



①9



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

①1 Número de publicación: **2 298 220**

⑤1 Int. Cl.:
G01V 5/00 (2006.01)

①2

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

⑧6 Número de solicitud europea: **01910478 .5**

⑧6 Fecha de presentación : **09.02.2001**

⑧7 Número de publicación de la solicitud: **1254384**

⑧7 Fecha de publicación de la solicitud: **06.11.2002**

⑤4 Título: **Sistema de inspección por rayos X con forma espectral.**

③0 Prioridad: **10.02.2000 US 502093**

④5 Fecha de publicación de la mención BOPI:
16.05.2008

④5 Fecha de la publicación del folleto de la patente:
16.05.2008

⑦3 Titular/es: **American Science & Engineering, Inc.**
829 Middlesex Turnpike
Billerica, Massachusetts 01821, US

⑦2 Inventor/es: **Grodzins, Lee y**
Rothschild, Peter

⑦4 Agente: **Carpintero López, Francisco**

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

Sistema de inspección por rayos X con forma espectral.

5 **Campo técnico**

La presente invención se refiere a sistemas y procedimientos para inspeccionar objetos, particularmente el cargamento en contenedores de transporte, camiones y trenes, usando radiación penetrante filtrada espectralmente.

10 **Antecedentes de la invención**

La inspección de contenedores de transporte por rayos X está muy consolidada para muchos fines, incluyendo la búsqueda de contrabando, propiedad robada y la verificación de los contenidos de los transportes que cruzan las fronteras nacionales.

15 Dichos sistemas de inspección típicamente producen lo que se denomina imagen de transmisión midiendo la distribución de intensidad de los rayos X que atraviesan el contenedor de transporte. Los contenidos de los contenedores de transporte cargados de forma ligera pueden examinarse eficazmente con energías de rayo X en el intervalo de cientos de keV aunque los semi-tráilers, camiones cisterna, trenes, y contenedores de transporte ISO cargados de forma pesada
20 típicamente requieren haces de rayos X en el intervalo de MeV. El diseño de un sistema de inspección de rayos X para examinar el cargamento heterogéneo requiere la consideración conjunta de los requisitos opuestos para penetración, sensibilidad y dosificación de la radiación, para los que los siguientes criterios de primer orden dan una guía general.

Penetración: según aumenta la energía de los rayos X, manteniendo constante la potencia del haz de electrones, la penetración aumenta inversamente con el coeficiente de absorción lineal, $\lambda \text{ cm}^{-1}$. Por ejemplo, los componentes de alta energía del rayo X del haz de un acelerador de 3 MeV penetran aproximadamente 3 veces más allá a través de hierro de lo que lo hacen los componentes de alta energía de un generador de rayos X de 450 keV; los coeficientes de absorción lineal pertinentes en hierro disminuyen casi en un factor de 3.

30 *Sensibilidad:* la sensibilidad de los rayos X para un espesor dado Δx de un objeto depende del material que rodea al objeto así como del material del propio objeto. Siendo iguales los demás parámetros, la sensibilidad S se define de forma útil como el cambio fraccionario en la velocidad de recuento I por centímetro del material. Es decir,

$$35 \quad S = \frac{\Delta I/I}{\Delta x} = -\lambda,$$

donde ΔI es la disminución de la velocidad de recuento debido al espesor del material Δx . La sensibilidad es mayor a la menor energía (mayor valor de λ) de radiación penetrante. En el ejemplo anterior, la sensibilidad de los rayos X de alta energía ha caído casi en un factor de 3 al aumentar la energía de 450 keV a 3 MeV, y tarda casi 9 veces que muchos rayos X para obtener la misma precisión estadística para la atenuación medida.

El conflicto entre penetración y sensibilidad generalmente se soluciona aceptando todo el espectro de rayos X generado por el haz de electrones. Los componentes de alta energía son eficaces para una penetración máxima mientras que los muchos más abundantes componentes de menor energía tienen la sensibilidad necesaria para examinar más eficazmente los contenedores de transporte cargados de forma ligera o los contenedores de transporte con secciones cargadas de forma ligera.

Dosis de radiación: la dosis de radiación en un haz de rayos X generado por un electrón de energía E que choca con una diana de volframio es aproximadamente proporcional a E^3 , como se analiza en Buechner, *et al.*, Physical Review, vol. 74, pág. 1348ff, (1948). A una potencia constante, la dosis de radiación directa en el haz varía aproximadamente como E^2 , como lo hace la dosis de radiación ambiental. Como se usa en esta descripción y en cualquiera de las reivindicaciones adjuntas, el término “dosis de radiación ambiental” se refiere a la dosis en los alrededores de una radiación dispersada.

55 En el ejemplo anterior, manteniendo constante la potencia de electrones, la dosis de radiación ambiental sube casi en un factor de 40 cuando la energía de los electrones sube de 450 keV a 3 MeV. Para satisfacer los códigos de seguridad respecto a radiación se hace necesario añadir una costosa protección que generalmente implica una infraestructura reforzada y puertas masivas en el área de inspección. En Estados Unidos, el sistema de inspección debe mantener la dosis en las áreas a las que tiene acceso la gente en menos de $5 \mu\text{Sv/h}$. (21 CFR § 1020.40). Estas especificaciones se denominan especificaciones de “cabina”. La expresión “cabina abierta” como se usa en este documento se refiere a un recinto, con o sin puertas o techo, que satisface las especificaciones legales de regulación de cabinas sin necesidad de protecciones para radiación en lugares diferentes a las proximidades del haz.

65 Para satisfacer las demandas de inspección de cargamentos cargados de forma densa, algunos sistemas actuales aplican rayos X de energía mayor de 450 keV. Se ha supuesto y mostrado en la técnica que una mayor energía da como resultado una mayor radiación ambiental que requiere una protección extensiva y aumenta en gran medida los costes para acatar las normativas.

Algunos sistemas de inspección de cargamento empleados actualmente usan aceleradores lineales por pulsos (linacs) que funcionan en el intervalo de aproximadamente 3 MeV a 9 MeV, produciendo un abanico de haces de rayos X que pasan a través del cargamento en una serie lineal de detectores de rayos X que miden su intensidad. Los abundantes componentes de baja energía del abanico del haz producen imágenes de alta calidad de contenedores de transporte cargados de forma ligera mientras que los componentes de alta energía tienen una potencia de penetración suficiente para encontrar contrabando detrás de más de 30 cm de acero. La radiación producida por los linacs es muy alta, típicamente mayor de 1 Gray/min en un metro, y por ello también lo es el coste para encerrar la radiación y la protección requerida. El coste del edificio, con puertas que contienen la radiación para el túnel de inspección a menudo supera el coste del propio sistema de inspección de rayos X.

Los usos actuales de absorbedores espectralmente selectivos en el contexto de generación de haz de rayos X incluyen su uso en generadores de rayos X de MeV para nivelar la distribución de intensidad como una función del ángulo. Los absorbedores se usan también en aplicaciones médicas para minimizar la dosis de radiación al paciente eliminando los componentes de baja energía que se absorben preferentemente en la piel y tejidos superficiales cercanos y no desempeñan un papel útil en el diagnóstico o tratamiento. Finalmente, los absorbedores se usan para crear haces de rayos X cuasi-monocromáticos, tal como para análisis de doble energía, por ejemplo. La radiación ambiental, como se ha definido anteriormente, no figura en ninguno de estos casos de uso actual de los absorbedores, ni como una consideración de diseño ni proporcionando control activo de las intensidades de rayo X.

Puede hacerse referencia, por ejemplo, a lo siguiente: documento US-A-5.040.199, que se refiere a un aparato y procedimiento para análisis usando rayos X; documento US-A-3.919.467, que se refiere a un sistema de inspección de equipajes por rayos X; el documento WO-A-00/33060, que se refiere a un sistema de formación de imágenes por retrodispersión de rayos X para inspección del tren de aterrizaje; y el documento WO-A-97/18462, que se refiere a un aparato y procedimiento para reconocimiento automático de objetos ocultos usando tomografía computarizada de energía múltiple.

Sumario de la invención

En una realización, la presente invención proporciona un sistema de inspección para inspeccionar un objeto, comprendiendo el sistema de inspección una fuente de radiación penetrante y al menos un detector, la fuente para generar un haz y para irradiar el objeto y caracterizado en cada instante de tiempo por un espectro de energía instantáneo y una intensidad, el detector para detectar la radiación penetrante después de la interacción con el objeto; estando caracterizado el sistema de inspección porque comprende un regulador para proporcionar radiación penetrante incidente que tiene un primer espectro instantáneo dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial en un primer caso y porque los fotones de energías menores que la primera energía fiducial penetran a través del objeto, proporciona el regulador de radiación penetrante incidente que tiene un segundo espectro instantáneo dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial en un segundo caso si y sólo si los fotones cuando están presentes, de energías menores que la primera energía fiducial no penetran a través del objeto, de manera que una dosis de radiación media se mantiene por debajo de un nivel especificado.

En otra realización, la presente invención proporciona un sistema de inspección para inspeccionar un objeto, comprendiendo el sistema de inspección una primera fuente de radiación penetrante para generar un primer haz y para irradiar el objeto, estando caracterizada la primera fuente por un espectro de energía dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial; estando caracterizado el sistema de inspección porque comprende: (a) una segunda fuente de radiación penetrante para generar un segundo haz y para irradiar el objeto, estando caracterizada la segunda fuente por una intensidad de fuente y un espectro de energía dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial; (b) un primer detector para detectar la radiación penetrante de la primera fuente después de la interacción con el objeto y un segundo detector para detectar la radiación penetrante de la segunda fuente después de la interacción con el objeto, constituyendo la primera fuente y el primer detector un primer módulo de inspección y constituyendo la segunda fuente y el segundo detector un segundo módulo de inspección; (c) un regulador para activar la primera y segunda fuentes de radiación penetrante de una manera temporalmente intercalada; y (d) un controlador de intensidad para regular la segunda energía fiducial de la segunda fuente basado al menos en la radiación penetrante de la primera fuente después de la interacción con el objeto.

En una realización más, la presente invención proporciona un procedimiento para inspeccionar un objeto, comprendiendo el procedimiento generar un haz de radiación penetrante caracterizado en cada instante de tiempo por un espectro de energía instantáneo y una intensidad, irradiando una parte del objeto, hasta la totalidad del mismo, con el haz y detectando la radiación penetrante después de la interacción con el objeto; estando caracterizado el procedimiento porque comprende: (a) modular la radiación penetrante incidente mediante un regulador de manera que se proporciona un espectro instantáneo dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial, a menos que los fotones cuando están presentes, de energías menores que la primera energía fiducial fallen a la hora de penetrar a través del objeto, en cuyo caso (b) modular la radiación penetrante incidente mediante un regulador de manera que se cambia el espectro de energía instantáneo proporcionando un segundo espectro instantáneo dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial de manera que una dosis de radiación media se mantiene por debajo de un nivel especificado.

De acuerdo con los sistemas y procedimientos descritos en este documento, tanto los componentes de alta energía como los componentes de baja energía de los generadores de rayos X de MeV pueden usarse mientras se mantiene

la radiación ambiental suficientemente baja de manera que el coste de la infraestructura para contener la radiación se reduce significativamente. De esta manera, las necesidades aparentemente mutuamente exclusivas de penetración y sensibilidad para penetrar objetos fácilmente pueden obtenerse ventajosamente. Esto puede conseguirse, de acuerdo con la presente invención, combinando diversas modalidades: en primer lugar, un haz de rayos X altamente penetrante, de alta energía con radiación ambiental mínima puede obtenerse conformando apropiadamente el espectro del haz de rayos X del acelerador mediante un absorbedor apropiado. En segundo lugar, el espectro de rayo X de menor energía esencial, generado por el mismo o un acelerador diferente, puede satisfacer las necesidades de sensibilidad para objetos fácilmente penetrables mientras se mantiene una radiación ambiental mínima. En tercer lugar, los dos espectros pueden coordinarse en el tiempo de manera que no haya interferencias o cruce entre los dos componentes. Las realizaciones adicionales de la invención usan también el hecho de que las intensidades de los generadores de rayos X pueden controlarse para maximizar la efectividad del sistema de inspección mientras se mantiene el estado de “cabina abierta”. Un procedimiento de control usa el sistema de transmisión de baja energía para controlar la intensidad de los haces desde el sistema de transmisión de alta energía; otro procedimiento de control, que puede usarse junto con el primero, usa indicadores de radiación ambiental para controlar las intensidades de rayo X desde los generadores de rayos X.

Breve descripción de los dibujos

Las anteriores características de la invención se entenderán mejor haciendo referencia a la siguiente descripción detallada considerada junto con los dibujos adjuntos:

La Figura 1 muestra espectros de Monte-Carlo simulados de rayos X emitidos a 90° desde una diana de volframio bombardeada con electrones a 3 MeV, antes de la filtración y después de la filtración de acuerdo con una realización preferida de la presente invención;

La Figura 2a es una vista en planta esquemática de un sistema de transmisión de formación de imágenes de inspección usando un único generador de rayos X de alta energía por pulsos para producir tanto una imagen de transmisión a baja energía como a alta energía de acuerdo con la realización preferida de la presente invención;

La Figura 2b muestra la geometría de un absorbedor rotatorio de acuerdo con una realización de la presente invención;

La Figura 3 es una vista esquemática de un sistema de inspección de rayos X usando diferentes *fuentes de rayos X* de alta y baja energía de acuerdo con una realización de la presente invención; y

La Figura 4 es una vista esquemática de un sistema de inspección de cargamento que muestra dos sistemas de retrodispersión independientes y un sistema de transmisión de alta energía diferente e indicadores de la radiación ambiental de acuerdo con una realización preferida de la presente invención.

Descripción detallada de las realizaciones específicas

Se describen ahora sistemas para reducir ventajosamente la dosis de exposición a radiación ambiental pero que aún proporcionan las ventajas de un haz de rayos X altamente penetrante. Un tema común en las diversas realizaciones descritas a continuación es la intercalación de un espectro de rayo X de baja intensidad, predominantemente de baja energía con un espectro de baja intensidad, predominantemente de alta energía.

Haciendo referencia en primer lugar a la Figura 1, se muestran espectros de rayos X emitidos a 90° desde una diana de volframio bombardeada con electrones a 3 MeV. La línea continua, designada con el número 6, corresponde al espectro, generado por simulación de Monte Carlo, de los rayos X emitidos en las condiciones especificadas. El espectro no filtrado 6 se muestra, en una escala logarítmica, como una función de la energía del fotón, en MeV. (Aunque en este documento se denomina “no filtrado”, la curva continua 6 de hecho se ha filtrado ligeramente para reducir la intensidad de los rayos X por debajo de aproximadamente 200 keV). En el espectro no filtrado 6, aproximadamente el 50% de los rayos X tienen energías por debajo de 500 keV y sólo el 8% de los rayos X tienen energías por encima de 1,5 MeV. De esta manera, el espectro no filtrado puede caracterizarse haciendo referencia a una energía fiducial, en este caso de 500 keV, por debajo de la cual la mitad de los fotones emitidos, en número, tienen su energía.

La curva discontinua 8 es la distribución de intensidad de rayos X emitidos (dentro de un factor multiplicativo), filtrado a través de 2 cm de uranio y “endurecido” de esta manera. Dos cm de uranio corresponde a aproximadamente 2,2 trayectorias libres medias para las mayores energías de rayo X mostradas en la figura. Cuanto menor sea la radiación penetrante, a energías por debajo de aproximadamente 400 keV, se han absorbido en cuatro órdenes de magnitud, mientras que los componentes penetrantes han disminuido en menos de un orden de magnitud. Un absorbedor de 2 cm de grosor de uranio empobrecido puesto en el haz casi elimina los rayos X por debajo de aproximadamente 700 keV. La radiación filtrada puede caracterizarse pues como dominada por fotones por encima de una energía fiducial especificada.

La presente invención, en las realizaciones preferidas, consigue una reducción ventajosa en la exposición a radiación mediante filtrado como se describe ahora con referencia a las Figuras 2-4. Una vista en planta esquemática de un sistema de inspección de rayos X, designado de forma general por el número 11, se representa en la Figura 2a. La transmisión de rayos X se mide mediante el módulo de rayo X 16 que incluye una fuente de rayos X 18, preferible-

mente un linac. Otras fuentes de radiación de rayo X tales como microtrones pueden usarse dentro del alcance de la presente invención. La fuente 18, envía un haz de rayos X 19 que tiene un perfil de sección transversal especificado y una energía máxima que, para los fines de la presente exposición, se supone que es de aproximadamente 3 MeV. La sección transversal del haz 19 es preferiblemente la de un abanico del haz, que tiene una extensión angular apreciable sólo en una dirección transversal, sin embargo otros perfiles de sección transversal del haz pueden ser preferibles en aplicaciones particulares. El haz de rayos X 19 atraviesa un absorbedor 22, mostrado en el haz y en la Figura 2b. Los rayos X 21 pasan a través del absorbedor 22 y después atraviesan un recinto inspeccionado 10, típicamente un medio de transporte tal como un contenedor de transporte de carga o camión. Dentro del recinto 10, se muestra a modo de ejemplo, un objeto 14 que es penetrado fácilmente por los rayos X de menor energía. El objeto 14 puede ser fino o puede estar compuesto por un elemento ligero, es decir, un elemento que tiene un bajo número atómico Z. El objeto 14 se penetra con rayos X por debajo de unos cientos de keV. Como ejemplo adicional, se muestra un objeto denso 12 que no puede penetrarse eficazmente con los rayos X de menor energía. Los rayos X 21 se detectan en un detector de rayos X 20 que es típicamente un detector segmentado cuyo espaciado (o distancia entre segmentos) determina la resolución espacial de la imagen obtenida cuando la posición lateral de incidencia del haz 21 en el recinto 10 se varía mediante el movimiento relativo del recinto en la dirección 13 con respecto al haz 21. Cualquier movimiento que da lugar al movimiento relativo del recinto 10 en la dirección 13 con respecto al haz 21 está dentro del alcance de la presente invención, incluyendo el movimiento de haz 21 con respecto a un recinto fijado al suelo 10.

El absorbedor 22 se muestra como un cilindro giratorio. La rotación del absorbedor 22 puede ser continua o por etapas, dependiendo de la aplicación. En una realización preferida, un primer par de sectores 24 está abierto de manera que el haz 19 no está atenuado según atraviesa el absorbedor 22. El término "par de sectores" se usa para describir segmentos opuestos que tienen secciones transversales con forma de cuña en un plano perpendicular al eje de rotación del absorbedor, estando el eje de rotación en la página de la Figura 2a. Otros pares de sectores, mostrados en la Figura 2b como segmentos 36 y 34, están hechos de material absorbente. Para ilustración se considera la situación sencilla de un absorbedor 35 de 2 cm de uranio alternando con la ausencia de absorbedor 24. Otros elementos pesados, tales como volframio o plomo, pueden usarse también como absorbedores. Cuando el absorbedor 35 está interceptando el haz 19, el perfil espectral del haz es el espectro filtrado mostrado como la curva de puntos 8 en la Figura 1. La intensidad en el haz 21 de rayos X por debajo de 500 keV se ha reducido en un factor más de 10.000, mientras que la intensidad de radiación penetrante por encima de 1,5 MeV se ha reducido en solo un factor de aproximadamente 8.

Si el corte de sector 24 es 22,5°, entonces todo el haz está presente durante 1/8 de cada vuelta del absorbedor; los espectros de menor energía, tan importantes para inspeccionar una cargamento ligera o fina tal como 14, se están usando una octava parte del tiempo. El componente penetrante del espectro está presente todo el tiempo; una octava parte del tiempo a toda su potencia y siete octavas partes del tiempo a aproximadamente 1/8 de toda su potencia.

Los ejemplos de siete octavos y un octavo son ilustrativos, como lo es un absorbedor de 2 cm de uranio. Pueden ajustarse diferentes absorbedores y diferentes proporciones de tiempos de permanencia del absorbedor para situaciones específicas. Además, otras geometrías que proporcionan interposición periódica de un absorbedor 24 dentro del haz incidente 19 están dentro del alcance de la invención como se reivindica en las reivindicaciones adjuntas. La Figura 2b, para otro ejemplo, muestra una varilla absorbidora en sección transversal en la que dos absorbedores 34 y 36 diferentes pueden usarse para conformar los espectros para una aplicación especial de inspección de cargamento.

Los detectores de radiación 26 y 28, colocados en las posiciones apropiadas en los límites de exclusión del sistema (dentro de los cuales típicamente no se permite el paso al personal), controlan la radiación ambiental y pueden denominarse en este documento indicadores de radiación ambiental. Solo se muestran dos detectores 26 y 28 para ilustración; en la práctica, los detectores pueden ponerse en tantas posiciones críticas como sea necesario para una instalación particular. Los indicadores 26 y 28 sirven para dos funciones: en primer lugar, controlan la intensidad del haz 19 que emerge de la fuente 18. En segundo lugar, controlar la intensidad media y limitan esta media al máximo especificado controlando la intensidad de los haces desde la fuente o fuentes 18 de radiación de rayos X.

Un control sencillo y eficaz del nivel de la radiación incidente es cambiando la velocidad de pulso del linac 18. En una realización ejemplar, el linac 18 emite 500 pulsos por segundo. Si el cargamento 10 se mueve a través del haz 21 a 15 cm/s y la resolución espacial del sistema en la dirección del movimiento es de 0,5 cm, entonces el píxel está en el haz durante 33 ms. Como el linac emite 500 pulsos/segundo, hay 16 pulsos solapando en cada píxel. Uno o más de estos pulsos puede suprimirse en respuesta a una señal indicadora desde los detectores de radiación ambiental 26 y 28. Este sencillo mecanismo permite al sistema variar la intensidad global en más de un orden de magnitud. Si se necesita un mayor intervalo de control, puede modularse entonces la intensidad de la pistola de electrones 17 de linac 18. En los casos en los que se usa un acelerador de corriente continua o de onda continua en la fuente 18 en lugar de una fuente por pulsos como se ha descrito hasta ahora en este documento, el control de la intensidad del haz desde el acelerador se consigue más fácilmente modulando la propia corriente del haz de electrones, como se sabe bien en la técnica de generación de rayos X.

La especificación de la cabina que prescribe el grado de protección requerido para un sistema de rayos X se especifica típicamente en términos de un nivel de radiación medio por hora. Durante una hora dada, típicamente se examinan muchos cargamentos, y generalmente los cargamentos variarán mucho en el grado de carga. Los camiones ligeramente cargados generalmente se examinan eficazmente con un haz de rayos X que produce mucha menos radiación que la especificación de la "cabina". Los cargamentos con carga pesada se examinan después con la máxima intensidad consistente con mantener la media horaria al nivel de la "cabina".

Debe observarse que con respecto a sectores cargados de forma ligera del cargamento, el absorbedor rotatorio 22 descrito con referencia a las Figuras 2a y 2b proporciona datos para un análisis de doble energía y permite determinar una medida del número atómico de los objetos en dichos sectores cargados de forma ligera del cargamento, como saben las personas especialistas en la técnica de inspección de cargamento con rayos X. Específicamente, la intensidad de los rayos X de alta energía, detectada con el absorbedor 35 en su sitio, depende de una densidad zonal de los objetos aunque sustancialmente no sobre el número atómico. La intensidad sin absorbedor 24 puede depender del número atómico si la energía de los rayos X detectados es suficientemente baja: por debajo de aproximadamente 200 keV para distinguir hierro y otros elementos pesados; por debajo de aproximadamente 100 keV para distinguir aluminio/silicio a nivel de número atómico.

Otras mejoras, de acuerdo con realizaciones alternativas de la invención, pueden aumentar ventajosamente la efectividad de la inspección dentro de las restricciones de un sistema de “cabina abierta”. Dichas mejoras incluyen, sin limitación, pesar los camiones antes de la inspección y disponer su posición en la cola para maximizar la producción en base a mantener el estado de la “cabina”.

Un haz no atenuado y a toda potencia de 3 MeV, sin un atenuador especial 22, penetra casi 40 cm de hierro aunque típicamente produce niveles de radiación ambiental, a por ejemplo, 6,1 m (20 pies) del abanico del haz, que son de dos a tres órdenes de magnitud demasiado altos para el estado de la “cabina”. Cuando la intensidad del haz se disminuye, como se ha descrito anteriormente, para satisfacer las especificaciones de la cabina, las capacidades de penetración disminuyen a no mucho más de 20 cm de hierro. Mediante lo descrito anteriormente, combinando filtros y control de intensidad, la radiación ambiental a 6,1 m (20 pies) puede mantenerse para un estado de “cabina abierta” y el haz aún penetrará al menos 30 cm de hierro. Debe observarse que el control de la intensidad usando indicadores de radiación ambiental 26 y 28 puede permitir ventajosamente que una parte de los cargamentos 10 se inspeccionen a toda potencia y a una mayor penetración.

Durante el tiempo de permanencia en cada detector 20, típicamente de 15 ms a 30 ms, el absorbedor 22 típicamente hace al menos una vuelta completa de manera que el píxel detector está expuesto alternativamente al haz no atenuado y al haz atenuado, proporcionando de esta manera dos o más espectros instantáneos de irradiación distintos en diferentes partes de la vuelta del absorbedor.

Los indicadores de radiación 26 y 28 se muestran en los límites de la zona de exclusión del sistema, manejando los datos apropiados para controlar la intensidad del haz de rayos X suministrando sus señales a un sistema central 30 para indicar y controlar las intensidades de los haces 19 del generador de rayos X 18.

Haciendo referencia ahora a la Figura 3, pueden usarse dos aceleradores 38 y 44, de acuerdo con otras realizaciones de la invención, para obtener dos imágenes de transmisión del mismo contenedor de transporte. Las fuentes de rayos X 38 y 44 producen haces 39 y 46, respectivamente, de rayos X cada uno de los cuales puede tener un perfil transversal especificado y que son, preferiblemente, un abanico de haces. Los haces 39 y 46 se detectan en los detectores 43 y 48 que son preferiblemente series de detectores segmentadas para usar junto con una geometría del abanico del haz. El sistema 42 en la Figura 3 es un sistema de rayos X de baja energía, que puede ser por pulsos o no, para inspeccionar las secciones cargadas de forma ligera de un contenedor de transporte con buena sensibilidad. El sistema inferior 37 en la figura es un linac de alta energía (~MeV) por pulsos con un absorbedor 40 apropiado para eliminar los componentes del rayo X de menor energía. Los ciclos de utilización de los dos sistemas están intercalados de manera que sólo uno de ellos está contando en un momento dado. Los indicadores de la radiación ambiental 26, 28, y 29 se muestran suministrando sus señales a un sistema central 30 para indicar y controlar las intensidades de los haces desde los generadores de rayos X, como se ha descrito anteriormente con referencia a la Figura 2a.

En la realización de la invención mostrada en la Figura 3, la inspección mediante un sistema de inspección con linac 37 (esencialmente el mismo que 16 en la Figura 2) va precedida de un sistema de inspección “de baja energía” 42. El sistema 42 está compuesto por un generador de rayos X 44 en el intervalo de 200 keV a 500 keV que suministra un abanico del haz 46 que atraviesa el cargamento del contenedor de transporte 10 y se detecta en el detector segmentado 48. El sistema 42 usa componentes relativamente baratos; por ejemplo, un tubo de rayos X convencional 44 y detectores 48 que en muchas ocasiones son más finos que los de la serie 43. El sistema linac 37 se ha descrito anteriormente con referencia a la Figura 2; la única diferencia radica en el absorbedor 40. El absorbedor 40 puede tener diversos espesores o materiales que pueden insertarse para una flexibilidad y control máximos. En esta realización preferida, se considera un único absorbedor de 2 cm de uranio que está siempre en su sitio de manera que el haz 41 tiene el perfil de intensidad espectral mostrado como la curva de puntos 8 de la Figura 1. El absorbedor 40 se muestra separado del acelerador 38. En la práctica, el absorbedor se dispone en las cercanías del ánodo acelerador y puede ser integral con el mismo.

Una característica importante de esta invención es que los dos haces 46 del sistema 42, y 41 del sistema 37 no se detectan nunca al mismo tiempo, de esta manera los dos sistemas pueden estar bastante juntos sin ninguna interferencia entre ellos. Un procedimiento preferido para implementar esta característica es usar el hecho de que el linac 38 suministra haces en ráfagas de 2 μ s que están presentes solo durante el 0,1% del tiempo. El detector 43 se enciende justo antes del pulso del haz de linac y se apaga justo después. El detector 48 se apaga durante el tiempo en el que el haz de rayos X 39 se enciende, evitando de esta manera la interferencia del sistema de alta energía 37 en el sistema de baja energía 42. Como se sabe en la técnica, el detector 48 puede “apagarse” en muchos puntos a lo largo de la ruta electrónica, desde el extremo frontal, apagando la tensión del detector, hasta el extremo de salida ignorando la lectura

o el ajuste al valor medio de las intensidades que preceden y que siguen al pulso de linac. Evitar las interferencias en cualquier dirección es trivial si el generador de rayos X 44 es un acelerador por pulsos ya que sus pulsos pueden intercalarse con aquellos de 38. Si, como se prefiere, el acelerador 44 es un tubo de rayos X de corriente continua, entonces el haz 46 debe desconectarse durante los breves periodos en los que el haz 39 está encendido. La capacidad para conectar y desconectar la corriente del haz 46 en microsegundos se cimenta en muchos generadores de rayos X disponibles en el mercado.

El sistema de rayos X 42 sirve para dos funciones principales: en primer lugar, produce una imagen de transmisión a través de los componentes cargados de forma ligera del cargamento usando los rayos X de baja energía necesarios para una alta sensibilidad. En segundo lugar, su imagen de cualquier sección del cargamento se obtiene muchos segundos antes de que la sección correspondiente sea inspeccionada por el sistema 37 de manera que los resultados obtenidos de la imagen del sistema 42 pueden, mediante el regulador 45, controlar automáticamente la intensidad del haz del acelerador 38. Por ejemplo, no es necesario examinar para nada el objeto ligero 14 en la Figura 3, con el sistema 37, que sólo necesita examinar el objeto denso 12. Como el objeto 12 sólo ocupa aproximadamente la mitad de la longitud del contenedor de transporte 10, la potencia del acelerador 38 puede aumentarse en un factor de dos durante el tiempo exacto, para obtener una mayor penetración. Como otros ejemplos, si se descubren objetos escondidos usando el haz de baja energía, el haz de alta energía debe cortarse. Análogamente, si se descubren productos alimenticios, entonces la energía del linac debe cambiarse a 500 keV para cumplir las normas de irradiación de alimentos.

Los resultados obtenidos de la imagen del sistema 42 pueden usarse también para controlar la distribución angular del abanico del haz 41. Para hacer esto, el absorbedor 40 se articula en la dirección vertical. Cada segmento articulado tiene una pluralidad de posiciones y puede controlarse por ordenador: un absorbedor nominal tal como uranio de 2 cm de espesor se inserta para inspeccionar objetos gruesos y un absorbedor muy grueso, "negro" se inserta en las posiciones de altura que ya se han sido inspeccionadas por las bajas energías del sistema 42. Funcionando de esta manera, el absorbedor 40 actúa como un conformador del perfil del haz de abanico del haz 41.

Los detectores de radiación ambiental 26, 28, y 29 sirven para las mismas funciones en esta realización que en la realización descrita anteriormente con referencia a la Figura 2a. Además, los detectores de radiación ambiental 26, 28, y 29 mantienen ventajosamente la máxima efectividad de los componentes de baja y alta energía.

Haciendo referencia ahora a la Figura 4, se muestra una vista esquemática de una realización de la invención en la que las imágenes de retrodispersión se obtienen desde dos lados del cargamento 10 mediante los sistemas 60 y 72. Cada uno de los sistemas 60 y 72 consiste en un tubo de rayos X 62 y 74 que funciona a una energía máxima típica de aproximadamente 440 keV, aunque pueden ser apropiadas otras tensiones operativas tan bajas como 200 keV, dependiendo de la aplicación. Los rayos X generados 63 y 78 se forman en un haz luminoso de barrido girando las ruedas 64 y 76, cada una de las cuales tiene radios huecos. Una rueda interruptora típica tiene tener 4 radios espaciados 90° de manera que un haz luminoso barre a través del cargamento cuatro veces por vuelta. Los rayos X transmitidos a través del cargamento 10 se detectan en un detector no segmentado 68. Los rayos X retrodispersados de objetos tales como 14 se detectan en detectores de retro-dispersión 70 y 80.

La imagen de transmisión del sistema 60 sirve para las mismas funciones que el sistema de transmisión 42 mostrado en la realización descrita anteriormente con referencia a la Figura 3: produce la imagen necesaria de las secciones cargadas de forma ligera del cargamento y controla la intensidad con el tiempo del haz de rayos X desde el sistema linac 50.

El sistema de rayos X de menor energía 72 solo necesita un sistema de retrodispersión ya que las imágenes de transmisión necesarias se han obtenido de los sistemas 60 y 50.

Las interferencias entre los tres sistemas 60, 50, y 72 pueden minimizarse de diferentes maneras dentro del alcance de la invención. Puede suponerse, para el siguiente ejemplo y sin limitación, que el sistema 50 usa el linac por pulsos a 3 MeV y que los sistemas 60 y 72 usan tubos de rayos X de corriente continua. Para evitar interferencias entre el linac y los aceleradores de corriente continua, los detectores 68, 70, y 80, y los haces 63 y 78 se apagan todos ellos cuando el haz 52 está encendido. Apagar los haces en los sistemas 60 y 72, y la supresión detectores 68, 70 y 80 crea pequeñas aberraciones, fácilmente corregibles ya que sólo aproximadamente un único píxel entre un millar se ve afectado. Las interferencias entre los sistemas 60 y 72 generalmente serán pequeñas, ya que están relativamente separados, aunque para eliminar completamente estas interferencias sólo es necesario intercalar los haces luminosos de exploración. Por ejemplo, cada una de las ruedas 64 y 76 puede tener sólo dos radios; la primera a dicho 0° y 180°, la última a 90° y 270°. Según giran las ruedas sincronizadas, los haces incidentes sobre el cargamento 10 se alternan. En este procedimiento, las ruedas giran a dos veces la velocidad que sería necesaria si cada una tuviera 4 radios.

Haciendo referencia adicionalmente a la Figura 4, los indicadores de radiación ambiental 26, 28, y 29, como en el caso anterior, controlan las intensidades desde los aceleradores de manera que los niveles de radiación ambiental satisfacen aunque nunca superar las especificaciones de la "cabina". Esta realización puede ser especialmente ventajosa en que añade capacidad de formación de imágenes a través de un cargamento cargado de forma pesada sin aumentar el coste de la infraestructura de ninguna manera significativa. Las simulaciones de Monte Carlo detalladas muestran que el sistema mostrado esquemáticamente en la Figura 4 puede formar imágenes a través de más de 30 cm de acero para todo el cargamento mientras que se mantienen las especificaciones de "cabina abierta" en un pasillo paso a través de 12,2 m (40 pies) (la longitud típica de un semi-tráiler) sin necesidad de puertas o un techo para la contención de

la radiación ionizante. Se necesita una pequeña infraestructura de protección o contención de radiación para satisfacer las normas de seguridad de radiación de una denominada “cabina abierta”, evitando de esta manera los millones de dólares habituales en costes de construcción, un factor importante en la comercialización de estos sistemas.

Las realizaciones de la presente invención pueden aplicarse ventajosamente de manera que los sistemas MeV pueden tener tanto alta sensibilidad a objetos finos usando rayos X de baja energía como alta penetración de objetos gruesos usando rayos X de alta energía y esto lo hacen con una estructura de inspección abierta que mantiene el estado de “cabina abierta”. Debe resaltarse que una estructura de inspección “abierta” puede tener un techo y puertas aunque esto no sería para protección de la radiación.

Esta invención muestra cómo, en diversos sistemas de rayo X diferentes, el campo de radiación puede minimizarse de manera que los sistemas de inspección pueden ser de “cabina abierta”, manteniendo ambas capacidades de rayo X de alta energía y de baja energía. El primer espectro se forma mediante absorbedores. Se realizan ganancias adicionales usando indicadores de radiación ambiental para controlar la intensidad de los haces desde los generadores de rayos X y mantener la sensibilidad y penetración más eficaz, manteniéndose dentro de las especificaciones de “cabina abierta”.

Una realización alternativa a la realización descrita con referencia a la Figura 4 omite el detector de transmisión 68 del sistema 60 y usa el procedimiento descrito con referencia a la Figura 2 con su absorbedor variable 22. Esta variación en el tema básico carece de la flexibilidad de la realización mostrada en la Figura 4 aunque puede usarse ventajosamente en situaciones en las que es apropiado usar energías de rayo X de energía bastante baja, por ejemplo menores de 150 keV, en los sistemas de retrodispersión 60 y 72.

Para los fines de los ejemplos descritos anteriormente, puede suponerse, sin limitación, que el acelerador de alta energía es un acelerador lineal (linac) por pulsos, de 3 MeV, que suministra rayos X en ráfagas de $2\ \mu\text{s}$ espaciadas 2 ms; es decir, 500 pulsos por segundo y un factor de utilización de 10^{-3} . De hecho, están disponibles en el mercado aceleradores, que suministran hasta kilovatios de potencia media, con energías desde menos de 2 MeV a más de 9 MeV.

Debe observarse, de acuerdo con una realización alternativa de la invención, que pueden seleccionarse diferentes absorbedores para cada acelerador de energía para conformar el espectro de energía resultante para la penetración máxima consistente con el tipo de contenidos del contenedor de transporte inspeccionado y una dosis ambiental máxima especificada o una dosis media especificada.

Aunque la invención se ha descrito en detalle, se entiende claramente que la misma es a modo de ilustración y ejemplo y no debe considerarse una limitación. De hecho, numerosas variaciones y modificaciones resultarán evidentes para los especialistas en la técnica. Se pretende que todas estas variaciones y modificaciones estén dentro del alcance de la presente invención como se ha definido en las reivindicaciones adjuntas.

REIVINDICACIONES

1. Un sistema de inspección para inspeccionar un objeto (14), comprendiendo el sistema de inspección una fuente (18) de radiación penetrante (21) y al menos un detector (20), la fuente para generar un haz y para irradiar el objeto y **caracterizado** en cada instante de tiempo por un espectro de energía instantáneo y una intensidad, el detector para detectar la radiación penetrante después de la interacción con el objeto; estando **caracterizado** el sistema de inspección porque comprende un regulador (45) para proporcionar radiación penetrante incidente que tiene un primer espectro instantáneo dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial en un primer caso de manera que los fotones de energías menores que la primera energía fiducial penetran a través del objeto, proporcionando el regulador radiación penetrante incidente que tiene un segundo espectro instantáneo dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial en un segundo caso si y solo si dichos fotones, cuando están presentes, de energías menores que la primera energía fiducial no penetran a través del objeto, de manera que una dosis de radiación media se mantiene por debajo de un nivel especificado.
2. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 1 en el que la fuente de radiación penetrante incluye un filtro variable con el tiempo (22).
3. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 2 en el que el filtro variable con el tiempo es un elemento rotatorio que tiene una pluralidad de segmentos (24) de distintas características de absorción espectral.
4. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 3 en el que cada uno de la pluralidad de segmentos tiene una sección transversal con forma de cuña.
5. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 2 en el que el filtro variable con el tiempo incluye un absorbedor elegido entre el grupo de elementos pesados incluyendo uranio, volframio y plomo.
6. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 1 que comprende adicionalmente:
 - (a) al menos un indicador de radiación ambiental (26, 28) para crear una señal basada en la radiación detectada fuera de una zona de exclusión; y
 - (b) un controlador (30) para regular la intensidad de la fuente basada al menos en la señal.
7. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 6 en el que la fuente es de pulsos y el controlador regula el número de pulsos del haz por unidad de tiempo basado al menos en la señal.
8. Un sistema de inspección para inspeccionar un objeto (14), comprendiendo el sistema de inspección una primera fuente (62) de radiación penetrante para generar un primer haz (63) y para irradiar el objeto, estando **caracterizada** la primera fuente por un espectro de energía dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial; estando el sistema de inspección **caracterizado** porque comprende:
 - (a) una segunda fuente (51) de radiación penetrante para generar un segundo haz (52) y para irradiar el objeto, estando **caracterizada** la segunda fuente por una intensidad de fuente y un espectro de energía dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial;
 - (b) un primer detector (68) para detectar la radiación penetrante de la primera fuente después de la interacción con el objeto y un segundo detector (58) para detectar la radiación penetrante de la segunda fuente después de la interacción con el objeto, constituyendo la primera fuente y el primer detector un primer módulo de inspección (60) y constituyendo la segunda fuente y el segundo detector un segundo módulo de inspección (50);
 - (c) un regulador (45) para activar la primera y segunda fuentes de radiación penetrante de una manera intercalada en el tiempo; y
 - (d) un controlador de intensidad (30) para regular la segunda energía fiducial de la segunda fuente basado al menos en la radiación penetrante de la primera fuente después de la interacción con el objeto.
9. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 8 que comprende adicionalmente un controlador de intensidad para regular la intensidad de la segunda fuente basado al menos en la radiación penetrante de la primera fuente después de la interacción con el objeto.
10. Un sistema de inspección de acuerdo con la reivindicación 8 que comprende adicionalmente un conformador del perfil del haz (64) para controlar la dependencia angular del perfil de la intensidad de la segunda fuente de manera que minimiza la dosis de radiación ambiental.
11. Un procedimiento para inspeccionar un objeto, comprendiendo el procedimiento generar un haz de radiación penetrante **caracterizado** en cada instante de tiempo por un espectro de energía instantáneo y una intensidad, irra-

ES 2 298 220 T3

diando una parte del objeto, hasta la totalidad del mismo, con el haz y detectando la radiación penetrante después de la interacción con el objeto; estando **caracterizado** el procedimiento porque comprende:

- 5 (a) modular la radiación penetrante incidente mediante un regulador de manera que se proporciona un espectro instantáneo dominado por fotones de energías menores que una primera energía fiducial, a menos que los fotones cuando están presentes, de energías menores que la primera energía fiducial fallen a la hora de penetrar a través el objeto, en cuyo caso
- 10 (b) modular la radiación penetrante incidente mediante un regulador de manera que se cambia el espectro de energía instantáneo para proporcionar un segundo espectro instantáneo dominado por fotones de energías que superan una segunda energía fiducial de manera que una dosis de radiación media se mantiene por debajo de un nivel especificado.

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

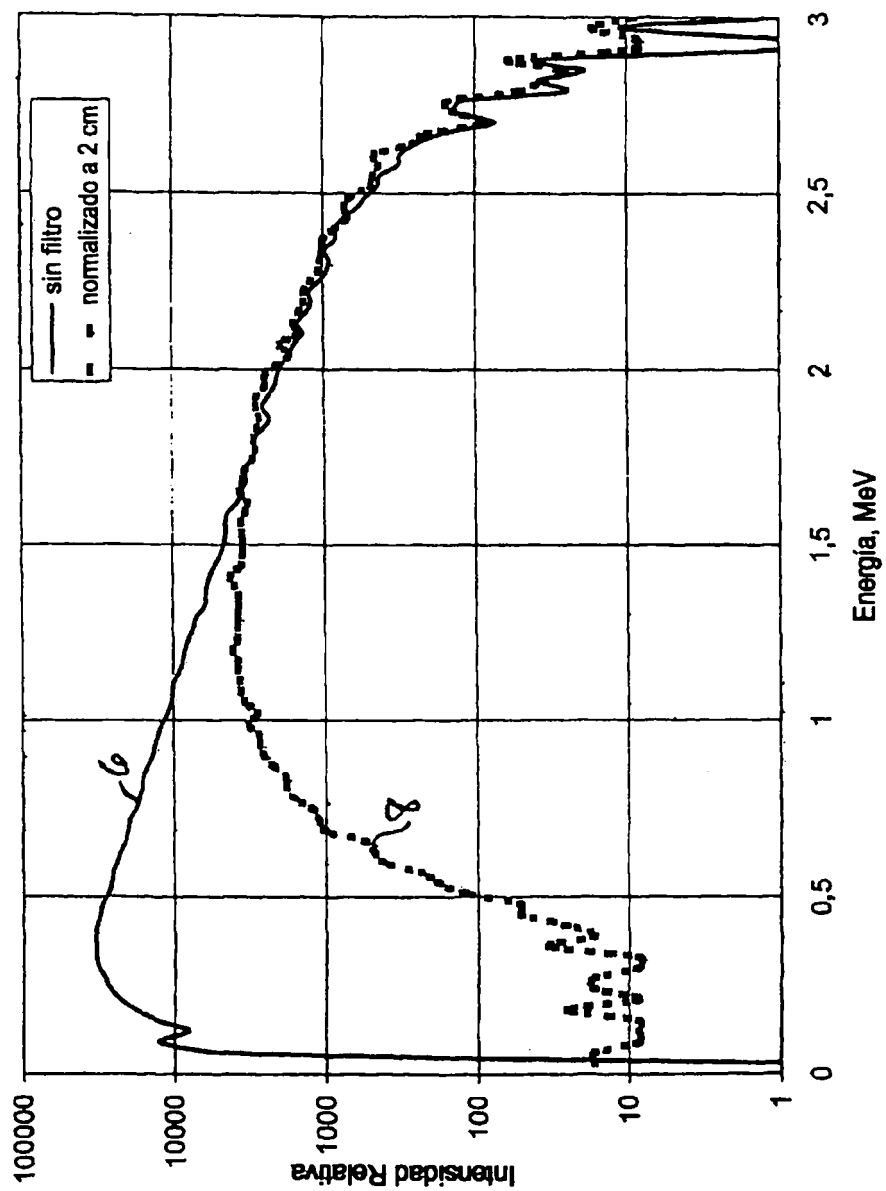


Fig. 1

