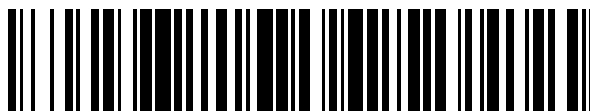


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 877 564**

51 Int. Cl.:

G01N 23/04 (2008.01)

G01N 23/22 (2008.01)

G01V 5/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **28.11.2015 PCT/AU2015/050752**

87 Fecha y número de publicación internacional: **02.06.2016 WO16082006**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **28.11.2015 E 15862380 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **28.04.2021 EP 3224603**

54 Título: **Dispositivo y método de caracterización de materiales**

30 Prioridad:

30.11.2014 AU 2014268284

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

17.11.2021

73 Titular/es:

**SOUTHERN INNOVATION INTERNATIONAL PTY LTD (100.0%)
Level1, 729 Nicholson Street
Carlton North, Victoria 3054, AU**

72 Inventor/es:

**SCOLLAR, PAUL;
MCLEAN, CHRISTOPHER;
TONISSEN, SHANE;
SALEEM, SYED KHUSRO y
ALLMAN, BRENDAN**

74 Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

ES 2 877 564 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

Dispositivo y método de caracterización de materiales

Antecedentes

5 Esta invención se refiere a un dispositivo para la identificación de materiales de la invención, con aplicación particular a la inspección de carga o equipaje para uno o más tipos de material.

10 Los sistemas de rayos X usados en la inspección de carga y equipaje utilizan un generador de rayos X de amplio espectro para iluminar el artículo que ha de inspeccionarse. Se utiliza un conjunto de detectores en el lado opuesto del artículo para medir la intensidad del flujo de rayos X que pasa a través del artículo. Los sistemas más grandes pueden tener la opción de tener dos o más fuentes de rayos X para recopilar dos o más proyecciones a través de la carga al mismo tiempo. Los sistemas de detección de rayos X utilizan la absorción diferencial de los rayos X de baja energía y de alta energía para generar una clasificación muy burda del material inspeccionado, y luego usan esta clasificación burda para generar una imagen de "color falso" para su visualización. Se utiliza una pequeña cantidad de colores, tan solo 3 en la mayoría de los sistemas existentes, para representar la clasificación de materiales.

15 Los detectores tradicionales están dispuestos en un conjunto de $1 \times N$ que comprende, más típicamente, diodos de fósforo o Si-PIN, para permitir una imagen de N filas y M columnas, capturada fila por fila a medida que el artículo pasa a través del sistema de escaneo. Se puede lograr una resolución de imagen de 1 a 2 mm con alrededor de 2000 detectores en el conjunto. Sin embargo, estos sistemas simplemente producen una imagen en función de la densidad integrada (a lo largo de la línea de visión entre la fuente de rayos X y el detector) del contenido del artículo que se inspecciona. Se utilizan dos conjuntos de detectores diferentes para generar una sola imagen: una para generar la imagen de alta energía y la otra para generar la imagen de baja energía. Esto proporciona una estimación mejorada de la densidad integrada y una capacidad rudimentaria para identificar elementos como orgánicos o metálicos. En una aplicación de detección, en la que el objetivo es identificar "contrabando" u otros artículos de interés, la gama de materiales a la que se da incorrectamente la clasificación de "contrabando" es grande. Por ello, es posible que se requiera un operario experto para identificar el material de amenaza potencial de entre la gran cantidad de falsas alarmas. El documento US 2013/315464 divulga un dispositivo para inspeccionar uno o más artículos de carga o equipaje que comprende: una fuente de radiación incidente configurada para irradiar uno o más artículos; una pluralidad de detectores adaptados para detectar paquetes de radiación que emanan del interior o pasan a través de uno o más elementos como resultado de la irradiación de la radiación incidente, estando configurado cada detector para producir un impulso eléctrico causado por los paquetes detectados que tienen un tamaño o una forma característicos dependientes de la energía de los paquetes; uno o más procesadores digitales configurados para procesar cada impulso eléctrico para determinar el tamaño o la forma característicos y de ese modo generar un espectro de energía del detector para cada detector de las energías de los paquetes detectados, y para caracterizar un material asociado con los uno o más elementos en función de los espectros de energía del detector.

Es necesario mejorar los sistemas de inspección de mercancías y equipajes.

35 Compendio de la invención

Las reivindicaciones adjuntas enumeran aspectos de la presente invención. Según un primer aspecto descrito de forma general (que no forma parte de la invención actualmente reivindicada) se proporciona un dispositivo para inspeccionar uno o más artículos de carga o equipaje que comprende:

una fuente de radiación incidente configurada para irradiar uno o más elementos;

40 una pluralidad de detectores adaptados para detectar paquetes de radiación que emanan del interior o pasan a través de uno o más elementos como resultado de la irradiación de la radiación incidente, estando configurado cada detector para producir un impulso eléctrico causado por los paquetes detectados que tienen un tamaño o una forma característicos dependiente de la energía de los paquetes;

45 uno o más procesadores digitales configurados para procesar cada impulso eléctrico para determinar el tamaño o la forma característicos y de ese modo generar un espectro de energía del detector para cada detector de las energías de los paquetes detectados, y para caracterizar un material asociado con los uno o más elementos en función de los espectros de energía del detector.

50 En una disposición descrita, cada paquete de radiación es un fotón y la pluralidad de detectores comprende uno o más detectores, cada uno compuesto por un material de centelleo adaptado para producir radiación electromagnética por centelleo de los fotones y un elemento productor de impulsos adaptado para producir el impulso eléctrico de la radiación electromagnética. El elemento productor de impulsos puede comprender un material fotosensible y la pluralidad de detectores puede disponerse uno al lado del otro en uno o más conjuntos de detectores de elementos de centelleo individuales del material de centelleo, cada uno cubierto con material reflectante alrededor de los lados del mismo y dispuesto arriba y acoplado ópticamente a un material sensible a los fotones. El material de centelleo puede ser oxiortosilicato de lutecio-itrinio (LYSO, por sus siglas en inglés). El material sensible a fotones puede ser un fotomultiplicador de silicio (SiPM, por sus siglas en inglés). Los elementos de centelleo individuales de uno o más de

los conjuntos de detectores pueden presentar un área de sección transversal a la radiación incidente de más de 1,0 milímetro cuadrado. El área de la sección transversal puede ser superior a 2 milímetros cuadrados e inferior a 5 milímetros cuadrados.

5 En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales se configuran además con un algoritmo de recuperación de apilamientos adaptado para determinar la energía asociada con dos o más impulsos superpuestos.

10 En una disposición descrita, en la que uno o más procesadores digitales están configurados para calcular un número atómico efectivo Z para cada uno de al menos algunos de los detectores en función, al menos en parte, del correspondiente espectro de energía del detector, los uno o más procesadores digitales pueden configurarse para calcular el número atómico efectivo Z para cada uno de al menos algunos de los detectores: determinando un espectro de energía predicho para un material con número atómico efectivo Z teniendo en cuenta un grosor de material estimado deducido del espectro de energía del detector y datos de atenuación de masa de referencia para el número atómico efectivo Z; y comparando el espectro de energía predicho con el espectro de energía del detector. Los uno o más procesadores digitales pueden configurarse para calcular el número atómico efectivo Z para cada uno de al menos algunos de los detectores: determinando un espectro de energía predicho para un material con número atómico efectivo Z teniendo en cuenta una tabla de calibración formada midiendo uno o más materiales de composición conocida; y comparando el espectro de energía predicho con el espectro de energía del detector.

En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales están configurados para realizar la etapa de comparación calculando una función de coste que depende de una diferencia entre el espectro de energía del detector y el espectro de energía predicho para un material con número atómico efectivo Z.

20 En una disposición descrita, se realiza una calibración de ganancia en cada detector individualmente para proporcionar coherencia de determinación de energía entre los detectores y los uno o más procesadores digitales se configuran además para calcular el espectro de energía del detector para cada detector teniendo en cuenta la calibración de ganancia.

25 En una disposición descrita, se realiza una calibración dependiente de la frecuencia de recuento que comprende la adaptación de los espectros de energía del detector para un desplazamiento dependiente de la frecuencia de recuento.

En una disposición descrita, se realiza una calibración dependiente de los parámetros del sistema en los espectros de energía del detector que comprende la adaptación para el tiempo, la temperatura u otros parámetros del sistema.

30 En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales se configuran además para reducir el ancho de banda de comunicación o el uso de memoria asociado con el procesamiento o el almacenamiento de los espectros de energía del detector, realizando una transformada rápida de Fourier de los espectros de energía y eliminando franjas de los espectros de energía de la transformada rápida de Fourier que tienen poca o ninguna señal para producir espectros de energía de detector transformados reducidos. Los uno o más procesadores digitales pueden configurarse además para aplicar una transformada rápida inversa de Fourier en los espectros de energía del detector transformados reducidos para proporcionar espectros de energía del detector reconstruidos. Los uno o más procesadores digitales pueden configurarse además con una ventana de transformada rápida de Fourier específica optimizada para minimizar los efectos de sobreoscilación de la transformada rápida de Fourier.

En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales se configuran además con un algoritmo de eliminación de la desviación del valor de referencia para eliminar un valor de referencia de una señal digital de impulso eléctrico antes del procesamiento adicional.

40 En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales se configuran además para producir una imagen de los uno o más elementos compuestos por píxeles que representan la caracterización de diferentes partes de los uno o más elementos deducidos de los espectros de energía del detector.

45 En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales están configurados además para realizar uno o más de teselado, agrupamiento, detección de bordes o media móvil en función de los números atómicos efectivos determinados para dicha pluralidad de detectores.

En una disposición descrita, los uno o más procesadores digitales se configuran además para realizar la detección de amenazas en función de uno o más tipos de material diana.

Según un segundo aspecto ampliamente descrito, se proporciona un método para inspeccionar uno o más artículos de carga o equipaje, comprendiendo el método las etapas de:

50 irradiar uno o más elementos utilizando una fuente de radiación incidente;

detectar paquetes de radiación que emanan del interior o pasan a través de uno o más artículos de carga o equipaje como resultado de la irradiación de la radiación incidente, utilizando una pluralidad de detectores, estando configurado cada detector para producir un impulso eléctrico causado por los paquetes detectados tener un tamaño o una forma característicos dependientes de la energía de los paquetes;

procesar cada impulso eléctrico usando uno o más procesadores digitales para determinar el tamaño o la forma característicos;

generar un espectro de energía del detector de inspección para cada detector de las energías de los paquetes detectados; y

5 medir un número atómico efectivo Z de un material desconocido asociado con uno o más artículos de carga o equipaje en función de los espectros de energía del detector de inspección en comparación con las mediciones de calibración realizadas durante una etapa de calibración; caracterizado porque la etapa de calibración comprende tomar medidas obtenidas de la irradiación de muestras de diferentes grosores de diferentes materiales de calibración de número atómico efectivo conocido Z , para generar espectros de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración en función de Z , del grosor x del material de calibración, y de las franjas B del histograma;

sumar los espectros recibidos en cada grosor para minimizar el ruido en los espectros;

tomar un espectro de referencia $I_0(B)$ para un grosor de material cero;

15 calcular las características de transmisión de calibración $T_x(Z, B, x)$ en función de Z , del grosor x del material y de las franjas B del histograma de energía dividiendo el espectro de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración por un espectro de referencia $I_0(B)$; y

calcular las relaciones de transmisión total de calibración $R(Z, x)$ usando una suma sobre las franjas B del histograma de energía del espectro de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración dividida por una suma sobre las franjas B del histograma de energía del espectro de referencia $I_0(B)$.

20 En toda esta memoria descriptiva, incluidas las reivindicaciones, a no ser que el contexto requiera algo distinto, se entenderá que la palabra "comprender" y variaciones tales como "comprende" y "comprendiendo" implican la inclusión de un número entero o una etapa o un grupo de números enteros o etapas indicados, pero no la exclusión de ningún otro número entero u otra etapa u otro grupo de números enteros o etapas.

25 En toda esta memoria descriptiva, incluidas las reivindicaciones, a no ser que el contexto requiera algo distinto, las palabras "carga o equipaje" abarcan paquetes, cartas, franqueo postal, efectos personales, carga, cajas que contienen bienes de consumo u otros bienes y todos los demás artículos transportados cuya inspección sea deseable o necesaria para detectar ciertos tipos de materiales, incluidos, entre otros, el contrabando y los materiales peligrosos o explosivos que pueden ser colocados por accidente o deliberadamente debido a una actividad criminal, terrorista o militar.

30 En toda esta memoria descriptiva, incluidas las reivindicaciones, a no ser que el contexto aparezca de otro modo, el término "paquetes" en relación con la radiación incidente incluye partículas cuánticas individuales sin masa, tales como rayos X, rayos gamma u otros fotones; neutrones u otras partículas másicas; y también se extiende en sus aspectos más amplios a cualquier otra radiación corpuscular para la que se pueda definir y detectar una energía de cada corpúsculo.

35 En toda esta memoria descriptiva, incluidas las reivindicaciones, a no ser que el contexto requiera algo distinto, las palabras "espectro de energía" en relación con un detector en particular se refieren a una generación de valores de energía de los paquetes individuales de radiación que emanan o pasan a través de la parte de los elementos sujeta a inspección detectados en un intervalo de tiempo desde el detector particular, valores de energía que pueden comprender valores en un intervalo, normalmente continuo, y pueden representarse como un histograma de recuentos de detección frente a una pluralidad de franjas de energía definidas, representando el número de franjas el valor deseado o resolución de energía alcanzable y constituyendo al menos 10 franjas, pero preferiblemente más de 50, 100 o 200 franjas de energía.

Breve descripción de los dibujos

Las Figuras 1 y 10 muestran una vista general de alto nivel de un sistema de rayos X de la forma que puede usarse para la inspección de carga y equipaje según dos realizaciones preferidas.

La Figura 2 ilustra un diagrama ejemplar del interior de la cámara de rayos X según una realización.

45 La Figura 3 muestra una vista más detallada del sistema de detección y de la electrónica de procesamiento según una realización.

La Figura 4 ilustra un diagrama de flujo para un método de procesamiento del Z efectivo de los espectros de energía total calculados por la electrónica de procesamiento de impulsos según una realización.

50 La Figura 5 es un gráfico que ilustra la eliminación del apilamiento de dos impulsos de un espectro según una realización.

La Figura 6 es un gráfico que ilustra la eliminación del apilamiento de dos y tres impulsos de un espectro según otra realización.

La Figura 7 es un gráfico que ilustra la eliminación parcial del apilamiento de dos y tres impulsos de un espectro cuando se asume solo un apilamiento de 2 impulsos según una realización.

La Figura 8 es un gráfico que ilustra la forma del filtro de aplanamiento espectral cuando se usa una ventana rectangular o una ventana de impulsos de coseno elevado según una realización.

5 La Figura 9 ilustra cómo se organizan y componen los datos en una imagen de una muestra escaneada, antes del procesamiento posterior adicional y la visualización de la imagen según una realización.

La Figura 10 ilustra una variante inalámbrica del sistema de la Figura 1.

La Figura 11 es un gráfico que ilustra los espectros recibidos no calibrados de una pluralidad de detectores según una realización.

10 La Figura 12 es un gráfico que ilustra un conjunto de ganancias del detector calculadas en función de un procedimiento de calibración según una realización.

La Figura 13 es un gráfico que ilustra los espectros recibidos de una pluralidad de detectores después de establecer la ganancia digital de los detectores en función de las ganancias del detector ilustradas en la Figura 12.

15 La Figura 14 ilustra los resultados del proceso de interpolación del Z efectivo para un caso de transmisión al 10% según una realización.

La Figura 15 ilustra el Z efectivo representado en función de la intensidad (porcentaje de transmisión) para diversas muestras de material evaluadas según una realización.

20 Las Figuras 16A, 16B, 16C ilustran un subsistema detector que comprende un conjunto de detectores según realizaciones en las que un conjunto lineal de cristales de centelleo está acoplada a un conjunto de elementos productores de impulsos en forma de fotomultiplicadores de silicio.

Las Figuras 16D y 16E ilustran un subsistema detector que comprende cristales de centelleo individuales acoplados individualmente a un conjunto de elementos productores de impulsos en forma de fotomultiplicadores de silicio por medio de una capa de acoplamiento óptico interpuesta entre los cristales de centelleo y los fotomultiplicadores de silicio según una realización.

25 La Figura 17 ilustra un subsistema detector que convierte fotones en impulsos de tensión para el procesamiento de impulsos según una realización.

La Figura 18 ilustra un sistema de inspección que utiliza rayos gamma para la identificación de materiales según una realización.

30 La Figura 19 ilustra un ejemplo de la formación de agrupamientos, ignorándose las teselas individuales, según una realización.

La Figura 20 ilustra un ejemplo de etapas de procesamiento del Z efectivo según una realización.

La Figura 21 ilustra una tabla relativa a una máscara de borde $L(c)$ indexada en columnas según una realización.

La Figura 22 ilustra el comportamiento de la media móvil a medida que pasa por un borde según una realización.

Descripción detallada de realizaciones

35 Es conveniente describir la invención del presente documento en relación con realizaciones particularmente preferidas. Sin embargo, la invención es aplicable a una amplia gama de métodos y sistemas y debe apreciarse que también se consideran dentro del alcance de la invención otras construcciones y disposiciones. También se considera que entran dentro del alcance de la presente invención diversas modificaciones, alteraciones, variaciones o adiciones a la construcción y las disposiciones descritas en el presente documento.

40 Esta invención se refiere a un método y un aparato para la identificación de materiales que utilizan una variedad de tipos de radiación para su análisis. En particular, los aparatos y los métodos ejemplificados en este documento pueden aplicarse a la detección de rayos X; sin embargo, se apreciará que los aparatos y los métodos podrían modificarse fácilmente para otros tipos de radiación incidente, como neutrones o rayos gamma, u otros tipos de radiación emanante, particularmente sustituyendo una forma diferente de unidad detectora, para detectar, por ejemplo, 45 electromagnetismo, neutrones, rayos gamma, luminiscencia, sonido u otros. Tales modificaciones están dentro del aspecto más amplio de la invención.

Además de que los rayos X se atenúan cuando se transmiten a través de la materia, los rayos X que atraviesan la materia interactúan con esa materia a través de una serie de modalidades que incluyen: dispersión en los planos cristalinos, provocando la emisión de rayos X de fluorescencia desde el interior de la estructura electrónica de los 50 elementos; y dispersión en estructuras de escala nanométrica dentro del material que se está escaneando. Estas

formas de interacción modifican ligeramente el espectro de energía del haz de rayos X transmitido, y al detectar y analizar este cambio en el espectro de energía es posible deducir información elemental específica sobre el elemento a través del cual pasó el haz de rayos X.

5 El sistema de una de las realizaciones descritas a continuación proporciona un sistema de detección capaz de estimar la energía de los fotones de rayos X individuales recibidos en el detector. Esto se logra utilizando un solo conjunto de detectores por fuente de rayos X, estando construido cada uno de los detectores del conjunto de un material detector apropiado acoplado a un fotomultiplicador, produciendo una señal analógica que comprende una serie de impulsos (un impulso por cada rayo X detectado), que puede superponerse o no cuando se recibe en el detector. El conjunto de detectores puede disponerse de forma análoga a los sistemas de inspección de carga o equipaje de la técnica anterior para construir una imagen fila por fila de características del artículo. A diferencia de los sistemas de la técnica anterior, el conjunto de detectores es capaz de medir la energía de cada fotón detectado.

10 A continuación, se utiliza un sistema de procesamiento de impulsos para generar un histograma para cada detector individual. Este histograma se compone de un recuento del número de rayos X que se encuentran en cada franja del histograma en un intervalo de tiempo determinado. Los intervalos del histograma representan un intervalo de energía de los rayos X recibidos y, por lo tanto, el histograma es el espectro de energía del haz de rayos X recibido. Puede haber una gran cantidad de franjas de histogramas, por ejemplo, hasta 512 o más bandas de energía separadas, lo que representa una mejora enorme con respecto a la medición de banda de energía dual aproximada dentro de los sistemas de escaneo existentes.

15 El sistema de las realizaciones descritas utiliza este espectro de energía de alta resolución completa para obtener una estimación mucho más precisa del número atómico efectivo (Z efectivo) del material inspeccionado, lo que da como resultado una clasificación muy superior del material inspeccionado.

Descripción general de alto nivel

La Figura 1 muestra una vista general de alto nivel de un sistema de inspección de equipaje y carga por rayos X según una realización de la invención.

25 Las principales características del sistema son las siguientes:

1. Una cámara (100) de rayos X en la que se escanea la muestra (101). La cámara está diseñada para contener la o las fuentes de rayos X y el soporte físico detector asociado y para garantizar que no se emitan rayos X más allá de la cámara para garantizar la seguridad de los operarios.
- 30 2. Un medio para provocar un movimiento relativo entre la muestra (101) que se va a inspeccionar y la cámara (100) de rayos X. En una realización, este comprenderá un medio para transportar (102) la muestra (101) que ha de inspeccionarse al interior de la cámara de rayos X. En un sistema típico, puede ser una cinta transportadora, un sistema de rodillos o similar, pero el sistema descrito en esta divulgación funcionará igualmente bien con cualquier medio de transporte. Una realización preferida es que la muestra pase a través de un túnel en el que la o las fuentes de rayos X y el o los conjuntos de detectores se encuentran en posiciones fijas. Sin embargo, en una realización alternativa, la o las fuentes de rayos X y el o los conjuntos de detectores pueden moverse por delante de la muestra.
- 35 3. Dentro de la cámara (100) de rayos X, hay:
 - a. Una o más fuentes (200, 201) de rayos X.
 - 40 b. Uno o más conjuntos (202, 209) de detectores de rayos X, con al menos un conjunto de detectores para cada fuente de rayos X.
 - c. Los conjuntos (202, 209) de detectores de rayos X pueden dividirse además en conjuntos de detectores más pequeños si es deseable para la implementación. El sistema descrito en esta divulgación no depende de una disposición ni/o una subdivisión específicas del conjunto de detectores.
 - 45 d. Procesadores digitales (203, 210) para procesar los impulsos de rayos X recibidos del conjunto (202, 209) de detectores. Dependiendo de la arquitectura de implementación, los procesadores digitales pueden:
 - i. residir en las mismas placas que el subsistema detector,
 - ii. residir en soporte físico separado, alojado dentro o fuera de la carcasa del escáner de rayos X,
 - iii. formar parte del sistema anfitrión, o
 - iv. una combinación de lo anterior.

Por lo general, existen medios adecuados, como un ordenador anfitrión (103) o, como se muestra en la Figura 10, un sistema inalámbrico (104) de visualización y control, para el control y la configuración del sistema de detección de rayos X, y la visualización y posprocesamiento de datos recopilados del sistema de escaneo de rayos X.

5 En algunas configuraciones de sistema en las que se realiza la detección automatizada de amenazas, es posible que no exista un requisito para el subsistema de control/visualización, sino algunos medios para informar sobre las amenazas detectadas.

La Figura 2 ilustra un diagrama ejemplar del interior de la cámara de rayos X, que muestra:

1. Fuentes (200) y (201) de rayos X de las que inciden rayos X (204) y (206) sobre la muestra (208) sometida a evaluación.
- 10 2. Conjuntos (202) y (209) de detectores para la detección de rayos X (205) y (207) incidentes en los conjuntos de detectores.
3. Las señales de cada conjunto de detectores se conectan a los procesadores digitales (203) y (210). Los procesadores digitales pueden montarse interna o externamente en la cámara de rayos X y podrían combinarse, en parte, con el sistema anfitrión.
- 15 4. La salida (211) de los procesadores digitales se pasa al anfitrión para su visualización, mientras que el anfitrión envía/recibe señales (212) de control hacia/desde los procesadores digitales.

La ubicación de los componentes en la Figura 2 es solo ilustrativa y no indica un requisito específico para el número de fuentes o de detectores, ni especifica un requisito para la ubicación de las fuentes o de los detectores. El sistema de detección y procesamiento descrito en esta divulgación funcionará satisfactoriamente con un número cualquiera de fuentes y conjuntos de detectores, e independientemente de cómo se coloquen esas fuentes. El punto clave es que los rayos X de la Fuente 1 atraviesen la muestra de prueba y se reciban en el Conjunto detector 1, y que los rayos X de las Fuentes 2 a N atraviesen la muestra y se reciban en los Conjuntos detectores 2 a N (es decir, el sistema puede funcionar con un número cualquiera de fuentes y un número cualquiera de conjuntos detectores, que puede o no ser igual al número de fuentes).

25 La Figura 3 muestra una vista más detallada del sistema de detección y del procesamiento. Esta figura muestra las etapas para un solo detector. El Z efectivo puede utilizar, y el procesamiento posterior de la imagen requerirá acceso a los espectros de todos los detectores.

Para cada detector en cada conjunto de detectores, hay un sistema de detección y una electrónica de procesamiento que comprende:

- 30 1. Un subsistema detector (301) para cada elemento detector individual (con N subsistemas de este tipo para un conjunto de detectores $1 \times N$), comprendiendo el subsistema detector:
 - a. Material detector para detectar los rayos X incidentes (300) y convertir cada rayo X detectado en un impulso de luz.
 - 35 b. Un fotomultiplicador para recibir y amplificar los impulsos de luz incidente en una señal analógica que comprende impulsos (312) que pueden o no superponerse.
 - c. Electrónica analógica adecuada, que puede incluir filtrado.
 - d. Un amplificador opcional (302) de ganancia variable. También se puede usar una ganancia analógica fija, o puede que no sea deseable usar una ganancia adicional al fotomultiplicador.
2. Un convertidor analógico a digital (303), para convertir las señales analógicas a valores digitales (313).
- 40 3. Una ganancia digital variable (304) para ajustar debidamente los niveles de la señal digital antes del procesamiento.
- 45 4. Un procesamiento (305) de impulsos de alta frecuencia para cada subsistema detector (301) —por ejemplo, los sistemas de procesamiento de impulsos descritos en la patente estadounidense nº 7383142, la patente estadounidense nº 8812268 y el documento WO/2015/085372—, comprendiendo el procesamiento de impulsos:
 - a. El seguimiento y la eliminación del valor de referencia, o la eliminación del valor de referencia fijo.
 - b. La detección de impulsos entrantes.
 - c. El cálculo de la energía de cada impulso detectado.

- d. La acumulación de los valores de energía calculados en un histograma (315) de energía (histograma de energía).
 - e. La salida de los valores de histograma acumulados cada vez que se recibe una señal de puerta.
 - f. El restablecimiento de los valores del histograma para el siguiente intervalo de recopilación.
- 5 5. Una fuente (306) de señales de puerta que emite una señal (314) de puerta a un intervalo regular preconfigurado.
- a. El intervalo de puerta es un intervalo corto constante que determina el periodo de acumulación del histograma.
- 10 b. Este intervalo de puerta también determina el tamaño del píxel en las imágenes de rayos X resultantes. El tamaño del píxel viene dado por el intervalo de puerta \times la velocidad de la muestra. Por ejemplo, un intervalo de puerta de 10 ms y una muestra que se mueve sobre un transportador a 0,1 m/s dan como resultado un tamaño del píxel de 1 mm en la dirección de la desviación.
- 15 6. En ausencia de una fuente de señales de puerta y una señal de puerta, se pueden usar otros medios apropiados para controlar y sincronizar la temporización de la recopilación del histograma de energía en todos los detectores. Por ejemplo, puede usarse una señal de temporización de red adecuadamente precisa en lugar de la señal de puerta.
- 20 7. Un sistema (307) de calibración, que recibe la entrada de las señales analógicas y digitales apropiadas y luego comunica los parámetros de calibración deseables a los distintos bloques de procesamiento. El sistema de calibración realiza:
- a. Una identificación de parámetros del impulso.
 - b. Una calibración de la ganancia.
 - c. Una calibración de la energía.
 - d. Una calibración de la desviación del valor de referencia (cuando se usa un valor de referencia fijo).
 - e. Un desplazamiento del valor de referencia dependiente de la frecuencia de recuento.
- 25 8. Un cálculo (308) del Z efectivo, que toma los espectros de energía calculados en cada detector durante cada intervalo de puerta y determina el Z efectivo de la muestra. Esto, a su vez, conduce a la producción de una imagen del Z efectivo.
- 30 9. Una generación de imágenes de intensidad que incluye:
- a. Una imagen (309) de intensidad en función de la energía total recibida en todo el espectro de energía.
 - b. Una imagen (310) de alta penetración o alto contraste determinada por la integración de bandas de energía seleccionadas del espectro de energía completo.
- 35 10. Un posprocesamiento y una visualización (311) de imágenes, con características que pueden incluir uno o más de los siguientes:
- a. Aumento de la nitidez de la imagen.
 - b. Detección y/o aumento de la nitidez de los bordes.
 - c. Filtrado de imágenes.
 - d. Aplicación de un mapa de color al Z efectivo para colorear los píxeles de la imagen en función del material identificado.
 - e. Selección, visualización y superposición de imágenes 2D para cada conjunto de detectores:
 - 40 i. Z efectivo.
 - ii. Intensidad.
 - iii. Imágenes de alta penetración / alto contraste.
 - f. Visualización de imágenes en un monitor apropiado u otro dispositivo de visualización.

Como se ha descrito anteriormente y se ha ilustrado en la Figura 9, las imágenes producidas para la visualización comprenden varios elementos de datos registrados para cada uno de los N elementos (501) del detector y para cada intervalo (500) de puerta.

5 Los datos obtenidos para el detector i durante el intervalo j de puerta se utilizan en la producción de imágenes del Z efectivo, de la intensidad y de alta penetración/alto contraste como se muestra en la Figura 9. Durante el procesamiento, se registran varios elementos en cada píxel (502), incluyendo uno o más de:

1. Los espectros de energía de rayos X.
2. El valor del Z efectivo calculado.
3. El valor de intensidad (suma de espectro completo).
- 10 4. Valores de intensidad de alta penetración / alto contraste calculados a partir de la integración de una o más bandas de energía.

La Figura 9 ilustra cómo se organizan y componen estos datos en una imagen de la muestra escaneada, antes de su posprocesamiento y su visualización de imagen ulteriores.

Subsistema detector

15 El subsistema detector utilizado en las máquinas de escaneo de rayos X comunes, tanto para aplicaciones industriales como de seguridad, utiliza un centelleador (como fósforo) acoplado a un conjunto de diodos PIN para convertir los rayos X transmitidos en luz y, posteriormente, en una señal eléctrica.

Para lograr una resolución del orden de 1-2 mm, se utilizan más de 2.000 píxeles detectores. Se requieren dos conjuntos de detectores separados (y circuitos de lectura electrónica) para la detección de rayos X de baja energía y rayos X de alta energía.

20 Cuando un rayo X impacta en el detector, produce una carga de electrones en el detector proporcional a la energía de los rayos X, siendo mayor la carga inducida en el detector cuanto mayor es la energía. Sin embargo, un examen más detallado de los conjuntos de detectores ha demostrado que los sistemas detectores no tienen la resolución para detectar fotones de rayos X individuales, sino que integran toda la carga producida por el píxel detector durante un periodo de tiempo determinado y la convierten en un valor digital. Cuando el flujo instantáneo de rayos X en el píxel detector es grande, se produce un valor digital grande (un píxel brillante en la imagen), y cuando pocos rayos X impactan en el detector, se produce un valor digital pequeño (un píxel oscuro en la imagen).

El subsistema detector de esta realización comprende:

- a) Un material detector.
- 30 b) Un material fotomultiplicador acoplado al material del detector utilizando un medio apropiado.
- c) Electrónica analógica.

El material detector puede tener las dimensiones $X \times Y \times Z$, o alguna otra forma. El fotomultiplicador puede ser un fotomultiplicador de silicio (SiPM) y el medio de acoplamiento puede ser una forma de grasa óptica o material de acoplamiento óptico. Puede ser deseable utilizar una forma de soporte o cubierta para mantener el detector en posición con respecto al fotomultiplicador. El fotomultiplicador requiere una fuente de alimentación y una tensión de polarización adecuados para generar el nivel requerido de amplificación de la señal detectada.

40 En una aplicación de escaneo de rayos X, se requiere una gran cantidad de subsistemas detectores de un solo elemento para producir cada conjunto de detectores. Puede ser deseable agruparlos de forma adecuada, según los requisitos específicos del escáner de rayos X. Los elementos individuales del material detector se pueden agrupar en una pequeña serie de M detectores. Se pueden montar pequeños grupos de M elementos detectores en una sola placa detectora; por ejemplo, 2, 4 o más grupos de M en una placa. El conjunto de detectores completo se compone entonces del número de placas detectoras necesario para alcanzar el número total N de elementos detectores por conjunto.

45 Los subsistemas detectores pueden disponerse en varias configuraciones diferentes que incluyen: conjuntos lineales de $1 \times N$ dispositivos; conjuntos cuadrados o rectangulares de $N \times M$ dispositivos; o matrices en forma de L, escalonadas, en espina o intercaladas. Un ejemplo de un dispositivo de detección, utilizado para convertir los fotones de radiación entrantes en una señal eléctrica, es la combinación de un cristal de centelleo, acoplado a un fotomultiplicador de silicio (SiPM) o un contador de fotones de múltiples píxeles (MPPC, por sus siglas en inglés).

50 En un dispositivo de detección de este tipo, se utiliza un cristal de centelleo, como LSYO (1701), para convertir el fotón (1700) de radiación entrante en fotones UV (1703). En el caso del material de centelleo LYSO, el pico de emisión de fotones UV se produce a 420 nm; otros materiales de centelleo como los enumerados en la Tabla 1 pueden tener picos de emisión diferentes. Después de la interacción del fotón (1700) de radiación con el cristal (1701) de centelleo

para producir fotones UV (1703), puede usarse un contador de fotones de múltiples píxeles o un fotomultiplicador (1704) de silicio con sensibilidad en la región UV (como uno con las métricas de rendimiento de la Tabla 2) para detectar estos fotones y producir una señal eléctrica.

5 La Figura 16A representa un conjunto lineal de cristales (1600) de centelleo de LYSO, indicativo de cómo se pueden unir entre sí dispositivos de detección individuales para formar un conjunto lineal. En este ejemplo indicativo, los cristales individuales (1600) de LYSO tienen una sección transversal de 1,8 mm y una altura de 5 mm; los cristales individuales (1600) de LYSO se envuelven alrededor de los lados en un material reflectante para contribuir a recoger todos los fotones UV. El paso de este conjunto ejemplar es de 2,95 mm, la longitud es de 79,2 mm y la anchura del conjunto es de 2,5 mm

10 Las Figuras 16B y 16C representan un conjunto de detectores desde una vista superior y una vista lateral, respectivamente, que comprende el conjunto lineal de cristales de LYSO representados en 16A acoplados a un elemento (1604) productor de impulsos eléctricos sobre el sustrato (1605). El elemento productor de impulsos eléctricos puede comprender un fotomultiplicador de silicio (SiPM). Un reflector especular mejorado (ESR, por sus siglas en inglés) o aluminio u otra lámina reflectante (1601) se coloca alrededor de las superficies laterales de los cristales de centelleo para dirigir los fotones de centelleo hacia el material fotomultiplicador (1604) de silicio y evitar la fuga de luz (diafonía) entre dispositivos de detección adyacentes. Opcionalmente, el acoplamiento óptico (1606) puede interponerse entre los cristales de LYSO y SiPM, y puede comprender un número cualquiera de materiales adecuados conocidos; por ejemplo, una capa delgada de adhesivo ópticamente transparente.

20 En otra realización, los cristales (1607) de centelleo pueden acoplarse individualmente a elementos (1604) productores de impulsos eléctricos, como se muestra en las Figuras 16D y 16E. El acoplamiento se puede lograr mediante varios métodos; por ejemplo, interponiendo una película adhesiva ópticamente transparente (1609) o material de acoplamiento óptico entre los cristales (1607) de centelleo y los elementos (1604) productores de impulsos eléctricos, pudiendo comprender los elementos (1604) productores de impulsos eléctricos SiPM o un MPPC. El acoplamiento se puede realizar mediante una máquina de ensamblaje de "recogida y colocación" para alinear y acoplar individualmente los componentes y el material de acoplamiento. Los cristales de centelleo se pueden envolver en un material reflectante como una lámina o material ESR (1608) para contribuir a la captura de fotones.

25 En cualquiera de las realizaciones, los cristales (1600, 1607) de LYSO pueden tener normalmente una sección transversal (anchura) de aproximadamente 1-2 mm, una profundidad de aproximadamente 1-2 mm y una altura de aproximadamente 3-5 mm, teniendo la película reflectante (1601, 1608) o de ESR aproximadamente 0,05 mm - 0,1 mm de grosor. En una realización preferida de los detectores mostrados en la Figura 16D, la sección transversal es de 1,62 mm, la profundidad es de 1,24 mm, la altura es de aproximadamente 4,07 mm y la película de ESR tiene un grosor de 0,07 mm. El área de la sección transversal del material de centelleo es preferiblemente mayor de 1 mm cuadrado y puede ser mayor de 2 mm cuadrados y menor de 5 mm cuadrados.

30 Aunque el diseño del subsistema detector ejemplar utiliza un centelleador que es compacto, robusto, rentable y no higroscópico, en el aspecto más amplio de la invención se pueden considerar otros subsistemas detectores. Estos incluyen subsistemas detectores que utilizan materiales centelleadores inorgánicos o inorgánicos alternativos; las características de algunos de tales materiales se proporcionan en la Tabla 1. También se podrían considerar otros mecanismos para convertir fotones de radiación en señales eléctricas para el subsistema detector. Algunos ejemplos de otras opciones de materiales detectores incluyen:

- 35
- 40 a) Germanio de alta pureza (HPGe, por sus siglas en inglés): Logra una resolución de "patrón oro" de 120 eV para la línea de rayos X Fe55 a 5,9 keV; los detectores pueden fabricarse con un grosor superior a 10 mm, por lo que detectan rayos X de alta energía de hasta muchos centenares de keV.
- 45 b) Diodo de deriva de silicio (SDD, por sus siglas en inglés): Detectores SDD que miden una radiación de energía relativamente baja. Para la misma línea Fe55 a 5,9 keV, los detectores SDD tienen una resolución de aproximadamente 130 eV. Además, estos detectores pueden funcionar a frecuencias de recuento más altas que las de los detectores HPGe e inmediatamente por debajo de la temperatura ambiente.
- 50 c) Diodos PIN: La eficiencia de detección de rayos X de hasta 60 keV es sustancialmente mayor que la de los detectores SDD y cae aproximadamente al 1% para energías de rayos X superiores a 150 keV. Estos detectores pueden funcionar a temperatura ambiente; sin embargo, la resolución mejora con el enfriamiento; la resolución de la línea de 5,9 keV es ~ 180 eV.
- d) Telururo de cadmio y cinc: Es un detector de radiación de estado sólido a temperatura ambiente que se utiliza para la detección directa de rayos X de energía media y radiación de rayos gamma. Tiene una eficiencia de detección para rayos X de 60 keV muy cercana al 100% e incluso para fotones de rayos X con energías de 150eV; la eficiencia de detección sigue siendo superior al 50%.
- 55 e) Cesio yodo (CsI (TI)): Este es un material de centelleo utilizado para la detección de rayos X en aplicaciones médicas de formación de imágenes y diagnóstico. El material de centelleo se usa para convertir los rayos X en fotones de luz que generalmente luego se convierten en una señal eléctrica mediante un tubo

ES 2 877 564 T3

fotomultiplicador. El CsI es un material barato y denso y tiene una buena eficiencia de detección de rayos X y rayos gamma hasta muchos centenares de keV.

Tabla 1: Propiedades de una variedad de materiales centelleadores

Centelleador	Densidad	Emisión máx. (nm)	Índice de refracción	Tiempo principal de desintegración (ns)	Rendimiento lumínico (F/MeV)
NaI (TI)	3,67	415	1,85	230	38.000
CsI (TI)	4,51	540	1,8	680	65.000
CsI (Na)	4,51	420	1,84	460	39.000
Li (Eu)	4,08	470	1,96	1400	11.000
BGO	7,13	480	2,15	300	8.200
CdWO4	7,9	470	2,3	1100	15.000
PbWO4	8,3	500	---	15	600
OSG	6,71	440	1,85	56	9.000
LSO	7,4	420	1,82	47	25.000
LSYSO	7,2	420	1,52	42	28.000
YAP (Ce)	4,56	370	1,82	27	18.000
YAG	4,55	350	1,94	27	8.000
BaF2 (rápido)	4,88	220	1,54	0,6	1.400
LaCl3 (Ce)	3,79	330	1,9	28	46.000
LaBr3 (Ce)	5,29	350	---	30	61.000
CaF2 (Eu)	3,19	435	1,47	900	24.000
ZnS (Ag)	4,09	450	2,36	110	50.000

Tabla 2: Datos de rendimiento de los centelleadores de LYSO

Datos geométricos		
Área de sensor activo	3,0 × 3,0	mm ²
Tamaño del micropíxel	50 × 50	µm ²
Número de píxeles	3600	
Eficiencia geométrica	63%	

Propiedades espectrales		
Intervalo espectral	300 hasta 800	nm
Máxima longitud de onda	420	nm
PDE a 420 nm ²	> 40%	
Ganancia M ¹	~ 6 × 10 ⁶	
Coefficiente de temperatura ¹	$\left \frac{1}{M} \cdot \frac{\partial M}{\partial T} \right < 1\%$	°C ⁻¹
Tasa de oscuridad ¹	< 500	kHz/mm ²
Diafonía ¹	~ 24%	

Propiedades eléctricas		
Tensión de ruptura	25 ± 3	V
Tensión de operación	10 - 20%	Sobretensión ¹
<i>(1) Al 20% de sobretensión y 20°C.</i>		
<i>(2) La medición de PDE se basa en estadísticas de Poisson de pico cero; el valor no se ve afectado por la diafonía ni el impulso posterior.</i>		

5 Una ventaja particular de la realización de centelleador y fotomultiplicador aquí descrita es la escalabilidad de los elementos de detección para una fácil adaptabilidad a grandes sistemas de escaneo, como los que se aplican a grandes artículos de carga, que pueden tener dos o más metros de dimensión lineal. Esto contrasta con los materiales de conversión directa como el telururo de cadmio y cinc, que tienen un tiempo muerto inaceptable a medida que aumenta el área del elemento detector individual.

Etapas de procesamiento

Las siguientes secciones describen las etapas involucradas en el procesamiento de cada etapa particular de los distintos algoritmos.

10 **1. Calibración**

El sistema de escaneo comprende una gran cantidad de detectores individuales. Si bien cada detector y la electrónica asociada están diseñados idealmente para tener una respuesta idéntica a la radiación incidente, en la práctica esto no será posible. Estas variaciones entre detectores dan como resultado una variación de detector a detector en la salida del espectro de energía. Al calibrar de manera adecuada y completa el sistema de detección, la salida de espectros de energía de los procesadores digitales de procesamiento de impulsos se puede calibrar adecuadamente para que representen la intensidad de los rayos X recibidos en franjas de energía estrechas conocidas.

1.1. Calibración de los impulsos del detector

La calibración de los impulsos del detector se utiliza para identificar las características de los impulsos para cada detector que requiere el sistema de procesamiento de impulsos. Los parámetros exactos requeridos pueden variar, dependiendo del sistema de detección. Para aplicaciones típicas que utilizan el método de procesamiento de impulsos descrito en la patente estadounidense n° 7383142 y la patente estadounidense n° 8812268, el impulso se modela como un doble exponencial promediado de la forma:

$$p(t) = \int_{t-T_a}^t A \left[\exp(-\alpha(\tau - t_0)) - \exp(-\beta(\tau - t_0)) \right] d\tau \quad \text{(Ecuación 1)}$$

25 donde α y β son las constantes de tiempo del flanco descendente y del flanco ascendente, respectivamente, t_0 es el tiempo de llegada del impulso, T_a es la ventana de promediado del impulso y A es un factor de escala del impulso relacionado con la energía del impulso.

El procesamiento requiere los dos parámetros α y β , y la forma de impulso $p(t)$ que se puede obtener mediante un método de calibración apropiado, o a partir del conocimiento del diseño del subsistema de detección. A continuación se describe un método adecuado para estimar α , β y $p(t)$ a partir de impulsos recibidos.

1.2. Calibración de ganancia del detector

30 Cada subsistema detector, combinado con un convertidor analógico a digital, tendrá características ligeramente diferentes debido a variaciones de fabricación. Como resultado de tales variaciones de componentes, los espectros de energía se escalarán de manera diferente. Las variaciones distintas de la escala de ganancia se abordan dentro de la Calibración de la desviación del valor de referencia o de la Calibración de la energía.

35 El objetivo de la calibración de ganancia es lograr el alineamiento de los espectros de energía emitidos por la electrónica de procesamiento de impulsos en todos los detectores. La necesidad de precisión absoluta puede reducirse o eliminarse si se aplica la calibración de energía por detector.

La calibración de la ganancia se puede lograr de varias formas. Se puede aplicar el siguiente planteamiento:

1. Configurar una fuente de rayos X conocida.
 - a. Se puede insertar en el haz un material con características particulares. Por ejemplo, el plomo (Pb) tiene un borde de absorción conocido a 88 keV.

- b. Utilizar la radiación conocida del material detector (por ejemplo, LYSO), detectada por sí misma (el propio espectro).
2. Medir el espectro de energía en cada detector como salida de la electrónica de procesamiento de impulsos.
3. Asegurarse de que se obtienen datos suficientes para lograr un espectro uniforme con un ruido mínimo.
- 5 4. Seleccionar una característica o características en las que realizar el alineamiento. Por ejemplo,
 - a. Un pico específico en el espectro.
 - b. Un borde de absorción (para el caso del Pb).
 - c. La forma completa del espectro (apropiada para el propio espectro de LYSO).
5. Calcular la franja del histograma correspondiente a la ubicación de la característica para cada detector.
- 10 6. Calcular la mediana de estas franjas de ubicación de características en todos los detectores.
7. La ganancia requerida para cada detector se calcula luego como la relación entre la ubicación media y la ubicación de la característica específica del detector. Nota: Se elige la mediana u otra referencia adecuada (por ejemplo, el máximo o el mínimo). La mediana se elige para que algunos canales se amplifiquen y algunos se atenúen, en lugar de atenuar todos los canales a la amplitud mínima.
- 15 8. Luego, se aplican las ganancias a cada canal del detector. La ganancia se puede aplicar como ganancia analógica, ganancia digital o una combinación de las dos, dependiendo de la funcionalidad particular del sistema. Para obtener los mejores resultados, al menos parte de la ganancia es la ganancia digital, en la que se puede lograr una variación de ganancia arbitrariamente fina.
- 20 9. Volver a medir el espectro de energía en cada detector y confirmar que se haya logrado el alineamiento requerido.
10. Si resulta deseable, calcular una calibración de ganancia actualizada/mejorada para cada detector y aplicar la calibración actualizada a cada detector.
11. Repetir las etapas 9 y 10 tantas veces como se desee para lograr la correspondencia requerida entre los espectros de todos los detectores.
- 25 Para los métodos de cálculo del Z efectivo descritos en esta divulgación, se ha encontrado que se puede lograr un alineamiento espectral dentro del 1-2% y es deseable para resultados del Z efectivo precisos y coherentes.
- En una implementación práctica del subsistema de detección, puede haber varias placas detectoras, cada una con varios detectores. El número total de detectores puede ser de varios miles o más. Aquí se presentan los resultados de un ejemplo de una placa detectora de este tipo. La placa ejemplar comprende 108 detectores, usándose en este caso
- 30 LYSO como material de centelleo. Estos detectores están agrupados en conjuntos lineales de 27 detectores. Entonces, cada placa detectora usa 4×27 conjuntos de detectores para alcanzar un total de 108 detectores.
- Cuando inciden rayos X en un detector, el LYSO emite fotones en función de la energía de los rayos X incidentes. Cada detector se coloca encima de un SiPM, y es el SiPM el que detecta y amplifica los fotones emitidos. Los detectores están acoplados al SiPM a través de una grasa óptica. La ganancia de cada SiPM está determinada por la
- 35 tensión de polarización aplicada y la tensión de ruptura del SiPM. Como resultado de las variaciones en el material LYSO, de la calidad del acoplamiento entre el LYSO y el SiPM, y también de las variaciones en la ganancia del SiPM y las propiedades del material de SiPM, puede haber una diferencia considerable en la energía de impulso recibida para una determinada energía de rayos X incidente.
- El efecto de la variación en la energía del impulso detectada es que los espectros de energía de todos los detectores no son los mismos. Esto se puede ver en la Figura 11, donde se representan gráficamente los espectros recibidos sin
- 40 calibrar de los 108 detectores. Estos espectros de energía se miden, habiendo una muestra de plomo (Pb) en el haz de rayos X y viéndose claramente la estructura del espectro de Pb. Se puede ver que la cola del espectro de energía se extiende a través de un intervalo de aproximadamente 150 franjas de histogramas. Esto significa que la energía real por franja es bastante diferente para cada detector.
- 45 Siguiendo el procedimiento de calibración de ganancia descrito anteriormente, se calculó un conjunto de ganancias del detector, como se muestra en la Figura 12. A partir de la figura, el valor de ganancia calibrado varía de aproximadamente 0,75 a 1,45.
- Después de establecer la ganancia digital para que sea igual a las ganancias del detector en la Figura 12, se volvieron a medir los espectros de energía de los 108 detectores, como se muestra en la Figura 13. Está claro que los espectros
- 50 de energía ahora están bien alineados, lo que indica el éxito de la calibración de la ganancia. Los diferentes niveles

de amplitud del espectro reflejan la gama de factores expuestos anteriormente que pueden afectar al espectro de energía resultante. En este caso, algunos detectores están capturando un número total de rayos X mayor que otros, indicado por la mayor amplitud del espectro. No obstante, el alineamiento de las características espectrales es muy bueno, como se requiere.

5 **1.3. Calibración de la desviación del valor de referencia**

Cada subsistema detector puede tener un nivel de valor de referencia ligeramente diferente, medido en la salida del convertidor analógico a digital. Para que la electrónica de procesamiento de impulsos calcule con precisión la energía de los impulsos recibidos, se estima y se elimina el valor de referencia. Se puede utilizar cualquier método adecuado que incluya, por ejemplo:

- 10 1. Medición fuera de línea de la desviación del valor de referencia (con rayos X desactivados):
- a. Registrar y promediar una serie de muestras desde el detector.
 - b. Usar este promedio como desviación del valor de referencia que se restará de todos los datos.
- 15 2. Seguimiento y adaptación en línea de la desviación del valor de referencia:
- a. Usar la salida de procesamiento de impulsos para estimar y realizar un seguimiento de la desviación del valor de referencia.
 - b. Filtrar los valores de referencia (ruidosos) objeto de seguimiento y actualizar en consecuencia el registro de desviación del valor de referencia.
 - c. Usar un periodo inicial de convergencia con los rayos X desactivados, seguido de una adaptación continua mientras los rayos X están activados.

20 **1.4. Calibración de la energía**

La electrónica de procesamiento de impulsos producirá un espectro de energía que no está calibrado. Es decir, la salida comprenderá una serie de recuentos en un conjunto de franjas de histograma, pero se desconoce la energía exacta de esas franjas de histograma. Para lograr resultados precisos del Z efectivo, se requiere un conocimiento de la energía de cada franja.

25 Esto se consigue de la siguiente manera:

- 1. Usar una fuente con picos de espectro conocidos. Un ejemplo adecuado es una fuente de Ba133, con picos espectrales a 31, 80, 160, 302 y 360 keV.
- 2. Medir el espectro de energía sin calibrar.
- 3. Determinar las franjas de histograma correspondientes a los picos de espectro conocidos.

30 En lugar de usar una sola fuente con múltiples picos, también es posible usar una fuente de banda estrecha con energía variable (pero conocida) y medir el histograma en función de la energía para un intervalo de energías.

Una vez que se ha medido la relación entre las franjas de histograma y la energía, es posible:

- 1. Crear una tabla de consulta para la energía de cada franja del histograma.
- 2. Estimar parámetros de una forma funcional adecuada. Para una combinación de LYSO/SiPM, se ha encontrado que un modelo cuadrático se ajusta muy bien a los parámetros observados. Esto da un resultado de la forma:

$$\text{Franja del histograma} = A * \text{Energía}^2 + B * \text{Energía} + C \quad (\text{Ecuación 2})$$

donde A, B y C son constantes determinadas a partir del espectro de Ba133 medido. Esta fórmula se invierte para definir la energía en función de la franja del histograma expresada en términos de los mismos A, B y C.

40 Si la variación entre detectores es lo suficientemente pequeña (lo que requiere una buena correspondencia de componentes y una buena calibración de ganancia), entonces se puede aplicar una única calibración de energía a todos los detectores. En este caso, promediar los parámetros de calibración en varios detectores expuestos a la fuente de Ba133 producirá una estimación superior de los parámetros de calibración de energía.

Alternativamente, se pueden generar una tabla de calibración / parámetros de calibración individuales para cada detector.

1.5.Desplazamiento del valor de referencia dependiente de la frecuencia de recuento

Dependiendo de la combinación de detector / fotomultiplicador, puede ser deseable compensar un desplazamiento del valor de referencia dependiente de la frecuencia de recuento. La consecuencia de este desplazamiento es un desplazamiento a la derecha del espectro de energía a medida que aumenta la frecuencia de recuento. Para aplicar correctamente la calibración de energía, el espectro se mueve hacia la izquierda en un número específico de franjas / energía. La calibración requerida es:

- a) Una tabla de consulta, que define el desplazamiento del valor de referencia para cada frecuencia de recuento, con resultados intermedios obtenidos mediante interpolación.
- b) Una forma funcional, expresándose la desviación del valor de referencia en función de la frecuencia de recuento.

Se puede utilizar cualquier método adecuado para esta calibración, incluida la inyección de un espectro de fuente conocido de frecuencia de recuento variable y el registro del desplazamiento de espectro a medida que aumenta la frecuencia de recuento. Idealmente, la fuente tiene una banda de energía estrecha para que el desplazamiento se pueda medir claramente, y también una energía variable para que, si se desea, la desviación se pueda calibrar en función de la energía.

La necesidad de eliminar el desplazamiento del valor de referencia dependiente de la frecuencia de recuento puede reducirse o incluso eliminarse si se utiliza el seguimiento y la eliminación en línea de la desviación del valor de referencia.

1.6.Calibración del espectro residual

El espectro residual se mide con una gran masa de material en el haz, suficiente para bloquear completamente el haz de rayos X, como por ejemplo, un gran grosor de acero. En la práctica, sigue llegando al conjunto de detectores un pequeño nivel de energía, ya sea por dispersión u otros mecanismos, y este espectro residual debe medirse para que pueda eliminarse de los espectros recibidos durante el funcionamiento normal.

A continuación, el espectro residual se mide promediando los espectros recibidos para varios intervalos de puerta con la masa de bloqueo en el haz.

1.7.Parámetros de apilamiento

Los parámetros del apilamiento se pueden calibrar de varias formas; por ejemplo:

- a) Estimación de los parámetros de apilamiento a partir de la naturaleza de los espectros recibidos.
- b) Estimación de los parámetros de apilamiento a partir del conocimiento de la señal, de la frecuencia de recuento de impulsos recibidos, de la frecuencia de muestreo del ADC (convertidor analógico a digital, por sus siglas en inglés) y del método de detección de impulsos.
- c) Medición de los parámetros de apilamiento de la siguiente manera:
 - i. Usar una fuente de energía estrecha, en la que puedan variarse la energía y la frecuencia de recuento.
 - ii. Medir el espectro recibido a medida que se varían la fuente de energía y la frecuencia de recuento.
 - iii. Medir directamente la relación entre el apilamiento de 2 y 3 impulsos recibidos y el pico de la señal principal.
 - iv. Formar una tabla de consulta del apilamiento de 2 impulsos y 3 impulsos en función de la frecuencia de recuento y la energía.

2. Procesamiento de impulsos de alta frecuencia

Se asigna a cada subsistema detector un sistema (305) de procesamiento de impulsos de alta frecuencia, como los descritos en la patente estadounidense nº 7383142, la patente estadounidense nº 8812268 o el documento WO/2015/085372, para realizar las siguientes operaciones en la salida de señal de impulso digitalizada del convertidor analógico a digital:

- a) Seguimiento y eliminación del valor de referencia, o eliminación del valor de referencia fijo.
- b) Detección de impulsos entrantes.
- c) Cálculo de la energía de cada impulso detectado.
- d) Acumulación de los valores de energía calculados en un histograma de energía (histograma de energía).

- e) Salida de los valores de histograma acumulados cada vez que se recibe una señal de puerta u otra de temporización.
- f) Restablecimiento de los valores del histograma para el siguiente intervalo de recopilación.

3. Imagen de intensidad

5 El valor de intensidad, o, más específicamente, el valor de transmisión, se calcula a partir del espectro de energía generado para cada detector *i* en cada intervalo *j* de puerta de acuerdo con:

$$R(i, j) = \frac{\sum_B I(B)}{\sum_B I_0(B)} \quad \text{(Ecuación 3)}$$

donde los sumatorios se realizan sobre todas las franjas *B* del histograma (o, de manera equivalente, sobre todas las energías *E*), para los espectros de energía recibidos (*I*(*B*)) y los espectros de energía de referencia (*I*₀(*B*)).

Los elementos dentro de la imagen de intensidad pueden clasificarse como:

- 10 a) Impenetrables, si *R*(*i*, *j*) < *R*_{baja} y está puesta a 0.
- b) Vacíos, o no hay nada en el haz, si *R*(*i*, *j*) > *R*_{alta} y está puesta a 1.

Los umbrales *R*_{baja} y *R*_{alta} puede estar preestablecidos o ser configurables por el usuario.

4. Imágenes de alto contraste

15 Mediante el uso de un espectro de energía completo, se generan imágenes de intensidad con contraste variable basadas en la integración del espectro recibido en diferentes bandas de energía. En los escáneres de rayos X de energía dual existentes, el sistema solo puede utilizar el amplio intervalo de energía inherente al material detector. Cuando se dispone de un espectro de energía completo, se pueden usar intervalos de energía arbitrarios para generar imágenes de intensidad asociadas en ese intervalo de energía. A continuación, se pueden definir intervalos de energía específicos para aislar y mostrar mejor tipos de materiales particulares, con intervalos de energía ajustados, por ejemplo, para material orgánico, material inorgánico o metales ligeros, medianos o pesados.

20 Las imágenes de alto contraste / alta penetración se generan para cada detector *i* en cada intervalo *j* de puerta de acuerdo con:

$$R_{E12}(i, j) = \frac{\sum_{E1}^{E2} I(E)}{\sum_{E1}^{E2} I_0(E)} \quad \text{(Ecuación 4)}$$

25 donde *E*₁ y *E*₂ son los límites inferior y superior del intervalo de energía *E*₁₂. La banda de energía puede ser definida por el usuario o estar preconfigurada. Se pueden configurar una, dos o más bandas de energía diferentes para permitir al usuario seleccionar entre imágenes de interés.

5. Procesamiento del Z efectivo

30 El procesamiento del Z efectivo implica el uso de espectros de energía completos calculados por la electrónica de procesamiento de impulsos, combinado con la calibración de energía, para calcular una estimación del Z efectivo del material de muestra. El procesamiento del Z efectivo se realiza para cada detector, y para cada detector prosigue de la siguiente manera (por lo que, para un conjunto de detectores 1 × *N*, este proceso se repite *N* veces). Para reducir los requisitos de cálculo, el procesamiento del Z efectivo solo se realiza para los detectores *i* recibidos y los intervalos *j* de puerta que no se declaran impenetrables o vacíos.

5.1. Operaciones preliminares

- 35 1. Con referencia a la Figura 4, comprimir los datos (400) del espectro de energía usando una FFT (transformada rápida de Fourier, por sus siglas en inglés) y descartar todos menos las *N* primeras franjas (que se seleccionan de manera que las franjas descartadas contengan poca o ninguna señal). Nota: esta etapa es opcional, pero para una configuración de sistema en la que el Z efectivo se calcula en un ordenador central de procesamiento permite una reducción significativa del ancho de banda de comunicación. La transferencia de 32 franjas FFT complejas para un histograma de 512 puntos requiere solo 1/8 del ancho de banda de comunicación.
- 40 2. Realizar la integración (402) del espectro, promediando un número 2*S*+1 de los espectros de energía recibidos con FFT. Esta integración del espectro aumenta el tiempo de medición disponible para calcular el

Z efectivo sin reducir la resolución espacial a la que se calcula la imagen de intensidad. La integración se realiza a través de los intervalos de puerta $j-S \leq j \leq j+S$, para realizar una media móvil centrada en el intervalo j de puerta. Si no se requiere integración, hacer $S = 0$.

- 5 3. Realizar reducción (403) del apilamiento. La FFT es la primera etapa de la reducción del apilamiento, que no es necesaria si la compresión de datos ya se ha logrado utilizando una FFT. La reducción del apilamiento se puede lograr con un algoritmo adecuado descrito a continuación.
- 10 4. Si es deseable, aplicar un desfase (404) del dominio de FFT para lograr un desplazamiento lateral deseado del espectro de energía. Se ha encontrado que esta etapa es deseable cuando existe un desplazamiento del valor de referencia específico de la frecuencia de recuento. Nota: la multiplicación por un término de fase que aumenta linealmente (con franja FFT) en el dominio de FFT da como resultado un desplazamiento lateral después de la iFFT (transformada rápida de Fourier inversa, por sus siglas en inglés). La extensión del desplazamiento lateral está determinada por la pendiente del aumento lineal.
- 15 5. Antes de la iFFT, aplicar una ventana (405) de dominio frecuencial. Esta ventana se puede utilizar para diseñar un aplanamiento deseado del espectro de energía. El proceso de diseño de la ventana se describe a continuación. Se ha diseñado una buena ventana para lograr un filtrado suave del espectro de energía. El filtrado del ruido en el espectro de energía permite la posibilidad de utilizar un número reducido de franjas de energía en el cálculo del Z efectivo para una mejora general en la eficiencia de cálculo.
- 20 6. Rellenar con ceros los datos de FFT, insertar el conjugado complejo en la segunda mitad de la memoria intermedia (406) de la FFT y aplicar la iFFT (407). En este punto se obtiene un espectro de energía aplanado en forma de histograma.

El relleno con ceros inserta datos que se truncaron después de la FFT. No es esencial insertar ceros para todas las franjas truncadas. Por ejemplo, rellenar menos ceros puede producir una memoria intermedia de FFT más pequeña que es más eficiente computacionalmente para calcular la IFFT.
- 25 Para un vector real x , y un tamaño de FFT de $2N$, los elementos $N+2$ a $2N$ de la salida de la FFT son el conjugado complejo de los elementos 2 a N . Aquí $N+1$ será uno de los elementos puestos a cero por el relleno con ceros.
- 30 7. Restar el espectro residual de cada detector. Como se señaló anteriormente, esto elimina cualquier espectro que estaría presente incluso en presencia de un material completamente bloqueante.
- 35 8. Aplicar la curva/función (408) de calibración de energía para convertir las franjas del histograma en valores de energía. Nota: Alternativamente, la calibración de energía se puede aplicar dentro de la propia rutina del Z efectivo. En esta etapa, la salida es un espectro (409) de energía calibrado aplanado.
9. Si es necesario, realizar la integración del espectro entre detectores adyacentes de modo que la integración sobre espectros de energía $2P+1$ para los detectores $i - P \leq i \leq i + P$. Si bien la integración sobre los intervalos de puerta se puede realizar en el dominio de FFT, la integración sobre detectores adyacentes solo se puede realizar después de que se haya aplicado la calibración de energía, ya que las franjas de histograma sin procesar de los detectores adyacentes pueden no corresponder a la misma energía. Al realizar la integración del espectro 2D, el rendimiento de la identificación de materiales se puede mejorar en comparación con la realización del procesamiento del Z efectivo en un solo píxel.

5.2. Medición del espectro de referencia

- 40 Para calcular el Z efectivo (y también las imágenes de intensidad / alto contraste), se obtiene un espectro de referencia con rayos X activados, pero antes de que la muestra alcance el haz de rayos X. Dentro de un diseño de máquina dado, habrá una demora entre el momento en que se activan los rayos X y el momento en que la muestra alcanza el haz de rayos X durante el cual se puede recopilar el espectro de referencia. El proceso es el siguiente:
 - 45 1. Activar los rayos X.
 2. Esperar a que el haz de rayos X se estabilice. Esto se puede lograr mediante un retraso temporal o filtrando los recuentos de rayos X hasta que la variación disminuya por debajo de un umbral especificado.
 3. Recopilar y sumar N espectros de energía de rayos X $I_0(E, n)$ (es decir, recopilar el espectro de energía registrado al final de N intervalos de puerta sucesivos) en la salida de la electrónica de procesamiento de impulsos.
 - 50 4. Dividir la suma de los espectros por N para calcular un espectro de referencia promedio para

$$I_0(E) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N I_0(E, n) \quad (\text{Ecuación 5})$$

donde $I_0(E)$ es el número de referencia de recuentos a la energía E, N es el número de intervalos de puerta y E es el nivel de energía de los rayos X.

Si en cualquier momento durante la recopilación de referencia se detecta una muestra en el haz de rayos X, entonces la acumulación de espectros de referencia cesa y puede usarse como referencia el promedio de M espectros recopilados, o la medición termina si M es insuficiente.

5.3. Carga o creación de una tabla de constantes de atenuación de masa

Las constantes de atenuación de masa para un Z efectivo dado y una energía dada definen el grado en que el material dado Z atenuará los rayos X de energía E. En particular, la intensidad de las energías recibidas a una energía particular vendrá dada por:

$$I(E) = I_0(E) \exp(-\mu_a(Z, E) \rho x) \quad (\text{Ecuación 6})$$

donde $I(E)$ es el número recibido de recuentos a la energía E, $I_0(E)$ es el número de referencia de recuentos a la energía E, $\mu_a(Z, E)$ es la constante de atenuación de masa para el material con número atómico efectivo Z a la energía E, ρ es la densidad del material y x es el grosor del material en relación con el grosor de referencia utilizado en la creación de los datos de atenuación de masa.

Los datos de atenuación de masa están disponibles en un número finito (pequeño) de energías, quizá cada 10, 20 o 50 keV, mientras que los espectros de energía creados por el método descrito en esta divulgación pueden generarse con un espaciamiento de energía de tan solo 1 keV o incluso menos. En la práctica, se seleccionará un número finito de estos valores de energía para su uso en el cálculo del Z efectivo.

Para lograr una tabla de atenuación de masa uniforme en todas las energías en el espectro de energía, los datos de las energías intermedias para cada Z se obtienen usando interpolación cúbica u otro método de interpolación adecuado. Los valores de atenuación de masa en función de la energía se consideran lo suficientemente uniformes como para que una interpolación cúbica sea un buen método de interpolación aplicable.

5.4. Cálculo del Z efectivo

El procesamiento del Z efectivo prosigue entonces de la siguiente manera:

1. Para cada detector y cada periodo de puerta (un detector especificado en un periodo de puerta específico que define un píxel en la imagen resultante), se medirá un espectro de energía calibrado como se describe en la sección "Operaciones preliminares". El procesamiento del Z efectivo no se realiza para espectros de energía clasificados como impenetrables o vacíos.
2. Determinar un conjunto de franjas de energía que se utilizarán para el cálculo del Z efectivo.
 - a. En función del espectro recibido, identificar la región de energía donde se reciben suficientes recuentos.
 - b. Estas serán las franjas del espectro donde los recuentos superen un umbral predeterminado.
 - c. Alternativamente, determinar las energías en las que la transmisión (relación entre el espectro recibido y el de referencia) supere un umbral.
3. Para cada valor Z para el que haya datos de atenuación de masa disponibles en cada una de las franjas de energía, realizar las siguientes operaciones:
 - a. Estimar el grosor del material para el Z supuesto. Un método posible es estimar el grosor a un valor de energía E de acuerdo con

$$\rho x(E) = -\log\left(\frac{I(E)}{I_0(E)}\right) \frac{1}{\mu_a(Z, E)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

donde $I(E)$ es el número de recuentos recibido a la energía E, $I_0(E)$ es el número de referencia de recuentos en la energía E, $\mu_a(Z, E)$ es la constante de atenuación de masa para el material con número atómico efectivo Z a la energía E, ρ es la densidad del material y x es el grosor del material en relación con el grosor de referencia utilizado en la creación de los datos de atenuación de masa.

Se puede obtener una estimación de grosor mejorada promediando la estimación de grosor a varias energías para reducir el impacto del ruido en la energía única. No es deseable estimar ρx explícitamente; el parámetro combinado ρx es suficiente.

- 5 b. Calcular un espectro predicho para este Z, en función del espectro de referencia registrado previamente, del parámetro de grosor y de la tabla ma según

$$\hat{I}(Z, E) = I_0(E) \exp\left(\rho x(Z) ma(Z, E)\right) \quad (\text{Ecuación 8})$$

calculado en todas las energías seleccionadas E, donde $I(Z, E)$ es el espectro predicho.

- c. Calcular una función de coste para este Z como la suma de los errores cuadráticos entre el espectro recibido y el espectro predicho bajo el supuesto del material Z

$$C(Z) = \sum_E w(E) \left[I(E) - \hat{I}(Z, E) \right]^2 \quad (\text{Ecuación 9})$$

- 10 donde C(Z) es la función de coste y w(E) representa los coeficientes de ponderación para cada suma de los errores cuadráticos entre el espectro recibido y el espectro predicho.

Los coeficientes de ponderación w(E) se pueden elegir para que sean la unidad, o alternativamente w(E) = I(E) dará como resultado una función de coste que da un coeficiente de ponderación menor a las regiones del espectro recibido donde el número de recuentos es pequeño y mayor coeficiente de ponderación a las regiones donde se reciben más recuentos.

- 15 4. Para este píxel (que constituye un espectro de energía recibido de un detector específico durante un periodo de puerta específico), calcular el Z efectivo estimado como el valor de Z que minimiza la función de coste:

$$\hat{Z} = \min_Z C(Z)$$

(Ecuación 10)

- 20 Cabe señalar que no existe un requisito particular para que el Z efectivo sea un número entero y, de hecho, la tabla de atenuación de masa puede contener valores para valores no enteros de Z que representan materiales compuestos. Sin embargo, es evidente que no es posible representar un continuo de posibles valores Z en una tabla finita. Para calcular Z con precisión arbitraria, es posible interpolar la función de coste a la resolución requerida usando un algoritmo de interpolación apropiado. El valor de Z elegido es entonces el valor que minimiza la función de coste interpolada. La función de coste C(Z) es una función continua y, por lo tanto, se puede predecir de manera fiable una coma flotante real o un valor continuo de Z que minimiza esta función continua a partir de la curva mediante alguna forma de interpolación.

- 25 Además, también se observa que la etapa 3 anterior indica que la función de coste se calcula para todos los valores Z disponibles en la tabla de atenuación de masa. En la práctica, dependiendo del comportamiento de la función de coste, se pueden aplicar métodos de búsqueda eficientes para reducir los requisitos de cálculo. Dichos métodos incluyen uno o más de los siguientes:

- 30 1. Búsqueda de gradiente.
2. Mejor primera búsqueda.
3. Alguna forma de búsqueda de patrones.

La forma de la función de coste se ha elegido para que sea relativamente insensible al ruido en el espectro.

6. Procesamiento del Z efectivo usando calibración de materiales

- 35 En la práctica, debido a características del detector y del procesamiento que pueden ser difíciles de caracterizar, puede resultar difícil lograr una calibración de energía precisa en todos los detectores, todas las frecuencias de recuento y todas las franjas del espectro.

- 40 Según la invención reivindicada, se ha desarrollado un método alternativo mediante el cual el sistema se calibra utilizando muestras de materiales conocidos de grosor variable. El objetivo es calibrar los espectros recibidos previstos en función del material, del grosor del material y de las franjas del histograma de energía. Esto evita la necesidad de una calibración de energía absoluta y también evita en gran medida el efecto del desplazamiento del espectro con la frecuencia de recuento (si está presente). También se puede eliminar la necesidad de quitar el apilamiento.

6.1. Proceso de (auto)calibración del material

Idealmente, con una buena calibración de ganancia, los espectros recibidos de todos los detectores son coherentes entre sí, por lo que solo es deseable obtener datos de calibración en un detector para usarlos en todos los detectores. En la práctica, es probable que sea deseable obtener datos de calibración para grupos de detectores adyacentes o posiblemente todos los detectores, dependiendo de la coherencia entre detectores.

La primera etapa en el proceso de calibración es obtener un espectro de referencia $I_0(B)$ en cada franja B de histograma, sin material en el haz de rayos X para el detector o detectores que han de calibrarse. Las franjas de histograma ahora se denotarán con B en lugar de E para indicar que no es necesario calibrar las franjas en términos de su energía exacta.

A continuación, para cada material que ha de calibrarse:

1. Determinar el Z efectivo del material (ya sea mediante una medición independiente o mediante la especificación de la pureza del material).
2. Obtener una “cuña escalonada” del material. Es decir, una muestra del material que comprende una serie de escalones de grosor conocido x. El escalón más grande es idealmente suficiente para reducir el haz de rayos X a un nivel en el que pueda considerarse impenetrable. Nota: se pueden usar otras muestras de material, pero tal cuña escalonada es una forma conveniente con la que calibrar.
3. Escanear la cuña escalonada en la ubicación requerida del detector. El resultado será una serie de espectros de energía no calibrados registrados a lo largo de cada escalón del material (el número de espectros dependerá de las dimensiones de la muestra, de la velocidad de escaneo y del periodo de puerta).
4. Sumar los espectros recibidos en cada escalón para minimizar el ruido en los espectros. Estos espectros se denominan $I(Z, B, x)$, ya que son una función del material, del histograma y del grosor del material. Tener en cuenta también que $I(Z, B, 0)$ es simplemente el espectro de referencia $I_0(B)$.
5. Calcular la característica de transmisión para todos los materiales, las franjas de histograma y el grosor como

$$T_x(Z, B, x) = \frac{I(Z, B, x)}{I_0(B)} \tag{Ecuación 11}$$

6. Calcular la transmisión total en función de Z y x como

$$R(Z, x) = \frac{\sum_B I(Z, B, x)}{\sum_B I_0(B)} \tag{Ecuación 12}$$

notando nuevamente que $R(Z, 0) = 1$ para todo Z.

Las tablas de $T_x(Z, B, x)$ y $R(Z, x)$ forman conjuntamente las tablas de calibración que se utilizan para estimar el Z efectivo en cada píxel (intervalo de detector/puerta). Como se indicó anteriormente, pueden o no ser una función del detector también, dependiendo de la equivalencia de los datos de todos los detectores.

Claramente, es deseable calibrar con muestras de todos los materiales posibles; sin embargo, en la práctica, solo se puede muestrear un subconjunto del continuo completo de materiales y mezclas. Para lograr entradas de tabla para valores intermedios de Z, es deseable interpolar las funciones T_x y R a valores intermedios de Z para expandir la cobertura de la tabla.

Una vez obtenidas las tablas de calibración, es ahora posible estimar el Z efectivo para una muestra de material desconocido de la siguiente manera.

6.2. Operaciones preliminares

Las operaciones preliminares son sustancialmente las mismas que las descritas anteriormente, con los siguientes comentarios:

1. Puede no ser conveniente realizar la eliminación del apilamiento.
2. Puede no ser deseable realizar un desplazamiento lateral del espectro para compensar el desplazamiento del valor de referencia dependiente de la frecuencia de recuento.
3. La ventana de dominio frecuencial sigue siendo necesaria antes de la iFFT.

4. La curva de calibración de energía no se aplica, ya que no es necesario realizar una calibración de energía absoluta con este método, pero es posible que se requiera la eliminación del espectro residual.
5. La integración del espectro se puede realizar entre de intervalos de puerta y entre detectores como se describe a continuación.
- 5 6. El espectro recibido se denominará $I(B)$, la intensidad en una serie de franjas B de histograma. El uso de B se diferencia del uso de E para la sección anterior, en la que las franjas de histograma se calibran en términos de su energía real.

6.3. Medición del espectro de referencia

10 El espectro de referencia se obtiene exactamente de la misma manera que se describe anteriormente, pero ahora se denota $I_0(B)$, que denota el uso de franjas de histograma, en lugar de energía.

6.4. Cálculo del Z efectivo

El procesamiento del Z efectivo prosigue entonces de la siguiente manera:

- 15 1. Para cada detector y cada periodo de puerta (un detector específico en un periodo de puerta específico que define un píxel en la imagen resultante), se medirá un espectro de energía no calibrado $I(B)$ como se describe en la sección "Operaciones preliminares". Nuevamente, no se realiza el procesamiento del Z efectivo para espectros de energía clasificados como impenetrables o vacíos.
2. Determinar un conjunto de franjas de histograma que se utilizarán para el cálculo del Z efectivo:
 - a. En función del espectro recibido, identificar la región donde se reciben suficientes recuentos.
 - 20 b. Estas serán las franjas del espectro donde los recuentos superan un umbral predeterminado. Elegir B : $I(B) > I_{min}$.
 - c. Alternativamente, determinar las franjas en las que la transmisión (relación entre el espectro recibido y el espectro de referencia) supera un umbral.
 - d. Alternativamente, utilizar todas las franjas de histograma disponibles y aplicar una ponderación en la función de coste para eliminar las franjas no deseadas del cálculo de costes.
 - 25 e. Nota: en última instancia, la reducción del número total de franjas de histograma procesadas logrará una mayor eficacia de cálculo, por lo que no es ideal el uso de todas las franjas.
3. Calcular el total de rayos X recibidos como una relación con la referencia.

$$R = \frac{\sum_B I(B)}{\sum_B I_0(B)} \quad \text{(Ecuación 13)}$$

4. Para cada valor Z para el que haya datos de calibración disponibles, realizar las siguientes operaciones:
 - 30 a. Estimar el grosor del material a partir de la transmisión total recibida R y los valores de la tabla de calibración de $R(Z, x)$ para este material Z. Esto se logra mediante
 - i. La interpolación de la curva de $R(Z, x)$ en el valor medido de R para obtener un \hat{x} correspondiente, mediante, por ejemplo, una interpolación cúbica.
 - ii. A partir de $R(Z, x)$ calibrada, obtener una forma funcional $x = f(R, Z)$ para calcular x en función del material y la transmisión.
 - 35 b. De la tabla de $R(Z, x)$ hallar x_1 y x_2 de modo que $R(Z, x_1) \leq R < R(Z, x_2)$. Tener en cuenta que $x_1 = 0$, corresponde al espectro de referencia, y si la transmisión recibida R es más pequeña que una entrada de la tabla, utilizar las 2 entradas finales para x_1 y x_2 , y el resultado será una extrapolación a un material más grueso.
 - 40 c. Usar ahora las tablas de transmisión calibradas $T_x(Z, B, x)$ para determinar los coeficientes de atenuación de masa local para cada franja del histograma de acuerdo con:

$$\hat{m}_a(Z, R, B) = \log \left(\frac{T_x(Z, B, x_2)}{T_x(Z, B, x_1)} \right) \quad (\text{Ecuación 14})$$

d. A continuación, calcular un espectro recibido previsto de acuerdo con

$$\hat{I}(Z, B) = T_x(Z, B, x_1) I_0(B) \exp \left(\left[\frac{\hat{x} - x_1}{x_2 - x_1} \right] \hat{m}_a(Z, R, B) \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

Este espectro recibido previsto es un espectro recibido interpolado entre los dos espectros de calibración más cercanos, pero basado en la atenuación diferente observada en cada franja. Se podrían usar otras formas de interpolación entre espectros, pero la interpolación específica del material aquí usada proporciona un resultado de interpolación superior.

e. Calcular una función de coste C(Z) para este Z como la suma de los errores cuadráticos entre el espectro recibido y el espectro predicho bajo el supuesto de material Z

$$C(Z) = \sum_B w(B) [I(B) - \hat{I}(Z, B)]^2 \quad (\text{Ecuación 16})$$

Los coeficientes de ponderación w(B) se pueden elegir para que sean la unidad, o alternativamente w(B) = I(B) dará como resultado una función de coste que da un coeficiente de ponderación menor a las regiones del espectro recibido donde el número de recuentos es pequeño y mayor coeficiente de ponderación a las regiones donde se reciben más recuentos.

f. Para este píxel (que constituye un espectro de energía recibido de un detector específico durante un periodo de puerta específico), calcular el Z efectivo estimado como el valor de Z que minimiza la función de coste:

$$\hat{Z} = \min_Z C(Z)$$

(Ecuación 17)

Cabe señalar que no existe un requisito particular para que Z efectivo sea un número entero y, de hecho, la tabla de autocalibración puede contener valores para valores no enteros de Z que representan materiales compuestos. Sin embargo, es evidente que no es posible representar un continuo de posibles valores Z en una tabla finita. Para calcular Z con precisión arbitraria, es posible interpolar la función de coste a la resolución requerida usando un algoritmo de interpolación apropiado. El valor de Z elegido es entonces el valor que minimiza la función de coste interpolada. La función de coste C(Z) es una función uniforme y, por lo tanto, se puede predecir de manera fiable una coma flotante real o un valor continuo de Z que minimiza esta función uniforme a partir de la curva mediante alguna forma de interpolación.

Se puede utilizar la misma forma de métodos de búsqueda eficientes para reducir el cálculo y evitar una búsqueda exhaustiva de todos los materiales Z en la tabla de calibración.

6.5. Adaptación del sistema

Algunos parámetros del sistema variarán con el tiempo, por lo que el sistema se adapta para mantener la calibración a lo largo del tiempo:

1. Obtener una actualización de la calibración.
 - a. Los espectros de calibración se miden durante los periodos en los que los rayos X están desactivados.
 - b. La ganancia se actualiza según los cambios observados en los espectros medidos.
 - c. La ganancia es A*ganancia antigua + B*ganancia nueva, donde A+B=1, y B será pequeña para evitar ruido y permitir una adaptación lenta.
2. Actualización de la calibración de los impulsos.
 - a. Periódicamente se puede realizar una nueva calibración de los impulsos, aunque se ha encontrado que, al permanecer los parámetros del impulso lo suficientemente constantes a lo largo del tiempo, como máximo puede ser necesaria una recalibración diaria o quizás semanal o mensual de los parámetros de los impulsos.

3. Actualización de la desviación del valor de referencia.
 - a. Esto se puede hacer durante los periodos en los que los rayos X están desactivados, de la misma manera que se realiza la calibración inicial: se requiere un conjunto corto de datos para la desviación del valor de referencia.
 - 5 b. Adaptada continuamente a través de un algoritmo de seguimiento del valor de referencia como se describe a continuación.
4. La calibración de energía, el desplazamiento de espectro dependiente de la frecuencia de recuento, los parámetros de apilamiento y el espectro residual pueden requerir una recalibración ocasional fuera de línea. También se puede encontrar que, para una máquina determinada, estos raramente, o nunca, requieren recalibración.

10

7. Ejemplo de procesamiento del Z efectivo

La siguiente es una descripción general de un ejemplo del proceso reivindicado utilizado para calibrar placas detectoras, en particular implementando un proceso de autocalibración y con la opción de usar el cálculo del Z efectivo de "coma flotante":

- 15 1. Obtener cuñas de calibración de material conocido, idealmente puro o cercano a elementos puros. Para la presente calibración se utilizaron 3 materiales:
 - a. Carbono ($Z = 6$).
 - b. Aluminio ($Z = 13$).
 - c. Acero inoxidable (Z aproximadamente 26).
- 20 2. Las dimensiones del escalón se eligen teniendo en cuenta lo siguiente:
 - a. Se utiliza un ancho de 30 cm para garantizar que se pueda calibrar una gran cantidad de detectores con 1 escaneo de calibración.
 - i. El modo de proyección se utiliza para aumentar efectivamente la cantidad de píxeles que se pueden calibrar.
 - 25 ii. Con cuñas de 30 cm, 2 alturas de calibración pueden cubrir las 5 placas detectoras con suficiente superposición para evitar efectos de borde.
 - b. Las alturas de los escalones se determinaron para tratar de obtener un espaciamiento de transmisión razonablemente uniforme desde algo $< 0,5\%$ hasta el 95% .
 - i. Para el carbono, lograr una transmisión inferior al $0,5\%$ requirió algo así como 300 mm de material.
 - 30 ii. Para metales más pesados, lograr una transmisión del 95% requirió muestras muy delgadas, de 0,5 mm y menos. Para metales como el estaño (no utilizado aquí) esto fue sumamente difícil.
 - c. La longitud del escalón es de 50 mm. Cuando se escanea al 4% de la velocidad normal, la velocidad de escaneo es de 8 mm por segundo, por lo que se pueden recopilar aproximadamente 6 segundos de datos de cada escalón. Esto es necesario para garantizar espectros de calibración muy precisos, dada la

35
3. Se escanean las cuñas de material y los datos resultantes se procesan fuera de línea en Matlab de la siguiente manera:
 - a. Para cada píxel de cada escaneo, determinar las ubicaciones de inicio y finalización del escalón.
 - b. Dejar algo de margen para evitar efectos cerca de los bordes de los escalones.
 - 40 c. Para cada escalón identificado:
 - i. Extraer los datos binarios correspondientes al espectro medido en cada segmento del escalón.
 - ii. Integrar todos los datos, para establecer un espectro muy preciso (con > 5 segundos de datos).
 - iii. Calcular la intensidad total correspondiente (en relación con un promedio a largo plazo del espectro de la fuente medido durante la misma ejecución de calibración sin nada en el haz).
 - 45 d. Crear una tabla para cada escalón (intensidad) de cada material, que contenga:

- i. Una correlación entre el grosor del escalón y la intensidad del escalón. Esta tabla se utiliza para interpolar cualquier espectro medido en un grosor de material equivalente.
- ii. Una serie de espectros de calibración, incluido un espectro de referencia. Cada espectro representa un grosor de material, a partir del cual se pueden interpolar espectros para grosores de material intermedios.

5

Los datos de calibración para los 3 materiales con $Z = 6, 13, 26$ son adecuados para la producción de una imagen de 3 colores, clasificando el material como orgánico (cerca de $Z = 6$), inorgánico / metal ligero (cerca de $Z = 13$) o metal (cerca de $Z = 26$). Para lograr el objetivo central de una estimación precisa del Z efectivo para separar materiales hasta $\pm 0,2 Z$ o mejor, es necesario obtener datos de calibración de un conjunto mucho más grande de materiales, a partir de los cuales se podría obtener una estimación continua de Z . No es práctico ejecutar escaneos de calibración para todos los materiales desde $Z = 3$ hasta $Z = 92$, por lo que se obtuvo por interpolación una gama de conjuntos de datos de calibración adicionales. Los conjuntos de calibración para $Z = 3$ a $Z = 13$ se obtuvieron a partir de la interpolación/extrapolación de los conjuntos de datos de carbono y aluminio. Los conjuntos de calibración para $Z = 13$ a $Z = 50$ efectivos pueden obtenerse a partir de la interpolación de los conjuntos de datos de aluminio y acero inoxidable.

10

15

Para cada píxel del escáner, el procedimiento para obtener los conjuntos de datos de calibración adicionales es el siguiente:

1. Para cada uno de $Z = 6, 13, 26$, interpolar los espectros de calibración a un nuevo conjunto de intensidades. Para la presente demostración, las intensidades (en porcentaje) utilizadas fueron: 95, 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 15, 10, 6, 4, 2, 1, 0,5, 0,2. En este punto, ahora hay una tabla de calibración para cada material en un conjunto común de intensidades. El proceso ahora consiste en crear tablas de calibración para otros materiales con el mismo conjunto de intensidades comunes.
2. Para la presente demostración, el conjunto de materiales requeridos es $Z = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 30, 35$. El espectro para el material Z , en el histograma B , en el grosor x (que aquí corresponde a uno de los niveles de transmisión definidos) se denota como $I(Z, B, x)$. Para cada material requerido, para cada intensidad, el nuevo espectro de material interpolado se obtiene de la siguiente manera:

20

25

- a. Si $Z_{\text{nuevo}} \leq 13$

$$I(Z_{\text{nuevo}}, B, x) = I(6, B, x) \frac{(13 - Z_{\text{nuevo}})}{7} + I(13, B, x) \frac{(Z_{\text{nuevo}} - 6)}{7}$$

- b. Si $Z_{\text{nuevo}} > 13$

$$I(Z_{\text{nuevo}}, B, x) = I(13, B, x) \frac{(26 - Z_{\text{nuevo}})}{13} + I(26, B, x) \frac{(Z_{\text{nuevo}} - 13)}{13}$$

3. A continuación, las nuevas tablas se incluyen en el conjunto total de datos de calibración utilizados para el procesamiento del Z efectivo.
4. Todas las tablas de calibración se guardan en un formato de fichero apropiado para su entrada en un soporte lógico PoCC.

30

Hay algunos puntos importantes a tener en cuenta aquí:

1. Para $Z < 6$, el proceso es una extrapolación en lugar de una interpolación: uno de los coeficientes se vuelve negativo, mientras que el otro es mayor que 1. Si bien parece haber funcionado aceptablemente bien hasta $Z = 3$, se debe tener cuidado con la extrapolación, ya que puede divergir rápidamente.
2. De manera similar, para $Z > 26$, el proceso es la extrapolación. Aquí sería mejor incluir los datos de calibración para el estaño Sn y luego también hacer que el Pb complete los datos de calibración disponibles. El reto con estos materiales de mayor Z es obtener curvas de calibración sensibles a una transmisión del 90%; la muestra de material debe ser muy delgada para lograr esta transmisión.
3. Al incluir valores de Z por debajo de 3, la función de coste se comporta razonablemente bien en la región de interés alrededor de $Z = 6$. Esto asegura que el proceso para calcular un Z efectivo continuo/de coma flotante sea capaz de determinar correctamente los valores Z alrededor de 6, esencialmente evitando anomalías en los bordes, o al menos empujándolos a valores Z fuera del intervalo de interés.
4. Es posible que se requiera una interpolación más sofisticada para evitar un punto común de intersección; esto es aceptable para un Z más bajo, pero deja de ser cierto cuando se mueve hacia los metales. Puede ser necesario interpolar varios espectros para obtener cada nuevo material interpolado.

35

40

45

5. El rendimiento general está algo limitado por el uso de solo 3 materiales medidos reales. De hecho, es bastante notable que se haya logrado un rendimiento tan excelente dado el espaciamiento de los materiales de calibración.
6. Los materiales con mayor Z, como el plomo Pb, tienen bordes de absorción, por lo que se debe acabar considerando estos materiales si se desea lograr un rendimiento preciso con un alto Z efectivo. Hasta este punto, los bordes de absorción no se han incorporado específicamente al modelo.

La función de coste $C(Z)$ es una función uniforme y, por lo tanto, se puede predecir una coma flotante real o un valor continuo de Z que minimiza esta función uniforme a partir de la curva mediante alguna forma de interpolación.

Los resultados del proceso de interpolación se muestran en la Figura 14 para el caso de transmisión del 10%. Se puede ver que hay una progresión muy uniforme a través de todos los materiales, y esto es lo que da como resultado el poder de discriminación del procesamiento del Z efectivo. Cualquier material medido en el intervalo Z efectivo se puede colocar en algún lugar de este conjunto de curvas, usándose el desplazamiento exacto de las curvas de calibración para determinar una estimación muy precisa del Z efectivo del material.

La implementación del Z efectivo de coma flotante se ha basado en una interpolación cuadrática, utilizando los valores de la función de coste en el valor Z que minimiza la función de coste, y el valor Z a ambos lados de este, con alguna consideración especial en los bordes. Este planteamiento ha producido resultados del Z efectivo que (con suficiente integración del espectro) han resuelto con precisión materiales en los que la diferencia conocida del Z efectivo es menor que 0,2.

El proceso para el cálculo de una estimación continua / de coma flotante del Z efectivo es el siguiente:

1. Calcular la función de coste $C(Z)$ en cada valor Z en la tabla de calibración.
2. Encontrar el valor de Z para el cual $C(Z)$ se minimiza.
3. Encontrar los valores de Z y los valores de la función de coste asociada para los valores de Z a cada lado del valor de Z que minimiza $C(Z)$.
4. Se estiman los coeficientes de un modelo cuadrático, siendo el modelo en la región del mínimo:

$$C(Z) = a_0 + a_1Z + a_2Z^2 + n$$

donde n es ruido en la función de coste. Esto, a su vez, se modela en forma de ecuación matricial para los 3 valores Z Z1, Z2 y Z3 y los valores asociados de la función de coste C1, C2 y C3, siendo

$$C = Ha + n$$

y donde

$$H = \begin{bmatrix} 1 & Z_1 & Z_1^2 \\ 1 & Z_2 & Z_2^2 \\ 1 & Z_3 & Z_3^2 \end{bmatrix}$$

$$a = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix}$$

$$C_1$$

$$C_2$$

$$C_3$$

y la solución se obtiene mediante inversión matricial como:

$$\hat{a} = (H'H)^{-1} H'C$$

La forma general inv(H'H) H'C se usa para acomodar el caso donde se usan más de 3 valores Z y C para estimar los coeficientes cuadráticos.

5. Calcular el valor de Z que minimiza la función cuadrática. El valor de Z en el que hay un punto de inflexión es simplemente:

$$\hat{Z} = \frac{-a_1}{2a_2}$$

- 5 Por diseño, uno de los valores Z (generalmente Z2 excepto en los bordes) es un mínimo, por lo que se puede suponer que el Z óptimo resultante es un mínimo en lugar de un máximo. En los bordes puede haber problemas, pero esto debe tratarse por separado.

En la realización divulgada, se realizan las siguientes observaciones:

- 10 1. Por diseño, uno de los valores Z (generalmente Z2 excepto en los bordes) es un mínimo, por lo que se puede suponer que el Z óptimo resultante es un mínimo en lugar de un máximo. En los bordes, puede haber problemas, pero esto debe tratarse por separado.
- 15 2. Si el valor de Z que minimiza la función de coste está en cualquier borde, entonces es necesario usar 2 valores a un lado del valor mínimo de Z. El cálculo de coma flotante puede convertirse en una extrapolación a un punto fuera del intervalo de valores Z en la tabla de calibración. Cuando esto ocurre, la estimación de Z puede divergir rápidamente, por lo que se debe tener cuidado de poner un límite a la estimación del valor Z máximo o mínimo (es decir, cuánta extrapolación se permite).
3. La inclusión de valores de Z por debajo de 6 y por encima de 26 está diseñada para garantizar que los efectos de borde descritos anteriormente no afecten negativamente a las estimaciones de Z, particularmente en la región de interés alrededor de Z = 6.
- 20 4. Es probable que existan formas más eficientes computacionalmente de obtener los coeficientes cuadráticos y la estimación asociada del mínimo. Esto no se ha explorado en esta etapa.
5. De hecho, para un conjunto dado de valores Z, todas las matrices e inversas necesarias pueden calcularse fuera de línea y almacenarse para un uso más eficiente, ya que solo dependen de los valores Z y el espaciado Z, no del espectro medido y la función de coste.
- 25 6. El modelo cuadrático es aceptable cuando la función de coste se comporta bien, es uniforme y está relativamente libre de ruido. Cuando se utilizan tiempos de integración muy cortos para recopilar los histogramas del espectro de energía, la función de coste puede volverse ruidosa y puede converger en un mínimo local debido al ruido. En este caso, y en general, puede ser necesario un modelo de interpolación más sofisticado para aplanar la función de costes y evitar efectos de ruido. Esto puede implicar más de 3 puntos en el proceso de interpolación.
- 30

El modelo cuadrático es solo un modelo para garantizar que se obtenga un Z efectivo coherente para un material en particular. No pretende ser un modelo funcional preciso del comportamiento de la función de costes y no se lo considera necesario. El objetivo principal es obtener una estimación del Z efectivo que sea coherente para un material en particular y permita una separación fiable de materiales poco espaciados. El modelo cuadrático logra este objetivo.

- 35 El algoritmo de Z efectivo de coma flotante se verificó en una variedad de muestras de materiales y también se verificó extensamente en maletines. Se hicieron varias observaciones sobre el rendimiento.

- 40 1. Con valores de transmisión altos, correspondientes a muestras muy delgadas / de baja atenuación, la función de coste podría volverse ruidosa y también las curvas de calibración para Z más altos a menudo están mal interpoladas a una transmisión > 90%. Como resultado, la salida tendía a enfatizar demasiado los valores de Z más altos.
2. En una transmisión muy baja, y en las proximidades de grandes cambios en los niveles de transmisión, como cerca del borde de los bloques de metal, podría haber algo de dispersión en el espectro recibido, lo que daría como resultado una salida sesgada hacia lo orgánico, incluso cuando se sabía que el material era metálico.
3. El conocimiento *a priori* del Z probablemente efectivo proporcionó la siguiente heurística:
- 45 a. Es más probable que la transmisión alta sea un material orgánico o de menor Z, ~~ya que muy grandes.~~
- b. Es más probable que la transmisión baja sea un material de Z más alto, ya que se requerirían grosores muy grandes de material de Z bajo.

Como resultado de estas observaciones, se introdujo una ponderación $v(Z, I)$ para ajustar la función de coste en función tanto de la intensidad como de Z . Estas ponderaciones de la función de coste se ajustan para garantizar que la salida del Z efectivo sea la requerida para muestras de ensayo conocidas. En PoCC, la implementación se ha limitado a 3 regiones diferenciadas:

- 5 1. Alta transmisión, $I > \text{umbral alto}$

Para una alta transmisión, se encontró que la salida estaba algo sesgada hacia un Z alto cuando se escanearon materiales orgánicos bastante delgados. Por lo tanto, los coeficientes de ponderación de los costes fueron bajos para los orgánicos y aumentaron a un Z mayor.

2. Transmisión media, $\text{umbral bajo} < I < \text{umbral alto}$

10 En el alcance medio de transmisión, la salida fue generalmente coherente con el Z efectivo previsto; por lo tanto, solo se aplicó una ponderación de función de coste muy leve.

3. Transmisión baja, $I < \text{umbral bajo}$

15 Se encontró que, a una transmisión muy baja, los materiales de Z más alto ocasionalmente se identificaban erróneamente como materiales de Z bajo. Esto fue especialmente así cerca de los bordes de los bloques de metal, donde la dispersión podría permitir que un exceso de rayos X de baja energía llegara al detector. Como resultado, a baja transmisión, los coeficientes de ponderación de coste se diseñaron para aumentar el coste de los materiales de bajo Z para producir la salida de Z más alto de manera más coherente. Un efecto secundario de este planteamiento es que los materiales orgánicos muy gruesos comienzan a identificarse como metales de baja transmisión. Esto solo se puede superar eliminando la fuente subyacente de la identificación errónea, que es un exceso de rayos X de baja energía en el espectro recibido.

20

8. Implementación del procesamiento del Z efectivo

Las siguientes secciones describen con más detalle las etapas y algoritmos de procesamiento individuales. La Figura 20 indica una descripción general de las diversas etapas de procesamiento opcionales que pueden implementarse en el presente método.

25 8.1. Teselado

El algoritmo de teselado es efectivamente una función de promediado de bloques. El propósito del algoritmo de teselado es promediar la imagen del Z efectivo flotante sobre un área (mm^2) que representa el objeto más pequeño requerido para ser detectado de una intensidad y composición de material constante. El algoritmo de teselado genera teselas con un 50% de superposición para garantizar que siempre capturamos el objeto de interés. El algoritmo de teselado estima la media y la desviación estándar sobre teselas rectangulares en la imagen del Z efectivo flotante. El ancho y la altura de la tesela son definidos por el usuario. Las teselas se superponen en un 50% tanto en dimensiones verticales como horizontales. Dado un tamaño de imagen N_r por N_c píxeles y una dimensión de tesela T_r por T_c píxeles, el número de teselas en la dimensión vertical es $\text{suelo}(N_r/T_r)+1$. Las dimensiones de las teselas deben valorarse uniformemente para garantizar un 50% de superposición. El algoritmo de teselado ejecuta un bucle que indexa cada tesela y calcula la media y la desviación estándar de todos los píxeles de la tesela.

30

35

La elección de las dimensiones de las teselas se reduce esencialmente a una solución de compromiso entre:

1. Las dimensiones del objeto más pequeño que debe detectarse, y
2. La resolución requerida del Z efectivo. Se ha observado que la varianza del Z efectivo se reduce casi linealmente con el número de píxeles promediados del Z efectivo, por lo que áreas más grandes producen una mejor resolución del Z efectivo.
- 40

Además, la idea de teselado y agrupamiento se ha utilizado para evitar la necesidad de implementar una segmentación sofisticada de imágenes en este momento. Se consideró que para obtener mediciones precisas del Z efectivo se requerirían, en cualquier caso, grandes bloques contiguos de material uniforme, por lo que el planteamiento de teselado y agrupamiento sería solo marginalmente inferior a la segmentación de imagen completa. No obstante, la segmentación de imágenes puede resultar ventajosa en última instancia para formas muy irregulares, especialmente cuando se pueden utilizar algunos planteamientos más sofisticados de reconocimiento de objetos junto con una medición del Z efectivo.

45

8.2. Agrupamiento

El algoritmo de agrupamiento agrupa teselas que tienen un Z efectivo común y están conectadas espacialmente. El propósito del algoritmo de agrupamiento es detectar objetos que abarcan áreas más grandes que el tamaño mínimo del objeto definido por las dimensiones de la tesela; véase la sección 2.1. La conectividad se define a lo largo de los bordes. A las teselas conectadas se les asigna un ID de agrupamiento común. La salida del algoritmo de agrupamiento es un mapa de agrupamiento y una tabla de agrupamiento. El mapa de agrupamiento es un conjunto de teselas

50

conectadas con ID de agrupamientos asociados. La tabla de agrupamientos contiene información sobre cada ID de agrupamiento, incluido el número de teselas en el agrupamiento y la extensión vertical y horizontal de cada agrupamiento.

5 El algoritmo de agrupamiento realiza un escaneo por filas de la imagen en mosaico. Si la tesela $P(r, c)$ está conectada a una tesela en el conjunto $A = \{P(r, c-1), P(r-1, c+1), P(r-1, c), P(r-1, c-1)\}$, entonces se le asigna el ID de agrupamiento. Si la $P(r, c)$ no está conectada al conjunto A, pero está conectada a una tesela en el conjunto $B = \{P(r, c+1), P(r+1, c-1), P(r+1, c), P(r+1, c+1)\}$ entonces se asigna a la tesela un nuevo ID de agrupamiento. En el caso de la conexión con las teselas en el conjunto A, es posible que $P(r-1, c+1)$ tenga un ID de agrupamiento diferente al de otros en el conjunto. En este caso, se realiza una fusión de agrupamientos. Esto se logra simplemente reemplazando un ID de agrupamiento por otro; el orden específico no es importante. Los conjuntos A y B se adaptan a ocho condiciones de contorno, cuatro a lo largo de los bordes de la imagen y cuatro en los vértices de la imagen.

La Figura 19 muestra la formación de agrupamientos, ignorándose las teselas individuales.

8.3. Detección de amenazas

15 El algoritmo de detección de amenazas es un clasificador de la vecina más próxima. El algoritmo clasifica teselas individuales. Hay dos etapas en el algoritmo, entrenamiento y clasificación. La etapa de entrenamiento establece una tabla de consulta que correlaciona la intensidad normalizada con el Z efectivo flotante para una variedad de materiales denominados "amenazas". Esta terminología no tiene importancia. La tabla de consulta simplemente contiene materiales de interés. En la implementación actual, la tabla de consulta es objeto de aproximación como un ajuste cuadrático, para el cual solo se almacenan los coeficientes cuadráticos (véase threat.cpp).

20 Durante la etapa de clasificación, la entrada es la intensidad medida (I_{med}) normalizada de la tesela, el Z efectivo medido (Z_{med}) flotante de la tesela y un error de clasificación máximo del Z efectivo (ΔZ). Para cada material del conjunto de formación, el clasificador declara una clasificación positiva si

$$\text{abs}(C_i(I_{med}) - Z_{med}) < \Delta Z,$$

siendo C_i la función cuadrática asociada con el material de amenaza i -ésimo.

25 El uso tanto de la intensidad como del Z efectivo en el perfil de amenaza es un aspecto importante de este planteamiento. Por lo general, el Z efectivo no es constante con el grosor del material, por lo que incluir la intensidad (relacionada con el grosor) proporciona una evaluación bidimensional con una discriminación muy superior al Z efectivo por sí solo.

30 La Figura 15 muestra el Z efectivo frente a la intensidad para una variedad de muestras de material evaluadas, junto con la interpolación cuadrática. Aquí la variación del Z efectivo con la intensidad es clara.

8.4. Detección de bordes

35 El propósito del algoritmo de detección de bordes es garantizar que la ventana de media móvil de la sección 2.5 no se extienda a los límites del material. La detección de bordes utiliza transiciones de amplitud en la imagen de intensidad para declarar los bordes del material. La entrada al algoritmo de detección de bordes es la imagen de intensidad. Los bordes solo se detectan en la dimensión horizontal. La razón para no detectar bordes en la dimensión vertical es que la ventana de media móvil solo opera en la dimensión horizontal. Los bordes de la imagen de intensidad se calculan para cada detector. Se utiliza un operador de gradiente de primer orden para detectar bordes. El usuario define el ancho de la máscara del operador de gradiente y el umbral de gradiente. Dada la siguiente máscara de borde $L(c)$ indexada en columnas como se muestra en la Figura 23, el gradiente es $G = \text{suma}(L(c) \cdot I_{norm}(c))$, siendo I_{norm} la intensidad normalizada; véase la sección 2.6. Se declara un borde cuando $\text{abs}(G) > g$, siendo g un umbral definido por el usuario.

8.5. Media móvil

45 El propósito del algoritmo de media móvil es filtrar los histogramas de intensidad para cada detector para aumentar la relación señal-ruido efectiva. El algoritmo genera un histograma de intensidad filtrado sobre un corte k , para cada detector, promediando los histogramas de intensidad medidos sobre una ventana simétrica centrada en el corte k . El detector de bordes desempeña un papel importante a la hora de garantizar que la ventana de media móvil no se sitúe entre materiales diferentes. Si una ventana se superpone a un borde, el promedio solo se calcula hasta los límites del borde. El ancho de la ventana puede ser establecido por el usuario. En los bordes no se realiza un promedio. La Figura 22 ilustra el comportamiento de la media móvil a medida que pasa por un borde.

50 Una realización que puede ser más eficiente computacionalmente es un planteamiento de media móvil adaptativa:

1. Calcular el Z efectivo en cada corte en presencia de bordes.
2. Calcular el Z efectivo en función de una superposición del 50% de las ventanas de media móvil (por ejemplo, cada 5 píxeles para una longitud de MA (media móvil, por sus siglas en inglés) de 11 píxeles).

Esto puede proporcionar una mejora de 3-5 veces en la velocidad de cálculo, dependiendo de la configuración exacta.

Detalles adicionales

1. Realización radiográfica de rayos gamma

5 Otra realización de la invención es la de la radiografía de rayos gamma. En tal aplicación, se puede usar una fuente (1800) de rayos gamma, como el cobalto 60, para irradiar el túnel de un escáner (1801) con fotones de rayos gamma. La fuente (1800) de rayos gamma puede estar blindada (1802) y también se puede usar un colimador (1803) para crear un haz de rayos gamma (1804) en abanico. Un sistema de rodillos (1805) u otros dispositivos como transportadores puede ser usado para pasar carga (1806), paquetes, bolsas u otros artículos de interés a través del haz de abanico de rayos gamma (1804). Los fotones de rayos gamma interactuarán con la carga (1806) a través de una variedad de interacciones que incluyen absorción, dispersión y retroceso.

10 Los fotones de rayos gamma que atraviesan la carga pueden detectarse en el otro lado del escáner mediante un subsistema detector. Tal subsistema detector (1807) puede ser un conjunto de detectores de centelleo acoplados a fotomultiplicadores de silicio para producir una señal eléctrica. Alternativamente, la matriz puede consistir en material semiconductor como el germanio de alta pureza (HPGe), que es capaz de convertir directamente los fotones de rayos gamma en una carga eléctrica.

2. Procesamiento de impulsos de alta frecuencia

En principio, puede usarse cualquier método adecuado de procesamiento de impulsos de alta frecuencia dentro de las realizaciones descritas en el presente documento. Sin embargo, el alto flujo de rayos X presente en los sistemas de detección de rayos X típicos da como resultado una alta frecuencia de recuento de impulsos y una alta probabilidad de recibir impulsos de rayos X superpuestos.

15 El apilamiento de impulsos ha sido durante mucho tiempo un problema al que enfrentarse en las aplicaciones de la espectroscopia de radiación de alta frecuencia. Los planteamientos tradicionales para la conformación de impulsos utilizan filtros lineales para acortar la duración del impulso, lo que puede reducir significativamente la SNR (relación señal ruido, por sus siglas en inglés) y, por lo tanto, se limitan a frecuencias de salida de unos centenares de kc/s. Un planteamiento alternativo para procesar los datos de los detectores de radiación se basa en la idea de modelar matemáticamente los datos corrompidos por el apilamiento de impulsos y resolver los parámetros requeridos del modelo. Al recuperar en lugar de descartar los datos dañados por el apilamiento de impulsos, esta técnica permite un procesamiento de impulsos de alto rendimiento y bajo tiempo muerto sin la tradicional pérdida de resolución de energía.

20 Las divulgaciones de las publicaciones de patentes internacionales WO2006029475, WO2009121130, WO2009121131, WO2009121132, WO2010068996, WO2012171059 y WO2015085372 son útiles en la presente invención para lograr un procesamiento de impulsos de alta frecuencia con reducción en el rechazo de apilamientos de impulsos, y todas se incorporan aquí por referencia en su integridad como útiles en las realizaciones de la presente invención como si se repitieran aquí literalmente, y el solicitante se reserva el derecho de incorporar cualquier terminología y conceptos divulgados en las anteriores publicaciones de patentes internacionales en futuras modificaciones del lenguaje de reivindicación de la solicitud actual.

25 La siguiente descripción incluye una selección de las técnicas dadas a conocer en las anteriores publicaciones de patentes internacionales adaptadas a la invención actual, pero los expertos en la técnica apreciarán que todas estas técnicas son potencialmente útiles y la elección entre los planteamientos alternativos está guiada por la satisfacción de diversas restricciones de rendimiento que compiten entre sí, incluida la velocidad de procesamiento, la precisión de la determinación de energía y la tasa máxima de recuento.

2.1. Procesamiento de impulsos de alto rendimiento basado en modelos: método 1

30 El algoritmo que se describe brevemente aquí, y con más detalle en el documento WO2006029475 (incorporado por referencia), para procesar los datos de los detectores de radiación es un algoritmo de procesamiento de señales en tiempo real basado en modelos que caracteriza la salida del detector y [n] de radiación como se muestra a continuación:

$$y[n] = \sum_{i=1}^N \alpha_i h[n - \tau_i] + \omega[n] \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad \text{(Ecuación 18)}$$

35 La serie cronológica (y) digitalizada del detector de radiación se modela como la suma de un número desconocido de eventos de radiación (N), con tiempos de llegada (τ) aleatorios y amplitudes (α), interactuando con un detector de radiación, que tienen una forma de impulso prevista (h) y con un proceso de ruido (ω).

40 Por lo tanto, para caracterizar completamente la salida digitalizada del detector de radiación, es deseable estimar: la respuesta de impulso prevista del detector; el número de eventos en la serie cronológica digitalizada del detector; el tiempo de llegada de cada uno de esos eventos de radiación; y las energías individuales de cada evento. Una vez que

se han determinado estos parámetros, los datos digitalizados del detector se pueden descomponer con precisión en los eventos de componentes individuales y se puede determinar la energía de cada evento.

Caracterización del sistema

5 La calibración del detector es la primera etapa del algoritmo; toma como entrada los datos de la serie cronológica del detector y determina la respuesta de impulso unitario del detector (la forma de impulso prevista del detector). Remitirse a Calibración de parámetros de impulso para obtener un resumen más detallado del proceso de calibración de impulso.

Localización de impulsos

10 Una vez que se ha determinado la respuesta de impulso unitario del detector, esta es utilizada por la etapa de localización de impulsos para determinar el número de eventos en el flujo de datos digitalizados del detector y su TOA (tiempo de llegada, por sus siglas en inglés) mutuo.

15 La detección de eventos en la forma de onda digitalizada del detector se logra ajustando un modelo exponencial a un número fijo de puntos de datos. Después de la etapa de Caracterización del sistema, la caída exponencial de la cola del impulso está bien caracterizada. La métrica de detección (la señal utilizada en última instancia para tomar una decisión sobre si ha llegado o no un impulso) se forma ajustando una curva exponencial a un número específico de puntos de datos. Esta "ventana de detección" de longitud fija se ejecuta continuamente sobre los datos digitalizados del detector y se calcula la suma de los cuadrados del error (esto también se puede considerar como la suma del cuadrado del ajuste residual). Esta operación da como resultado tres modos distintos de operación:

- 20 1. *Operación de valor de referencia:* procesamiento de muestras de datos cuando no hay señal presente. Como los datos pueden modelarse con bastante precisión mediante un exponente, la suma cuadrática de los errores es mínima y permanece bastante constante.
- 25 2. *Detección de eventos:* cuando un evento de radiación entra en la ventana de detección, los datos ya no se pueden modelar con precisión como un exponente (los datos podrían considerarse no diferenciales en $T = 0$, el momento exacto de llegada del evento de radiación). En consecuencia, aumentará la suma cuadrática de los errores. Esta métrica de detección seguirá aumentando hasta que el evento de radiación se sitúe en el medio de la ventana de detección.
3. *Operación de cola:* al procesar datos en la cola de un evento de radiación, los puntos de datos se modelan con bastante precisión como un exponente. En consecuencia, la suma cuadrática de los errores vuelve al mismo nivel que el modo de operación de valor de referencia.

30 El uso de una operación de ajuste de impulso de exponente de este tipo en el detector digitalizado produce una métrica de detección ideal. Permanece bajo en el valor de referencia, aumenta rápidamente en respuesta a la llegada de un evento y decae rápidamente una vez que el flanco ascendente del evento de radiación ha disminuido. Además, al aumentar el número de muestras del ADC en la ventana de detección de longitud fija, es posible suprimir el ruido del detector y detectar con precisión eventos de muy baja energía. Sin embargo, el ancho de la métrica de detección (en muestras) varía proporcionalmente con la ventana de detección. En consecuencia, a medida que se amplía la ventana de detección, disminuye la capacidad de distinguir dos impulsos muy separados.

Detección de picos cuadráticos

40 La etapa final de la localización de impulsos consiste en tomar una decisión sobre el número exacto y el tiempo de llegada de cada uno de los eventos de radiación en el flujo de datos del detector. Un planteamiento sería aplicar un umbral simple a la métrica de detección y declarar la llegada de un impulso a la muestra más cercana al cruce del umbral. Sin embargo, un simple cruce de umbral es susceptible al ruido y solo proporciona una precisión de muestra de $\pm 0,5$ para determinar el tiempo de llegada del impulso. Para tener un tiempo de llegada de impulso más preciso y para que sea robusto contra el ruido (de particular importancia cuando se trata de señales de baja energía cerca del suelo de ruido), se puede utilizar un algoritmo de detección de picos cuadráticos. Tal planteamiento ajusta una cuadrática a una ventana deslizante de N muestras de la métrica de detección (N puede ser igual a 5). Para que se declare un pico, se examina la descomposición y se declara un pico si la curvatura está dentro de un intervalo permitido, la constante está por encima de un umbral y el término lineal ha cambiado de positivo a negativo. Los coeficientes también se pueden utilizar para determinar el tiempo de llegada de la submuestra.

Estimación de la energía del impulso

50 La etapa de Estimación de la energía del impulso determina la energía de todos los eventos de radiación en el flujo de datos del detector. Como entrada utiliza: el conocimiento *a priori* de la respuesta al impulso de la unidad detectora; el número de eventos; y su tiempo individual de llegada. Los datos digitalizados del detector de la ecuación 1 ($y [n]$) también se puede escribir en forma de matriz como:

$$y = Ax + b \tag{Ecuación 19}$$

donde A es una matriz M × N, cuyas entradas están dadas por

$$\mathbf{A}(n,i) = \begin{cases} h(n - \tau_i) & \tau_i \leq n \leq \min(m, \tau_i + T - 1) \\ 0 & \text{en los demás casos.} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Por tanto, las columnas de la matriz A contienen múltiples versiones de la respuesta de impulso unitario del detector. Para cada una de las columnas individuales, el punto de partida de la forma de la señal está definido por la posición temporal de la señal. Por ejemplo, si las señales en los datos llegan a las posiciones 2, 40, 78 y 125, la columna 1 de la matriz A tendrá "0" en la primera fila, el 1^{er} punto de datos de la respuesta de impulso unitario en la segunda fila, el 2^o punto de datos de la respuesta de impulso de la unidad en el 3^a fila, etc. La segunda columna tendrá "0" hasta la fila 39 seguida de la forma de la señal. La tercera columna tendrá "0" hasta la fila 77; la cuarta columna tendrá "0" hasta la fila 124 y luego la forma de la señal. Por lo tanto, el tamaño de la matriz **A** está determinado por el número de señales identificadas (que se convierte en el número de columnas), mientras que el número de filas depende del número de muestras en la "serie cronológica".

Una vez que se ha creado la matriz del sistema, es posible resolver las energías deseadas de cada evento de radiación mediante el cálculo de la pseudoinversa de la matriz A:

$$x = \text{inv}(A'.A).A'.y \quad (\text{Ecuación 21})$$

Validación de datos

La etapa funcional final del algoritmo de procesamiento de señales en tiempo real es la etapa de validación. En esta etapa, todos los parámetros que han sido estimados por etapas algorítmicas anteriores (forma de impulso, número de eventos, tiempo de llegada y energía del evento) se combinan para reconstruir un modelo "libre de ruido" de los datos del detector.

Restando este modelo de los datos del detector de la serie cronológica real digitalizada del detector, se puede determinar la precisión de los parámetros estimados. Al igual que al examinar el residuo de un ajuste en línea recta de un conjunto de datos, si la magnitud de los residuos es pequeña, los parámetros describen bien los datos. Sin embargo, si se observan grandes residuos, los datos del detector se han estimado mal y esa parte de los datos puede rechazarse.

2.2. Procesamiento de impulsos de alto rendimiento basado en modelos: método 2

El algoritmo que se describe brevemente aquí, y con más detalle en el documento WO2010068996 (incorporado por referencia), para procesar los datos de los detectores de radiación es un algoritmo de procesamiento de señales en tiempo real basado en modelos en el que el procesamiento de señales se realiza al menos en parte en un espacio de transformada.

En una realización, el método para resolver señales individuales en los datos de salida del detector comprende:

obtener o expresar los datos de salida del detector como una serie digital (como una serie cronológica digital o un espectro digitalizado);

obtener o determinar una forma de señal (o equivalentemente la respuesta de impulso) de señales presentes en los datos;

formar una forma de señal transformada transformando la forma de señal según una transformada matemática;

formar una serie transformada transformando la serie digital según la transformada matemática, comprendiendo dicha serie transformada señales transformadas;

evaluar una función de al menos la serie transformada y la forma de señal transformada (y opcionalmente de al menos un parámetro de las señales transformadas) y de ese modo proporcionar una salida de función;

modelar la salida de la función según un modelo (por ejemplo, modelando la salida de la función como una pluralidad de sinusoides);

determinar al menos un parámetro de la salida de la función en función del modelo; y

determinar un parámetro de las señales a partir del al menos un parámetro determinado de la salida de función.

La persona experta entenderá que las señales individuales en los datos de salida del detector también pueden describirse como impulsos individuales en una salida del detector o en una señal de salida del detector (en cuyo caso la forma de la señal podría denominarse forma del impulso).

En general, se puede considerar que la forma de la señal caracteriza la interacción entre el detector y la radiación (u otra entrada detectada) que se utilizó o se está utilizando para recopilar los datos. Puede determinarse o —si se conoce a partir de mediciones, calibraciones o similares anteriores—, obtenerse (por ejemplo) de una base de datos.

5 En algunas realizaciones, transformar la serie digital según la transformada matemática comprende formar un modelo de la serie digital y transformar el modelo de la serie digital según la transformada matemática.

En ciertas realizaciones, el método incluye determinar una pluralidad de parámetros de las señales transformadas, tales como frecuencia y amplitud.

10 En determinadas realizaciones particulares, la transformada es una transformada de Fourier, tal como una transformada rápida de Fourier o una transformada discreta de Fourier, o una transformada ondulatoria. De hecho, en determinadas realizaciones, la transformada puede aplicarse de forma algo diferente a la forma de la señal y a la serie digital, respectivamente. Por ejemplo, en una realización, la transformada matemática es la transformada de Fourier, pero la forma de la señal se transforma con una transformada discreta de Fourier y la serie digital se transforma con una transformada rápida de Fourier.

En una realización, la transformada es una transformada de Fourier y la función se puede representar como

$$Y(k) = X(k)/H(k) \quad (\text{Ecuación 22})$$

15 donde $X(k)$ es la serie transformada y $H(k)$ es la forma de señal transformada.

Por tanto, este método se esfuerza por determinar un parámetro de las señales y, por lo tanto, de la mayor cantidad de datos posible, pero se apreciará que puede que no sea posible hacerlo para algunos datos (que, por lo tanto, se denominan “datos corruptos”), como se describe a continuación. Se entenderá que el término “señal” es intercambiable en este contexto con “impulso”, ya que se refiere a la salida correspondiente a eventos de detección individuales en lugar de a la señal de salida global que comprende la suma de señales individuales. También se apreciará que la posición temporal (o temporización) de una señal puede medirse o expresarse de diversas formas, como por ejemplo según el tiempo (o posición en el eje del tiempo) del máximo de la señal o el flanco anterior de la señal. Normalmente, esto se describe como el tiempo de llegada o el tiempo de detección.

25 También se entenderá que la expresión “datos del detector” se refiere a los datos que se han originado en un detector, ya sean procesados posteriormente por componentes electrónicos asociados o de otro tipo dentro o fuera del detector.

La forma de la señal (o respuesta al impulso) puede determinarse mediante un proceso de calibración que implica medir la respuesta al impulso del detector (como la respuesta en el dominio temporal o la respuesta en el dominio frecuencial) a una o más detecciones de eventos individuales para derivar de esos datos la forma de la señal o la respuesta al impulso. A continuación, se puede obtener una forma funcional de esta forma de señal interpolando los datos con (o ajustando a los datos) una función adecuada, tal como una polinómica, exponencial o cúbica. A continuación, se puede construir un filtro (como un filtro inverso) a partir de esta forma de señal del detector. Se puede realizar una estimación inicial de los parámetros de la señal mediante convolución de los datos de salida del detector con el filtro. Los parámetros de señal de particular interés incluyen el número de señales y la posición temporal (o tiempo de llegada) de cada una de las señales.

35 Los parámetros de señal particulares de interés pueden luego refinarse más.

La precisión de la estimación de los parámetros se puede determinar o “validar” comparando un modelo del flujo de datos del detector (construido a partir de los parámetros de la señal y el conocimiento de la respuesta al impulso del detector) y la salida real del detector. Si este proceso de validación determina que algunos parámetros no son lo suficientemente precisos, estos parámetros se descartan. En el análisis espectroscópico que utiliza este método, los parámetros de energía que se consideran suficientemente precisos pueden representarse como un histograma.

40 Los datos pueden incluir señales de diferentes formas. En este caso, el método puede incluir determinar, cuando sea posible, la forma de señal de cada una de las señales.

En una realización, el método incluye restar progresivamente de los datos aquellas señales que se ajusten aceptablemente a formas de señal sucesivas de varias formas de señal, y rechazar aquellas señales que no se ajusten aceptablemente a ninguna de las varias formas de señal.

2.3. Procesamiento de impulsos de alto rendimiento basado en modelos: método 3

El algoritmo que se describe brevemente aquí, y con más detalle en el documento WO2012171059 (incorporado por referencia), para procesar los datos de los detectores de radiación es un algoritmo de procesamiento de señales en tiempo real basado en modelos en el que la determinación de la ubicación y la amplitud de los impulsos dentro de la señal se logra ajustando una función a los datos de salida del detector.

El método puede comprender además detectar un impulso o impulsos en dichos datos de salida del detector:

deslizando una ventana a través de los datos a ubicaciones de ventanas sucesivas;

identificando posibles impulsos realizando un ajuste de impulsos a los datos en la ventana en cada ubicación de la ventana;

- 5 determinando cuál de los posibles impulsos tiene un inicio de impulso que cae antes y cerca del inicio de la ubicación de la ventana respectiva y una amplitud máxima que supera la desviación estándar del ruido en la ventana en la respectiva ubicación de la ventana; e

identificando como impulsos, o emitiendo, aquellos de dichos posibles impulsos que tienen un impulso que comienza a caer una, dos o tres muestras antes del inicio de la ubicación de la ventana respectiva y una amplitud pico que supera la desviación estándar del ruido en la ventana en la respectiva localización de la ventana.

- 10 En muchas realizaciones, las una o más funciones son funciones del tiempo.

En algunas de esas realizaciones, sin embargo, la persona experta apreciará que las una o más funciones pueden no ser funciones exclusivamente del tiempo.

El método puede comprender proporcionar los datos de salida del detector o convertir los datos de salida del detector en forma digital antes de ajustar las una o más funciones a los datos de salida del detector.

- 15 En una realización, las una o más funciones tienen la forma:

$$f(t) = av(t) + be^{-\alpha t} \quad \text{(Ecuación 23)}$$

En esta realización, $v(t)$ puede calcularse numéricamente, por ejemplo, mediante la fórmula

$$v(t) = e^{-\alpha t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\beta-\alpha)k} \quad \text{(Ecuación 24)}$$

para $t = 0, 1, 2, \dots$ (siendo $v(0) = 0$).

Aunque, matemáticamente, $v(t) = \frac{1}{1 - e^{-(\beta-\alpha)}} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$ cuando sea $\beta \neq \alpha$, la fórmula anterior se puede utilizar

- 20 para evaluar $v(t)$ numéricamente. Además, la fórmula anterior sigue siendo correcta incluso cuando $\alpha = \beta$, reduciendo en ese caso a $v(t) = te^{-\alpha t}$.

En una realización, las una o más funciones tienen la forma:

$$f(t) = av(t) + be^{-\alpha t} \quad \text{(Ecuación 25)}$$

y el método incluye determinar una ubicación y una amplitud del impulso con un método que comprende:

definir un impulso de referencia $p(t)$ como una convolución de $e^{\alpha t}u(t)$ con $e^{\beta t}u(t)$ (como se analiza con más detalle en el Apéndice),

- 25 determinar la ubicación τ y amplitud A de $f(t)$ a partir de $f(t) = Ap(t - \tau)$, con $\tau \leq 0$.

La persona experta apreciará que el presente aspecto de la invención contempla expresiones diferentes pero matemáticamente equivalentes de este planteamiento.

La persona experta también apreciará que:

$$p(t) = \frac{1}{\beta - \alpha} (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) u(t), \text{ cuando } \alpha \neq \beta, \text{ y}$$

$$p(t) = te^{-\alpha t}, \text{ cuando } \alpha = \beta.$$

Expandir $f(t) = Ap(t - \tau)$ da las dos ecuaciones:

$$\frac{1 - e^{-(\beta-\alpha)\tau}}{\beta - \alpha} = \gamma \frac{-b}{a}, \quad \text{(Ecuación 26)}$$

$$A = \gamma^{-1} e^{-\beta\tau} a, \tag{Ecuación 27}$$

donde $\gamma = \frac{1 - e^{-(\beta-\alpha)}}{\beta-\alpha}$. En el límite, a medida que β se vuelve igual a α , la constante γ se convierte en 1, y la ecuación

(1) se convierte en $\tau = \frac{-b}{a}$. Por lo tanto, esta forma es adecuada para su uso en un método numéricamente estable para una τ de cálculo.

5 Si $|\beta - \alpha|$ es muy pequeño, se debe tener cuidado con el cálculo de γ . Esto se puede hacer sumando los primeros términos de la expansión de Taylor:

$$\gamma = 1 - \frac{1}{2!}(\beta - \alpha) + \frac{1}{3!}(\beta - \alpha)^2 - \dots \tag{Ecuación 28}$$

10 La resolución de la ecuación (1) se puede hacer numéricamente, como con un método de bisección, especialmente porque el lado izquierdo es monótono en τ . La determinación del lado izquierdo para diferentes valores de τ puede hacerse mediante cualquier técnica adecuada, como con una expansión en serie de Taylor para una τ pequeña. (En la práctica, el valor de τ generalmente será pequeño, porque el ruido generalmente impedirá la caracterización precisa de un impulso que comenzó en un pasado distante).

La aproximación lineal en τ de la ecuación (1) es $\tau = \gamma \frac{-\gamma}{a}$, y es exacta si $\beta = \alpha$. La solución general exacta

(teóricamente) es $\tau = \frac{-1}{\beta - \alpha} \ln \left(1 + \gamma(\beta - \alpha) \frac{b}{a} \right)$, la expansión en serie de Taylor de la cual es:

$$\tau = \gamma \frac{-\gamma}{a} \left(1 - \frac{1}{2}x + \frac{1}{3}x^2 - \frac{1}{4}x^3 + \dots \right), \quad x = \gamma(\beta - \alpha) \frac{b}{a} \tag{Ecuación 29}$$

que es válida siempre que $|x| < 1$.

15 El método puede comprender restringir τ al requerir que $\tau \in [\tau^*, 0]$. Por lo tanto, debido a que el lado izquierdo de la ecuación es monótono en τ , la restricción de que $\tau \in [\tau^*, 0]$ es equivalente a la restricción sobre a y b de que $0 \leq b \leq ca$, donde el escalar c está dado por

$$c = -\gamma^{-1} \frac{1 - e^{-(\beta-\alpha)\tau^*}}{\beta - \alpha} \tag{Ecuación 30}$$

$$= \frac{e^{-(\beta-\alpha)\tau^*} - 1}{1 - e^{-(\beta-\alpha)}} \tag{Ecuación 31}$$

De hecho, si $\tau^* = -1$, entonces $c = \frac{e^{\beta-\alpha} - 1}{1 - e^{-(\beta-\alpha)}}$.

Por tanto, es posible proporcionar una optimización limitada.

Esta limitación se puede implementar con las limitaciones de que α y β no sean negativas y $\alpha > \beta$.

20 El método también puede comprender limitar la amplitud del impulso. Esto se puede utilizar, por ejemplo, para evitar que un impulso ajustado sea demasiado pequeño o demasiado grande. De hecho, con referencia a la ecuación (2) anterior, si τ está limitado a estar entre -1 y 0 , entonces A se encuentra entre $\gamma^{-1}a$ y $\gamma^{-\alpha}e^{\beta}a$. Limitar a limita, por lo tanto, la amplitud A .

25 Según otra realización particular, la función f tiene la forma de una función con tres exponenciales. En cierto ejemplo de esta realización, las constantes de tiempo τ_1, \dots, τ_3 son conocidas y diferentes (por lo que surgen menos problemas de imprecisión numérica), y el método incluye ajustar la curva:

$$A_1 e^{-\tau_1 t} + \dots + A_3 e^{-\tau_3 t}. \quad (\text{Ecuación 32})$$

En otro ejemplo de esta realización, las constantes de tiempo τ_1, \dots, τ_3 son conocidas y están en orden ascendente, de modo que $\tau_1 \leq \tau_2 \leq \tau_3$, y el ajuste de la función f incluye el uso de vectores base:

$$v_1(t) = e^{-\tau_1 t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\tau_2 - \tau_1)k} \sum_{l=0}^{k-1} e^{-(\tau_3 - \tau_2)l} \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$v_2(t) = e^{-\tau_1 t} \sum_{k=0}^{t-1} e^{-(\tau_2 - \tau_1)k} \quad (\text{Ecuación 34})$$

$$v_3(t) = e^{-\tau_1 t}. \quad (\text{Ecuación 35})$$

Como referencia, si las constantes de tiempo difieren, entonces

$$v_1(t) = \frac{\gamma_{31} - \gamma_{21}}{\gamma_{32}} \frac{1}{\gamma_{31}\gamma_{21}} e^{-\tau_1 t} - \frac{1}{\gamma_{32}\gamma_{21}} e^{-\tau_2 t} + \frac{1}{\gamma_{32}\gamma_{31}} e^{-\tau_3 t}$$

$$v_2(t) = \frac{1}{\gamma_{21}} (e^{-\tau_1 t} - e^{-\tau_2 t}), \text{ y}$$

$$v_3(t) = e^{-\tau_1 t},$$

donde $\gamma_{ji} = 1 - e^{-(\tau_j - \tau_i)}$.

- 5 Sin embargo, obsérvese que, a diferencia del caso anterior de "doble exponencial", en el que había dos incógnitas (concretamente, la ubicación y la amplitud del impulso) y dos ecuaciones (provenientes de los dos vectores base), en este caso de "tres exponenciales" hay dos incógnitas, pero tres ecuaciones. Por lo tanto, hay muchas formas diferentes de invertir estas ecuaciones (recuperando así la ubicación y la amplitud del impulso) y, en general, esta será la estrategia más robusta al ruido.
- 10 En otra realización particular, la función f tiene la forma:

$$f(t) = ae^{-\alpha t} - be^{-\beta t}, \quad (\text{Ecuación 36})$$

donde α y β son coeficientes escalares, y el método comprende determinar α y b .

Este planteamiento puede no ser adecuado en aplicaciones en las que $\alpha \cong \beta$, pero en algunas aplicaciones se puede saber que es poco probable que esto ocurra, lo que hace que esta realización sea aceptable.

En un ejemplo de esta realización, determinar la ubicación comprende determinar una ubicación $t_*(a,b)$ donde:

$$t_*(a,b) = \frac{\ln \alpha - \ln \beta}{\alpha - \beta} + \frac{\ln a - \ln b}{\alpha - \beta}. \quad (\text{Ecuación 37})$$

- 15 Se apreciará que esta realización, que utiliza $e^{\alpha t}$ y $e^{\beta t}$, tiene la desventaja de que estos términos convergen a medida que β se aproxima a α (a diferencia de los términos $v(t)$ y $e^{\alpha t}$ en la realización descrita anteriormente, que siguen siendo distintas. De hecho, podría decirse que $e^{\alpha t}$ corresponde a la cola de un impulso que ocurrió en $-\infty$ (mientras que $v(t)$ representa un impulso que ocurre en el tiempo 0).
- La función f puede ser una superposición de una pluralidad de funciones.
- 20 El método puede incluir determinar la amplitud del impulso evaluando $f = f(t)$ en $t = t_*(a, b)$.
- Por tanto, la presente invención se refiere en general a un método y un aparato para estimar la ubicación y la amplitud de una suma de impulsos a partir de observaciones ruidosas de datos de salida del detector. Presentó la estimación de máxima verosimilitud como punto de referencia (que es equivalente a la estimación del error cuadrático medio mínimo, ya que el ruido es ruido gaussiano blanco aditivo).
- 25 El método puede comprender el filtrado de paso bajo de los datos antes de ajustar las una o más funciones.

En una realización, sin embargo, el método comprende adaptar las una o más funciones para permitir una aberración de baja frecuencia en los datos de salida del detector. Esto se puede hacer, en un ejemplo, expresando las una o más funciones como una combinación lineal de tres funciones exponenciales (como $f(t) = ae^{-at} - be^{-\beta t} + ce^{-\gamma t}$).

5 En una cierta realización, el método comprende forzar cualquier estimación que tenga el impulso que comienza dentro de la ventana a que comience en un límite de la ventana.

En una realización particular, el método comprende maximizar el tamaño de la ventana o variar el tamaño de la ventana.

En una realización, el método comprende transformar los datos de salida del detector con una transformada antes de ajustar las una o más funciones a los datos de salida del detector como transformados.

10 Este planteamiento puede ser deseable en aplicaciones en las que el análisis se simplifica si se realiza en un espacio de transformada. En tales situaciones, el método también puede comprender aplicar posteriormente una transformada inversa a las una o más funciones, aunque en algunos casos puede ser posible obtener la información deseada en el espacio de transformada.

La transformada puede ser una transformada de Laplace, una transformada de Fourier u otra transformada.

15 En una realización, estimar la ubicación del pico comprende minimizar un desfase entre el inicio de una ventana y el inicio del impulso.

En una realización particular, el método comprende además detectar un impulso o impulsos en los datos:

deslizando una ventana a través de los datos a ubicaciones de ventanas sucesivas;

identificando posibles impulsos realizando un ajuste de impulsos a los datos en la ventana en cada ubicación de la ventana;

20 determinando cuál de los posibles impulsos tiene un inicio de impulso que cae antes y cerca del inicio de la ubicación de la ventana respectiva y una amplitud máxima que excede la desviación estándar del ruido en la ventana en la respectiva ubicación de la ventana; e

25 identificando como impulsos, o emitiendo, aquellos de los posibles impulsos que tienen un impulso que comienza a caer una, dos o tres muestras antes del inicio de la ubicación de la ventana respectiva y una amplitud pico que supera la desviación estándar del ruido en la ventana en la respectiva localización de la ventana.

Según un segundo aspecto general, la invención proporciona un método para localizar un impulso en los datos de salida del detector, que comprende:

ajustar una pluralidad de funciones a los datos;

30 determinar una función de mejor ajuste, siendo cualquiera de dichas funciones que optimice una métrica elegida al modelar dichos datos; y

determinar una ubicación y una amplitud de un pico de dicho impulso a partir de dicha función de mejor ajuste.

En una realización, cada una de las una o más funciones es una superposición de una pluralidad de funciones.

2.4. Procesamiento de impulsos de alto rendimiento basado en modelos: método 4

35 El algoritmo que se describe brevemente aquí, y con más detalle en el documento WO2015085372 (incorporado por referencia), para procesar los datos de los detectores de radiación es un algoritmo de procesamiento de señales en tiempo real basado en modelos en el que la resolución de señales individuales en los datos de salida del detector comprende transformar los datos del detector para producir datos escalonados, o usar datos que están ya en forma escalonada, y detectar al menos una señal y estimar un parámetro de la señal en función, al menos parcialmente, de los datos escalonados.

40 El método comprende transformar los datos de salida del detector para producir datos escalonados o datos integrales, detectar al menos un evento y estimar una energía de impulso asociada con el evento.

En algunas realizaciones, la detección del al menos un evento ocurre ajustando una forma de impulso prevista con un segmento de ventana deslizante de los datos de forma de impulso transformados.

45 En algunas realizaciones, el método comprende además la etapa de detectar picos en la señal, en la que se aplica una métrica de detección a los datos transformados. En algunas realizaciones, la métrica de detección se compara con un umbral simple: si la métrica es menor que el umbral, entonces no se considera que haya impulsos presentes; si supera el umbral, entonces puede haber presentes uno o más impulsos. La declaración de picos significativos en la métrica de detección se realiza cuando la pendiente del pico que cambia de positivo a negativo indica un evento.

Se apreciará que puede que no sea posible caracterizar adecuadamente todos los datos (los datos no caracterizados se denominan “datos corruptos”); estos datos corruptos pueden opcionalmente ser rechazados. Se entenderá que el término “señal” es intercambiable en este contexto con “impulso”, ya que se refiere a la salida correspondiente a eventos de detección individuales en lugar de a la señal de salida global que comprende la suma de señales individuales. También se apreciará que la posición temporal (o temporización) de una señal puede medirse o expresarse de diversas formas, como por ejemplo según el tiempo (o posición en el eje del tiempo) del máximo de la señal o el flanco de avance de la señal. Normalmente, esto se describe como el tiempo de llegada o el tiempo de detección.

5 También se entenderá que la expresión “datos del detector” se refiere a los datos que se han originado en un detector, ya sean procesados posteriormente por componentes electrónicos asociados o de otro tipo dentro o fuera del detector.

10 El método comprende opcionalmente el borrado de muestras dentro de una ventana establecida alrededor del flanco ascendente para asegurar que se excluye de los cálculos la región del borde de cada impulso, donde los datos reales del impulso transformados difieren de un impulso idealmente transformado.

El método comprende opcionalmente una evaluación de la varianza de las estimaciones de energía en los datos y la validación de los datos modelados.

15 El método puede incluir construir un modelo de los datos a partir de la salida de datos procesados y determinar la precisión del modelado basándose en una comparación entre los datos de salida del detector y el modelo.

20 En una realización ejemplar del método 4, el método incluye crear un modelo de la salida del detector usando los parámetros de la señal en combinación con la respuesta al impulso del detector. En otra realización ejemplar, el método puede incluir realizar la detección de errores comparando la salida real del detector con el modelo de la salida del detector utilizando, por ejemplo, mínimos cuadrados.

El método puede incluir descartar estimaciones de energía que consideradas no suficientemente precisas. En una realización, el método incluye presentar todas las estimaciones de energía suficientemente precisas en un histograma.

3. Reducción del apilamiento de impulsos

25 Incluso cuando se utiliza un método apropiado de procesamiento de impulsos de alta frecuencia, seguirá habiendo situaciones en las que no sea posible distinguir entre llegadas de impulsos poco espaciadas. Tal situación ocurre cuando llegan múltiples impulsos dentro de la ventana en la que el algoritmo de detección de impulsos es capaz de determinar la llegada de distintos impulsos. Dependiendo de la frecuencia de muestreo del ADC, de la estadística de llegada de impulsos y de la electrónica del detector, la cantidad total de apilamiento puede ser del orden del 5% a 1 Mc/s. El apilamiento puede ser el resultado de detectar 2 impulsos como un solo impulso; sin embargo, también es posible detectar 3 impulsos como 1 impulso, mientras que detectar 4 o más impulsos como 1 impulso es posible pero mucho menos probable.

3.1.Solución del problema: eliminación del apilamiento de dos impulsos

Si el espectro subyacente de energía de rayos X se denota x, entonces el espectro con apilamiento de dos impulsos es:

$$y = x + k_1 x * x \tag{Ecuación 38}$$

35 donde * denota convolución, y k_1 es el coeficiente de apilamiento que se estima a partir de la observación de datos o se calcula a partir de la teoría. Para estimar el espectro subyacente x, se realiza el siguiente proceso:

1. Tomar la FFT de cada lado, donde la convolución ahora se convierte en multiplicación, por lo que

$$Y(n) = X(n) + k_1 X(n)^2 \tag{Ecuación 39}$$

2. En cada franja n de FFT, resolver la ecuación cuadrática $k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0$, teniendo en cuenta que tanto X(n) como Y(n) son complejas. La solución es

$$\hat{X}(n) = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4k_1 Y}}{2k_1} \tag{Ecuación 40}$$

3. La solución correcta que ha de tomarse es la solución “positiva”. También se basa en tomar la solución correcta para la raíz cuadrada compleja.

4. Calcular ahora el espectro sin apilamiento tomando la FFT inversa de \hat{X} .

$$\hat{x} = IFFT(\hat{X}) \quad (\text{Ecuación 41})$$

Usando el coeficiente de apilamiento correcto, se muestra que el apilamiento se elimina por completo.

3.2.Solución del problema: eliminación del apilamiento de dos y tres impulsos

5 En la práctica, para los espectros medidos en el sistema de escaneo de rayos X, cuando solo se eliminaron dos apilamientos de impulsos, se observó que seguía quedando algún apilamiento residual a energías más altas. Esto indicó que había un apilamiento de tres (o más) impulsos no eliminados en estas energías superiores. Para eliminar parte, y con suerte la mayoría, de este apilamiento residual, el modelo se amplía ahora para incluir un apilamiento de 3 impulsos, por lo que el espectro recibido viene dado por:

$$y = x + k_1 x * x + k_2 x * x * x \quad (\text{Ecuación 42})$$

donde * denota convolución, y k_1 y k_2 son los coeficientes de apilamiento para un apilamiento de dos y tres impulsos, respectivamente. Para estimar el espectro subyacente x , se realiza el siguiente proceso:

- 10 1. Tomar la FFT de cada lado, donde la convolución ahora se convierte en multiplicación, por lo que

$$Y(n) = X(n) + k_1 X(n)^2 + k_2 X(n)^3 \quad (\text{Ecuación 43})$$

2. Para cada una de las N franjas en la FFT, resolver la ecuación cúbica

$$k_2 X(n)^3 + k_1 X(n)^2 + X(n) - Y(n) = 0 \quad (\text{Ecuación 44})$$

teniendo en cuenta que tanto X como Y son complejas. Como la cuadrática, hay una solución de forma cerrada; sin embargo, la solución a la cúbica es considerablemente más complicada de la siguiente manera:

- a. Dividir por k_2 , para que cada ecuación tenga ahora la forma

$$X(n)^3 + aX(n)^2 + bX(n) + c(n) = 0 \quad (\text{Ecuación 45})$$

- 15 observando que $X(n)$ y $c(n)$ son complejos.

- b. Calcular

$$Q = \frac{a^2 - 3b}{9}$$

$$R = \frac{2a^3 - 9ab + 27c}{54} \quad (\text{Ecuación 46})$$

- c. Calcular

$$P = \sqrt{R^2 - Q^3} \quad (\text{Ecuación 47})$$

- d. Comprobar P y negarlo si es deseable. Si $\text{Re}(\text{conj}(R).P) < 0$, entonces $P = -P$. Esto es para asegurar que se obtengan las raíces cúbicas correctas en la etapa siguiente.

- 20 e. Calcular

$$A = -\sqrt[3]{R + P} \quad (\text{Ecuación 48})$$

- f. Calcular

$$B = 0 \quad \text{si } A = 0$$

$$B = \frac{Q}{A} \quad \text{en los demás casos} \quad (\text{Ecuación 49})$$

- g. Calcular las 3 soluciones de la ecuación cúbica:

$$r_1 = (A+B) - \frac{a}{3}$$

$$r_2 = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} + i\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B) \quad (\text{Ecuación 50})$$

$$r_3 = -\frac{A+B}{2} - \frac{a}{3} - i\frac{\sqrt{3}}{2}(A-B)$$

3. Elegir la solución para asignarla a $\hat{X}(n)$. La solución correcta es la que tiene menor magnitud de r_2 y r_3 .

$$\hat{X}(n) = r_2 \quad \text{si } |r_2| \leq |r_3|$$

$$\hat{X}(n) = r_3 \quad \text{si } |r_2| > |r_3| \quad (\text{Ecuación 51})$$

4. Calcular ahora el espectro sin apilamiento tomando la FFT inversa de \hat{X}

$$\hat{x} = \text{IFFT}(\hat{X}) \quad (\text{Ecuación 52})$$

Usando los coeficientes de apilamiento correctos, en la Figura 6 se muestra que el apilamiento se elimina por completo. Si se procesan los mismos datos con el solucionador cuadrático, que asume solo dos apilamientos de impulsos, se puede ver en la Figura 7 que todavía hay apilamientos residuales en el espectro a valores de energía más altos y una ligera distorsión del espectro a energía más baja.

4. Diseño de una ventana de aplanamiento espectral óptima

El aplanamiento del espectro de energía es particularmente útil en sistemas de detección de rayos X donde la duración de la medición del espectro puede ser muy corta para lograr una alta resolución espacial en la imagen de muestra. Se ha descubierto que los espectros de energía típicos producidos por un sistema de barrido de rayos X de energía amplia tienden a tener componentes de baja frecuencia casi exclusivamente. Inicialmente para reducir el ancho de banda de comunicación, pero también para reducir los requisitos de cálculo y proporcionar el beneficio adicional de aplanar el espectro, los datos del espectro se pasan a través de una FFT.

Después de la FFT, la mayoría de las franjas FFT se descartan, ya que solo es necesario mantener aproximadamente 1/8 de las franjas FFT para reconstruir con precisión el espectro de energía. Por ejemplo, si se calculan 512 franjas de histograma, solo se retienen 32 franjas FFT complejas. Las 32 últimas franjas FFT complejas son solo el conjugado complejo de estas franjas, y las 448 franjas restantes no contienen (casi) información.

El efecto de descartar estas franjas FFT es:

1. Proporcionar rechazo al ruido.
2. Filtrar el espectro reconstruido (después de la iFFT).

Sin embargo, si se aplica una ventana FFT rectangular, después de la iFFT, el espectro medido se convoluciona sustancialmente con una función sinc. Esto no es deseable debido a la gran extensión de la función sinc y a la gran sobreoscilación.

Para mejorar el diseño de la función de la ventana FFT, se adoptó el siguiente planteamiento:

1. Especificar la ventana de "dominio temporal" deseada. En este ejemplo, se utiliza un impulso de coseno elevado.
2. Tomar la FFT de la ventana deseada (simétrica alrededor de 0 para dar solo una salida de FFT real).
3. Multiplicar este resultado solo por la ventana rectangular existente.
4. Multiplique además el resultado por una ventana que tenga un ligero ahusamiento en el borde para reducir aún más la sobreoscilación resultante de multiplicar por una ventana rectangular.

La Figura 8 ilustra el resultado obtenido. La ventana rectangular, si se usa por sí sola, da como resultado que el espectro medido se convoluciona con una función sinc, con un ancho en la amplitud media de aproximadamente 10 muestras, pero oscilaciones significativas, alrededor del 22% en el primer pico negativo. Mediante una definición cuidadosa de la ventana w de usuario, es posible lograr una respuesta en el dominio "temporal" que tiene

aproximadamente la naturaleza de un coseno elevado, con muy poca naturaleza oscilatoria, alrededor del 0,2%. Sin embargo, la anchura en amplitud media aumenta a alrededor de 20 muestras.

Si bien se usaron FFT y truncamiento de datos para reducir la carga de comunicación y de cálculo, el beneficio adicional de una función de ventana diseñada apropiadamente es que los espectros de energía recibidos se aplanan antes del procesamiento, lo que resulta en una reducción significativa del ruido en las estimaciones del Z efectivo y el potencial para usar menos franjas en la estimación del Z efectivo a la vez que se logra un resultado similar.

5. Calibración de parámetros de impulso

El siguiente es un método adecuado para la calibración de los parámetros de impulso recibidos α y β para impulsos de la forma:

$$p(t) = \int_{t-T_a}^t A \left[\exp(-\alpha(\tau-t_0)) - \exp(-\beta(\tau-t_0)) \right] d\tau \quad (\text{Ecuación 53})$$

donde α y β son las constantes de tiempo del flanco descendente y del flanco ascendente respectivamente, t_0 es el tiempo de llegada del impulso, T_a es la ventana de promediado del impulso y A es un factor de escala del impulso relacionado con la energía del impulso.

Los parámetros de impulso se pueden estimar a partir de una captura de serie cronológica de la señal del detector digitalizada de la siguiente manera:

1. Obtener una serie de muestras de la señal digitalizada del detector, obtenida durante un periodo con los rayos X activados, y siendo la frecuencia del impulso general lo suficientemente baja como para extraer impulsos aislados. Dependiendo de los parámetros del impulso, con impulsos rápidos puede ser adecuado utilizar aproximadamente 500k muestras a una frecuencia de muestreo de 100 MHz y a una frecuencia de recuento de hasta 500k impulsos por segundo.
2. Extraer un bloque de muestras de longitud (número \times frecuenciaDeMuestreo / frecuenciaNominalDeRecuento). Para número = 40 y una frecuencia de muestreo de 100 MS/s, la frecuencia nominal de recuento es 100 kcs; esto es 40.000 muestras.
3. Calcular el umbral de ruido umbr:
 - a. Histograma del bloque de datos: las franjas del histograma son números enteros en el intervalo de los datos muestreados $\pm 2^{13}$ para datos de 14 bits con signo.
 - b. Encontrar la franja con el valor más alto. Esta es la media de ruido estimada.
 - c. Encontrar la franja donde el nivel cae a 0,63 del pico. La diferencia con el pico es la desviación estándar (sigma) de ruido estimada.
 - d. Establecer el umbral de ruido a 2 sigma de la media. $\text{umbr} = \text{mediaDeRuido} + 2 \times \text{sigmaDeRuido}$. También se pueden utilizar otros factores distintos de 2, dependiendo de la aplicación.
4. Calcular el umbral de señal umbs:
 - a. Filtrar el bloque de datos con el filtro de "salto" de la forma [-1 -1 -1 0 1 1 1].
 - b. Establecer el umbral de detección en umbr y aumentarlo en etapas de $4 \times \text{sigmaDeRuido}$.
 - c. Establecer un valor umbral de los datos filtrados y determinar el número de tandas en las que los datos superen umbs. Una "tanda" es una secuencia continua de muestras que superan el umbs, terminada en cada extremo por una muestra por debajo de umbs.
 - d. Seguir incrementando el umbral de detección hasta que en la etapa k $\text{ntandas}(k) - \text{ntandas}(k-1) \geq -1$. Es decir, hasta que el número de tandas deje de disminuir. (Nota: este criterio de detención puede producir un umbral pesimista a frecuencias de recuento más altas).
 - e. Establecer umbs para que sea el umbral actual en la etapa k.
5. Estimar la frecuencia de recuento como $\text{ntandas}(k) / (\text{longitud de la memoria intermedia} / \text{frecuencia de muestreo})$.
6. Etapa opcional: si la estimación de la frecuencia de recuento es menos de la mitad o más del doble de la frecuencia nominal de recuento, volver a realizar el cálculo del umbral de señal y ruido con una longitud de memoria intermedia de datos calculada a partir de la estimación de la frecuencia de recuento para acercarse a número impulsos detectados.

7. Implementar la máquina de estado de detección de impulsos. En primer lugar, detectar $n_{i1} = 50$ impulsos para estimar la longitud del impulso l_{oni} (inicialmente poner l_{oni} a 0). A continuación, detectar $n_{i2} = 600$ impulsos para la estimación y optimización completa de los parámetros. El estado de detección de impulsos mecanizado es el siguiente:
- 5 a. Entrar en el estado “buscarImpulso”.
- b. Cuando un valor supere $umbs$, entrar en el estado “detectarImpulso”.
- c. En el estado “detectarImpulso”, buscar el valor por debajo de $umbs$. Entrar en el estado “buscarImpulsoFinal”.
- d. En el estado “buscarImpulsoFinal”,
- 10 i. Si $valor > umbs$, se ha producido una nueva detección antes del final del impulso. Entrar en el estado “apilamientoDelImpulsos”.
- ii. Si $valor < umbr$ y $longitudDelImpulso > l_{oni}$, se detecta el final de un impulso válido; registrar los parámetros de inicio/fin/longitud del impulso y volver a entrar en el estado “buscarImpulso”.
- e. En el estado “apilamientoDelImpulsos”, buscar el valor por debajo de $umbs$, luego entrar en el estado “buscarApilamientoFinal”.
- 15 f. En “buscarApilamientoFinal”, cambiar de estado:
- i. Si $valor > umbs$, se ha producido una nueva detección antes del final de un evento de apilamiento, lo que indica un apilamiento adicional. Volver al estado “apilamientoDelImpulsos”.
- ii. Si $valor < umbr$ y $longitudDelImpulso > l_{oni}$, se ha alcanzado el final del evento de apilamiento. Registrar los detalles del impulso y marcarlos como apilamiento para que no se use en la calibración. En la práctica, todos los detalles sobre este evento de impulso podrían descartarse, ya que no se utilizará en la calibración.
8. Para los primeros n_{i1} impulsos válidos (aislados), hacer lo siguiente:
- 25 a. Calcular el tiempo (t_0) de llegada, el exponente (β) del flanco ascendente, el exponente (α) del flanco descendente, el tiempo promedio (T_a), la señal máxima ($S_{m\acute{a}x}$), el tiempo del máximo ($t_{m\acute{a}x}$), la energía (E) del impulso.
- b. Algunos impulsos pueden rechazarse en este punto si parece que en realidad hay más de un impulso (apilamiento no detectado); esto se indica mediante múltiples cruces por cero en la derivada de los datos filtrados (derivada cero = ubicación $m\acute{a}x/m\acute{i}n$ local).
- 30 c. Establecer la estimación de la longitud del impulso en $7 / mediana(\alpha)$. Esto produce un valor aproximado para la muestra en el que el impulso caerá a 0,001 del valor pico. Se puede obtener un cálculo más preciso utilizando α y β si es necesario, pero el umbral de 0,001 es algo arbitrario en cualquier caso, y en la cola el impulso converge lentamente a cero.
9. Volver a la etapa 8 y obtener n_{i2} impulsos. Se ha utilizado $n_{i2} = 600$, pero esto es algo arbitrario y se basa en la cantidad de impulsos que había realmente en los datos de prueba. Solo la mitad de estos impulsos se utilizará finalmente en la calibración, por lo que n_{i2} debe ser el doble de la cantidad de impulsos que se requieran (deseen) en el proceso de calibración.
- 35 10. Para cada uno de los n_{i2} impulsos:
- 40 a. Calcular el tiempo (t_0) de llegada, el exponente del flanco ascendente (β), el exponente del flanco descendente (α), el tiempo promedio (T_a), la señal máxima ($S_{m\acute{a}x}$), el tiempo del máximo ($t_{m\acute{a}x}$), la energía del impulso (E). Nuevamente, algunos impulsos pueden ser rechazados si parecen haber sido apilados sin ser detectados.
- b. Clasificar los impulsos en una secuencia de energía creciente.
- 45 c. Calcular los valores de energía de los cuartiles superior e inferior. Desechar los impulsos en los cuartiles superior e inferior. Esto elimina de manera efectiva los valores de energía atípicos de la muestra, aunque en una mezcla de energías de impulsos esto puede no ser lo mejor que se puede hacer. De hecho, puede ser mejor ordenar por función de coste α , β o mínimos cuadrados y descartar en función de esto. Por ahora, la ordenación de la energía parece adecuada.
- d. Para los impulsos restantes, ahora solo la mitad de n_{i2} (aproximadamente 300 si $n_{i2} = 600$):

- i. Calcular una forma de impulso estimada a partir de los parámetros alfa, beta, Ta, t0.
- ii. Normalizar el impulso real recibido por su energía.
- iii. Calcular la función de coste = suma de errores cuadráticos entre los impulsos estimados y reales (ambos están normalizados para ser energía unitaria nominal).

5 iv. Realizar una optimización iterativa de mínimos cuadrados para obtener estimaciones óptimas de alfa, beta, Ta, junto con la función de coste final y el número de iteraciones para la convergencia del optimizador de mínimos cuadrados. Nota: Se ha implementado un optimizador aproximado de LS (mínimos cuadrados, por sus siglas en inglés) de Gauss-Newton. En lugar de una jacobiana 3x3 completa, se calcula una serie de jacobianas unidimensionales en cada dimensión. Estas son derivadas numéricas, por lo que podrían estar sujetas a errores sustanciales. Esto significa que la trayectoria no siempre está en la dirección óptima, con mayor riesgo de divergencia si la función no se comporta bien. No se recomienda utilizar la función de esta forma, pero si no se dispone de un optimizador de LS eficiente, se podría proporcionar una implementación más robusta.

10
15 11. A partir de los resultados optimizados de mínimos cuadrados, establecer los valores finales de alfa, beta, Ta. Puede ser la mediana o los valores medios de los parámetros optimizados. El valor de t0 se puede establecer arbitrariamente de modo que a) t0 = 0 (y el impulso, por lo tanto, tenga alguna señal para la muestra k < 0) o b) t0 = techo(Ta), en cuyo caso el impulso es cero en k = 0 y tiene un valor positivo de k >= 1.

12. La forma p(t) del impulso se puede calcular directamente a partir de la fórmula y de los Ta, α y β estimados.

6. Método para el seguimiento del valor de referencia

20 Para determinar correctamente la energía de los impulsos, es deseable tener en cuenta el desplazamiento de CC (o el valor de referencia de la señal, que se usa indistintamente) en la señal del detector. Este desplazamiento de CC puede surgir de varias fuentes, incluidos los niveles de polarización de la electrónica analógica, la conversión de analógico a digital y el detector en sí. La teoría de control sugiere que el error de desplazamiento de CC se puede rastrear y reducir a cero generando una señal de retroalimentación que sea proporcional a la integral de la señal; sin embargo, existe un problema significativo en el caso del procesamiento de impulsos. Los impulsos introducen características adicionales a la señal que tienen una media distinta de cero. Esto introduce una polarización que depende de la energía del impulso, de la frecuencia de recuento y de la forma del impulso, que corrompe la señal de retroalimentación y evita que el seguimiento del bucle de control estándar elimine con éxito el desplazamiento de CC.

30 Para superar este problema, la salida de la señal del detector se procesa digitalmente para eliminar los efectos de conformación de impulsos introducidos por la electrónica analógica. Cuando no hay ningún desplazamiento de CC, esta señal procesada da como resultado una forma de señal que tiene un valor constante en las regiones entre las llegadas de impulsos y un cambio rápido de valor donde llegan los impulsos. Si hay presente un desplazamiento de CC residual en la señal del detector, la señal procesada cambia linealmente con el tiempo en las regiones entre llegadas de impulsos. Se puede formar una señal de retroalimentación de errores que sea proporcional a la pendiente de esta señal tomando la diferencia entre dos muestras. No es preciso que estas muestras sean consecutivas, sino que pueden estar separadas por "N" muestras en el tiempo. Al elegir un valor apropiado para "N", se puede encontrar una señal con una relación señal/ruido adecuada para generar un bucle de retroalimentación.

40 Para reducir el impacto de la polarización introducida por los eventos de impulso, el bucle de seguimiento del valor de referencia no se actualiza cuando llega un impulso entre las dos muestras utilizadas para generar la señal de error de retroalimentación.

El impacto de la polarización puede reducirse aún más evitando que el bucle de seguimiento del valor de referencia se actualice cuando llega un impulso dentro de una región de protección en cualquier lado de las muestras utilizadas para generar la señal de error de retroalimentación.

45 Cabe señalar que debido a la polarización causada por la llegada del impulso, el valor de la señal procesada del detector aumenta cada vez que llega un impulso. Esto acaba haciendo que los registros internos usados para almacenar el valor de la señal se desborden. Se monitoriza el valor de la señal procesada y, cuando se detecta un desbordamiento, se evita que el bucle de seguimiento del valor de referencia se actualice hasta que hayan pasado los efectos del desbordamiento.

50 Denotando la señal de impulso procesada en la muestra n como x(n), las siguientes etapas resumen el procedimiento para calcular la actualización de la estimación del desplazamiento de CC, denotado por CC(n):

1. Calcular la diferencia entre muestras de señal separadas por N muestras.
2. Determinar si ha de aplicarse la actualización. No aplicar la actualización de DC si
 - a. Se detecta la llegada de un impulso en una muestra entre las muestras n y n + N.

- b. El régimen transitorio de un impulso detectado anteriormente no ha decaído. Se puede considerar que el régimen transitorio dura M muestras después de que se detecta un impulso.
- c. La señal procesada $x(n)$ está a punto de alcanzar un desbordamiento positivo y volver a un valor negativo grande. No procesar si $x(n)$ está dentro de un umbral Δ de desbordamiento positivo o negativo.

5 3. Si se va a aplicar la actualización de CC, calcular entonces la actualización del desplazamiento de CC como

$$CC(n) = CC(n-1) + k [x(n) - x(n-N)] \quad \text{(Ecuación 54)}$$

donde $k \ll 1$ es la ganancia de actualización y se elige para lograr el equilibrio deseado entre respuesta rápida y el ruido en la estimación de CC.

10 Por último, se puede usar el mismo soporte físico para rastrear múltiples desviaciones del valor de referencia en múltiples canales en un esquema multiplexado por división de tiempo. Los valores de las variables del bucle de seguimiento para cada canal se almacenan/cargan al cambiar entre canales. Se evita que el bucle de seguimiento del valor de referencia se actualice hasta que hayan pasado los efectos transitorios del cambio de canal del detector.

7. Colimación

15 Se puede utilizar una colimación muy ajustada dentro del escáner para minimizar el efecto de la dispersión en el espectro medido. Esto es particularmente importante cuando se producen transiciones de alta a baja o de baja a alta intensidad. Los resultados generales del sistema han demostrado que la dispersión se ha abordado en gran medida mediante la inclusión de una colimación ajustada.

8. Cálculo de referencia

20 El propósito del cálculo de referencia es establecer la intensidad media de cada detector. Este valor se utiliza para un cambio de escala de todos los histogramas de intensidad a una energía unitaria. Esto se denomina comúnmente *normalización*. Se calcula una intensidad de referencia para cada detector. La intensidad de referencia se calcula como la intensidad media sobre los N primeros cortes en un escaneo. La intensidad es la 1ª franja de la FFT o la suma de todos los elementos de valor complejo en el vector FFT.

25 También hay un histograma de referencia calculado de la misma manera: promediando los histogramas de energía medidos para los N primeros cortes. El histograma de referencia se utiliza para normalizar todos los histogramas medidos a fin de garantizar que las variaciones entre tandas en el flujo de rayos X no afecten al cálculo del Z efectivo.

La referencia se mide durante un intervalo:

- 1. En el que los rayos X están estabilizados, por lo que el flujo de rayos X no varía y no variará durante la duración del escaneo (en la práctica, la fuente de los Smith sí varía, especialmente cuando falla, y esto puede afectar a los resultados).
- 30 2. Anterior a la llegada de la muestra sujeta a evaluación.

La implementación actual usa una duración medida en cortes. Esto puede causar problemas cuando la velocidad de corte se reduce, por ejemplo, por debajo de 5 ms; la recopilación de referencia puede ejecutarse en la muestra sujeta a evaluación. Esta debe corregirse de 2 maneras para que sea completamente robusta:

- 35 1. Utilizar la velocidad de corte y la velocidad de escaneo configuradas para calcular la duración para la que se recopila la referencia, no un número establecido de cortes.
- 2. Incorporar la señal de detección de objetos para garantizar que la recopilación de referencia se detenga inmediatamente si se detecta una muestra antes de que finalice la duración de la referencia; se debe advertir al usuario cuando esto ocurra, ya que el rendimiento no estaría garantizado.

Se puede obtener un Z efectivo más preciso y coherente si se usa una recopilación de referencia de mayor duración.

REIVINDICACIONES

1. Un método para revisar uno o más artículos de carga o equipaje, el método comprende las etapas de:

irradiar uno o más elementos utilizando una fuente de radiación incidente;

5 detectar paquetes de radiación que emanan del interior o pasan a través de uno o más artículos de carga o equipaje como resultado de la irradiación de la radiación incidente, utilizando una pluralidad de detectores, estando configurado cada detector para producir un impulso eléctrico causado por los paquetes detectados que tienen un tamaño o una forma característicos dependientes de la energía de los paquetes;

procesar cada impulso eléctrico usando uno o más procesadores digitales para determinar el tamaño o la forma característicos;

10 generar un espectro de energía del detector de inspección para cada detector de las energías de los paquetes detectados; y

15 medir un número atómico efectivo Z de un material desconocido asociado con uno o más artículos de carga o equipaje en función de los espectros de energía del detector de inspección en comparación con las mediciones de calibración realizadas durante una etapa de calibración; **caracterizado porque** la etapa de calibración comprende tomar medidas obtenidas de la irradiación de muestras de diferentes grosores de diferentes materiales de calibración de número atómico efectivo conocido Z , para generar espectros de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración en función de Z , del grosor x del material de calibración, y de las franjas B del histograma;

sumar los espectros recibidos en cada grosor para minimizar el ruido en los espectros;

20 tomar un espectro de referencia $I_0(B)$ para un grosor de material cero;

calcular las características de transmisión de calibración $T_x(Z, B, x)$ en función de Z , del grosor x del material y de las franjas B del histograma de energía dividiendo el espectro de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración por un espectro de referencia $I_0(B)$; y

25 calcular las relaciones de transmisión total de calibración $R(Z, x)$ usando una suma sobre las franjas B del histograma de energía del espectro de energía $I(Z, x, B)$ del detector de calibración dividida por una suma sobre las franjas B del histograma de energía del espectro de referencia $I_0(B)$.

2. El método de la reivindicación 1 en donde las medidas de la etapa de calibración comprenden tomar las medidas de calibración en un detector para su uso en todos los detectores.

30 3. El método de la reivindicación 1 en donde la etapa de calibración comprende tomar medidas de calibración individuales para su uso en diferentes grupos de detectores adyacentes o medidas individuales en cada detector para su uso en cada detector.

4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3

35 en donde la etapa de medir el número atómico efectivo Z del material desconocido comprende usar las características de transmisión de calibración y las relaciones de transmisión total de calibración como tablas de calibración para estimar el número atómico efectivo Z del material asociado con uno o más elementos de los espectros de energía del detector de inspección.

5. El método de la reivindicación 4 en donde la etapa de medir el número atómico efectivo Z del material desconocido comprende:

40 obtener un espectro recibido $I(B)$ del espectro de energía del detector de inspección para cada detector o integrado entre intervalos de puerta o entre detectores;

calcular una relación de transmisión total R del material desconocido con respecto al espectro de referencia;

para cada valor de Z de la tabla de calibración, estimar un correspondiente grosor de material a partir de las relaciones de transmisión total de calibración, y calcular los espectros recibidos previstos para el correspondiente grosor de material; y

45 calcular el número atómico efectivo Z como un valor Z que minimiza una función de coste $C(Z)$ de los espectros recibidos previstos.

6. El método de la reivindicación 5 en donde la función de coste se interpola entre los valores de la tabla de calibración de Z para proporcionar una precisión arbitraria del número atómico efectivo Z .

7. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6 en donde las tablas de calibración medidas en los diversos grosores se aumentan por interpolación entre los diversos grosores para proporcionar una tabla de calibración para cada material de calibración en un conjunto común de relaciones de transmisión total.
- 5 8. El método de una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 7 en donde la tabla de calibración para cada material de calibración en un conjunto común de relaciones de transmisión total se aumenta por interpolación para valores Z intermedios entre los números atómicos conocidos Z de las muestras o extrapolación por encima y por debajo de la números atómicos conocidos Z de las muestras.

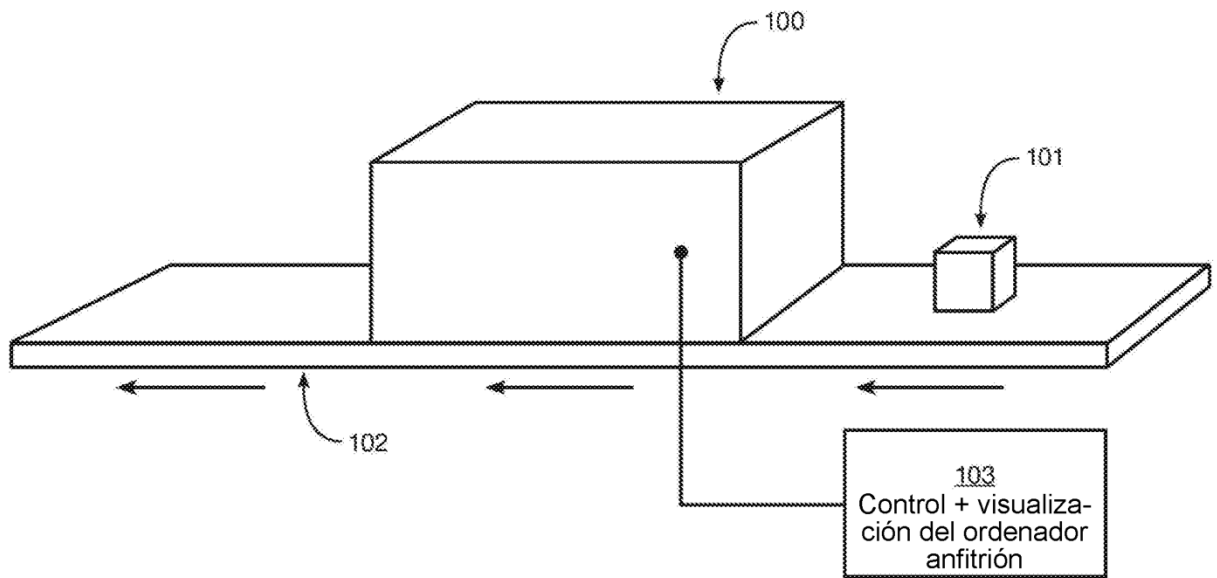


Figura 1

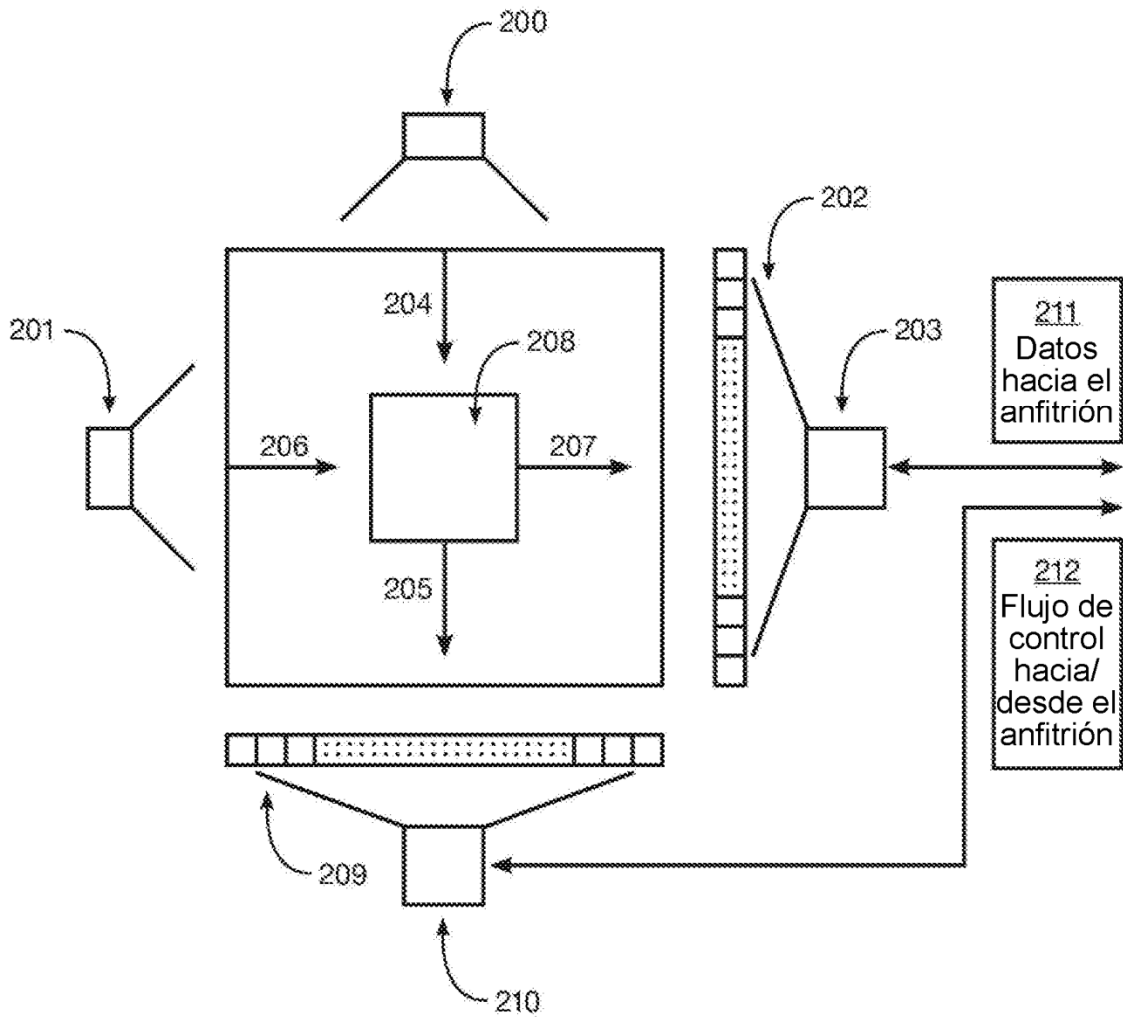


Figura 2

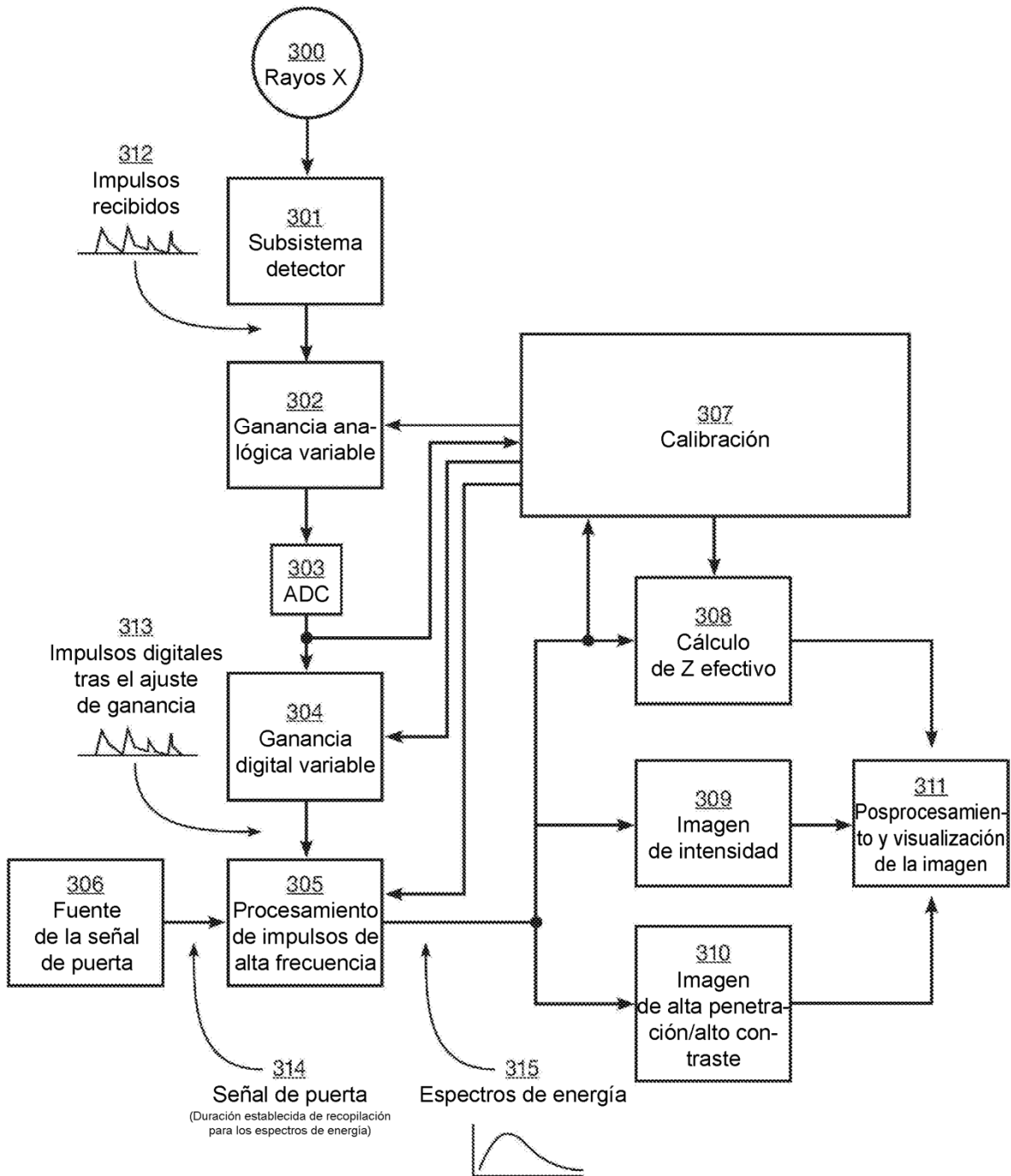


Figura 3

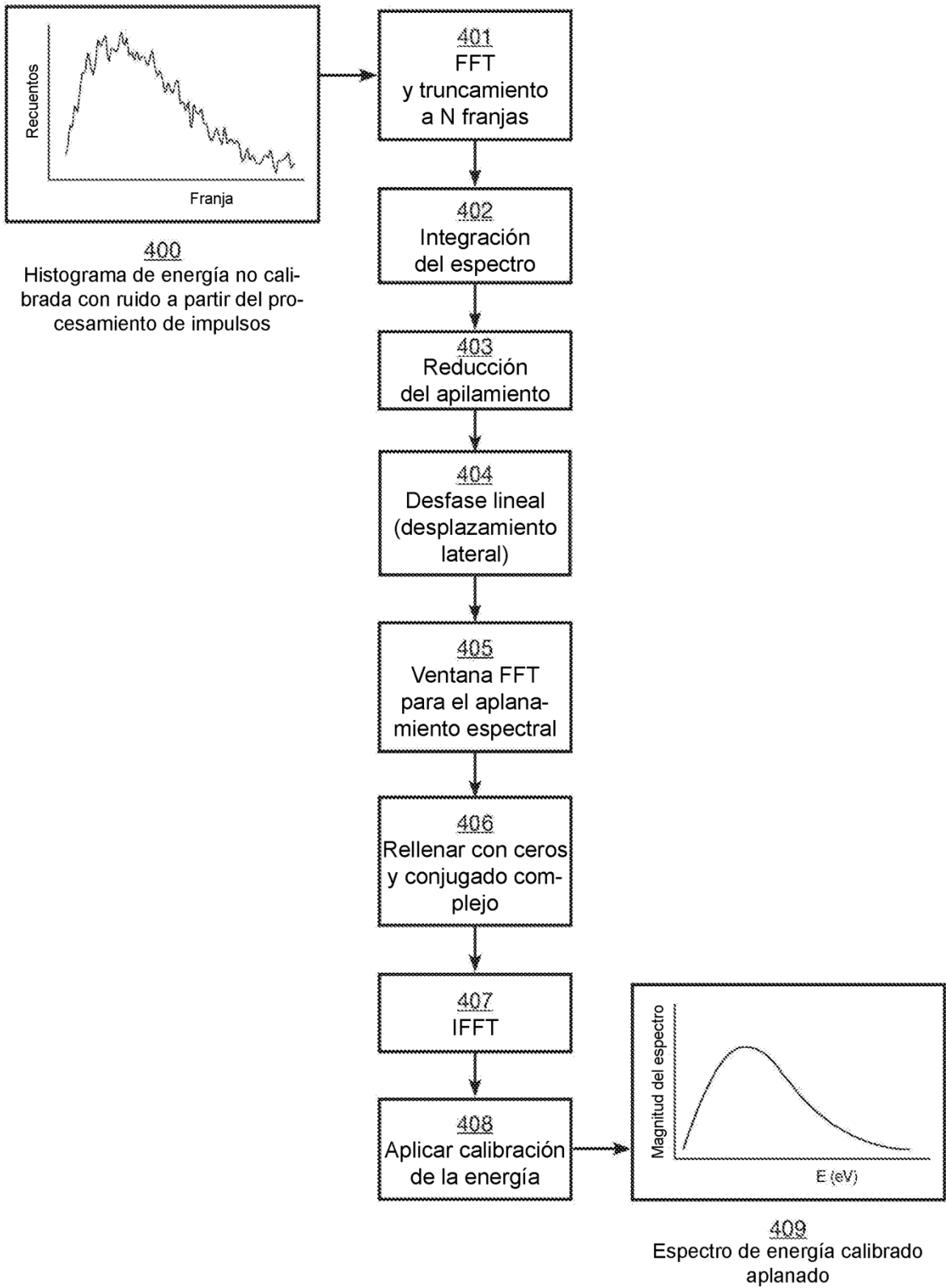


Figura 4

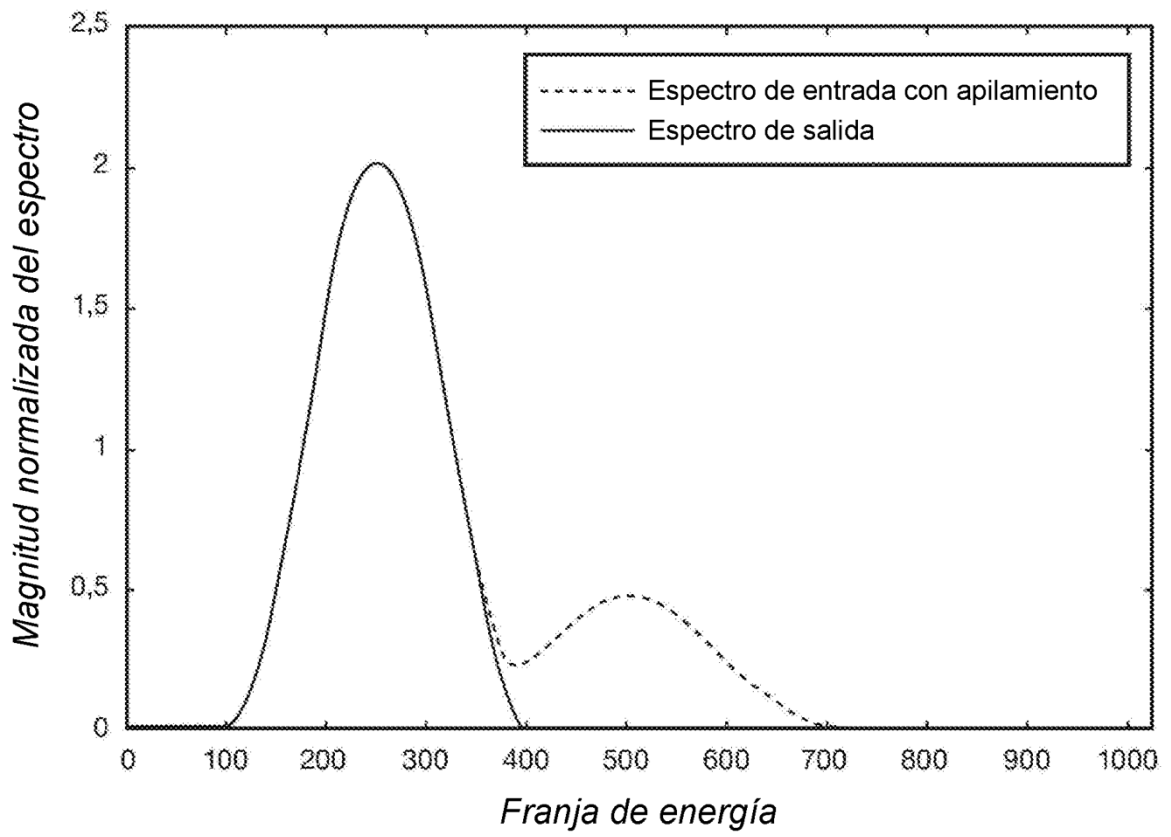


Figura 5

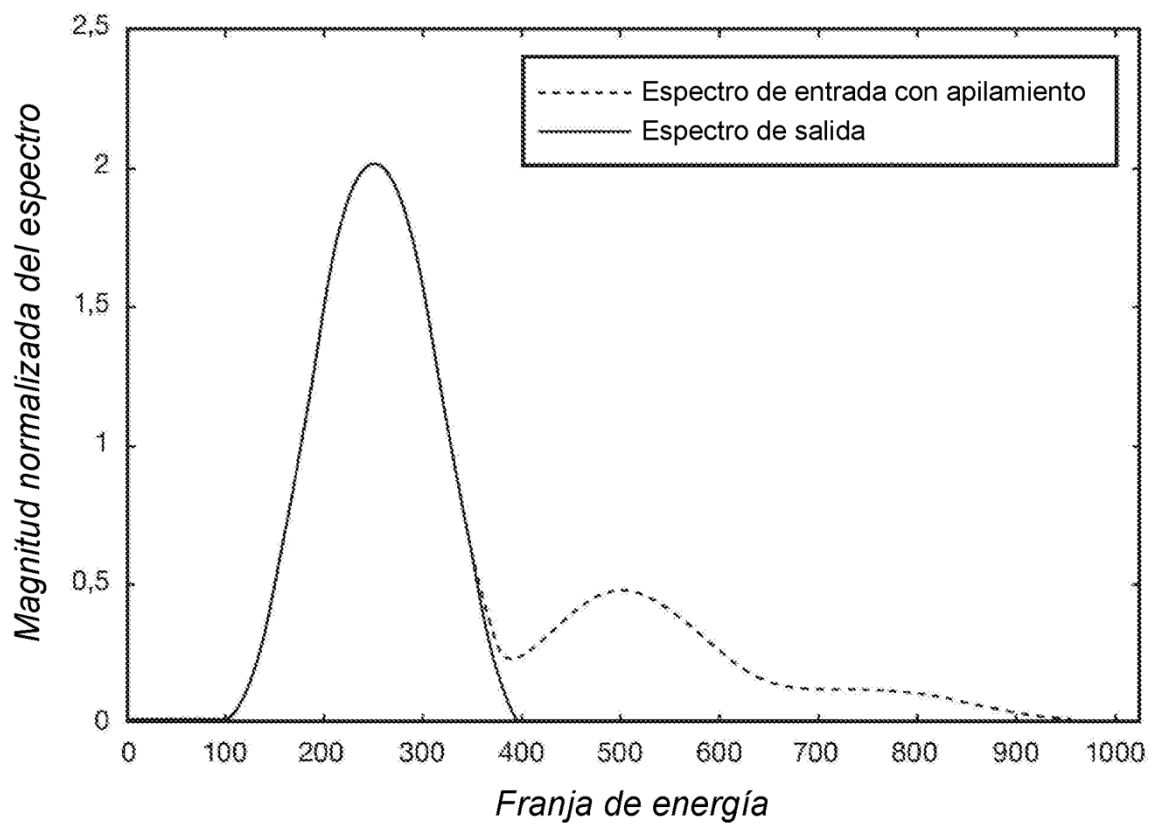


Figura 6

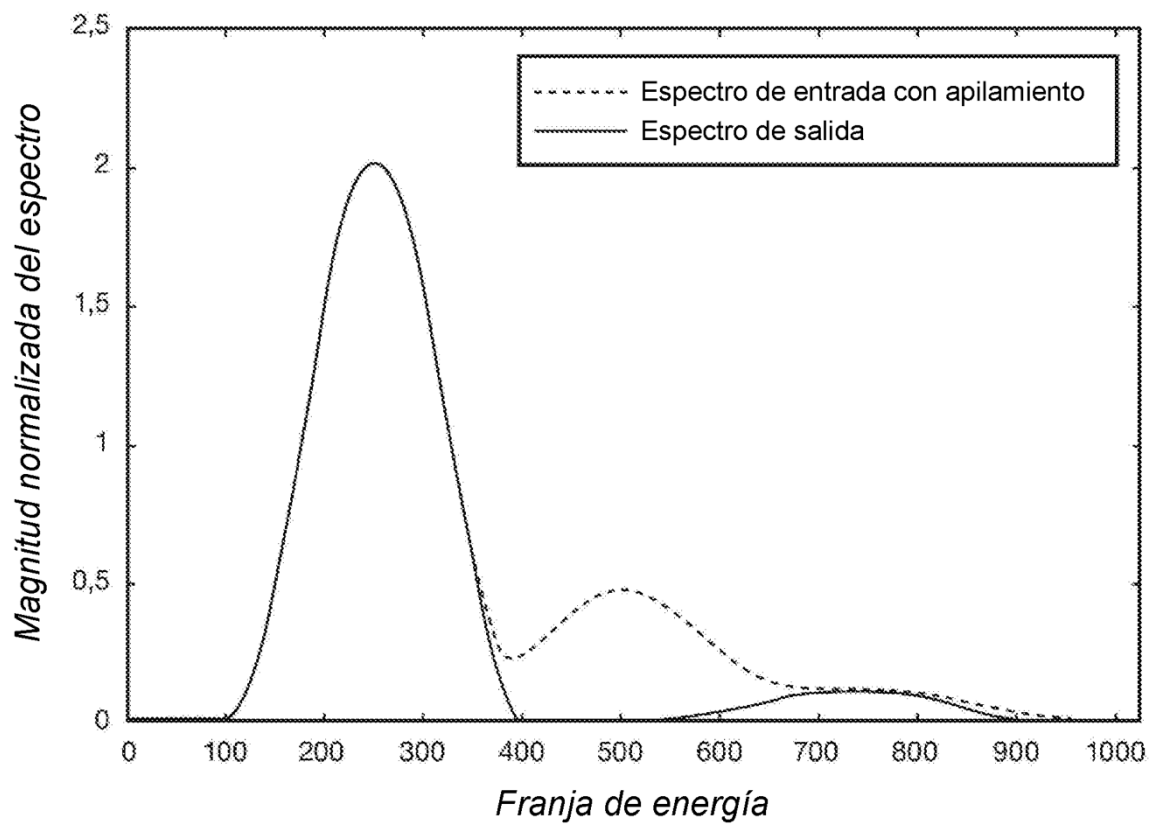


Figura 7

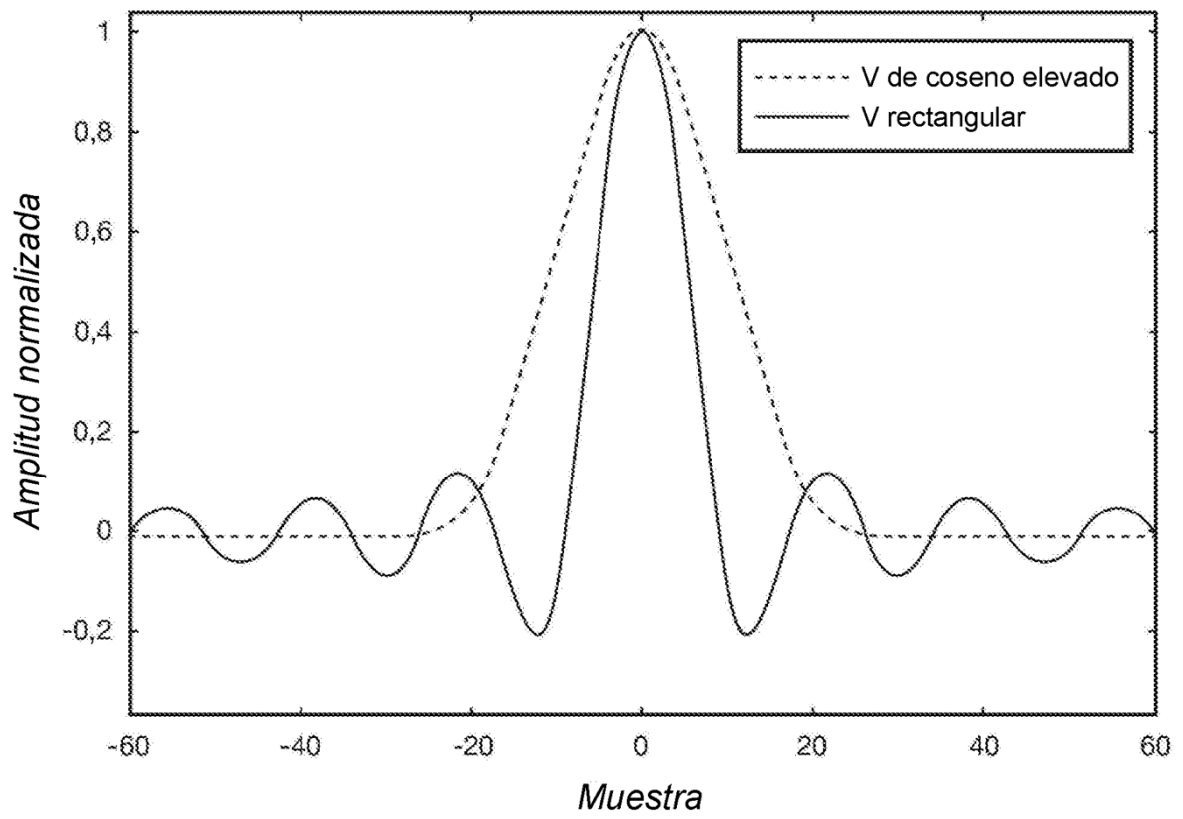


Figura 8

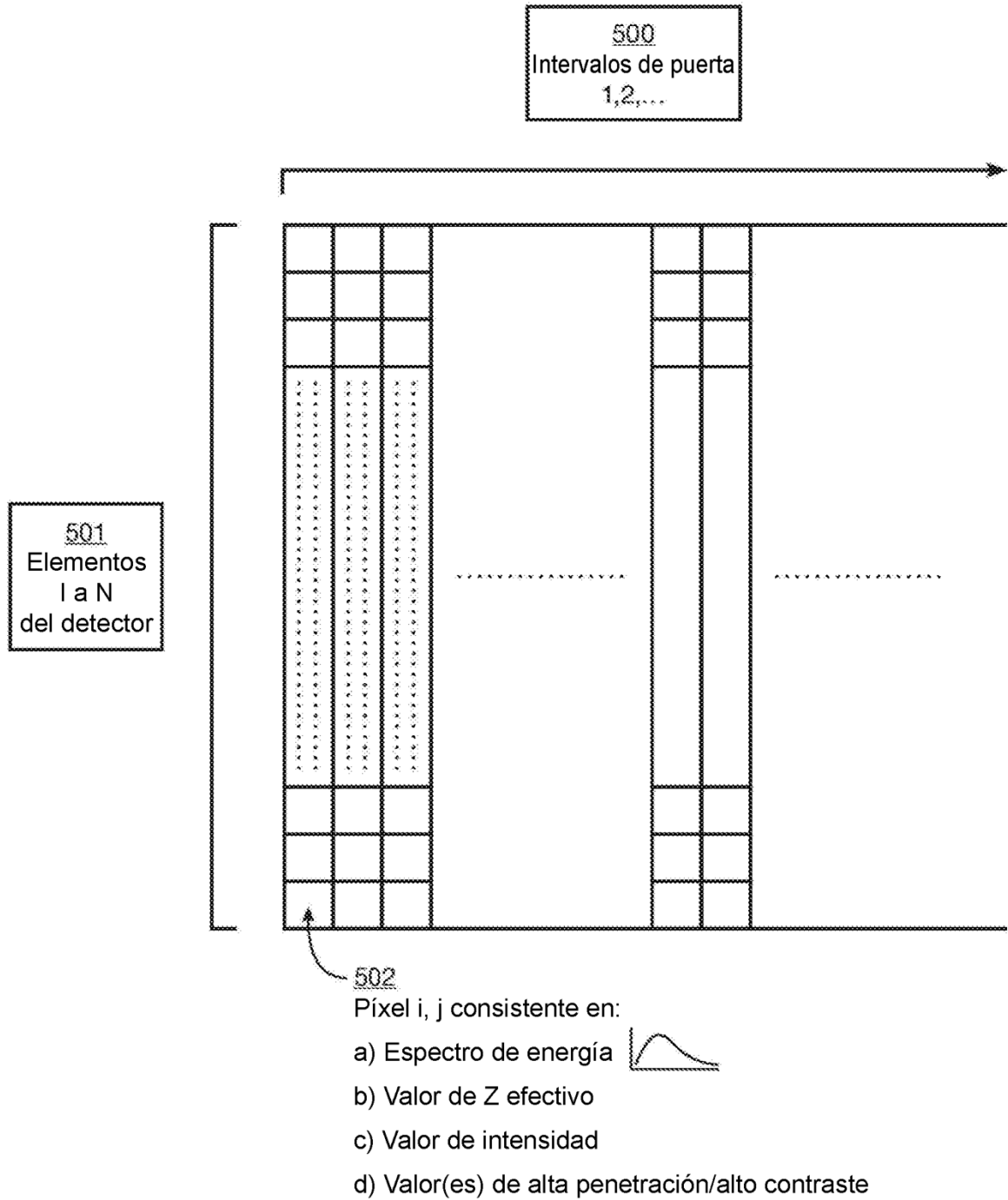


Figura 9

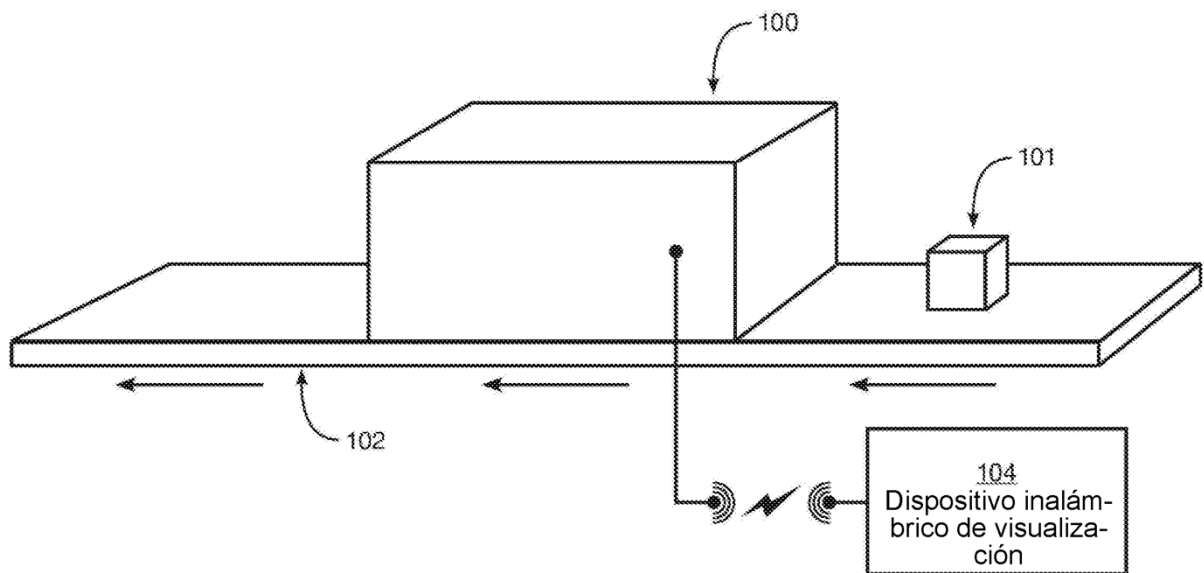


Figura 10

Espectros de energía no calibrados, 108 detectores

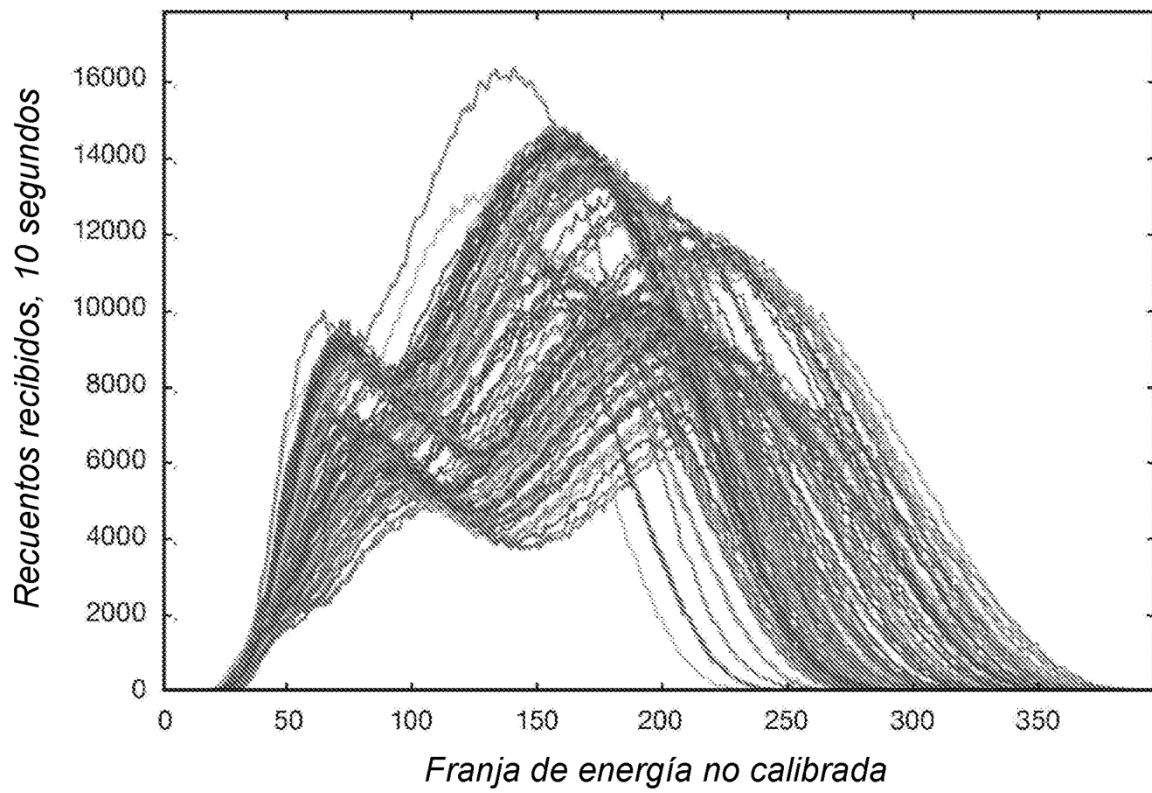


Figura 11

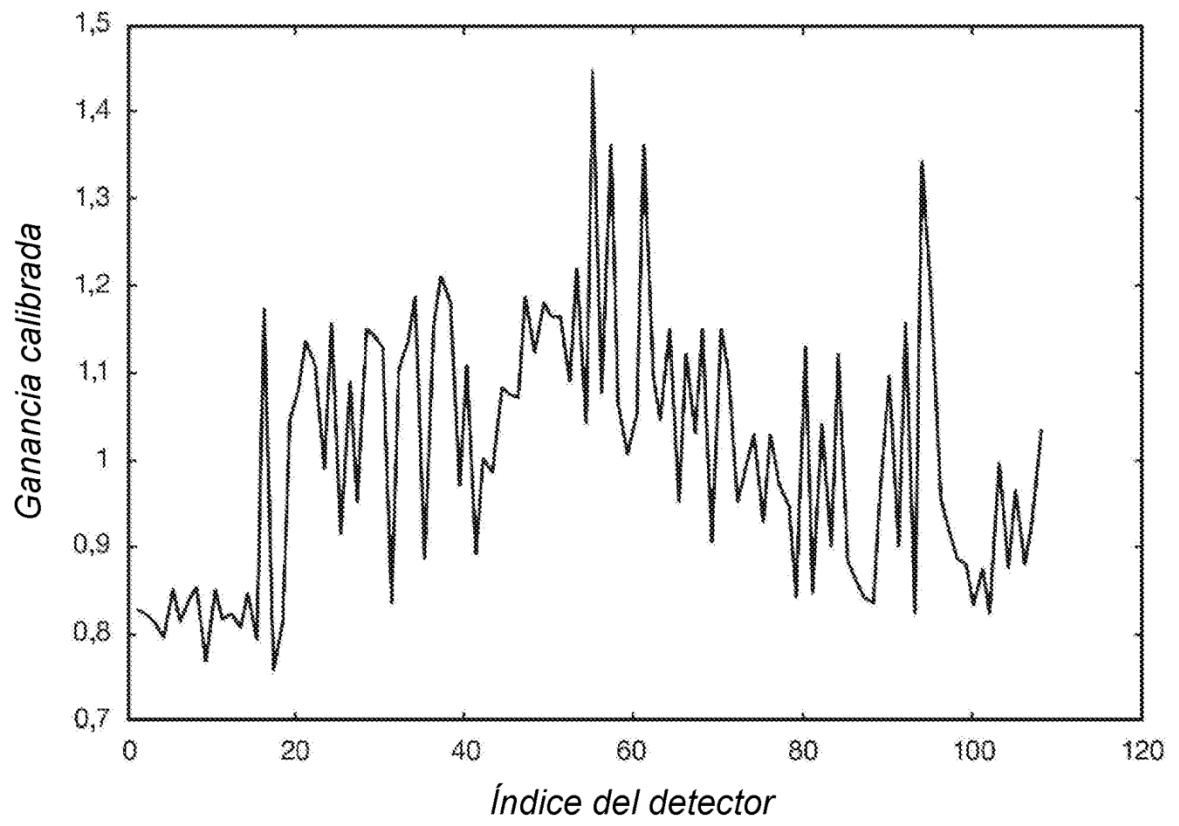


Figura 12

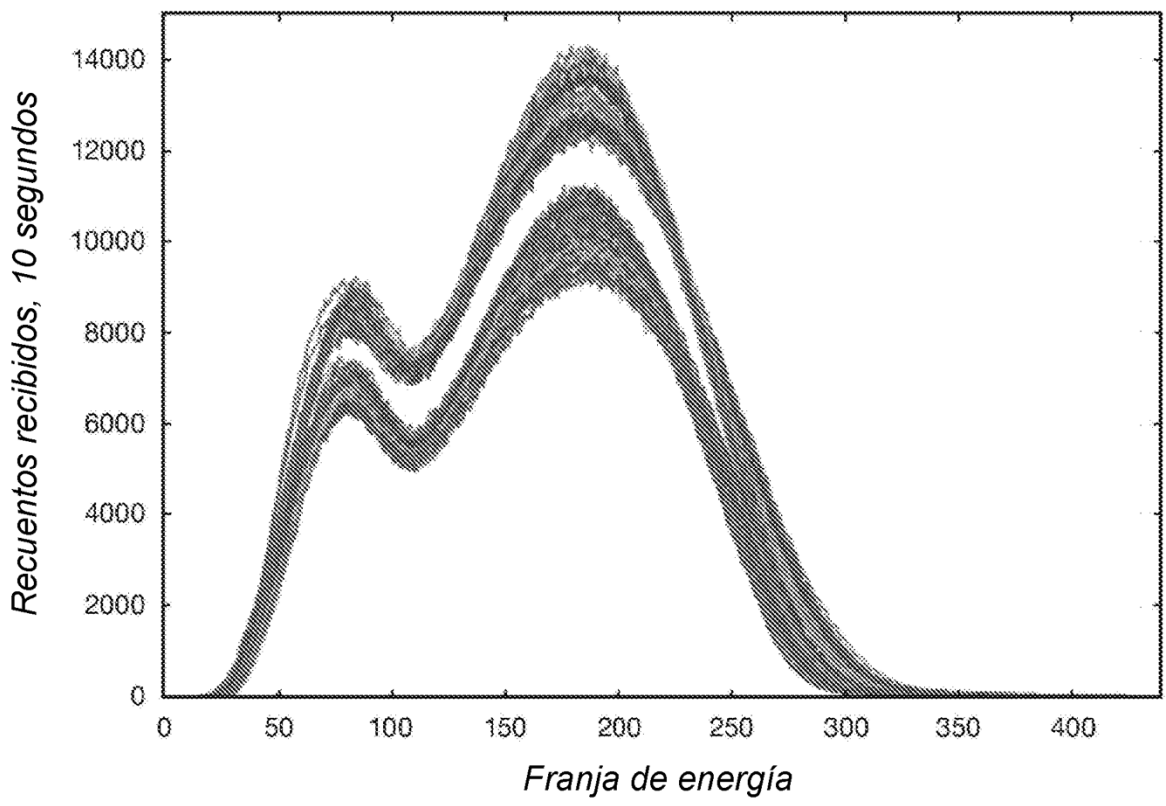


Figura 13

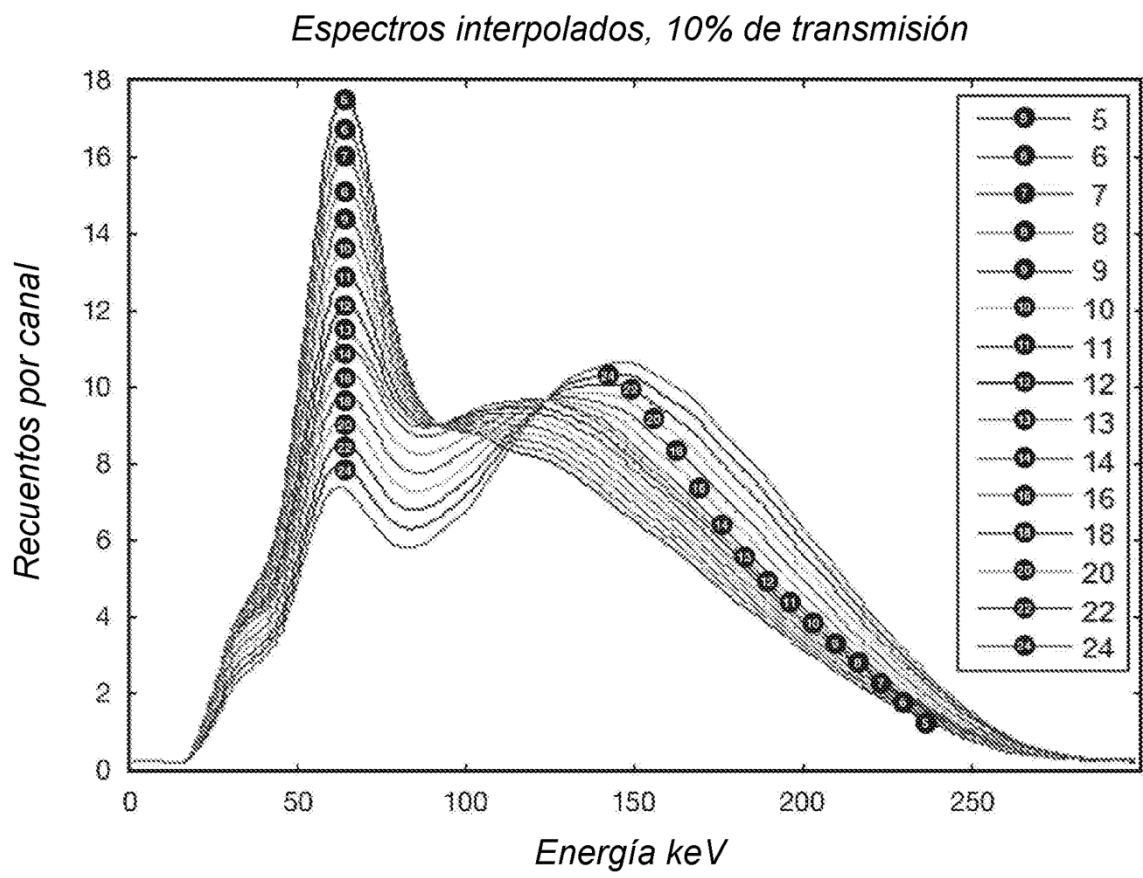


Figura 14

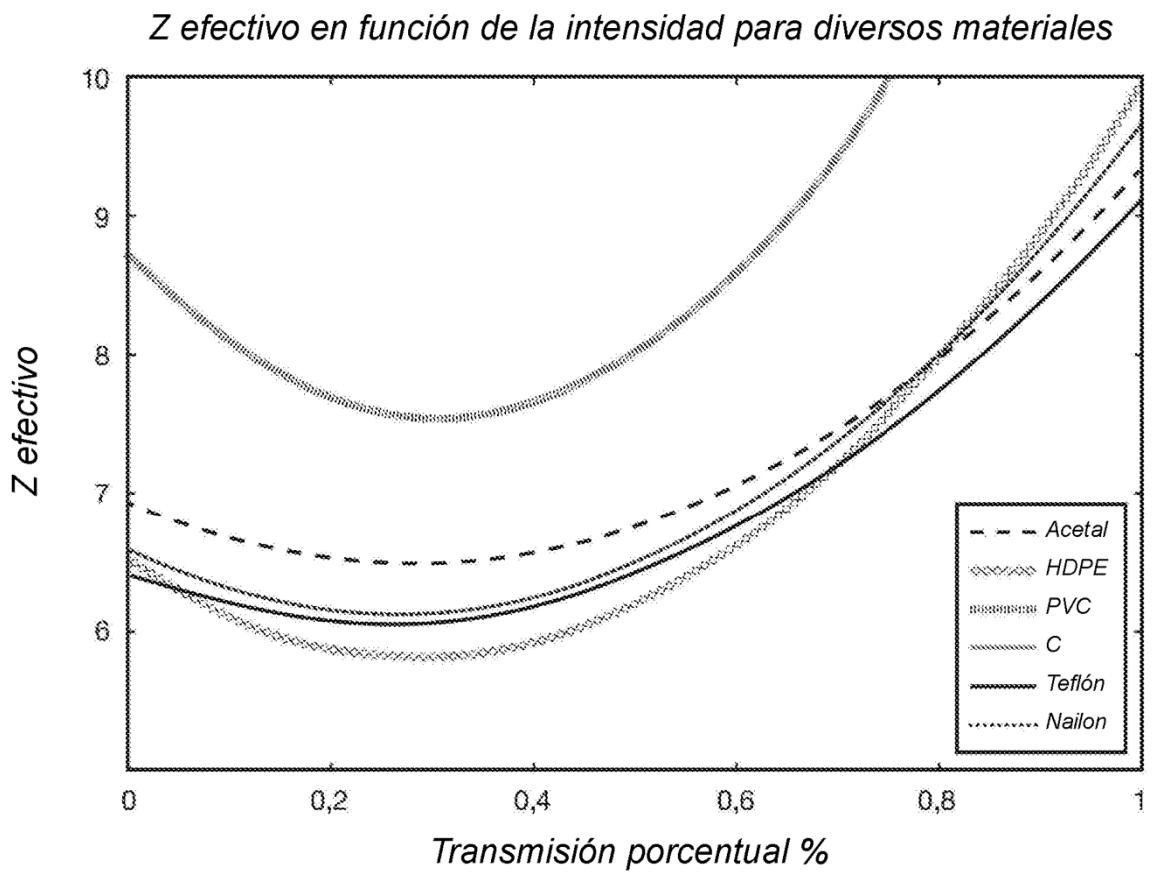


Figura 15

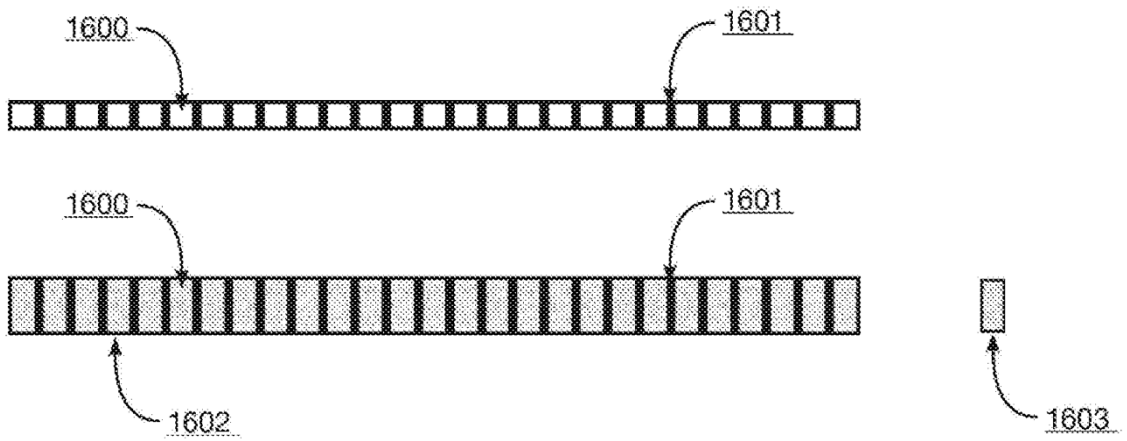


Figura 16A

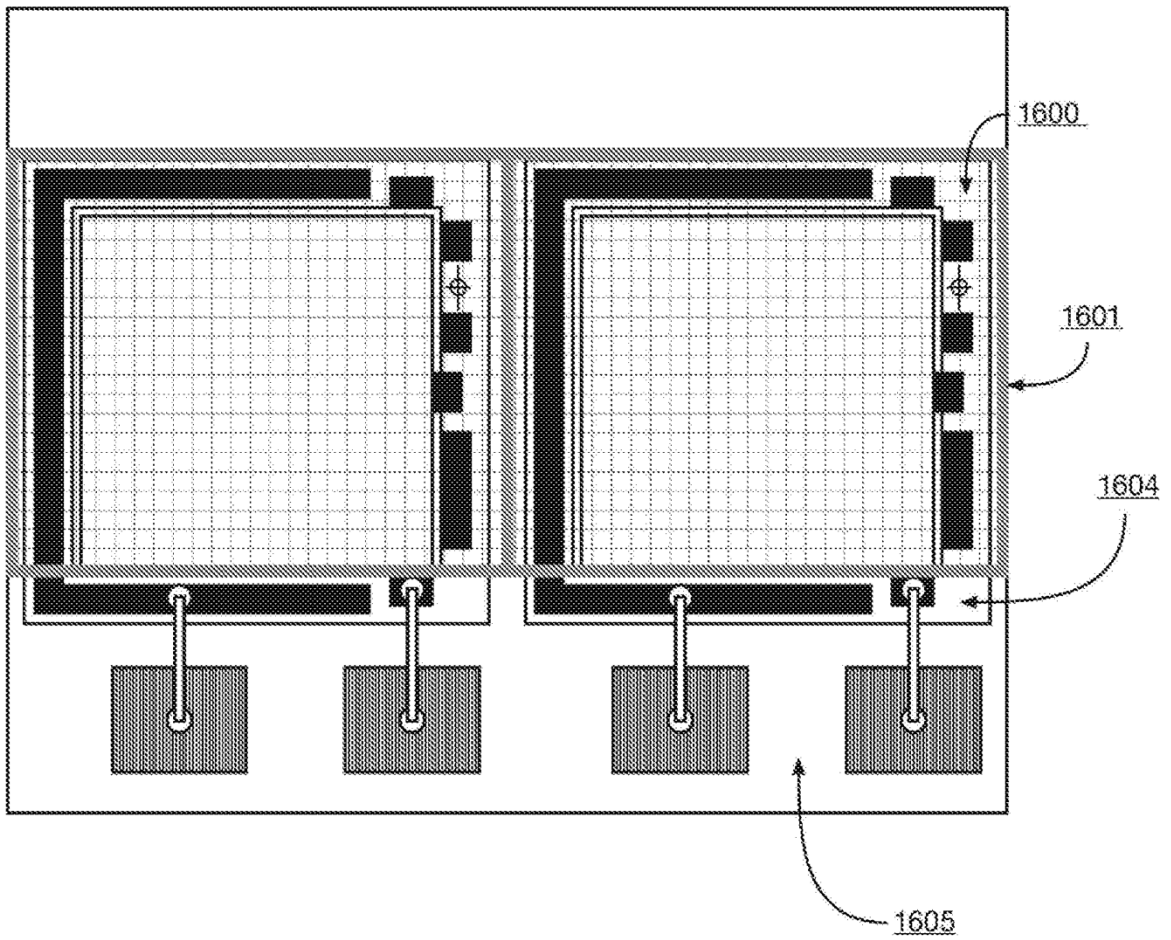


Figura 16B

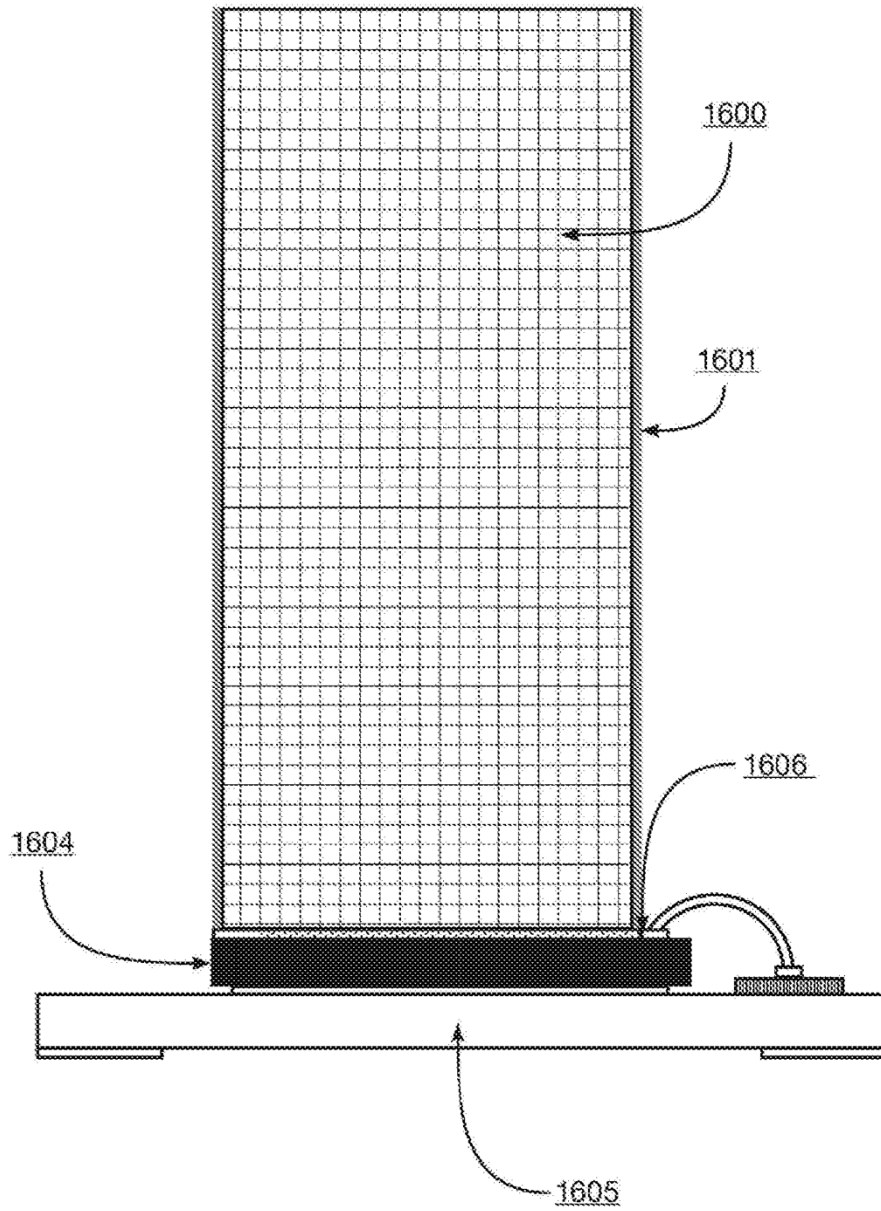


Figura 16C

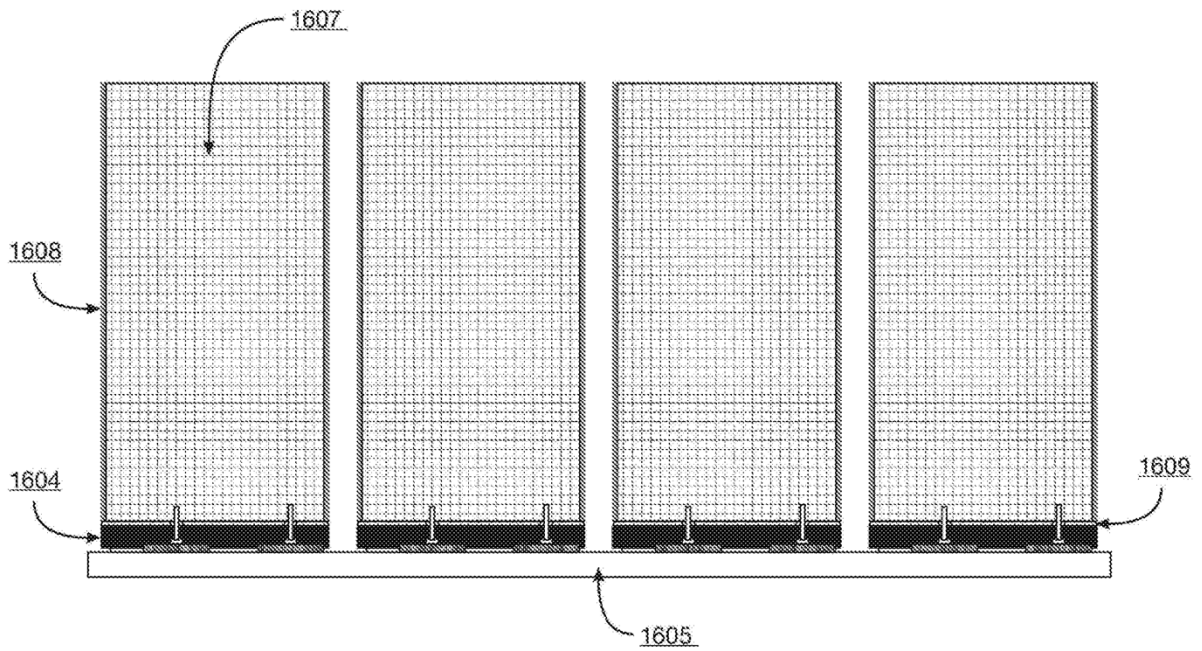


Figura 16D

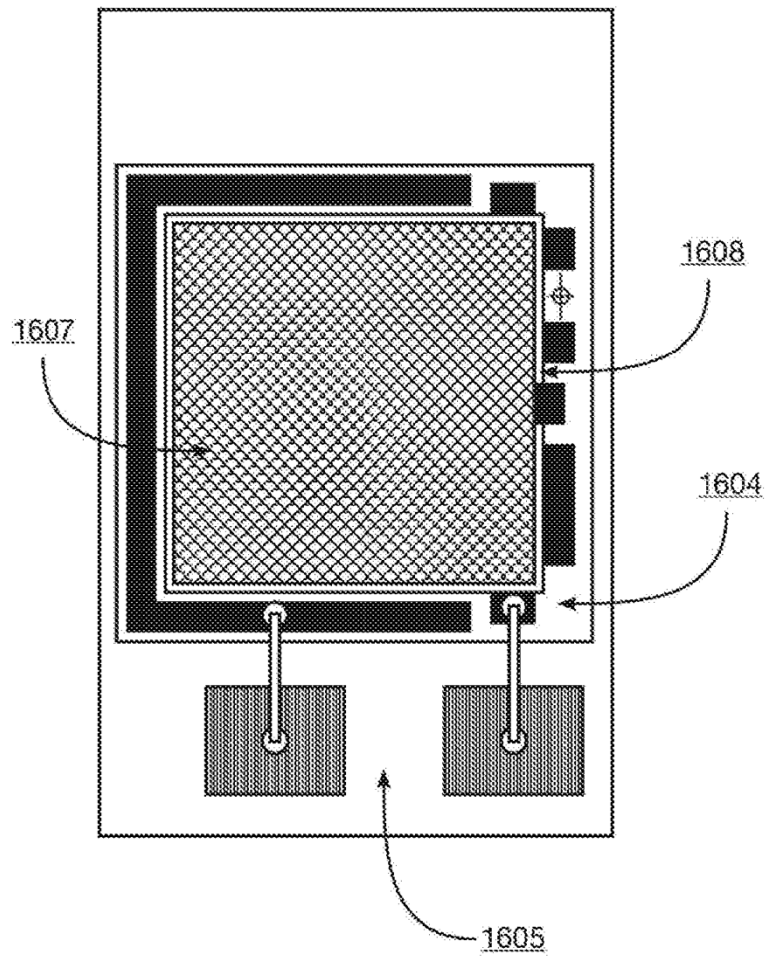


Figura 16E

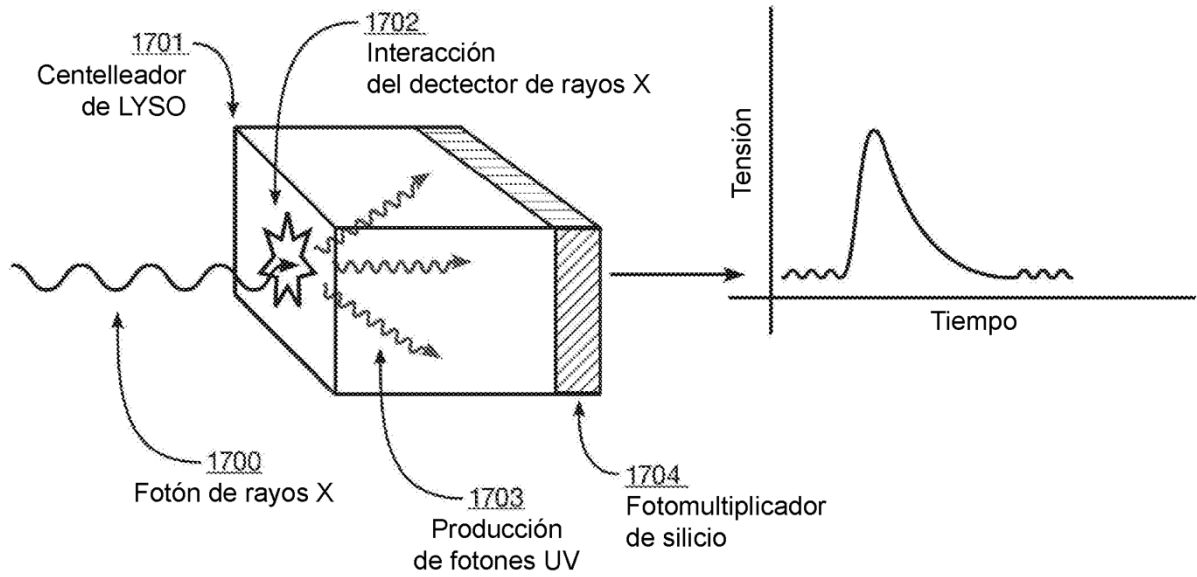


Figura 17

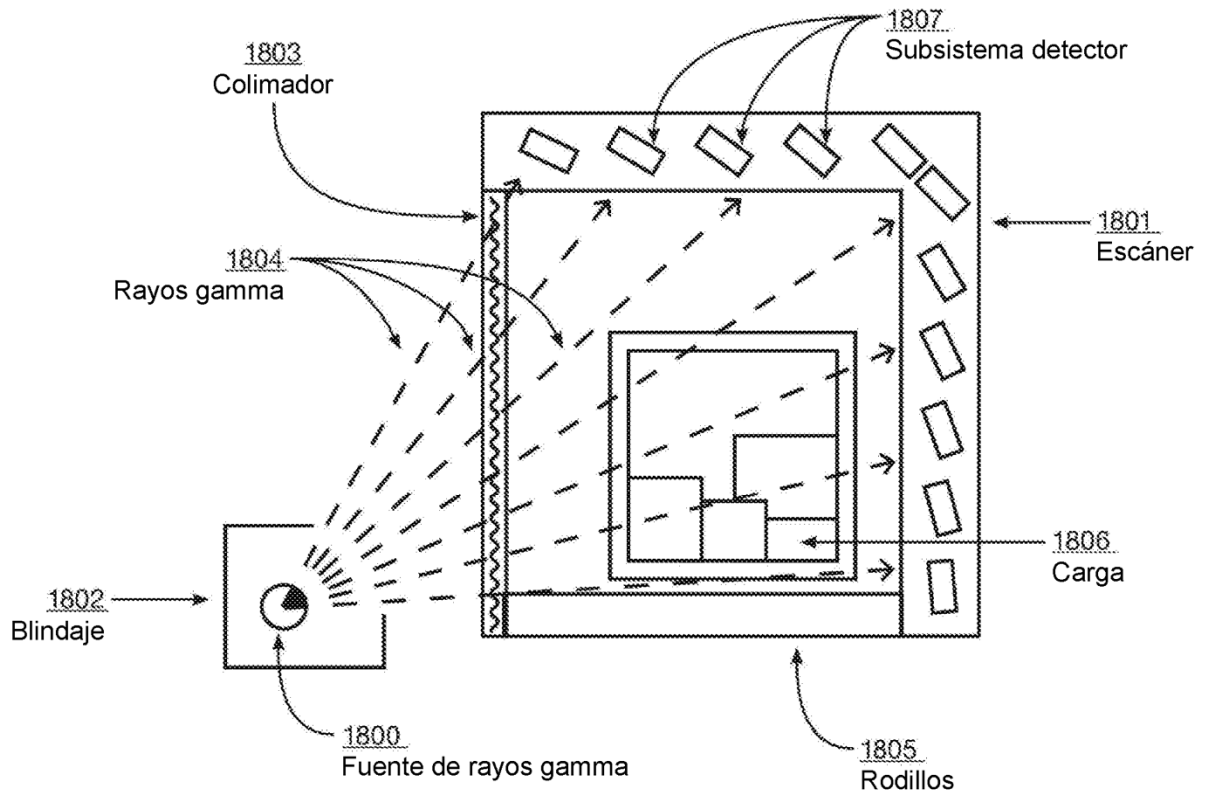


Figura 18

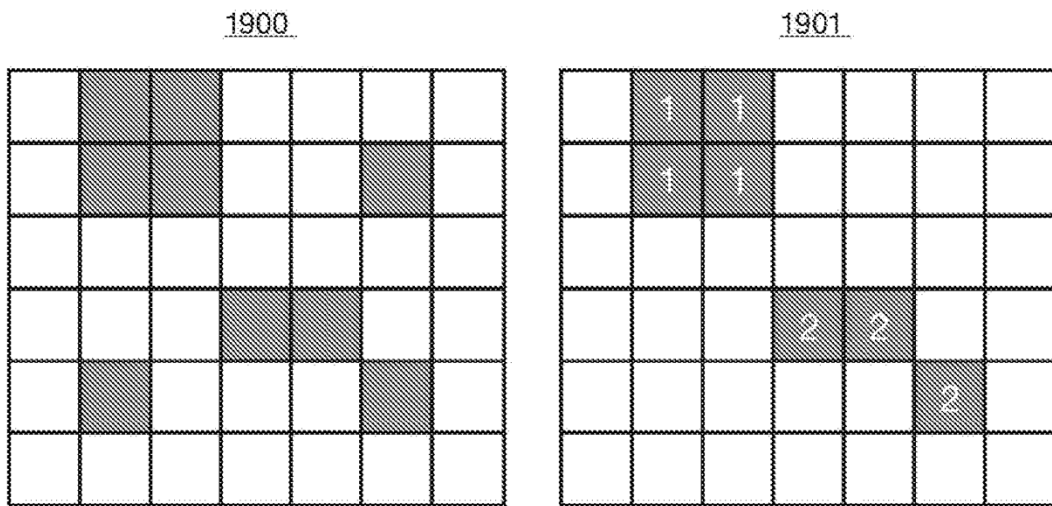


Figura 19

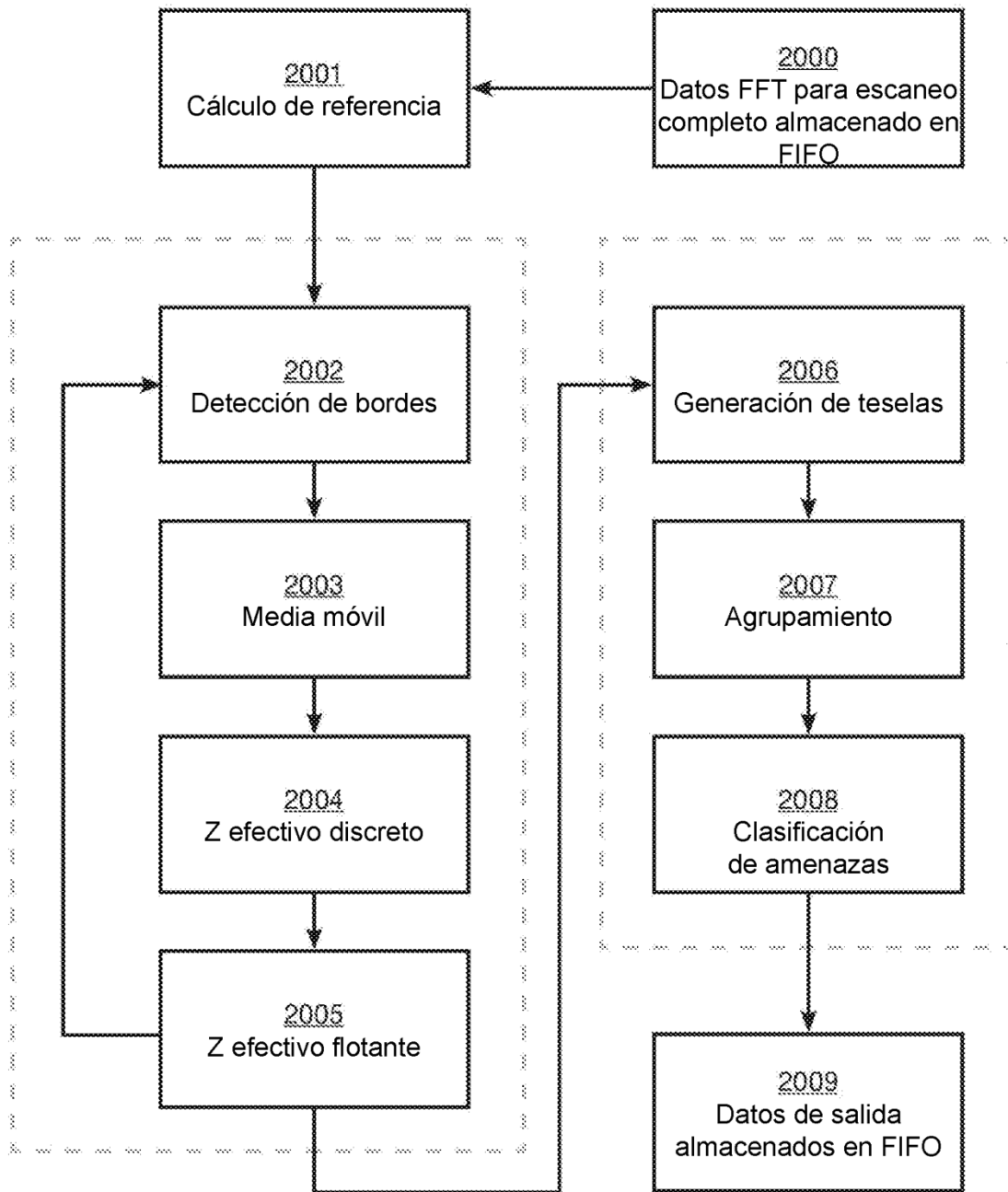


Figura 20

2100

$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	$1/3$	$1/3$	$1/3$
--------	--------	--------	---	-------	-------	-------

Figura 21

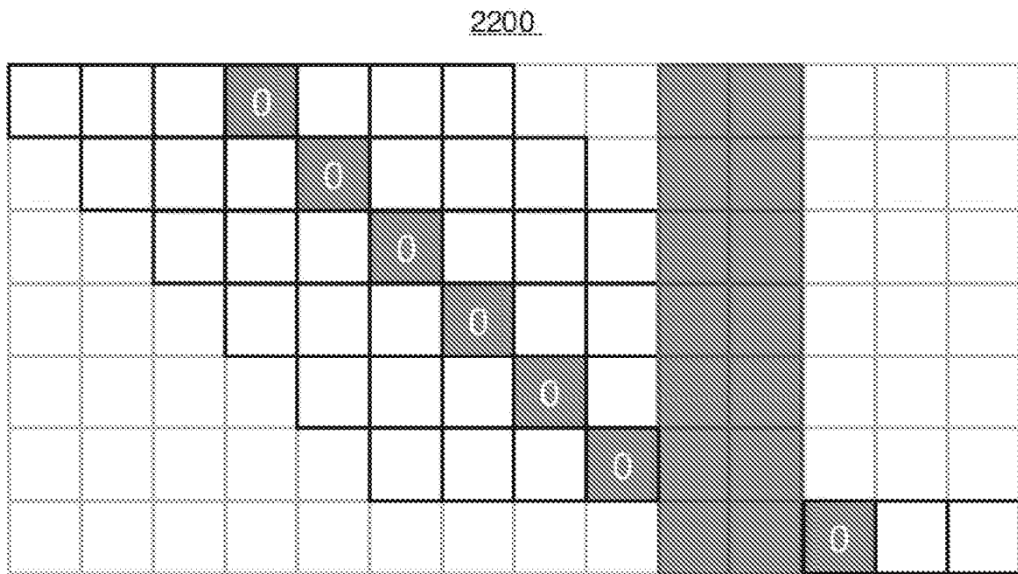


Figura 22