. Igualmente, la parte delantera también se ha cubierto, aunque tan sólo parcialmente, en la zona de la barbilla y la frente, para permitir a los ojos una visión cómoda, mediante una base en forma de cúpula cuadrada. Otras bases similares en forma de cúpula pentagonal, hexagonal, etc., pueden implementarse
10 también de forma análoga al coste de introducir cristales de sección poligonal irregular.

Según realizaciones particulares adicionales del dispositivo de imagen PET los módulos de detección forman un prisma hueco cuyas caras laterales son las caras susceptibles de estar dispuestas entre la nuca y la frente de un sujeto y las bases del
15 prisma son las caras susceptibles de estar dispuestas paralelas a las orejas, tal como se muestra en la figura 9. En ejemplo caso el prisma está formado por ocho lados (prisma octogonal), incluyendo el lado correspondiente a la barbilla y los lados ausentes del cuello y la zona ocular. Las bases, en lugar de estar formadas por octógonos irregulares, están formadas por un cuadrado grande que está constituido
20 por 9 detectores.

Formas que se aproximan a la esfera a partir de superficies planas pueden implementarse mediante hexágonos y pentágonos como en el icosaedro truncado. Sin embargo, el tamaño del icosaedro truncado está limitado por el tamaño de la arista de las caras y viene dado por la fórmula siguiente, para una arista de tamaño unidad:

$$25 \quad r_5 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{10} (125 + 41\sqrt{5})}$$

$$r_6 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{3}{2} (7 + 3\sqrt{5})}$$

siendo r_5 y r_6 el radio hasta el centro de los pentágonos y hexágonos, respectivamente. Para una arista de tamaño a hay que multiplicar r_5 y r_6 por la longitud de la arista.

30 Teniendo en cuenta que los cristales continuos de centelleo se fabrican a partir de lingotes cilíndricos de diámetro máximo de alrededor de 70mm en el caso del LSO o de 135mm en el caso del BGO, la arista máxima de un hexágono regular (correspondiente a la mitad del diámetro del lingote) será de 163mm. Ello limita la forma de icosaedro truncado al caso del BGO, no pudiéndose utilizar el LSO y sus
35 variantes. La familia de cristales LSO posee la característica de emitir una gran cantidad de luz y un tiempo de emisión muy corto respecto del BGO lo que resultan muy adecuados para la determinación precisa del tiempo de vuelo (TOF: Time Of Flight).

Alternativamente, en otra realización de la presente invención, el dispositivo de imagen PET tiene forma elongada a partir de 12 superficies planas de sección pentagonal y diferente número de superficies planas de sección hexagonal, regulares e irregulares, de tamaño arbitrariamente grande. En la figura 10 se muestran dos ejemplos. En el ejemplo de la izquierda, existen 70 vértices, 12 pentágonos, 15 hexágonos regulares y 10 hexágonos irregulares, es decir, 37 caras en total. Esta forma, en la que resulta crítico añadir hexágonos irregulares, posee dos ventajas importantes respecto al icosaedro truncado (el balón de fútbol): 1) tiene una forma elongada que se adapta mejor a la cabeza; 2) puede realizarse de forma arbitrariamente grande. De forma similar, la configuración de la derecha de la misma figura 10 contiene 12 pentágonos regulares, 10 hexágonos regulares y 20 irregulares y 120 aristas, y presenta simetría del grupo D5d.

Alternativamente, a partir de 12 pentágonos y diferente número de hexágonos regulares e irregulares es posible realizar prácticamente cualquier forma elongada.

Alternativamente, otra realización de la presente invención, se refiere a un dispositivo de imagen PET con forma elongada que además resulta más estrecha en la zona de la frente que en la parte de atrás, adaptándose aún más a la forma de la cabeza. En la figura 11 se muestran dos ejemplos. El ejemplo de la izquierda contiene 76 vértices, presentando el grupo de simetría T_d , y el de la derecha 84. A partir de 12 superficies planas de sección pentagonal y diferente número de superficies planas de sección hexagonal, regulares e irregulares, se pueden realizar estas y otras formas de tamaño arbitrariamente grande. En la figura 12, se muestra la disposición de cristales continuos del dispositivo de imagen PET perfectamente adaptado a la forma de la cabeza.

A partir de polígonos regulares de pocos tipos también se pueden construir los sólidos de Arquímedes diferentes al icosaedro truncado, algunos de los cuales se podrían utilizar como cascos si se utiliza sólo la mitad del sólido, por ejemplo: Icosidodecaedro truncado o el Dodecaedro romo.

A partir de polígonos regulares de pocos tipos también se pueden construir los sólidos de Johnson, algunos de los cuales se podrían utilizar como cascos si se elimina la base (el polígono más grande, octógono o decágono), por ejemplo: Cúpula cuadrada elongada, Cúpula pentagonal elongada, Rotonda pentagonal elongada, Cúpula cuadrada giroelongada, Cúpula pentagonal giroelongada, Rotonda pentagonal giroelongada, Ortocupularrotonda pentagonal, girocupularrotonda pentagonal, Romboicosaedro disminuido, Romboicosaedro Paragiroide disminuido y el Romboicosaedro Metagiroide disminuido.

También a partir de polígonos irregulares sencillos se pueden construir los sólidos de Catalan, algunos de los cuales se podrían utilizar como cascos si se utiliza sólo la mitad del sólido, por ejemplo: Hexecontaedro deltoidal y Hexecontaedro Pentagonal.

Estas configuraciones a partir de polígonos como pentágonos, hexágonos regulares e

irregulares, etc., no son fáciles de construir. Para ello, según una realización particular se dispone un sistema mecánico basado en una estructura rígida a modo de panel (figura 24) donde se alojarán cada uno los módulos de detección en su posición y orientación preestablecida. Cada celda del panel tiene la geometría y tamaño
5 adecuado para completar la configuración final del dispositivo. La matriz también incorpora un interfaz mecánico para poder enlazar este elemento con otros posibles componentes del sistema (posicionador del sistema detector respecto al paciente, soporte, carcasa protectora o embellecedora...). La matriz es opaca a la luz visible, para evitar que la luz se introduzca en la celda, pero es de baja densidad para evitar
10 interacciones no deseadas (scatter, compton, atenuación) con la radiación procedente del paciente.

El dispositivo de imagen PET de la presente invención además de los módulos de detección de rayos gamma, comprende la electrónica para la adquisición de los datos procedentes de los módulos de detección, la electrónica del "trigger" de coincidencias
15 temporales de rayos gamma, un ordenador para la adquisición y almacenamiento de los datos y programas informáticos para reconstrucción y visualización de la imagen a partir de los mismos.

Cada módulo de detección comprende un cristal continuo de centelleo, también llamado monolítico, un conjunto de foto-detectores para la colección de la luz emitida
20 por el cristal de centelleo tras la interacción del rayo gamma en el mismo, la electrónica de lectura de dichos foto-detectores, y opcionalmente, un encapsulamiento mecánico de todo el conjunto, tal como se muestra, a modo de ejemplo, en la figura 3. En esta realización concreta mostrada en esta figura al menos una de las caras del cristal está cubierta al menos en parte por el conjunto de foto-detectores.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que los foto-detectores deben ser colocados
25 en superficies planas de los cristales de centelleo continuos, o de difusores de luz o guías de luz pegados a dichas superficies planas. La razón es que los foto-detectores que se utilizan en la presente invención, tanto los de estado sólido como los fotomultiplicadores sensibles a la posición presentan superficies de entrada planas.
30 Por lo tanto, en el dispositivo PET de la invención no se usan cristales de centelleo con superficies curvas ya que no se acoplarían perfectamente a la superficie plana de los foto-detectores. Además, resulta bastante más complicado realizar cristales continuos con superficies curvas. Por ello, cada uno de dichos cristales es de sección principal poligonal, por ejemplo, en forma de prisma poligonal o pirámide poligonal
35 truncada (ver a modo de ejemplo, la figura 4). En general, la anchura del cristal será la misma para todos los detectores de centelleo independientemente de su forma poligonal.

En una configuración preferente, cada módulo de detección posee una única cara donde se sitúan los foto-detectores. Dicha cara se encuentra cubierta al máximo por
40 foto-detectores para optimizar la resolución en posición de impacto de los rayos gamma en el cristal, la resolución temporal y en energía. En dicha configuración

preferente, la superficie opuesta a la de foto-detección está completamente pulida y cubierta por un retro-reflector. Los módulos de detección pueden disponerse de forma que los rayos gamma entren por la cara opuesta a los foto-detectores o, alternativamente, por la cara donde se hallan situados los foto-detectores.

- 5 Hay que tener en cuenta además que prácticamente todos los foto-sensores presentan una superficie foto-sensible de sección cuadrada o rectangular, especialmente los de estado sólido, y por tanto resulta muy conveniente que los cristales continuos de centelleo también presenten una sección cuadrada o rectangular donde se colocan los foto-sensores. De esta forma, se minimizan las zonas no sensibles (muertas) y por tanto se maximiza la recolección de luz, optimizando la resolución en energía del rayo gamma y en su posición de impacto en el cristal.

Además, para maximizar la sensibilidad del detector resulta crítico que no existan huecos entre los cristales de centelleo para que no escapen los rayos gamma entre dichos huecos y por tanto no sean detectados. Al mismo tiempo, es importante evitar el solapamiento, es decir que unos cristales se monten sobre otros, entre los cristales de centelleo para minimizar el coste del dispositivo de imagen PET. Por lo tanto, resulta muy conveniente que todas las caras laterales de los cristales se acoplen de forma exacta a sus cristales vecinos.

- 20 Por lo tanto, los dispositivos PET de la invención poseen en común que los distintos cristales continuos de centelleo no dejan huecos entre sí por donde puedan escapar los rayos gamma sin ser detectados, excepto la anchura mínima del encapsulado en caso de que haya encapsulado, que contiene a cada módulo. Por tanto, una característica esencial de la presente invención es que los cristales de centelleo poseen forma de polígonos, preferentemente del mismo espesor, encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor, constituyendo un mosaico, es decir, sin dejar huecos y sin solaparse entre sí.

También hay que tener en cuenta que no es conveniente para la fabricación de un dispositivo de imagen PET que la forma de los módulos sea diferente para cada módulo de detección. Lo óptimo es que todos los módulos de detección sean idénticos entre sí para facilitar la fabricación de los mismos en serie. También sería asumible en la fabricación que únicamente hubiera dos o tres tipos de módulos de detección diferentes. Esto es importante no sólo para la fabricación de los módulos de detección sino también para el método de determinación del punto de impacto del rayo gamma en el cristal, que es diferente para cada tipo de módulo. Por ello, si una realización constara de cristales de muchas formas diferentes habría que desarrollar un algoritmo de determinación del punto de impacto del rayo gamma diferente para cada cristal.

- 40 Cada módulo detector puede estar envuelto por un encapsulado para inmovilizar los componentes del módulo (cristal continuo, foto-detector y electrónica asociada) en su

posición nominal, evitando que se introduzca luz en el interior del módulo detector y al mismo tiempo disipando el calor generado por los componentes del módulo detector.

Los materiales a emplear para dichos componentes pueden ser de diversa naturaleza (como polímeros o metales), y su selección dependerá de factores inherentes a la configuración seleccionada y la densidad de los elementos del módulo de detección pero preferiblemente se utilizan materiales poliméricos debido a su escasa interacción con la radiación emitida desde el paciente.

La fabricación de los componentes se realiza por cualquier método adecuado a los materiales elegidos (mecanizado, inyección, colada, impresión, sinterizado) pero preferiblemente se realiza mediante impresión 3D o sinterizado debido al bajo coste de producción para series reducidas, la variedad de materiales y acabados disponibles, así como las escasas restricciones de estos métodos en cuanto a características geométricas del diseño y tolerancias necesarias.

Todos los PET comerciales y académicos utilizan módulos de detección (y cristales de centelleo) de sección cuadrada o rectangular. Además, en dichos módulos la luz producida por el impacto de los rayos gamma en el cristal es dirigida hacia una única superficie de foto-detección, de sección cuadrada o rectangular. Dicha superficie de sección cuadrada o rectangular puede ser cubierta completamente por foto-detectores de sección cuadrada para maximizar la resolución en posición, en energía y temporal.

Sin embargo, no es posible cubrir completamente las superficies planas de sección triangular, pentagonal, hexagonal, o heptagonal, de los cristales continuos de centelleo que se utilizan en la presente invención, mediante foto-detectores de sección cuadrada disponibles comercialmente. Ello implica un deterioro en la resolución en posición, en energía y temporal. Para superar esta dificultad que no se ha planteado hasta el momento la presente invención proporciona distintas soluciones que se desarrollan a continuación.

Un objeto de la presente invención es la utilización de dos tamaños de foto-detectores, por ejemplo, cuadrados de 6 y 3 mm, tal como se muestra en la figura 14 para maximizar el área cubierta por los detectores sin sobrepasar a ésta, ya que colisionaría con los foto-detectores de cristales continuos adyacentes. Nótese que todos los foto-detectores de tamaño grande están alineados entre sí formando una matriz para facilitar la lectura mediante filas y columnas, tal como se muestra en la figura siguiente. Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo sea en forma de pentágono, hexágono, etc.

Alternativamente, se dispone de un método electrónico para leer y digitalizar todos y cada uno de los foto-detectores de forma individual mediante, por ejemplo, un ASIC (Application Specific Integrated Circuit), es posible cubrir una mayor área del cristal centelleante al desaparecer la restricción del alineamiento en filas y columnas. Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo fuera en forma de pentágono, hexágono, etc.

Alternativamente, los cuadrados de los foto-detectores pueden sobresalir si la superficie adyacente es una superficie cuadrada o rectangular. Esto se puede realizar utilizando cristales ligeramente más gruesos (por ejemplo, como se muestra en la figura 16) .

- 5 Se pueden disponer los foto-detectores para cubrir completamente la superficie del cristal continuo de centelleo sobrepasando el área de la superficie del triángulo. La colisión con los foto-detectores de cristales adyacentes, si éstos últimos son de sección cuadrada o rectangular, se puede evitar mediante el aumento del grosor del cristal de centelleo triangular (figura 18) el cristal de la derecha se desplaza
- 10 ligeramente (unos pocos milímetros) hacia el exterior (figura 19) o la utilización de una lámina gruesa de material transparente a la luz que actúe como difusor de la luz o como guía de luz (figura 20). Disposiciones análogas se realizan en el caso de que la superficie del cristal de centelleo fuera en forma de pentágono, hexágono, etc. En general y para cualquier realización, la colisión con los foto-detectores de cristales
- 15 adyacentes también se puede evitar independientemente de la forma del polígono mediante la utilización de guías de luz en forma de pirámides truncadas (cola de pez) de base más ancha en la parte del cristal de centelleo (como se muestra por ejemplo en la figura 21) y con la forma del polígono de dicho cristal. Dichas guías de luz estrechadas se pueden implementar a partir de fibras ópticas.
- 20 Las condiciones que cumplen los dispositivos PET de la invención son las siguientes: 1) forma elongada, adaptada al máximo a la forma de la cabeza, constituida a partir de módulos de detección independientes, con la mayor cobertura angular posible del cerebro; 2) máximo acercamiento de los módulos de detección a la cabeza, respetando la comodidad de los pacientes; 3) módulos de detección de rayos gamma
- 25 compuestos por cristales continuos de centelleo con superficies planas; 4) máximo tres formas diferentes de los cristales de centello; 5) acoplamiento exacto entre las superficies laterales de los cristales de centelleo; y 6) superficies que se puedan cubrir de forma prácticamente completa con foto-sensores de superficie cuadrada.

El dispositivo de imagen PET de acuerdo con cualquiera de las alternativas descritas anteriores, puede comprender un elemento protector susceptible de ser accionado

30 mecánica o manualmente para producir una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma de un objeto, tal como una cabeza, cuya imagen se pretende obtener e inmovilizar dicho objeto.

Dicho elemento protector puede ser seleccionado entre un sistema de colchón de

35 aire, adosado al conjunto de módulos de detección, y un sistema de contenedores elásticos, rellenos de pequeñas partículas esféricas o con cualquier otra geometría, de baja densidad.

El movimiento de la cabeza durante el tiempo de adquisición genera artefactos y degrada la calidad de la imagen. En la presente invención se proponen dos métodos

40 para reducir tal efecto, introduciendo un elemento entre la estructura tridimensional

del conjunto de detectores y la cabeza del paciente, con la capacidad de adaptarse dinámicamente a ambos.

La presente invención se refiere además a un método para realizar una toma de imágenes con un dispositivo de imagen PET definido anteriormente, que comprende
5 disponer un elemento protector entre el dispositivo de imagen PET y el objeto, tal como una cabeza, cuya imagen se pretende obtener, de modo que dicho elemento protector al ser accionado mecánica o manualmente produce una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma del objeto cuya imagen se pretende obtener. El elemento protector puede ser un sistema de colchón de aire o un
10 sistema de contenedores elásticos, como se han definido anteriormente.

En el caso del sistema de colchón de aire, adosado a la estructura tridimensional del conjunto de detectores y situado entre dicha estructura tridimensional y la cabeza del paciente que, se puede accionar mediante un sistema de inflado, manual o automatizado, que permite rellenar la separación entre la estructura tridimensional y la
15 cabeza, inmovilizando la cabeza del paciente dentro de la estructura.

En el caso del sistema de bolsas, por ejemplo dos, o contenedores elásticos, rellenos de pequeñas partículas esféricas o con cualquier otra geometría, de baja densidad para evitar artefactos, pueden ser ligeramente presionadas mecánicamente al frontal y lateral de la cabeza del paciente para, a continuación, someterlas al vacío, mediante
20 una bomba incluida a tal efecto, lo que provoca que dichas bolsas o contenedores adopten fielmente la forma del cráneo del paciente, impidiendo que se desplace o rote sobre la posición original en la que se encontraba en el momento de aplicar el vacío.

EJEMPLOS DE REALIZACIÓN PREFERENTE

EJEMPLO 1

En una primera realización preferente del dispositivo de imagen PET de cerebro, los cristales continuos de centelleo en conjunto forman un prisma de 8 lados de forma
30 elongada y que pueden ser dispuestos de forma inclinada a lo largo de la cabeza, tal como se muestra en la figura 22. Dicho prisma se cierra por la parte superior mediante una cúpula compuesta por 8 cristales de sección cuadrada y 4 cristales de sección triangular. Por la parte inferior, el prisma se cierra mediante un puente formado por 5 cristales de centelleo de sección cuadrada alrededor de la barbilla.

Los cristales de centelleo son de BGO (Germanato de Bismuto, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$) y con forma de pirámides truncadas de sección cuadrada, de grosor 20mm y tamaño de la
35 base $95 \times 95 \text{ mm}^2$. El truncamiento de la pirámide viene determinado por la forma del prisma de tal manera que los lados de los cristales se ajusten perfectamente unos con otros para evitar el escape de rayos gamma.

La base de cada cristal está cubierta completamente con foto-detectores de tipo SiPM cuadrados de tamaño $6 \times 6 \text{ mm}^3$. Todas las señales electrónicas producidas en

los foto-detectores se leen mediante la configuración de filas y columnas. En el caso de los cristales de centelleo de sección triangular los fotodetectores se colocan como en la figura 16 y se sitúa una lámina difusora de la luz o una guía de luz entre el cristal y los foto-detectores tal como se muestra en la figura 20. En el lado opuesto a los
5 foto-detectores se coloca un retro-reflector para maximizar la detección de luz preservando su distribución original.

EJEMPLO 2

En una segunda realización preferente, los cristales continuos de centelleo son de LSO (Oxi-Ortosilicato de Lutecio dopado con Cerio). Todos los cristales tienen una
10 anchura de 20mm. 5 cristales poseen una sección hexagonal regular de 35mm de arista. 6 cristales poseen una sección pentagonal de la misma arista. 10 cristales poseen una sección hexagonal irregular con 4 aristas de 35mm y dos aristas ligeramente más largas. Esta forma y tamaño de los cristales tiene la ventaja de aprovechar al máximo el tamaño del lingote de LSO. Todos estos cristales se unen
15 para formar una figura elongada alrededor de la cabeza del paciente tal como se muestra en la figura 12.

Los foto-detectores son de tamaño 3x3mm² y las señales producidas por los mismos son leídas individualmente mediante un ASIC que digitaliza tanto la intensidad como el tiempo. Ello permite obtener información del tiempo de vuelo, obteniendo una mejor
20 calidad de imagen.

REIVINDICACIONES

1. Un dispositivo de imagen PET dedicado a la observación del cerebro, caracterizado porque en su conjunto tiene una estructura con una forma capaz de albergar una cabeza, que comprende módulos independientes de detección de rayos gamma, dichos módulos de detección comprenden cristales continuos de centelleo de sección principal poligonal, en el que los módulos de detección forman en su conjunto una estructura tridimensional hueca capaz de circundar la cabeza, y siendo dicha estructura tridimensional elongada con un eje mayor en la dirección correspondiente a la dirección frente-nuca y un eje más corto en la dirección correspondiente a la línea recta que une las orejas, y estando dispuestos los cristales de centelleo adyacentes encajando lateralmente de forma exacta unos con otros a lo largo de todo su grosor, constituyendo un mosaico, es decir, sin dejar huecos y sin solaparse entre sí.
2. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco tumbado de base rectangular capaz de albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la base posterior del prisma está en la zona que corresponde a la parte de atrás de la cabeza, en la parte posterior de la estructura susceptible de ser enfrentada al hueso occipital.
3. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 2, en el que cada lado de dicho prisma está recubierto con detectores con cristales de sección cuadrada, de forma que el lado del prisma susceptible de ser enfrentado al cuello, y la base frontal, están cubiertos únicamente de forma parcial, de modo que el cuello quepa de forma holgada y no se obstruya la vista, mientras que la base posterior y todos los lados restantes del prisma están completamente cubiertos por módulos de detección.
4. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 2 o 3, en el que base posterior ha sido prolongada con módulos de detección adicionales hacia la zona que corresponde a la espalda cuando el dispositivo está colocado sobre la cabeza de un sujeto.
5. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una de las reivindicaciones 2 a 4, en el que lado del prisma susceptible de ser enfrentado al cuello cuando el dispositivo de imagen está en uso, y que solo está cubierto parcialmente con módulos de detección, forma con la base delantera del prisma un fragmento del mismo en forma de "L", y este fragmento en forma de L correspondiente a la zona de la barbilla cuando el dispositivo está en uso, es ajustable en posición para cada sujeto después de haber colocado el dispositivo de imagen PET en la cabeza.
6. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma hueco de bases de sección pentagonal, hexagonal, u octogonal capaz de

albergar una cabeza, estando la base anterior de dicho prisma en la parte delantera de la estructura susceptible de ser enfrentada a la cara de un sujeto, y la otra base del prisma en la parte posterior de la estructura que se enfrentaría a la parte de atrás de la cabeza susceptible de ser enfrentada al hueso occipital.

- 5 7. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1 o 2, que comprende módulos de detección de forma triangular, cuadrada, rectangular o combinaciones de ellas, y forman en conjunto un prisma hueco con una base en forma de cúpula poligonal.
8. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 7, en el que la
10 cúpula es cuadrada, rectangular, pentagonal, hexagonal u octogonal.
9. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 8, en el que los módulos de detección forman en su conjunto una estructura compuesta de tres partes: una central que es un prisma de base octogonal elongada cuyos lados enfrentados a las orejas están formados por más módulos que los otros lados del
15 octógono, la superior es una cúpula de base rectangular que sustituye la base superior del prisma, cubriéndolo, que cierra exactamente el prisma anterior y es por tanto de planta octogonal alargada por los lados de las orejas, y que se dispone en la zona correspondiente a la parte superior de la cabeza cuando el dispositivo de imagen PET está en uso, y la tercera es una parte inferior con forma de anillo o
20 puente perpendicular al prisma, que sustituye a la base inferior del prisma, y que es un conjunto de varios módulos dispuestos en cadena, que unen dos caras del prisma enfrentadas y paralelas entre sí, y de modo que esta parte inferior queda enfrentada a la barbilla de un sujeto cuando el dispositivo está en uso.
10. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 9, en el que la
25 parte inferior que se dispone enfrentada a la barbilla está desplazada hacia la mitad anterior del prisma o está centrada respecto al prisma y la cúpula que lo cubre, de modo que es susceptible de cubrir la parte lateral central de la cabeza.
11. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 8, en el que los
30 módulos de detección tienen forma cuadrada o rectangular formando en conjunto un prisma octaédrico hueco capaz de albergar una cabeza, y con una base en forma de cúpula cuadrada o rectangular.
12. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 9, en el que los
35 módulos de detección forman un prisma hueco de base octogonal que en la parte que se dispone en la zona superior de la cabeza tiene forma de una cúpula cuadrada o rectangular y la parte inferior que se dispone enfrentada a la barbilla está cubierta con cristales en forma de heptágonos y hexágonos.
13. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los
40 módulos de detección forman un prisma cuyas caras laterales son las caras susceptibles de estar dispuestas entre la nuca y la frente y las bases del prisma son las caras susceptibles de estar dispuestas paralelas a las orejas.

14. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 13, en el que el prisma está formado por ocho lados incluyendo un lado susceptible de estar enfrentado a la barbilla de un sujeto e incluyendo también los lados ausentes susceptibles de estar enfrentados al cuello y la zona ocular, y las bases están
5 formadas por un cuadrado constituido por varios detectores.
15. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los módulos detectores forman una estructura tridimensional hueca con forma elongada que comprende 70 vértices u 80 vértices, ésta última presentando simetría D_{5d} , y los
10 módulos detectores tienen superficies planas de sección tal que en al menos una parte de dichos módulos detectores son de sección pentagonal o sección hexagonal, regulares o irregulares.
16. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 1, en el que los módulos detectores forman una estructura tridimensional hueca con forma elongada que además es más estrecha en la parte anterior correspondiente a la zona de la
15 frente cuando el dispositivo está en uso, que en la parte posterior correspondiente a la zona de la nuca cuando el dispositivo está en uso, de modo que es capaz de ser adaptado a la forma de la cabeza.
17. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 16, en el que los módulos detectores forman una estructura tridimensional hueca que comprende 76
20 vértices o 84 vértices, ésta última presentando simetría T_d , y los módulos detectores tienen superficies planas de sección tal que en al menos parte de dichos módulos detectores es pentagonal o sección hexagonal, regulares o irregulares.
18. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además una matriz mecánica de
25 estructura opaca a la luz visible, rígida, a modo de panel donde se alojan cada uno los módulos de detección en su posición y orientación preestablecida, y un interfaz mecánico para poder enlazar un módulo con los otros módulos.
19. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende cristales continuos de centelleo de la
30 misma anchura para todos los detectores, independientemente de su forma poligonal.
20. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende módulos de detección de dos tamaños distintos.
21. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las
35 reivindicaciones anteriores en el que cada módulo de detección posee una única cara donde se sitúan los foto-detectores y tal que la superficie opuesta a la de foto-detección está completamente pulida y cubierta por un retro-reflector.

22. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores que comprende una lámina difusora de la luz o una guía de luz entre cada cristal continuo de centelleo y los foto-detectores.
23. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las
5 reivindicaciones anteriores que comprende una guía de luz, preferentemente construida mediante matrices de fibras ópticas, entre cada cristal continuo de centelleo y los foto-detectores, en forma de pirámides truncadas de base más ancha en la parte del cristal de centelleo y con la forma del polígono de dicho cristal, para evitar que los foto-detectores de cristales adyacentes colisionen entre sí.
- 10 24. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores en el que los módulos de detección están dispuestos de forma que los rayos gamma entran por la cara opuesta a los foto-detectores.
25. Un dispositivo de imagen PET según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende además
- 15 - un sistema electrónico de adquisición de datos y de "trigger" de coincidencias;
- un ordenador y algoritmos de reconstrucción y visualización de la imagen.
26. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende un elemento protector susceptible de ser
20 accionado mecánica o manualmente para producir una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma de un objeto cuya imagen se pretende obtener e inmovilizar dicho objeto.
27. Un dispositivo de imagen PET de acuerdo con la reivindicación 26, en el que el elemento protector está seleccionado entre un sistema de colchón de aire, adosado al
25 conjunto de módulos de detección, y un sistema de contenedores elásticos, rellenos de partículas.
28. Un método para realizar una toma de imágenes con un dispositivo de imagen PET definido una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, que comprende disponer un elemento protector entre el dispositivo de imagen PET y el objeto cuya imagen se
30 pretende obtener, de modo que dicho elemento protector al ser accionado mecánica o manualmente produce una adaptación completa del dispositivo de imagen PET a la forma del objeto cuya imagen se pretende obtener.
29. Un método de acuerdo con la reivindicación 28, en el que el elemento protector es un sistema de colchón de aire, adosado al conjunto de módulos de detección que
35 mediante un sistema de inflado, rellena la separación entre el dispositivo de imagen PET y el objeto cuya imagen se pretende obtener.
30. Un método de acuerdo con la reivindicación 28, en el que el elemento protector es un sistema de contenedores elásticos, rellenos de partículas que al ser presionadas

mecánicamente provocan la adaptación del dispositivo de imagen PET a la forma del objeto cuya imagen se pretende obtener.

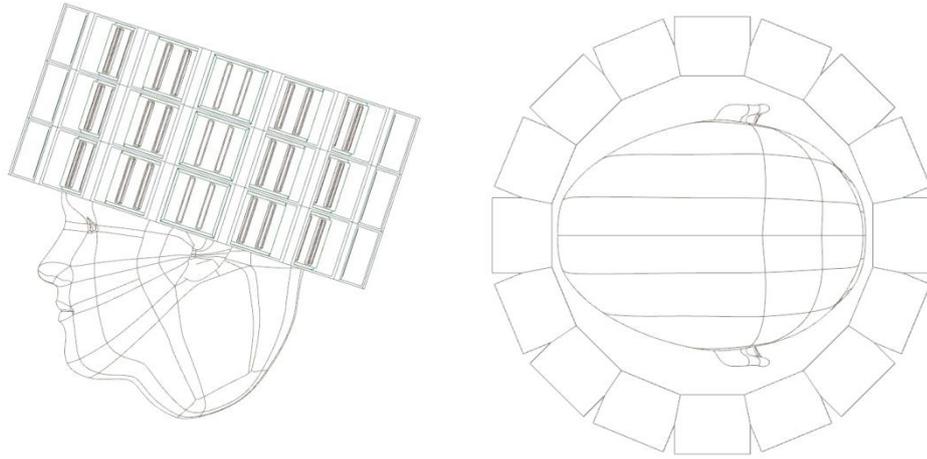


Fig. 1

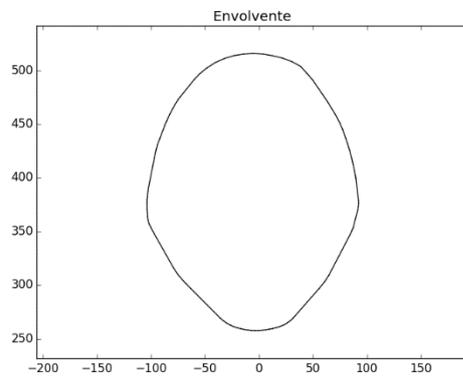
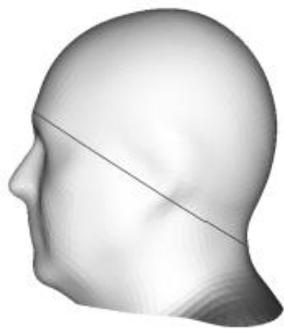


Fig. 2

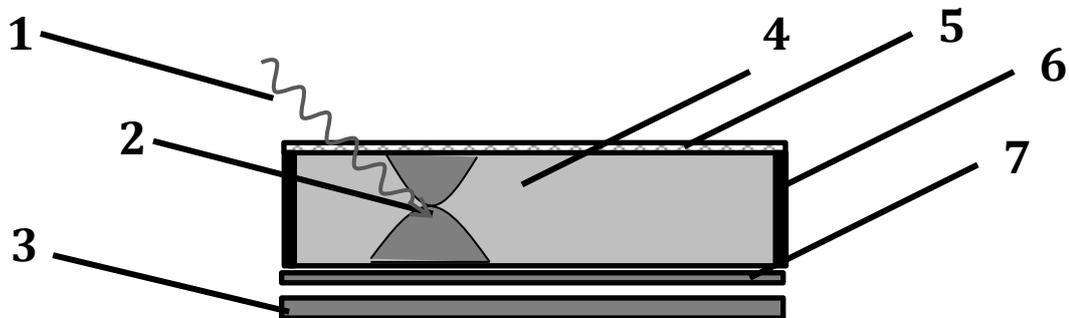


Fig. 3

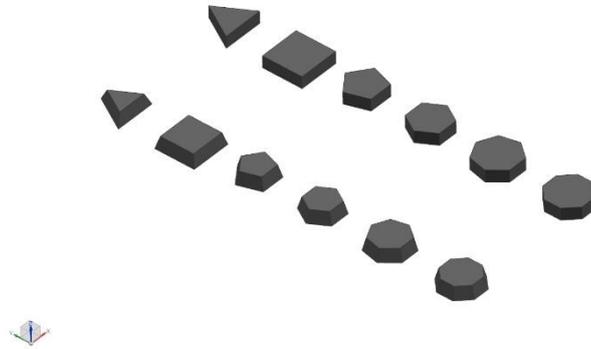


Fig. 4

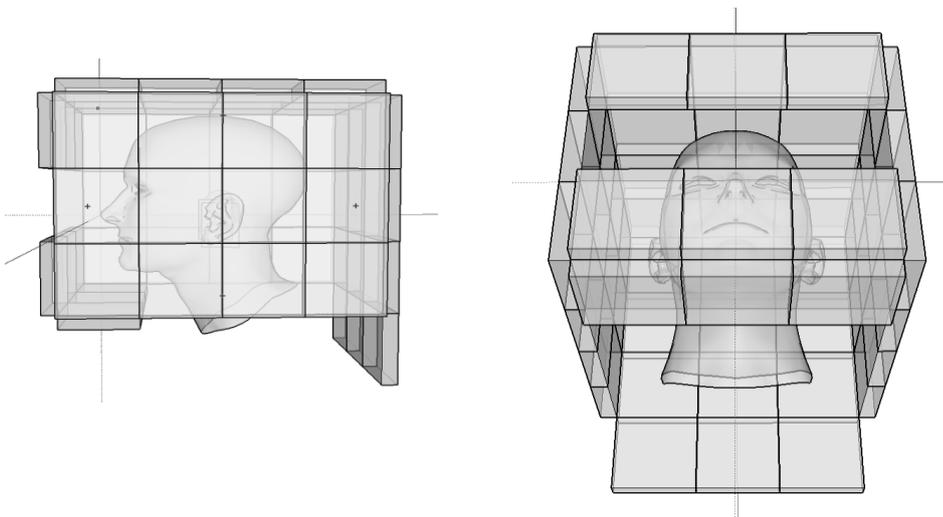


Fig. 5

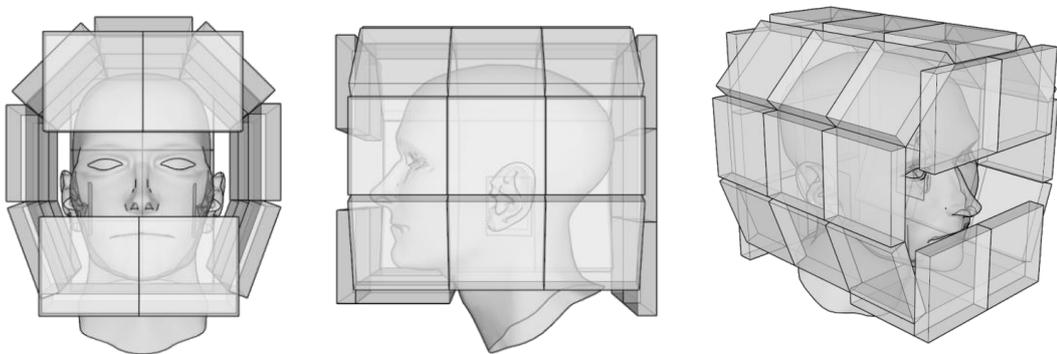


Fig. 6

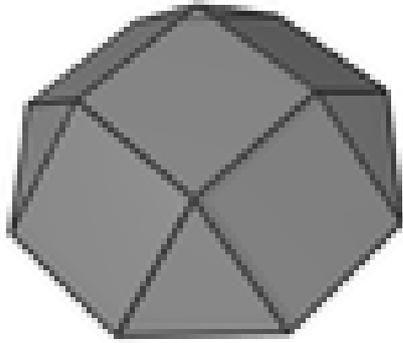


Fig. 7

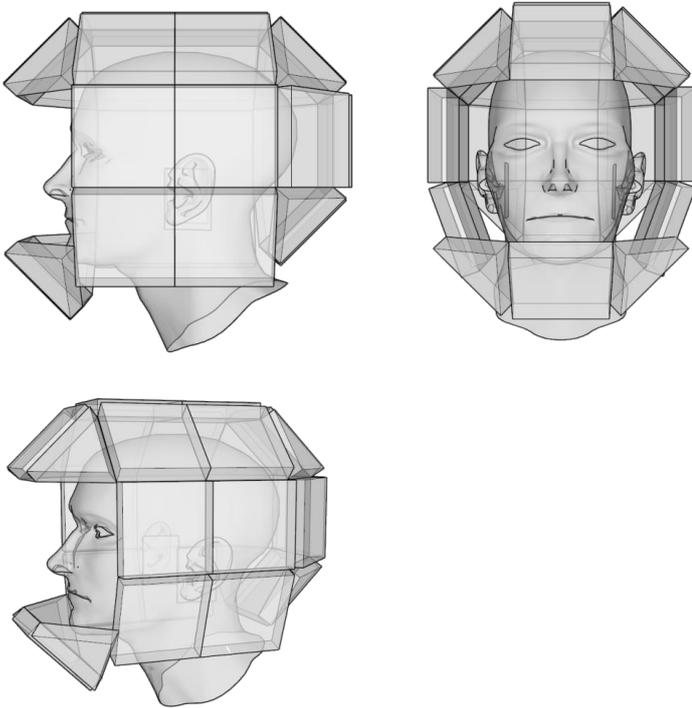


Fig. 8

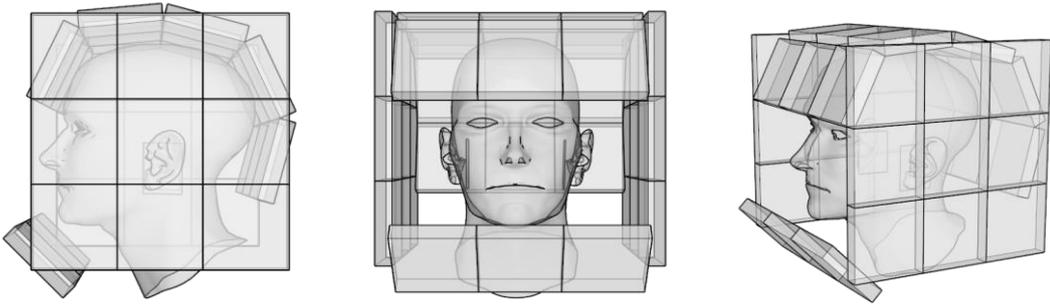


Fig. 9

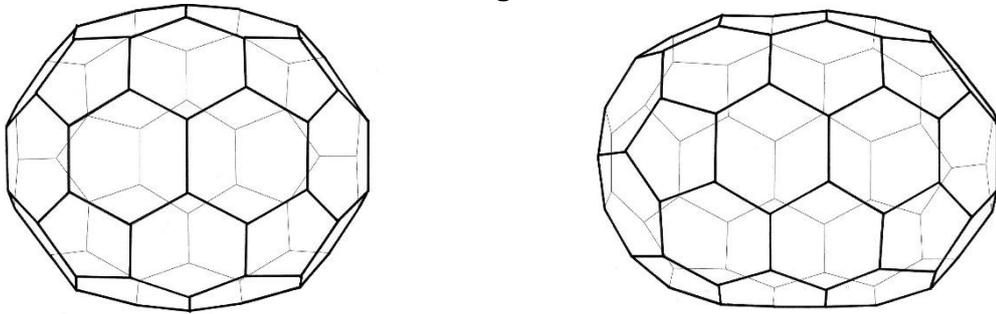


Fig. 10

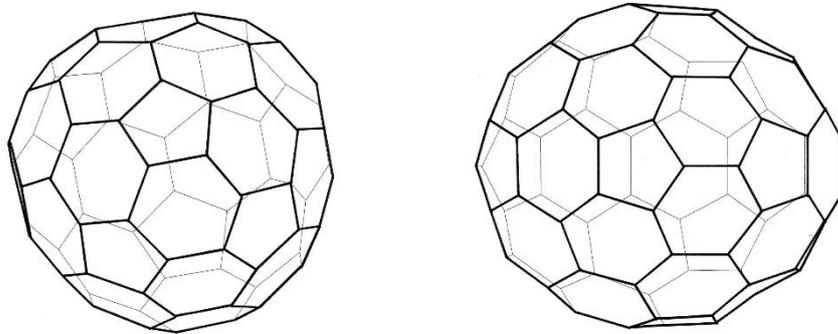


Fig. 11

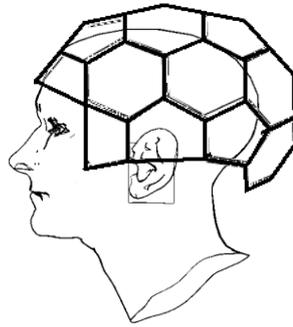


Fig. 12

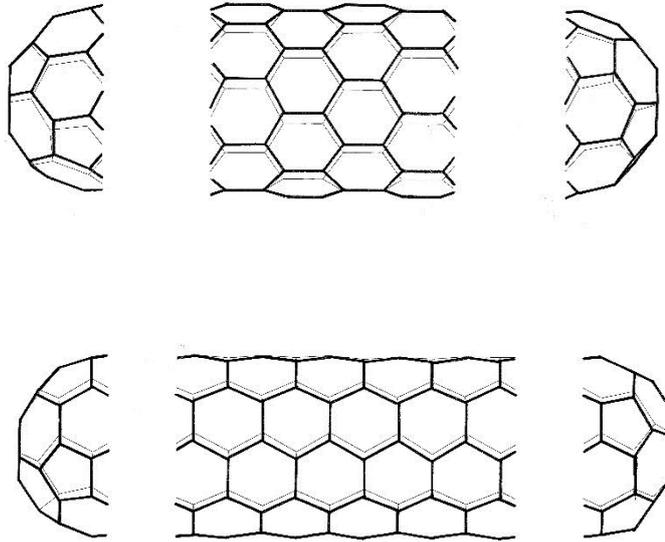


Fig. 13

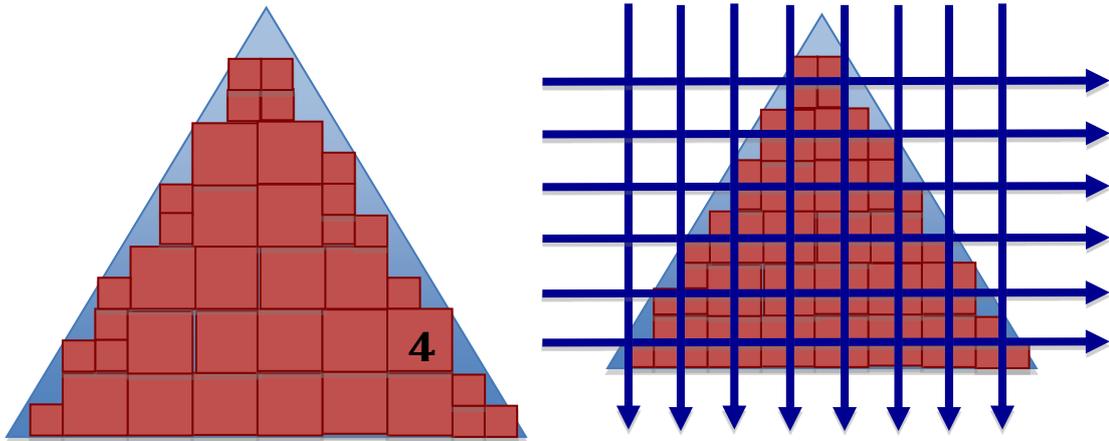


Fig. 14

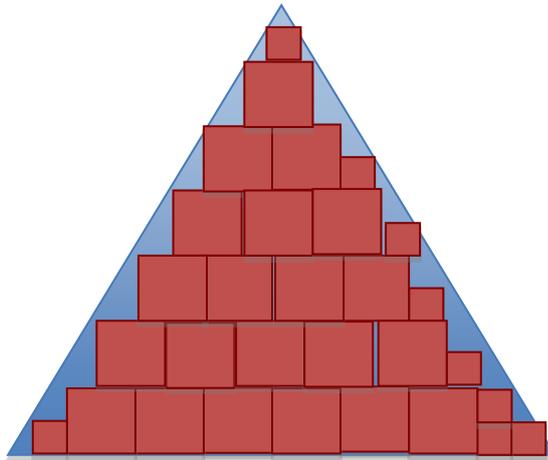


Fig. 15

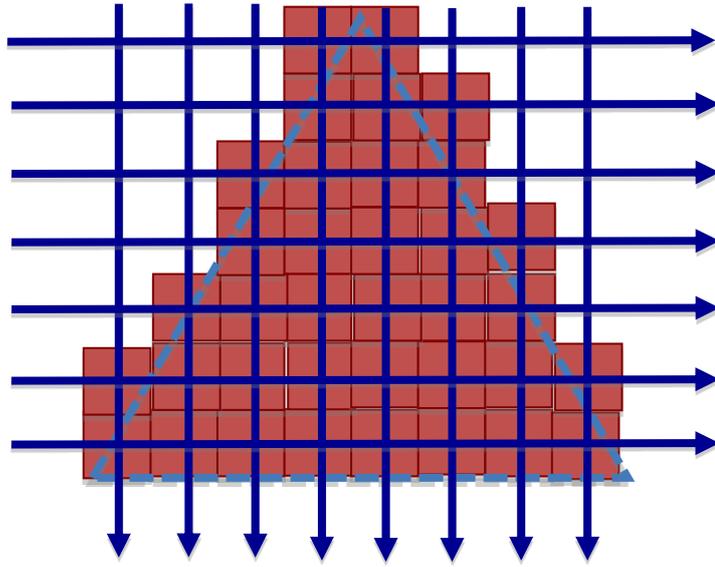


Fig. 16

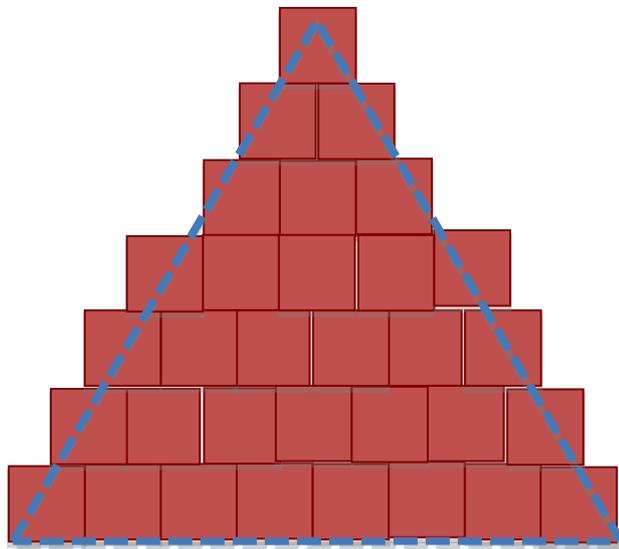


Fig. 17

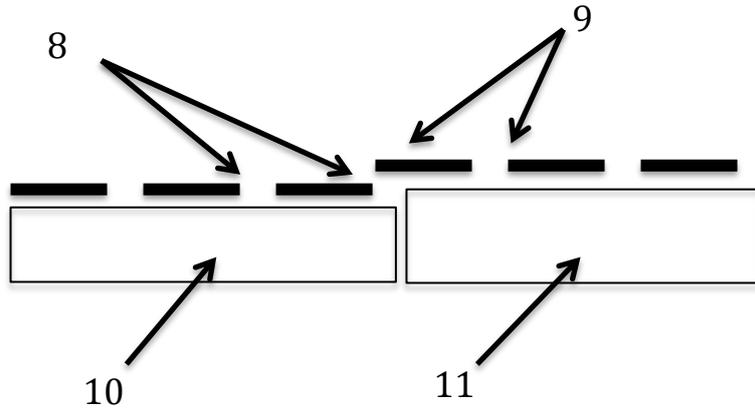


Fig. 18

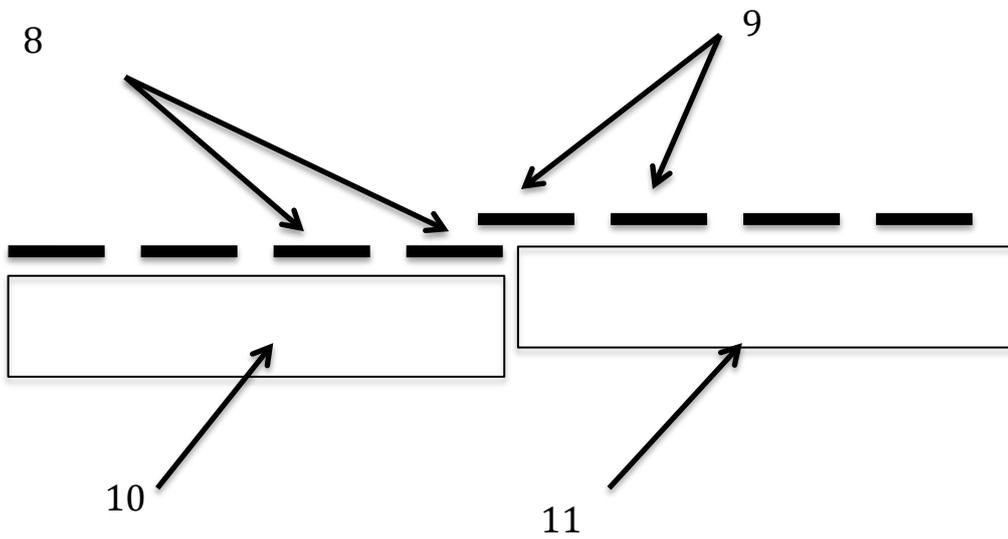


Fig. 19

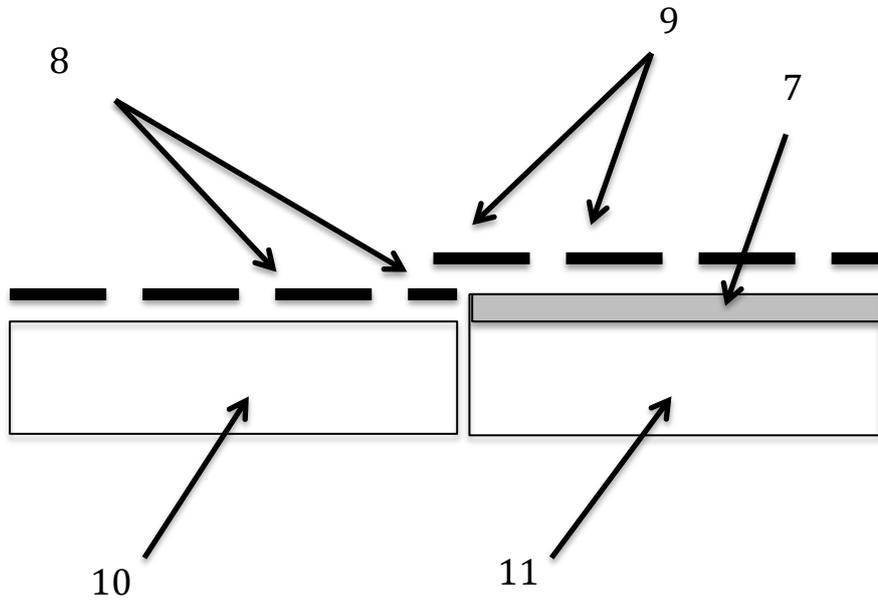


Fig. 20

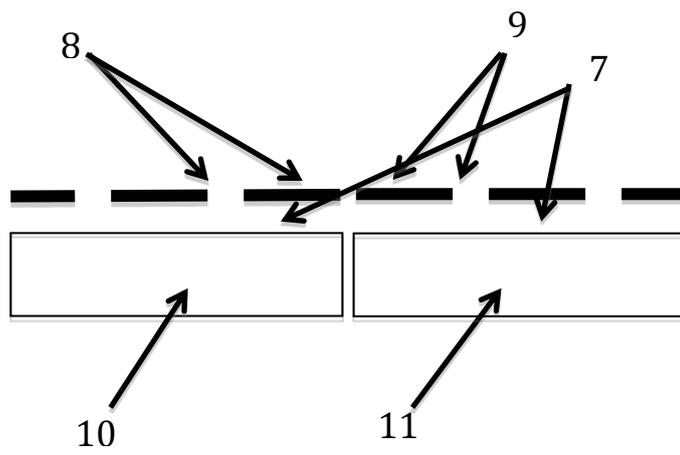


Fig. 21

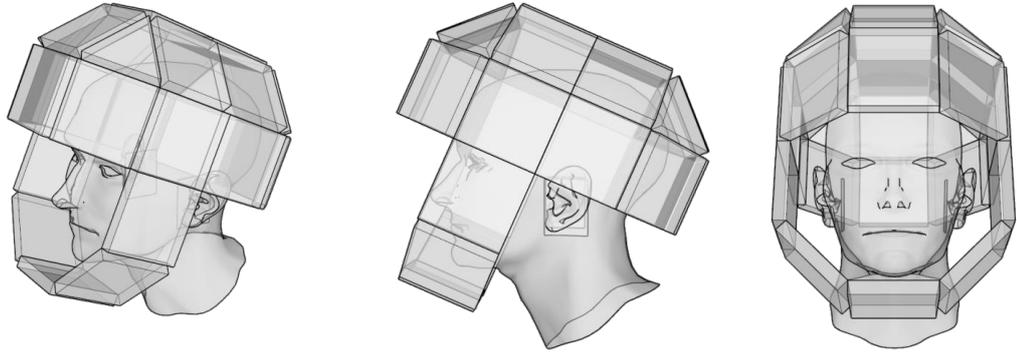


Fig. 22

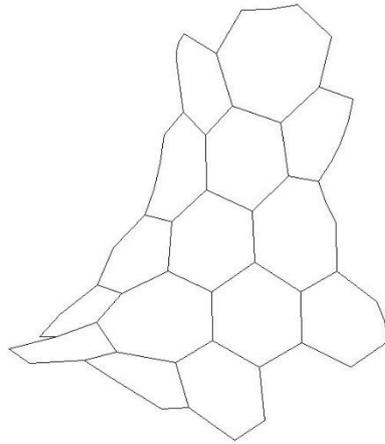


Fig. 23

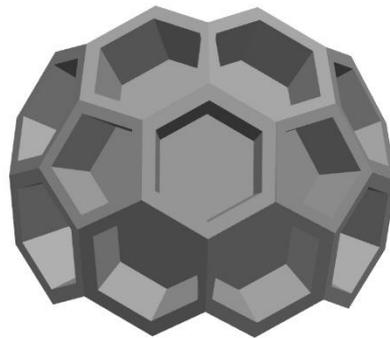


Fig. 24

