



19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

11 Número de publicación: **2 286 480**

51 Int. Cl.:

**G01N 23/10** (2006.01)

**G01V 5/00** (2006.01)

**G01T 1/16** (2006.01)

**G01T 3/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Número de solicitud europea: **03776665 .6**

86 Fecha de presentación : **10.12.2003**

87 Número de publicación de la solicitud: **1579202**

87 Fecha de publicación de la solicitud: **28.09.2005**

54 Título: **Equipo radiográfico.**

30 Prioridad: **10.12.2002 AU 2002953244**  
**29.08.2003 AU 2003904713**

45 Fecha de publicación de la mención BOPI:  
**01.12.2007**

45 Fecha de la publicación del folleto de la patente:  
**01.12.2007**

73 Titular/es: **COMMONWEALTH SCIENTIFIC AND  
INDUSTRIAL RESEARCH ORGANISATION**  
**Limestone Avenue**  
**Campbell, ACT 2601, AU**

72 Inventor/es: **Sowerby, Brian, David y**  
**Tickner, James, Richard**

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

Equipo radiográfico.

5 **Campo técnico**

Esta invención se refiere a un equipo radiográfico. En particular la invención se refiere a un equipo radiográfico para la detección de artículos, sustancias y materiales ocultos. Por ejemplo, la invención puede aplicarse a la detección de armas, explosivos, mercancía ilegal, drogas y otros artículos, sustancias y materiales ocultos en elementos tales como equipaje de avión, contenedores de carga aérea o para transporte.

**Técnica anterior**

Se han propuesto tecnologías basadas en rayos X, rayos gamma y neutrones para tratar de resolver este problema (Hussein, E., 1992, Gozani, t. 1997, An, J. *et al*, 2003). La tecnología más ampliamente adoptada es el escáner de rayos X que forma una imagen del elemento que están examinándose midiendo la transmisión de rayos X a través del elemento desde una fuente a un detector segmentado espacialmente. Los rayos X se atenúan más fuertemente por materiales densos, de mayor número atómico tales como metales. Por consiguiente, los escáneres de rayos X son ideales para detectar elementos tales como pistolas, cuchillos y otras armas. Sin embargo, los rayos X proporcionan poca potencia de discriminación entre elementos orgánicos e inorgánicos. Utilizando rayos X, la separación de materiales orgánicos ilícitos tales como explosivos o narcóticos de materiales orgánicos benignos, comúnmente encontrados no es posible.

Está desarrollándose un sistema de identificación elemental para la inspección de productos cargados sobre palés. El sistema llamado NELIS (Sistema de Análisis Elemental de Neutrones) utiliza un generador de neutrones de 14 MeV y tres detectores de rayos gamma para medir los rayos gamma inducidos desde el cargamento (Dokhale, P.A *et al*, 2001; Barzilov, A.P. Womble, P.C. y Vourvopoulos, G., 2001). NELIS no es un sistema de representación por imágenes y se utiliza junto con un escáner de rayos X para ayudar a identificar las anomalías de composición brutas.

Se ha desarrollado un sistema de inspección de cargamento por análisis de pulsación rápida de neutrones (Gozan, T., 1997, Sawa *et al.*, 1991) y comercializado por Ancore Corporation. El sistema PFNA utiliza un haz colimado de neutrones de pulsación rápida de nanosegundos y se mide el espectro resultante de rayos gamma. El procedimiento PFNA permite que se midan las relaciones de elementos orgánicos clave. Los neutrones de pulsación rápida de nanosegundos se requieren con el fin de localizar las regiones específicas que contribuyen a la señal de rayos gamma medida mediante espectrometría del tiempo de vuelo. En la práctica, la técnica está limitada por el acelerador de partículas muy caro y complejo, la limitada intensidad de la fuente de neutrones y la baja eficacia de detección de rayos gamma y las resultantes bajas velocidades de escaneado.

Los sistemas de radiografías de neutrones tienen la ventaja de la medición directa de neutrones transmitidos y son por tanto más eficaces que las técnicas que miden la radiación secundaria tales como los rayos gamma inducidos por neutrones. La radiografía de neutrones rápidos tiene el potencial para determinar la "imagen orgánica" de visibilidad directa de objetos (Klann, 1996). A diferencia de los rayos X, los neutrones se atenúan más fuertemente por materiales orgánicos, especialmente aquellos con altos contenidos de hidrógeno.

Se ha desarrollado un sistema de neutrones rápidos y rayos gamma y radiografía por Rynes *et al* (1999) para complementar a PFNA. En este sistema se transmiten neutrones de pulsación rápida de nanosegundos y rayos gamma desde un acelerador a través del objeto y las señales de neutrones y rayos gamma detectados se separan por el tiempo de llegada. El sistema resultante reivindica la combinación de las ventajas de los sistemas tanto de radiografías de rayos X como PFNA. Sin embargo está limitado por el acelerador de partículas muy caro y complejo.

Bartle (1995) ha sugerido utilizar la técnica de transmisión de neutrones rápidos y rayos gamma (Millen *et al*, 1990) para detectar la presencia de mercancías ilegales en equipaje, etc. Sin embargo esta técnica no se ha utilizado para representar por imágenes y su aplicación práctica para la detección de mercancías ilegales no se ha investigado.

Mikarov, V.I. *et al*, (200) ha investigado la posibilidad de radiografía de neutrones rápidos utilizando un generador de neutrones de 14 MeV y un sistema de detección con pantalla luminiscente/cámara CCD. Mikarov encontró que las aplicaciones estaban limitadas tanto por la baja eficacia de detección de la pantalla luminiscente de 2mm de espesor para neutrones rápidos como por la alta sensibilidad de la pantalla a los rayos X producidos por el generador de neutrones.

Los sistemas de radiografías de neutrones que utilizan un generador de 14 MeV y detección de neutrones térmicos están disponibles comercialmente (Le Tourneur, P., Bach, P. y Dance, W.E., 1998). Sin embargo el hecho de que los neutrones rápidos se ralentizan (alcanzan el equilibrio térmico) antes de realizar la radiografía limita el tamaño del objeto que está representándose por imágenes a unos pocos cm. No hay disponibles comercialmente sistemas de radiografías de neutrones rápidos que impliquen detección de neutrones rápidos.

La mayoría de los trabajos llevados a cabo con radiografía de neutrones se han llevado a cabo en el laboratorio utilizando neutrones de reactores nucleares o aceleradores de partículas que no son adecuados para aplicaciones de

manipulación de mercancías (Lefevre, H.W, *et al*, 1996, Miller, T.G., 1997, Chen, G. y Lanza, R.C., 2000, Brzosko, J.S. *et al*, 1992).

Para mejorar la capacidad de los sistemas de radiografías de neutrones rápidos para proporcionar discriminación entre diversos materiales orgánicos, se han propuesto sistemas que utilizan múltiples fuentes de energía de neutrones, junto con detectores con los medios para distinguir entre las diferentes energías de neutrones (Chen, G. y Lanza, R.C., 2000, Buffler, 2001). Los inconvenientes clave de estos sistemas han sido su dependencia de detectores de neutrones complejos que discriminan energía, y/o su utilización de sofisticadas fuentes de neutrones basadas en aceleradores de alta energía.

Perion *et al.* (Perion, 2000) ha propuesto un escáner que utiliza una fuente de radioisótopos o de radiación de frenado de rayos X de alta energía (MeV). O bien modulando la energía promedio de la fuente insertando y extrayendo rápidamente un filtro de bajo número atómico, o bien midiendo la energía de los rayos X detectados, es posible medir la transmisión a través del objeto que está escaneándose en dos energías de rayos X diferentes, una en la que domina la dispersión Compton y una en la que es significativa la producción de pares. Esta información puede utilizarse para deducir la densidad y número atómico medio de material en cada píxel de la imagen de escaneado. La principal desventaja de este esquema es el bajo contraste entre elementos diferentes, incluso cuando se utilizan fuentes de rayos X de muy alta energía. El coste de la disposición de detector de Perion sería también muy alto. Como alternativa, Perion sugiere que la medición de la transmisión tanto de los rayos X como de los neutrones (producidos o bien directamente en el objetivo de la radiación de frenado o bien insertando un filtro de producción de neutrones) puede dar información similar. La principal desventaja de este procedimiento es la baja energía de los neutrones producidos a través de reacciones ( $\gamma$ , n). Esto limita la capacidad de los neutrones para penetrar a través de cargamentos gruesos y aumenta la dificultad de detectar adecuadamente los neutrones transmitidos. En particular, es improbable que el detector escintilador apilado dado a conocer pudiera distinguir neutrones en presencia de un haz de rayos X mucho más intenso. Una desventaja de los esquemas tanto de rayos X de energía dual como de rayos X/neutrones es que los rayos X y los neutrones cubren un amplio intervalo de energías. Esto significa que no es posible modelar la transmisión utilizando una relación exponencial sencilla y que no es sencillo extraer información de sección transversal cuantitativa que pudiera utilizarse para identificación del material.

Se conoce a partir del documento US-A-5098640 inspeccionar un objeto utilizando un generador de tubo sellado que produce neutrones rápidos monoenergéticos. Este documento sugiere además proporcionar dentro del mismo alojamiento físico un aparato de inspección de neutrones y un aparato de inspección de rayos X.

Además, el documento US-A-5519225 da a conocer una fuente de radiación doble para irradiar alternativamente un objeto con neutrones y rayos X o rayos gamma. Se emplea un detector de ionización de gases para medir ambos tipos de radiación que pasan alternativamente a través del objeto.

### Descripción de la invención

La presente invención es un equipo radiográfico que comprende:

una fuente de neutrones rápidos sustancialmente monoenergéticos producidos a través de las reacciones de fusión de deuterio-tritio o deuterio-deuterio, que comprende un generador de tubo sellado o similar para producir los neutrones;

una fuente independiente de rayos X o rayos gamma de suficiente energía para penetrar sustancialmente en un objeto que va a representarse por imágenes;

un bloque de colimación que rodea las fuentes de neutrones y de rayos X y rayos gamma, aparte de la provisión de una o más ranuras para emitir haces de radiación en forma sustancialmente de abanico;

una disposición de detector que comprende una multiplicidad de píxeles de escintiladores individuales para recibir radiación de neutrones y radiación de rayos X o rayos gamma emitidas desde las respectivas fuentes y convertir la radiación recibida en impulsos luminosos, estando alineada la disposición de detector con los haces de radiación en forma de abanico emitidos desde el colimador de fuente y colimados para impedir sustancialmente que una radiación distinta a la transmitida directamente desde las fuentes alcance la disposición;

medios de conversión para convertir los impulsos luminosos producidos en los escintiladores en señales eléctricas;

medios de transporte para transportar el objeto entre las fuentes y la disposición de detector;

medios de cálculo para determinar a partir de las señales eléctricas la atenuación de los haces de rayos X o rayos gamma y los neutrones y para generar una salida que representa la distribución de masa y la composición del objeto interpuesto entre las fuentes y la disposición de detector; y

medios de visualización para visualizar imágenes basándose en la distribución de masa y la composición del objeto que está escaneándose.

## ES 2 286 480 T3

Una ventaja de la presente invención es que los neutrones son fundamentalmente monoenergéticos. Por tanto es posible modelar la transmisión de neutrones utilizando una relación exponencial sencilla y, además, la información se obtiene de manera más precisa, lo que resulta útil para la identificación del material.

5 El equipo según al menos una realización de la invención tiene la ventaja añadida de la medición directa de neutrones transmitidos y es, por lo tanto, mucho más eficaz cuando se compara con sistemas de la técnica anterior que miden radiación secundaria tal como rayos gamma inducidos por neutrones.

10 El equipo radiográfico puede utilizar una o más energías de neutrones. En un ejemplo de una técnica de energía de neutrones dual, el equipo radiográfico puede utilizar dos tubos, uno para producir sustancialmente neutrones de 14 MeV a través de la reacción de fusión de deuterio-tritio y un segundo para producir sustancialmente neutrones de 2,45 MeV a través de la reacción de fusión de deuterio-deuterio. La medición de la transmisión de neutrones a una segunda energía puede utilizarse para mejorar la capacidad de la técnica de transmisión de energía única.

15 La fuente de rayos X o rayos gamma puede comprender una fuente de radioisótopos tal como  $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$  con suficiente energía para penetrar sustancialmente a través del objeto que va a representarse por imágenes. La fuente de  $^{60}\text{Co}$  o  $^{137}\text{Cs}$  puede tener una energía de aproximadamente 1 MeV aunque pueden utilizarse otras energías dependiendo de la fuente. Alternativamente podría utilizarse un tubo de rayos X, o un acelerador lineal de electrones para producir radiación de frenado.

20 La colimación tanto de la fuente de rayos X o de rayos gamma como de la fuente de neutrones, actúa de manera ventajosa para minimizar la dispersión. Además, la colimación apropiada tanto de las fuentes como del detector garantiza una geometría de haz estrecho y por lo tanto mayor precisión al determinar la atenuación de neutrones y rayos gamma a través de un objeto. Además, el haz en forma de abanico altamente colimado proporciona seguridad de radiación aumentada. El bloque de colimación puede fabricarse a partir de parafina gruesa, hormigón grueso, bloques de protección de hormigón con granalla de hierro, acero, plomo, o similares. De manera similar, el o cada disposición de detector puede alojarse dentro de un protector de detector que presenta una ranura con el fin de proporcionar la colimación. El protector de colimación de detector puede hacerse de hierro y tener un espesor de más de aproximadamente 100 mm. El ancho de la ranura puede seleccionarse para permitir el paso directo de los neutrones y rayos gamma desde la fuente al detector y para proteger a la disposición de detector de la radiación dispersa. La ranura del detector puede ser aproximadamente del mismo ancho que la disposición de detector. Las ranuras del colimador de fuente pueden ser más estrechas.

35 La disposición de detector puede comprender una o más columnas de píxeles de escintiladores.

La misma disposición de detector puede ser capaz de detectar tanto neutrones como rayos X o rayos gamma. Puede utilizarse discriminación de energía para distinguir las señales o el detector puede hacerse funcionar secuencialmente para los neutrones y rayos X o rayos gamma. Una ventaja de utilizar la misma disposición de detector para detectar los neutrones y rayos X o rayos gamma, es que puede conseguirse una reducción en el coste de la disposición de detector.

40 De manera opcional pueden utilizarse disposiciones de detector independientes para detectar respectivamente los neutrones y rayos X o rayos gamma, con o sin colimadores de detector de neutrones y rayos X o rayos gamma independientes.

45 Los escintiladores pueden seleccionarse de manera que su respuesta espectral se adapte estrechamente a los fotodiodos. Los escintiladores pueden además estar rodeados por una máscara para cubrir al menos una parte de cada uno de los escintiladores, teniendo cada máscara una primera superficie reflectante para reflejar los impulsos luminosos que se escapan de vuelta al escintilador. La máscara tendrá una abertura para permitir que se detecte la luz del escintilador mediante el fotodiodo. La máscara puede comprender capas de cinta de PTFE y/o papel Tyvek. De manera ventajosa, la eficacia de los escintiladores de plástico con una máscara para neutrones puede ser mayor del 10%. El material que rodea los escintiladores actúa para garantizar que la luz que se escapa de los escintiladores se refleja de vuelta para detectarse. En un ejemplo en el que cada disposición de detector incluye escintiladores de plástico de emisión de luz naranja y fotodiodos de silicio, el equipo puede tener de manera ventajosa una mayor eficacia de rendimiento que permite que las imágenes se capten más rápidamente. Además, el equipo puede fabricarse a un coste relativamente más bajo.

Pueden utilizarse aceite de silicona, grasa GE-688, polisiloaxina, pegamento óptico tal como pegamento Eljen EJ-500, o similares para acoplar óptimamente los fotodiodos a los respectivos escintiladores.

60 Si el equipo radiográfico comprende una única disposición de detector para detectar tanto neutrones como rayos X o rayos gamma, los escintiladores pueden ser escintiladores de plástico o escintiladores de líquido.

En un ejemplo adicional en el que el equipo radiográfico comprende fuentes de neutrones dobles y una fuente de rayos X o rayos gamma, los escintiladores pueden ser escintiladores de plástico o líquido. En este ejemplo, los escintiladores pueden estar acoplados a tubos fotomultiplicadores.

65 Si el equipo radiográfico comprende disposiciones de detector de neutrones y rayos gamma independientes, los escintiladores de neutrones pueden ser preferiblemente escintiladores de plástico o escintiladores de líquido y los

## ES 2 286 480 T3

escintiladores de rayos gamma pueden ser escintiladores de plástico, escintiladores de líquido o escintiladores inorgánicos tales como yoduro de cesio, yoduro de sodio o germanato de bismuto. Alternativamente, los detectores de rayos X o rayos gamma pueden ser cámaras de ionización.

5 La cara que recibe la radiación de cada escintilador, o el “área” de cada escintilador, corresponde a un único píxel. El área de cada escintilador puede normalmente ser menor de aproximadamente 20 mm por 20 mm. Áreas más pequeñas llevan a una resolución espacial mejorada.

10 El espesor de cada escintilador puede estar en el intervalo de 50 a 100 mm y puede estar en función de la eficacia de detección y la eficacia de captación de luz. En un ejemplo en el que el objeto que va a representarse por imágenes es un dispositivo de unidad de carga o ULD tal como aquellos utilizados normalmente en entornos de aeropuertos, la cara que recibe la radiación de la disposición de escintiladores puede tener dimensiones de aproximadamente 120 mm x 3.300 mm y puede comprender aproximadamente 1.000 píxeles. Cuando se combina con una energía de fuente de neutrones de 14 MeV de aproximadamente  $10^{10}$  neutrones/segundo, el contenido de un único ULD puede representarse por imágenes a lo largo de un periodo de tiempo de aproximadamente un minuto.

15 Como alternativa pueden utilizarse escintiladores de neutrones y rayos gamma independientes, que comprenden, por ejemplo, aproximadamente 1.000 píxeles de neutrones y aproximadamente 500 píxeles de rayos gamma. En la práctica, los píxeles de rayos gamma pueden hacerse más pequeños que los píxeles de neutrones, lo que proporciona de manera ventajosa imágenes espaciales de alta resolución.

20 En un ejemplo adicional, los medios de conversión pueden comprender tubos fotomultiplicadores y fibras ópticas de desplazamiento de longitud de onda (WSF). En este ejemplo, la luz de una fila o columna de barras del escintilador puede captarse mediante las WSF y transmitirse a un tubo fotomultiplicador multiánodo. Poniendo un índice a la fila y columna que producen el impulso luminoso, puede inferirse la barra del escintilador que intercepta la radiación.

25 Los medios de conversión pueden incluir amplificadores de alta ganancia y bajo ruido para amplificar las señales de salida. Los medios de conversión pueden incluir un ordenador para realizar procesamiento de imágenes y visualizar las imágenes para un operador en una pantalla de ordenador.

30 El detector puede estar controlado en temperatura para reducir el ruido y mejorar la estabilidad. Por ejemplo, los fotodiodos y preamplificadores pueden estar refrigerados a aproximadamente  $-10^{\circ}\text{C}$  o menos.

35 En un ejemplo, cuando se escanea un objeto que va representarse por imágenes, se obtienen una o más salidas midiendo la transmisión de, por ejemplo, los neutrones de 14 MeV a través del objeto y la transmisión de los rayos X o rayos gamma de 1 MeV a través del objeto. Para un escaneado de neutrones de energía dual, también se mide la transmisión de, por ejemplo, los neutrones de 2,45 MeV a través del objeto. La invención no está limitada a la utilización de estas energías únicamente.

40 Si se utiliza una única disposición de detector para recibir la energía de radiación desde la fuente de rayos X o rayos gamma y la fuente de neutrones, el objeto puede escanearse más de una vez.

45 Si se utilizan detectores independientes para recibir la energía de radiación desde la fuente de neutrones y la fuente de rayos X o rayos gamma, la señal de salida puede comprender una primera salida de la primera disposición de escintiladores y una segunda salida de la segunda disposición de escintiladores, en los que la primera salida se refiere a la tasa de conteo de neutrones en cada ubicación de píxel del detector, y la segunda salida se refiere a la tasa de conteo de rayos X o rayos gamma en cada ubicación de píxel del detector.

50 Cada una de las entradas de la fuente puede procesarse por separado. Puede recogerse un espectro de escintilación sencillo por separado para cada píxel de la disposición para deducir las tasas de conteo de neutrones y rayos X o rayos gamma para cada píxel. La información puede entonces reunirse para formar una imagen de neutrones en dos dimensiones completa y una imagen de rayos X o rayos gamma en dos dimensiones completa. La imagen resultante puede tener una resolución vertical determinada por el tamaño de píxel, y una resolución horizontal determinada por el tamaño de píxel y la frecuencia con la que se lee la disposición.

55 El ordenador puede también ser capaz de realizar identificación automática del material. Por ejemplo, las salidas de la transmisión pueden convertirse en imágenes de coeficientes de atenuación de masa para cada píxel para la visualización en una pantalla de ordenador con diferentes valores de píxel asociados con diferentes colores. En particular, las imágenes de coeficientes de atenuación de masa pueden obtenerse a partir de las tasas de conteo medidas a partir de las transmisiones para cada uno de los neutrones de 14 MeV y rayos X o rayos gamma o los neutrones de 14 MeV, neutrones de 2,45 MeV y rayos X o gamma.

60 El análisis de las imágenes de coeficientes de atenuación de masa permite distinguir una variedad de materiales inorgánicos y orgánicos. Tal análisis puede incluir formar imágenes de relaciones de sección transversal entre pares de imágenes de coeficientes de atenuación de masa. Dependiendo de si se utiliza una única fuente o fuentes de neutrones dobles, las imágenes de relaciones de sección transversal pueden formarse a partir de las imágenes de coeficientes de atenuación de masa de la fuente de neutrones y los rayos X o rayos gamma, o la primera y segunda fuente de neutrones y la primera o segunda fuente de neutrones y los rayos X o rayos gamma. Por ejemplo, los neutrones de 14 MeV y

## ES 2 286 480 T3

los rayos X o rayos gamma, los neutrones de 14 MeV y los neutrones de 2,45 MeV y los rayos X o rayos gamma. De manera ventajosa, tales relaciones son independientes de la masa del objeto.

5 Las proporciones en las que se combinan las imágenes de relaciones de sección transversal pueden ajustarse por el operador para maximizar el contraste y la sensibilidad a un objeto particular que está examinándose en la imagen.

Puede formarse una imagen que sea una combinación lineal de dos imágenes de relaciones de sección transversal.

10 Pueden identificarse dos regiones en una imagen que contienen una primera sustancia, pero sólo una de las regiones puede contener una segunda sustancia. Realizando restas de sección transversal la imagen de la primera sustancia puede extraerse de manera efectiva dejando la imagen de la segunda sustancia disponible para la identificación. La masa de la segunda sustancia puede obtenerse a partir de los datos de transmisión de rayos X o gamma.

15 En un ejemplo, la fuente de neutrones y el detector son estacionarios y los medios de transporte están dispuestos de manera que el objeto se mueve en frente de la fuente de neutrones y rayos gamma. En un ejemplo adicional, el objeto puede ser estacionario y los medios de transporte estar dispuestos de manera que la fuente y el detector se mueven en sincronización a cada lado del objeto. En un ejemplo adicional más, pueden situarse múltiples conjuntos de detectores alrededor de fuentes que están ubicadas en el centro para permitir la adquisición simultánea de escaneos de una pluralidad de objetos separados. Esto tendría la ventaja de mejorar el rendimiento. En un ejemplo de este tipo, los  
20 medios de transporte pueden estar dispuestos de manera que los objetos pueden moverse entre la fuente de neutrones y el respectivo detector. Alternativamente, las fuentes y detectores pueden hacerse girar alrededor de un objeto que va a examinarse para permitir la obtención de múltiples vistas.

25 La velocidad a la que puede moverse el objeto en frente de o bien la fuente de neutrones, o bien la fuente de neutrones y rayos X o rayos gamma depende parcialmente de la intensidad de las fuentes de neutrones y rayos gamma. La intensidad de la única fuente de neutrones de 14 MeV puede ser del orden  $10^{10}$  neutrones/segundo, o tan alta como sea posible en la práctica con el fin de mejorar las estadísticas de conteo.

30 La velocidad a la que puede moverse el objeto en frente de la fuente de neutrones y rayos X o rayos gamma depende además de la cara que recibe la radiación de la disposición de escintiladores y del número de escintiladores. Además, la longitud de la disposición depende parcialmente de la longitud del objeto que va a representarse por imágenes.

35 El objeto puede escanearse entre las fuentes de neutrones y rayos gamma y el detector y puede pasar a través de un túnel protegido. Los medios de transporte pueden comprender un par de raíles para la colocación de una carretilla o plataforma sobre la que puede transportarse el objeto. Como alternativa, los medios de transporte pueden incluir una cinta transportadora u otra disposición similar para hacer pasar o moverse mediante torno objetos a través del túnel. Los medios de transporte pueden estar automatizados de manera que el objeto se transporta suavemente en frente de la fuente de neutrones a una velocidad uniforme controlable.

40 La invención puede aplicarse a exámenes no invasivos de cargamento marítimo, dispositivos de unidad de carga (ULD) de cargamento aéreo, o contenedores más pequeños o paquetes, la detección de mercancías ilegales, explosivos y otros artículos, sustancias o materiales. Puede proporcionar especificidad mejorada para materiales ilegales, tales como materiales orgánicos en matrices inorgánicas principalmente, así como la detección e identificación de clases específicas de material orgánico. Es particularmente adecuado para la detección de explosivos, narcóticos y otros  
45 elementos ilegales ocultos en equipaje de avión, contenedores de carga aérea y contenedores para transporte.

Una ventaja adicional de al menos una realización de la invención es que la utilización de un generador de neutrones para producir neutrones puede conectarse y desconectarse.

50 Puede también proporcionar automatización aumentada del proceso de inspección, con dependencia reducida de operadores humanos.

55 Además, puede proporcionar una velocidad de escaneado rápida de modo que puede conseguirse un alto rendimiento. Es sencilla, de bajo coste y utiliza fuentes de radiación segura; y sistemas de detección de radiación de bajo coste, sencillos. Puede funcionar a una velocidad de detección alta y con una probabilidad de alarma falsa baja.

### Breve descripción de los dibujos

60 Ahora se describirán varios ejemplos de la invención con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

la figura 1 es una vista en perspectiva del equipo radiográfico;

65 la figura 2 es una ilustración esquemática de un módulo de la disposición de detector del equipo radiográfico;

la figura 3 es un gráfico de barras de la relación calculada, R, la relación del neutrón de 14 MeV con los coeficientes de atenuación de masa de rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$  para un gran número de materiales benignos, narcóticos y explosivos;

## ES 2 286 480 T3

la figura 4 es una diagrama de la relación calculada, R, la relación del neutrón de 14 MeV con los coeficientes de atenuación de masa de rayos gamma de  $^{60}\text{Co}$  para una gama de elementos;

la figura 5a es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma de una motocicleta, la figura 5b es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma;

la figura 6a es una ilustración esquemática de una selección de muestras de materiales y objetos comunes dispuestos en estantes de madera; la figura 6b es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma; la figura 6c es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma;

la figura 7a es una ilustración esquemática de una selección de muestras de materiales, mercancías ilegales, alcohol, así como explosivos simulados y reales ocultos; la figura 7b es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma; la figura 7c es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma;

la figura 8a es una fotografía de un ULD que contiene elementos de metal electrónicos domésticos variados, bloques de hormigón y mercancías ilegales ocultas; la figura 8b es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma; la figura 8c es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma; la figura 8d es el resultado de visualización de la figura 8c que se ha procesado adicionalmente para resaltar el material orgánico;

la figura 9a es una fotografía de un ULD que contiene elementos domésticos variados y drogas ocultas; la figura 9b es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma; la figura 9c es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma; la figura 9d es el resultado de visualización de la figura 9c que se ha procesado adicionalmente para resaltar el material orgánico;

la figura 10a es una fotografía de un ULD que contiene elementos domésticos variados y drogas ocultas; la figura 10b es un resultado de visualización de un escaneo de rayos gamma; la figura 10c es un resultado de visualización en el que la imagen está coloreada según la relación de coeficientes de atenuación de masa, R, para neutrones de 14 MeV y rayos gamma; la figura 10d es el resultado de visualización de la figura 10c que se ha procesado adicionalmente para resaltar el material orgánico;

la figura 11 es un diagrama de un gran número de materiales benignos, narcóticos y explosivos en términos de dos relaciones de sección transversal, concretamente secciones transversales de neutrones de 2,45 MeV / neutrones de 14 MeV frente a secciones transversales de neutrones de 14 MeV / rayos X o gamma;

la figura 12a es una imagen de neutrones de DT de tasa de conteo simulada de una maleta; la figura 12b es una imagen de tasa de conteo simulada de una imagen de neutrones de DD de la maleta; la figura 12c es imagen de rayos X de tasa de conteo simulada de la maleta; la figura 12d es una imagen de sección transversal de DT / rayos X y la figura 12e es una imagen de sección transversal de DD / DT; y

la figura 13a es una imagen de neutrones de 14 MeV de un contenedor de carga aérea; la figura 13b es una imagen de rayos X respectivamente del mismo contenedor; y la figura 13c es una imagen combinada del mismo contenedor.

### Mejor modo para llevar a cabo la invención

La figura 1 ilustra la distribución general del equipo 10 radiográfico. El equipo 10 radiográfico incluye dos generadores de radiación independientes, el primero es un generador de neutrones A-325 MF Physics que tiene un módulo de emisión de neutrones de D-T para producir una fuente 12 de energía de neutrones que tienen una energía de 14 MeV. El generador de neutrones se hace funcionar a un voltaje de 80 a 110 kV. El segundo generador de radiación es una fuente 14 de  $^{60}\text{Co}$  de 0,82 GBq (o 22 mCi) para producir una fuente de rayos gamma y está ubicado a la derecha de y adyacente al generador de neutrones. El generador de neutrones y la fuente 14 de  $^{60}\text{Co}$  están situados dentro de un alojamiento 16 de protección de fuente.

Una disposición 18 de detector de 1.600 mm de largo y 20 mm de ancho está situada en la proximidad de la fuente de radiación y está alojada en un alojamiento 20 de protección de detector. La disposición 18 de detector, mostrada más claramente en la figura 2, está construida por ochenta barras 19 de escintilador de plástico (de las que sólo se muestra una parte), cada una con un área de recepción de la radiación de 20 mm x 20 mm, y una longitud de 75 mm. El área que recibe la radiación de cada barra 19 de escintilador corresponde a un único píxel en la trama de imagen. El término trama de imagen se utiliza para describir la disposición en dos dimensiones que contiene el número de conteos medidos en cada píxel, acumulados a lo largo de un intervalo de tiempo fijo. Las barras 19 de escintilador están hechas de un escintilador de plástico naranja con el fin de adaptar la respuesta espectral de los fotodiodos 21 de silicio con los respectivos escintiladores de plástico. Los fotodiodos 21 están acoplados ópticamente con los respectivos escintiladores 19 con pegamento óptico. Una máscara reflectante está pintada en cada una de las

## ES 2 286 480 T3

combinaciones de barra de escintilador naranja y fotodiodo para minimizar la pérdida de cualquier luz que escape de las barras de escintilador.

En la realización principal, la luz del escintilador producida en una barra 19 mediante un neutrón o rayo X o gamma incidente se detecta mediante un fotodiodo 21 fijado al extremo de la barra 19. En una primera variante, la luz de una fila o columna de barras de escintilador se recoge mediante una fibra óptica de desplazamiento de longitud de onda y se transmite al fotodiodo. Poniendo un índice a la fila y columna que produce el impulso luminoso, puede inferirse la barra de escintilador que intercepta la radiación. En una segunda variante, se recoge la luz de una multiplicidad de barras de escintilador mediante fibra óptica de desplazamiento de longitud de onda o transparente y se dirige a un fotodiodo sensible a la posición o tubo fotomultiplicador multiánodo, para permitir que se lean múltiples barras de escintilador mediante un único detector. En una tercera variante, se recoge la luz de varias filas o columnas de barras de escintilador mediante fibras ópticas de desplazamiento de longitud de onda y se transmite a un fotodiodo sensible a la posición o fotomultiplicador multiánodo. Poniendo un índice a la fila y columna que produce el impulso luminoso, puede inferirse la barra de escintilador que intercepta la radiación.

Puesto que los respectivos fotodiodos 21 no tienen ganancia interna, la electrónica 23 de acondicionamiento de señal incluye preamplificadores utilizados junto con amplificadores de alta ganancia con el fin de amplificar la señal de salida tanto para neutrones como para rayos gamma.

El equipo 10 alberga un ULD 28 con un ancho de hasta 2,5 m y una altura de 1,7 m. Cada ULD 28 que va a representarse por imágenes está montado sobre una plataforma 30 que tiene guías de deslizamiento para engancharse con un par de carriles 32. En la práctica, en un aeropuerto los ULD podrían escanearse mientras que están montados todavía sobre sus carretillas respectivas que se utilizan para transportar los ULD por el aeropuerto. Los ULD y sus carretillas podrían conducirse sobre una plataforma que atravesaría los haces de radiación a una velocidad conocida. Esto minimizaría la manipulación de los ULD en el aeropuerto.

Se proporciona un protector adicional de la forma de un túnel 34. El túnel 34 es suficientemente largo para que el equipo pueda hacerse funcionar sin puertas en cada extremo. Esto permite maximizar el número de ULD que pasan a través del equipo 10. Las hendiduras de colimación (no mostradas) que están cortadas en el protector de fuente y de detector respectivamente sirven para definir un haz de radiación en forma de abanico, dirigido desde las fuentes 12 y 14 hacia el detector 18 de radiación. La hendidura 38 de colimación de detector y el detector 18 se extienden por toda la altura del túnel 34. Las ranuras (no mostradas) en los lados del protector 34 están dotadas de y coinciden con hendiduras de colimación y para el paso de radiación desde las fuentes 12, 14 al detector 18.

Cada uno de los protectores 16, 20 y 34 de radiación atenúan y absorben tanto rayos gamma como neutrones. Los materiales de protección incluyen hormigón, hierro y polietileno. Los protectores 16, 20 y 34 de radiación proporcionan protección radiológica para operadores del equipo u otras personas en su proximidad inmediata.

En funcionamiento, los objetos que van a representarse por imágenes están situados sobre la plataforma 30 que se impulsa entonces a través del túnel 34. En el escáner prototipo a escala completa descrito en el presente documento, la plataforma 30 se hace funcionar normalmente a una velocidad tal que cada incremento de 10 mm tarda aproximadamente cuarenta segundos en captarse. Esto corresponde a una velocidad de 0,25 mm/seg; por consiguiente, se requieren aproximadamente 2½ para captar la imagen de un ULD completo. En la práctica, la velocidad a la que viaja el ULD a través del equipo puede aumentarse por un factor de más de cien aumentando la intensidad de la fuente de neutrones y aumentando el área de la disposición de detector.

A medida que el objeto pasa a través del túnel 34, se recoge un espectro del escintilador por separado para cada elemento de la disposición de 80 píxeles. Estos espectros se leen y reinician cada vez que la plataforma 30 atraviesa 10 mm y los espectros se utilizan para deducir tasas de conteo de neutrones y rayos gamma para cada píxel. La información en cada banda vertical se reúne entonces para formar imágenes de neutrones y rayos gamma en dos dimensiones, completas.

La imagen resultante tiene una resolución vertical de 20 mm, determinada por el tamaño de píxel, y una resolución horizontal de 10 mm, determinada por la frecuencia con la que se lee la disposición de 80 píxeles. Tal como se trata posteriormente, la desconvolución de la imagen final se realiza para corregir cualquier pérdida de definición que puede surgir como resultado de la combinación del movimiento de la plataforma 30 durante el escaneo y el ancho de 20 mm de los píxeles.

Supóngase que la intensidad de neutrones e intensidad de rayos gamma transmitidos a través de un objeto y detectada en un píxel particular de cada imagen son  $I_n$  e  $I_\gamma$  respectivamente, y que la intensidad de neutrones e intensidad de rayos gamma transmitida y detectada en un píxel particular de cada imagen sin un objeto presente son  $I_{on}$  e  $I_{og}$  respectivamente.

Entonces, la atenuación de neutrones rápidos fundamentalmente monoenergéticos a través de un objeto de densidad  $\rho$  y espesor  $x$  puede calcularse utilizando la ecuación:

$$I_n/I_{on} = \exp(-\mu_{14} \rho x) \quad (1)$$

## ES 2 286 480 T3

De manera similar, la atenuación de rayos gamma fundamentalmente monoenergéticos a través de un objeto puede escribirse como:

$$I_g/I_{og} = \exp(-\mu_g \rho x) \quad (2)$$

en la que  $\mu_{14}$  es el coeficiente de atenuación de masa de neutrones a 14 MeV y  $\mu_g$  es el coeficiente de atenuación de masa gamma. La relación de coeficientes de atenuación de masa puede entonces calcularse directamente:

$$R = \mu_{14}/\mu_g = \ln(I_n/I_{on})/\ln(I_g/I_{og}) \quad (3)$$

en la que R está directamente relacionada con la composición del objeto y permite una amplia variedad de materiales inorgánicos y orgánicos y elementos que han de distinguirse.

Las figuras 3 y 4 ilustran la capacidad de R para distinguir una amplia variedad de materiales inorgánicos y orgánicos. Pueden distinguirse en general materiales naturales principalmente basados en carbohidratos tales como algodón, papel, madera, así como muchos alimentos, materiales naturales basados en proteínas tales como lana, seda y cuero y materiales orgánicos sintéticos, principalmente polímeros. Como se ilustra, los materiales inorgánicos tales como elementos de alfarería, cerámicos y metal se distinguen fácilmente de los materiales orgánicos.

Debido a las tasas de conteo superiores y a la dispersión de fondo inferior de los rayos gamma, la imagen de rayos gamma lleva la mayor parte de la información sobre la forma y la densidad. Para cada píxel en la imagen se calcula la cantidad  $\ln(I_g/I_{og})$ , que es proporcional a la masa total por unidad de área del material a lo largo de la línea desde la fuente de radiación al píxel en cuestión. Se aplica un filtro de afilado de tipo “sombrero mexicano” a esta imagen para mejorar la definición de los objetos y reducir los efectos del movimiento y la pérdida de definición de tamaño de píxel que afecta a la resolución horizontal de la imagen.

La relación de píxel a píxel de las imágenes de neutrones y rayos gamma lleva información sobre la composición media de cada píxel, que es independiente de la cantidad de material implicado.

Debido a las estadísticas de conteo relativamente bajas en la imagen de neutrones, hay presente un ruido píxel a píxel considerable en la imagen de composición. Por consiguiente, se aplica un filtro de suavización gaussiano de 5x5 píxeles a esta imagen. Aunque esto reduce la resolución de la información de composición en la imagen final, mejora significativamente la visibilidad de cambios sutiles en la composición para objetos con dimensiones de más de aproximadamente 50 mm.

Los resultados de seis escaneos se muestran en las figuras 5 a 10. Las imágenes en escala de grises ilustran los resultados del escaneo de rayos gamma sólo y, como tal, muestran los resultados que podrían conseguirse a partir de un escáner de rayos X convencional. Las regiones con poco o nada de material implicado se muestran en blanco y los materiales más densos se muestran como sombras de gris más oscuras. Las imágenes en color combinan la información de forma y densidad de los rayos gamma junto con la información de composición de la imagen de relación neutrones/gamma. La densidad del color muestra la densidad del material, correspondiendo el blanco a nada de material implicado y teniendo las regiones más densas un color saturado. El color de un píxel corresponde al valor R de ese píxel, siendo los valores R inferiores de color azul, los valores intermedios de turquesa a verde y amarillo y los valores superiores naranja. La asociación exacta entre el valor R y el color es diferente para cada imagen, con la escala de color ajustada para mostrar la máxima información en cada caso. Para escaneos ULD, también se presenta una imagen orgánica mejorada. Esto resalta las regiones orgánicas de la imagen, que son de color amarillo, naranja y rojo.

La figura 5a ilustra el resultado del escaneo de rayos gamma sólo de una motocicleta. La figura 5b ilustra la información de forma y densidad de los rayos gamma combinada junto con la información de composición del escaneo de imagen de la relación de neutrones/gamma de una motocicleta. Esta imagen proporciona una buena indicación de las capacidades globales de representación por imágenes del equipo. En particular, detalles precisos tales como los cables 52 de freno delanteros se muestran con bastante claridad en la figura 5b, aunque son considerablemente más pequeños que el tamaño de píxel de 20 mm. El chasis 54 de metal y el motor 56 de la motocicleta se muestran en azul en la figura 5b; mientras que el combustible 58 en el depósito de combustible, los neumáticos 60 de caucho, el asiento 62 de plástico y las luces de plástico se muestran en naranja. El aceite 64 en el colector de lubricante (inmediatamente por encima del pie de apoyo), cuando se saca el promedio con el metal que lo rodea, muestra un trozo en verde. Por el contrario, a partir de la figura 5a de la imagen de rayos gamma convencional, resulta difícil o imposible distinguir entre el aceite 64 y el colector de lubricante.

Las figuras 6a a 6c ilustran una selección de muestras de material y objetos comunes dispuestos sobre estantes de madera. De nuevo, como se ilustra en la figura 6c, los metales tales como hierro 66, plomo 68 y aluminio 70 se muestran en azul oscuro. Los materiales intermedios tales como hormigón 72, vidrio 74 (en el monitor 75 del ordenador) y polvo 76 de cerámica (alúmina,  $Al_2O_3$ ) se muestran en azul claro. Finalmente, los materiales orgánicos, incluyendo simulaciones elementales de heroína 77, metanfetamina 78, cocaína 89 y TNT 82 se muestran en una variedad de colores que van del verde al naranja, dependiendo del valor R del material. Dos estatuas de cerámica en el

## ES 2 286 480 T3

estante superior, una llena de granalla 84 de hierro y la otra con azúcar 86 pueden distinguirse claramente, tanto por la densidad como por la composición.

Las figuras 7a a 7c ilustran una selección adicional de materiales, incluyendo productos ilegales, alcohol y explosivos ocultos tanto simulados como reales (Detasheet). Se colocan tres bloques de hormigón huecos sobre el estante superior. El bloque de la izquierda contiene material 84 orgánico oculto (sustituto de droga); el bloque central está vacío y el bloque de la derecha contiene polvo 96 de alúmina. Estos tres bloques proporcionan modelos sencillos de drogas ocultas en un objeto de cerámica o alfarería, un objeto vacío y un objeto vacío hueco con paredes engrosadas. Mientras que la imagen de rayos gamma de la figura 7b distingue claramente entre el bloque 95 vacío y los bloques 95 y 96 llenos, no puede separar el bloque 94 lleno de sucedáneo de droga del bloque 96 lleno de alúmina. Por el contrario, la imagen de neutrones de la figura 6c revela claramente el relleno 94 orgánico oculto mostrado como un trozo amarillo/naranja. En el lado derecho del estante central se colocan dos recipientes, uno lleno de alcohol 98 puro (met.) y uno con agua 100 (H<sub>2</sub>O). El alcohol 98 se muestra claramente como más “orgánico” (mayor valor R) y es predominantemente de color naranja; el agua 100, con un menor valor R es predominantemente verde. En el mismo estante, los explosivos simulado 102 y real 104 muestran el mismo color, lo que muestra que la simulación es un buen sustituto del explosivo real. En el estante inferior hay una caja que contiene doce botellas de vidrio de las que sólo cuatro son visibles, dos llenas con bebida 106 alcohólica simulada (40% de etanol, 60% de agua) y dos llenas de agua 108. De nuevo, se muestra que las botellas 106 llenas de alcohol tienen un valor R superior (más verde/naranja) que el agua 108 (predominantemente azul). Esto contrasta con las botellas mostradas en la figura 7b que son casi indistinguibles.

Las figuras 8a a 8d, 9a a 9d y 10a a 10d ilustran los resultados de representar por imágenes ULD llenos de una variedad de objetos. En las tres figuras, el contenido de los ULD se ha mantenido deliberadamente bastante sencillo para simplificar la explicación de los resultados obtenidos. En particular, la mayor parte del material de envase que normalmente estaría presente (cajas de cartón, espuma, poliestireno, etc.) se ha omitido para que los objetos en el ULD puedan verse claramente. Se reconoce que, en la realidad, la mayor parte de ULD estarían mucho más abarrotados.

Las figuras 8a a 8d ilustran un ULD lleno de una variedad de aparatos electrónicos domésticos (una nevera 120 y varios ordenadores 122), piezas metálicas, bloques 124 de hormigón huecos (que sustituyen a tuberías cerámicas o estatuas o figuras huecas) y herramientas. Dos paquetes de cuentas de plástico, que sustituyen a drogas 126, están ocultos dentro de uno de los ordenadores y dentro de uno de los bloques de hormigón. Un cilindro 128 de gas propano también está oculto en el ULD. La figura 8a ilustra una fotografía del escáner ULD. La figura 8b muestra los resultados del escaneo de rayos gamma sólo. Ninguno de los paquetes de sucedáneos de drogas 126 resulta particularmente obvio. El cilindro 128 de gas propano puede identificarse basándose en su forma, aunque la naturaleza orgánica de su contenido no está clara. Las figuras 8c y 8d están coloreadas según la relación R de neutrones/gamma, como resultado, los materiales orgánicos se muestran en la figura 8 en azul (los sucedáneos de drogas 126 y el cilindro 128 de gas) y los materiales orgánicos en naranja (el ordenador 122 y los bloques 124). Las proporciones en las que se combinan las dos imágenes se ajustan por el operador para maximizar el contraste y la sensibilidad a los materiales orgánicos que son de color amarillo y rojo y para minimizar los efectos del amontonamiento que resulta de los objetos superpuestos, el resultado se ilustra en la figura 8d. Ambos paquetes de drogas 126 ocultas pueden identificarse claramente.

Las figuras 9a a 9d ilustran un ULD con drogas 124 ocultas dentro de dos ordenadores 122 y una nevera 120. Aunque puede verse en la imagen de rayos gamma de la figura 8b que los dos ordenadores 122 superiores aparecen algo diferentes de los dos de abajo, no queda claro si esta es una diferencia auténtica de la estructura de las máquinas. Sin embargo, en las figuras 9c y 9d resulta evidente inmediatamente que la diferencia se debe a un gran volumen de material orgánico, como se muestra por el color naranja brillante de las regiones con drogas 124. Los dos ordenadores 122 superiores contienen ~1 kg de bolsas de cuentas de plástico que simulan drogas empaquetadas. Esto contrasta con el color predominantemente azul (inorgánico o valor R bajo) del resto de la estructura 126 del ordenador. De manera similar, no queda claro a partir de la imagen de rayos gamma de la figura 9b de la nevera 120 si la anomalía en el centro de la imagen forma parte de la estructura de la nevera o no. Sin embargo, en las figuras 9c y 9d puede observarse que la anomalía 124 es claramente orgánica y contrasta con la estructura predominantemente inorgánica visible en el resto de la nevera (en particular, el compresor 125 abajo a la derecha y el compartimiento del congelador en la parte superior). De nuevo, en la imagen orgánica mejorada de la figura 9d, las drogas 124 ocultas son claramente visibles. Además, otro material orgánico en el ULD (especialmente las estanterías 128 de madera detrás de la nevera 120 y el recipiente de agua 127 a la izquierda de la nevera 120) también se muestran en naranja.

Las figuras 10a a 10d ilustran un segundo ULD con drogas reales ocultas (1 kg de heroína y otro de metanfetaminas). La heroína 130 está oculta dentro de un bloque 132 de hormigón hueco. Las metanfetaminas 134 están ocultas dentro de una pequeña caja, que está colocada dentro de una caja 136 mayor llena de ropa. La naturaleza orgánica de las drogas ocultas resulta evidente a partir de los colores en las imágenes de composición de las figuras 10c y 10d. De nuevo, la imagen orgánica mejorada de la figura 10d revela de manera efectiva las drogas 130 y 134 ocultas, especialmente la heroína 130 en color amarillo dentro de los bloques 132 de hormigón. Puesto que las metanfetaminas 134 están ocultas dentro de la caja 136 de ropa (inmediatamente detrás de la horquilla delantera de la bicicleta 140), la discriminación de la composición es menos reveladora en este caso. Sin embargo, el paquete de drogas 134 puede identificarse como una anomalía potencial debido a su forma y mayor densidad.

El equipo radiográfico tal como se ha descrito puede usarse de al menos tres maneras para detectar e identificar materiales ilegales. Primero, las imágenes de rayos gamma proporcionan información considerable sobre las formas,

tamaños y densidades de objetos dentro de un objeto tal como un ULD. Algunos materiales sospechosos pueden identificarse de este modo. Ejemplos particulares serían paquetes de droga ocultos dentro de espacios o cavidades de objetos huecos. Segundo, los colores de la imagen de rayos gamma basados en la información de composición derivada de las mediciones de neutrones, proporcionan potentes pistas adicionales en la interpretación de las imágenes de escaneado y en la identificación de materiales sospechosos. En particular, se facilita enormemente la detección de materiales orgánicos dentro de objetos predominantemente inorgánicos. Tercero, en ciertas circunstancias, el equipo puede utilizarse para medir la relación de neutrones/gamma (valores R) de materiales sospechosos para ayudar adicionalmente en su identificación. Este planteamiento funciona mejor cuando hay poco material subyacente o superpuesto alrededor de la sustancia que está midiéndose, o cuando el material subyacente y superpuesto es razonablemente uniforme en la proximidad inmediata de la región de medición. En estas circunstancias, es posible realizar una corrección aproximada de la absorción de neutrones y rayos gamma en el material subyacente y superpuesto para obtener el valor R de sólo la sustancia de interés.

Una segunda realización se aplica directamente a la realización de transmisión de neutrones rápidos de energía dual para 14 MeV y 2,45 MeV. Sin embargo, la siguiente explicación también se aplica a la transmisión de energía dual a energías diferentes de 2,45 y 14 MeV. Sin embargo, a diferencia de la transmisión de neutrones de energía única explicada anteriormente, se miden tres tasas de conteo en cada píxel en lugar de dos en el caso de la transmisión de neutrones única, y pueden calcularse dos relaciones de sección transversal.

Supóngase que las tasas de conteo en un píxel particular de cada imagen son  $r_{14}$ ,  $r_{2,45}$  y  $r_x$  respectivamente. Estas tasas están relacionadas con la masa (desconocida) de material  $m$  entre la fuente y los puntos de detección y los coeficientes de atenuación de masa (desconocidos) de este material para neutrones de 14 MeV, neutrones de 2,45 MeV y rayos X o gamma, indicados respectivamente como  $\mu_{14}$ ,  $\mu_{2,45}$  y  $\mu_x$ , por las relaciones:

$$r_{14} = R_{14} \exp(-m\mu_{14}) \quad (4)$$

$$r_x = R_x \exp(-m\mu_x) \quad (5)$$

$$r_{2,45} = R_{2,45} \exp(-m\mu_{2,45}) \quad (6)$$

en las que  $r_{14}$ ,  $r_{2,45}$  y  $r_x$  son respectivamente las tasa de conteo para neutrones de 14 MeV, neutrones de 2,45 MeV y rayos X o gamma cuando no hay presente ningún objeto implicado.

Las relaciones de sección transversal pueden calcularse directamente:

$$\mu_{14}/\mu_x = \log(r_{14}/R_{14})/\log(r_x/R_x) \quad (7)$$

$$\mu_{2,45}/\mu_{14} = \log(r_{2,45}/R_{2,45})/\log(r_{14}/R_{14}) \quad (8)$$

Obsérvese que ambas de estas relaciones son independientes de la masa de material presente en el haz entre la fuente y el detector.

Las relaciones de sección transversal que vienen dadas por las ecuaciones (7) y (8) permiten distinguir una amplia variedad de materiales orgánicos e inorgánicos.

La figura 11 ilustra la relación de la sección transversal de neutrones de 2,45 MeV con la sección transversal de neutrones de 14 MeV frente a la relación de la sección transversal de neutrones de 14 MeV con la sección transversal de rayos X o gamma, para una selección de materiales. La disponibilidad de dos relaciones de sección transversal mejora adicionalmente la capacidad de la invención para distinguir entre diferentes materiales. Por consiguiente, el análisis de las tres imágenes de coeficiente de atenuación de masa permite inferir información sobre el contenido del objeto que está examinándose.

La figura 12 ilustra el beneficio adicional de utilizar energías de neutrones dobles, considerando las imágenes simuladas de una maleta 150 mostrada en las figuras 12a a 12e. Las imágenes 12a a 12c corresponden a las ecuaciones (4), (5) y (6) y muestran la transmisión de neutrones de 14 MeV, neutrones de 2,45 MeV y rayos X o gamma, respectivamente. Las imágenes 12d a 12e corresponden a las ecuaciones (7) y (8) y muestran las secciones transversales de DT/rayos X y DD/TT, respectivamente.

## ES 2 286 480 T3

La maleta 150 está llena de ropa compuesta por algodón y lana, y contiene varios objetos benignos y sospechosos. La botella 152 contiene agua y la botella 154 contiene bebida alcohólica. Los tres bloques que pueden verse abajo a la derecha de la maleta 150 son libros de pasta blanda, heroína 158 y explosivo 160 RDX. Un pistola 162 también es visible arriba a la derecha de la maleta 150.

A partir de una imagen 12c convencional de rayos X resulta difícil o imposible distinguir entre los contenidos de las dos botellas 152, 154, o los tres paquetes 156, 158, 160 a la derecha de la maleta, que tienen densidades similares. Las imágenes 12a, 12d de neutrones proporcionan un mejor contraste entre los diferentes materiales, pero los mejores resultados se obtienen a partir de las imágenes 12d y 12e de relación de sección transversal. En particular, el libro 156 como se muestra en las figuras 12a y 12b prácticamente desaparece en las figuras 12d y 12e dado que el papel tiene una composición similar a la de la ropa que lo rodea, mientras que las drogas 158 en la figura 12e y los materiales 160 explosivos en las figuras 12d y 12e pueden distinguirse claramente. Una clara diferencia también se observa en ambas figuras 12d y 12e entre las botellas que contienen agua 152 y bebida 154 alcohólica.

En una primera variante del procedimiento de transmisión de neutrones doble, el operador formaría una nueva imagen que es una combinación lineal de dos imágenes de relación de sección transversal. Las proporciones en las que se combinan las dos imágenes se ajustan por el operador para maximizar el contraste y la sensibilidad para materiales ilegales y minimizar los efectos del amontonamiento resultante de los objetos superpuestos.

Las figuras 13a y 13b ilustran imágenes de neutrones de 14 MeV y rayos X simuladas respectivamente de un recipiente 170, tomadas desde el lateral. Debido a su alta densidad, las tuberías 176 de acero dominan las imágenes, haciendo que sea difícil ver los contornos del equipo informático. Sin embargo, al formar una única imagen, la figura 13c, a partir de las dos imágenes de relación de sección transversal que vienen dadas por las ecuaciones (7) y (8), es posible eliminar el “amontonamiento” asociado a las tuberías 176 de acero, para revelar las cajas 174 de ordenador.

Este planteamiento puede entenderse con referencia a la figura 11. Escoger una combinación lineal de imágenes (7) y (8) es equivalente a dar color a los píxeles de la imagen según su distancia desde una línea orientada de manera arbitraria trazada en la figura 11. Al escoger esta línea paralela a dos materiales seleccionados, cualquier combinación de estos materiales tiene el mismo color. En el ejemplo comentado, la línea se escoge para ser paralela a una línea que conecta acero y el envase de poliestireno de los ordenadores. De este modo, las tuberías de acero pueden hacerse desvanecer en gran medida cuando pasan por delante de los ordenadores. La figura 13c muestra los resultados de este proceso.

Si bien se ha explicado un ejemplo de la invención de este tipo, debería observarse que una realización de este tipo sólo es una de las muchas que utilizan los principios de la invención. Mientras que en el ejemplo anterior, las fuentes de radiación están situadas a un lado del objeto que va a examinarse y los detectores en el lado opuesto, en una primera variación, las fuentes se sitúan por encima o por debajo del objeto que va a examinarse, con los detectores colocados en el lado opuesto (por debajo o por encima, respectivamente). En una segunda variante, las fuentes y los detectores pueden hacerse girar alrededor del objeto que va a examinarse para permitir la obtención de múltiples vistas. En una tercera variante, se utilizan múltiples conjuntos de fuentes y detectores para permitir la captación simultánea de múltiples vistas del mismo objeto. En una cuarta variante, se disponen múltiples conjuntos de detectores alrededor de una fuente central para permitir la adquisición simultánea de vistas de múltiples objetos.

Por supuesto, en funcionamiento, los objetos que van a escanearse pueden hacerse pasar por el túnel sobre una cinta transportadora o moverse mediante torno o empujarse a través del mismo usando un mecanismo adecuado.

Mientras que se está en la realización anterior, las dos fuentes de radiación se hacen funcionar de manera secuencial a medida que el objeto se escanea a través del analizador. En una primera variante, el objeto se escanea a través del analizador dos veces, con una fuente funcionando para cada escaneo. En una segunda variante, cada fuente tiene un detector asociado independiente y el objeto se escanea sólo una vez. En una tercera variante, las dos fuentes de radiación se hacen funcionar al mismo tiempo, se utiliza un único detector y se utiliza la discriminación de energía para separar las señales en función de los neutrones y los rayos X o gamma.

En la variante (realización de energía de neutrones dual), la fuente de radiación comprende tres generadores de radiación independientes, uno que produce neutrones de 14 MeV, uno que produce neutrones de 2,45 MeV y el último que produce radiaciones de rayos X o gamma de alta energía. Las fuentes de neutrones son generadores de neutrones de tubo sellado u otras fuentes compactas de naturaleza similar, que producen neutrones a través de reacciones de fusión de D-T y de D-D.

Las tres fuentes de radiación se hacen funcionar de manera secuencial a medida que el objeto se escanea a través del analizador. En una primera variante, el objeto se escanea a través del analizador tres veces, con una fuente funcionando para cada escaneo. En una segunda variante, cada fuente tiene un detector asociado independiente y el objeto se escanea sólo una vez. En una tercera variante, dos o más fuentes de radiación se hacen funcionar al mismo tiempo con un único detector, y se utiliza la discriminación de energía para distinguir las señales de los neutrones de energía alta, neutrones de energía baja y los rayos X o gamma.

Los expertos en la técnica apreciarán que pueden realizarse numerosas variaciones y/o modificaciones a la invención como se muestra en las realizaciones específicas sin alejarse del espíritu o alcance de la invención descrita a

grandes rasgos. Las presentes realizaciones han de considerarse, por tanto, a todos los efectos como ilustrativas y no restrictivas.

## Referencias

**An, J., Xiang, X., Wu, Z., Zhou, L., Wang, L. and Wu, H.**, 2003. "Progress on developing  $^{60}\text{Co}$  container inspection systems", *Applied Radiation and Isotopes* 58 (2003) 315-320.

**Bartle, C.M.**, 1995. "Method and apparatus for detecting concealed substances", patente estadounidense 5.479.023 (26 de diciembre de 1995).

**Barzilov, A.P., Womble, P.C. y Vourvopoulos, G.**, 2001. "NELIS - a neutron elemental analysis system of commodities of pallets", 2001 Office of National Drug Control Policy International Symposium.

**Brzosko, J.S. et al**, 1992. "Advantages and limitations of 14-MeV neutron radiography", *Nuclear Instruments and Methods* B72 (1992) 119-131.

**Buffler, A.**, 2001. "Contraband detection by fast neutron scattering", 2nd National Nuclear Technology Conference, NAC, Sudáfrica, 13-15 de mayo de 2001, documento D-03.

**Chen, G. y Lanza, R.C.**, 2000. "Fast neutron resonance radiography for elemental mapping", Final Research Coordination Meeting on "Bulk Hydrogen Analysis using Neutrons", Cape Town, Sudáfrica, 23-26 de octubre de 2000, págs. 31-38.

**Dokhale, P.A., Csikai, J., Womble, P.C. y Vourvopoulos, G.**, 2001. "NELIS - an illicit drug detection system", *AIP Conference Proceedings*, 576 (2001) 1061-1064.

**Gozani, T.**, 1997. "Neutron based non-intrusive inspection techniques", Proc. Internat. Conf. On Neutrons in Research and Industry, Crete, Grecia, 9-15 de junio de 1996, *SPIE Proceedings Series* 2867 (1997) 174-181.

**Hussein, E.**, 1992. "Detection of explosive materials using nuclear radiation: a critical review", *SPIE* Vol. 1736 (1992) 130-137.

**Klann, R.T.**, 1996. "Fast neutron (14.5 MeV) radiography: a comparative study", 5th World Conference on Neutron Radiography, Berlín, 17-20 de junio de 1996, 469 - 483.

**Lefevre, H.W. et al**, 1997. "Using a fast neutron spectrometer system to candle luggage for hidden explosives", Proc. Internat. Conf. On Neutrons in Research and Industry, Creta, Grecia, 9-15 de junio de 1996, *SPIE Proceedings Series* 2867 (1997) 206-210.

**Le Tourneur, P., Bach, P. y Dance, W.E.**, 1998. "Neutron fan beam source for neutron radiography purpose", 15th Int. Conf. on Applications of Accelerators in Research and Industry, Denton, Texas, EE.UU., 4-7 de noviembre de 1998.

**Mikero, V.I. et al**, 2000. "Investigation of prospects of fast neutron radiography on the basis of portable equipment", IAEA Coordinated Research Programme on "Bulk Hydrogen Analysis using Neutrons", Cape Town, Sudáfrica, 23-6 de octubre de 2000, Report F1-RC-655.3.

**Millen, M.J., Rafter, P.T., Sowerby, B.D., Rainbow, M.T. y Jelenich, L.**, 1990. "Plant trial of a fast neutron and gamma-ray transmission gauge for the on-belt determination of moisture in lump coke", *Nuclear Geophysics* 4 (1990) 215-226.

**Perion, D. et al**, 2000. "System for differentiating between organic and inorganic materials", Solicitud de patente internacional No. WO 00/43760.

**Rynes, J. et al**, 1999. "Gamma-ray and neutron radiography as part of a pulsed fast neutron analysis inspection system", *Nuclear Instruments and Methods* A422 (1999) 895-899.

**Sawa, Z.P., Gozani, T. y Ryge, P.**, 1991. "Contraband detection system using direct imaging pulsed fast neutrons", patente estadounidense N° 5.076.993, 31 de diciembre de 1991.

**Tickner, J.R. y Sowerby, B.D.**, 2002. "A Detection System", Solicitud de patente provisional australiana N° 2002953244, Fecha de presentación: 10 de diciembre de 2002.

## REIVINDICACIONES

1. Un equipo radiográfico (10) que comprende: una fuente (12) de neutrones rápidos sustancialmente monoenergéticos producidos a través de reacciones de fusión de deuterio-tritio o deuterio-deuterio, que comprende un generador de tubo sellado o similar para producir los neutrones;

una fuente (14) independiente de rayos X o rayos gamma de suficiente energía para penetrar sustancialmente en un objeto que va a representarse por imágenes;

un bloque (16) de colimación que rodea la fuente de neutrones y las fuentes de rayos X o rayos gamma, aparte de la provisión de una o más ranuras para emitir haces de radiación sustancialmente en forma de abanico;

una disposición (18) de detector que comprende una multiplicidad de píxeles (19) de escintiladores individuales para recibir radiación de neutrones y radiación de rayos X o rayos gamma emitidos desde las respectivas fuentes y para convertir la radiación recibida en impulsos luminosos, estando alineada la disposición de detector con los haces de radiación en forma de abanico emitidos desde el colimador de fuente y colimados para impedir sustancialmente que una radiación distinta a la transmitida directamente desde cada una de las fuentes alcance la disposición;

medios (21) de conversión para convertir los impulsos luminosos producidos en los escintiladores en señales eléctricas;

medios (30, 32) de transporte para transportar el objeto entre cada una de las fuentes (12, 14) y la disposición (18) de detector;

medios de cálculo para determinar a partir de las señales eléctricas la atenuación de los haces de rayos X o rayos gamma y neutrones y para generar una salida que representa la distribución de masa y la composición del objeto interpuesto entre cada una de las fuentes (12, 14) y la disposición (18) de detector; y

medios de visualización para visualizar imágenes basándose en la distribución de masa y la composición del objeto que está explorándose.

2. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 1, en el que la fuente (14) de rayos X o rayos gamma comprende una fuente de radioisótopos de  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$  o similar que tiene una energía de sustancialmente 1 MeV.

3. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 1, en el que la fuente (14) de rayos X o rayos gamma comprende un tubo de rayos X o acelerador de electrones que produce rayos X a través de radiación de frenado sobre un objetivo.

4. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la fuente (12) de neutrones produce neutrones que tienen sustancialmente energías superiores que los rayos X o rayos gamma de la fuente (14) de rayos X o rayos gamma, en el que las fuentes de neutrones y rayos X o rayos gamma están dispuestas para pasar a través de la misma ranura en el bloque (16) de colimación y se utiliza una única disposición (18) de detector, que comprende píxeles individuales de escintilador orgánico de plástico o líquido, en el que la discriminación entre los rayos X o los rayos gamma y los neutrones se hace basándose en la energía que depositan en el escintilador.

5. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que las fuentes (12, 14) de neutrones y rayos X o rayos gamma están dispuestas para pasar a través de la misma ranura en el bloque (16) de colimación y se utiliza una única disposición (18) de detector que comprende píxeles individuales de escintilador orgánico de plástico o líquido, en el que las fuentes de neutrones y rayos X o rayos gamma se hacen funcionar alternativamente.

6. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3, en el que las fuentes (12, 14) de neutrones y rayos X o rayos gamma están dispuestas para pasar a través de ranuras paralelas separadas en el bloque (16) del colimador y se utilizan dos disposiciones (18) de detector, una que comprende píxeles individuales de escintilador orgánico de plástico o líquido para el detector de los neutrones y una que comprende píxeles individuales de escintilador orgánico de plástico o líquido para la detección de los rayos X o rayos gamma.

7. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones 4 a 6, en el que cada ranura de los colimadores (18) de detector y de fuente es suficientemente ancha para garantizar la iluminación completa de los detectores por la fuente, mientras que minimiza la detección de radiación dispersa.

8. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 1, que comprende adicionalmente una segunda fuente (12) de neutrones de tubo sellado o similar que produce neutrones a través de reacción de fusión de o bien deuterio-tritio o bien deuterio-deuterio, en el que la segunda fuente utiliza la reacción de fusión complementaria a la primera fuente.

## ES 2 286 480 T3

9. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 8, en el que los neutrones de la segunda fuente de neutrones se detectan en una disposición (18) de detector colimado independiente que comprende píxeles individuales de escintilador orgánico de plástico o líquido.

5 10. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 9, en el que una de la primera o la segunda fuente de neutrones tiene una energía de sustancialmente 14 MeV y la otra fuente tiene una energía de sustancialmente 2,45 MeV.

10 11. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios (21) de conversión comprenden una pluralidad de fotodiodos, en el que el material del escintilador puede seleccionarse para tener una longitud de onda de emisión adaptada sustancialmente a la respuesta de los fotodiodos.

15 12. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios (25) de conversión comprenden fibras de desplazamiento de longitud de onda cruzadas acopladas a una multiplicidad de tubos fotomultiplicadores sencillos o multiánodo.

20 13. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 11 o la reivindicación 12, cuando dependen de cualquiera de las reivindicaciones 8 a 10, en el que las señales eléctricas de los medios (21) de conversión se utilizan para inferir la transmisión de los neutrones desde la fuente (12) de neutrones y los rayos X o rayos gamma a través del objeto que está explorándose, o la transmisión de los neutrones desde la primera fuente de neutrones, los rayos X o rayos gamma y los neutrones desde la segunda fuente de neutrones a través del objeto que está explorándose.

25 14. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 13, en el que las transmisiones se utilizan para calcular imágenes de coeficientes de atenuación de masa para cada píxel para la visualización con diferentes valores de píxel asociados con diferentes colores, basándose la imagen en la distribución de masa y composición inferidas a partir de estos cálculos.

30 15. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que los medios de cálculo comprenden un ordenador para realizar procesamiento de imágenes y visualizar las imágenes en una pantalla de ordenador.

35 16. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 15, en el que la salida puede convertirse en imágenes de coeficientes de atenuación de masa para cada píxel para la visualización en una pantalla de ordenador con diferentes valores de píxel asociados con diferentes colores.

40 17. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 16, en el que las imágenes de coeficientes de atenuación de masa pueden obtenerse a partir de tasas de conteo de las transmisiones para cada uno de los neutrones de deuterio-tritio o neutrones de deuterio-deuterio y rayos X o rayos gamma, o los neutrones de deuterio-tritio, neutrones de deuterio-deuterio y rayos X o rayos gamma.

18. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 17, en el que el ordenador puede operar para obtener imágenes de relación de sección transversal entre pares de imágenes de coeficientes de atenuación de masa.

45 19. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 18, en el que las proporciones en las que se combinan las imágenes de relación de sección transversal pueden ajustarse para maximizar el contraste y la sensibilidad a un objeto particular que está examinándose en la imagen.

50 20. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 18 o la reivindicación 19, en el que el ordenador puede realizar una identificación automática del material basándose en las secciones transversales medidas.

21. El equipo (10) radiográfico según la reivindicación 19, en el que las proporciones en las que se combinan las imágenes de relación de sección transversal pueden ajustarse por el operador.

55 22. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que las fuentes (12, 14) y la disposición (18) de detector son estacionarias y los medios (30, 32) de transporte están dispuestos de manera que el objeto puede moverse en frente de la fuente de neutrones.

60 23. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 21, en el que el objeto es estacionario y los medios (30, 32) de transporte están dispuestos de manera que la fuente (12, 14) y la disposición (18) de detector se mueven en sincronización a cada lado del objeto.

65 24. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones 1 a 21, en el que están situados múltiples conjuntos de detectores (18) alrededor de las fuentes (12, 14) que están ubicadas en el centro para permitir la adquisición simultánea de exploraciones de una pluralidad de objetos separados.

25. El equipo (10) radiográfico según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, en el que la intensidad de las fuentes de neutrones de deuterio-deuterio y/o deuterio-tritio es del orden de  $10^{10}$  neutrones/segundo o tan alta como sea posible en la práctica.

## ES 2 286 480 T3

26. Equipo (10) radiográfico según la reivindicación 11, en el que los escintiladores están rodeados por una máscara para cubrir al menos una parte de cada uno de los escintiladores, teniendo cada máscara una primera superficie reflectante para reflejar los impulsos luminosos que se han escapado de vuelta al escintilador.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

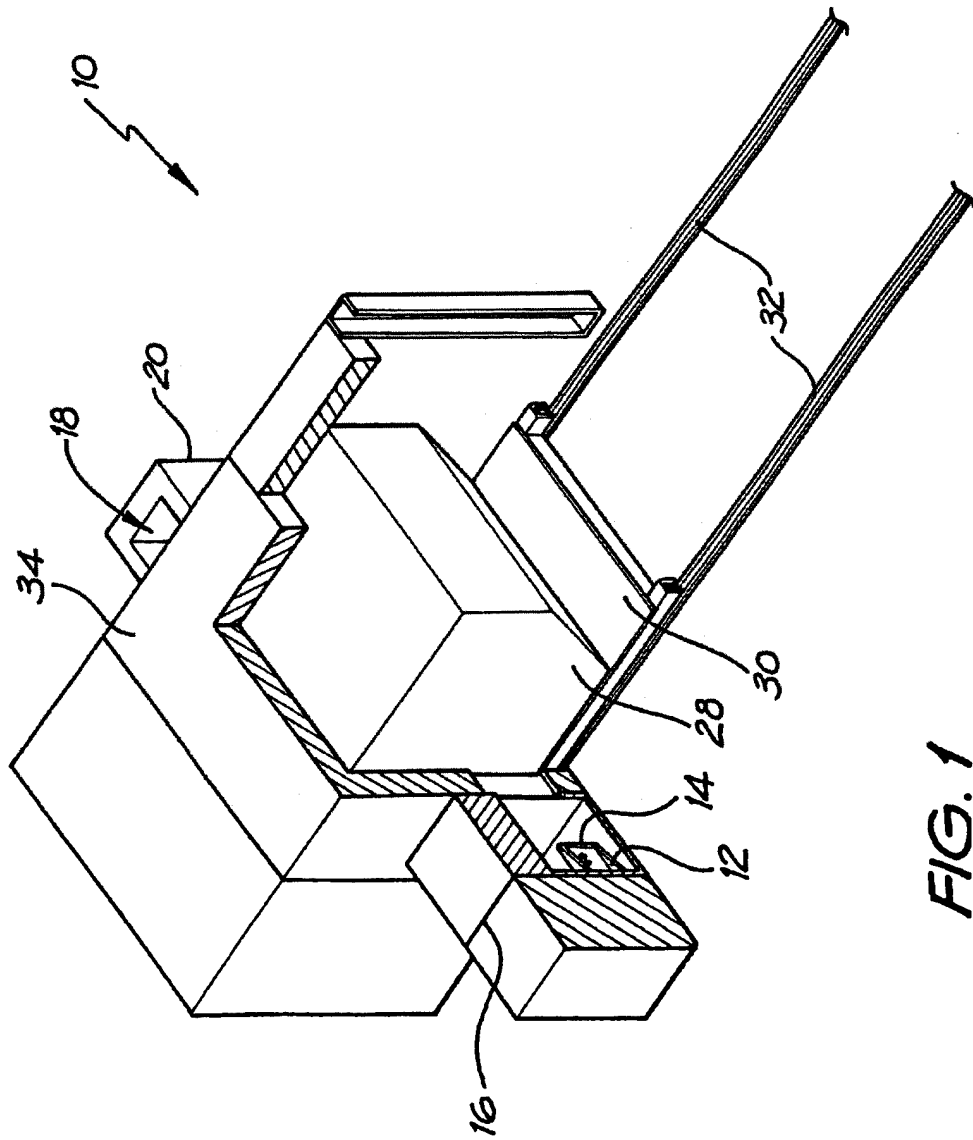


FIG. 1

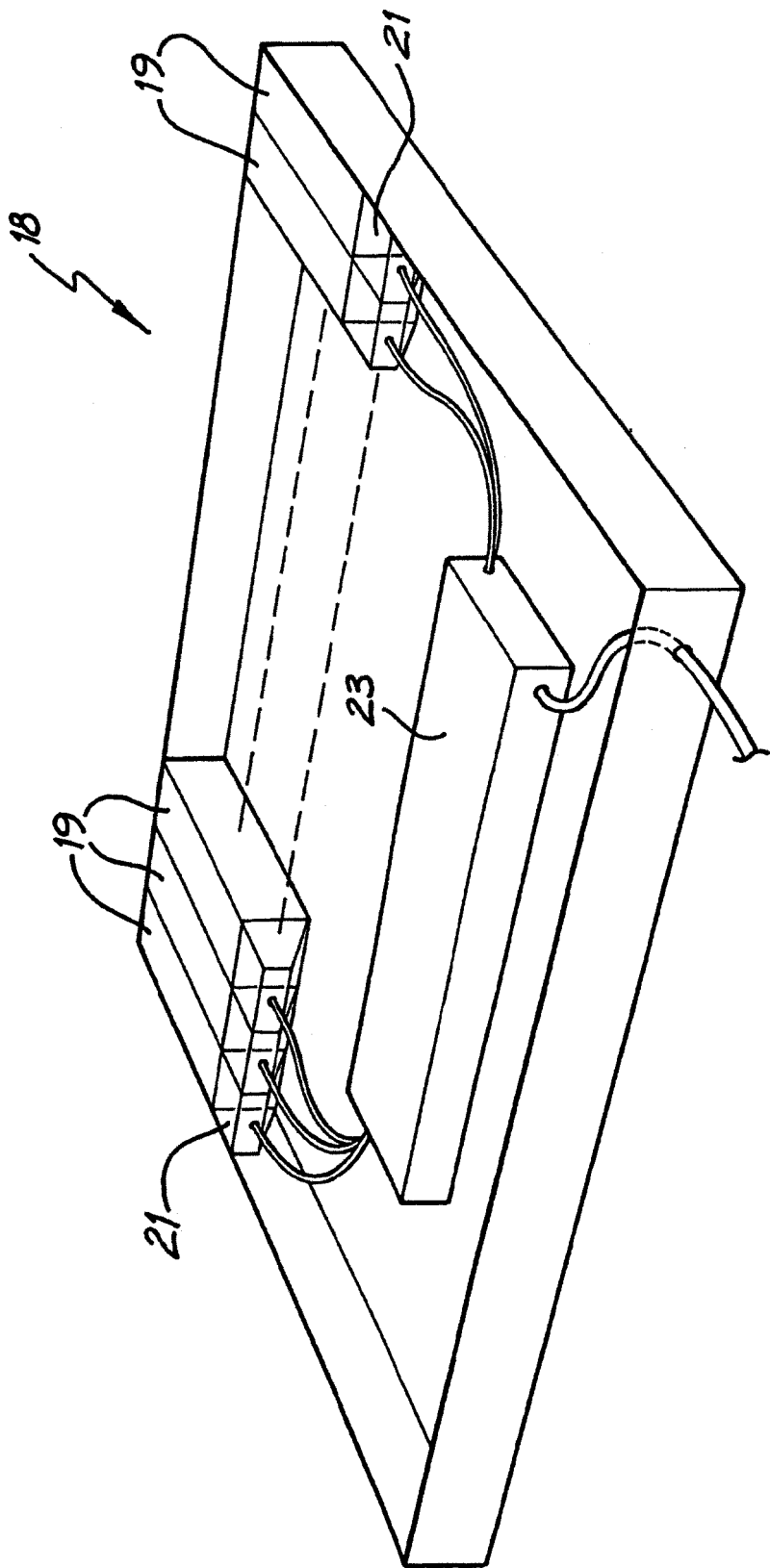


FIG. 2

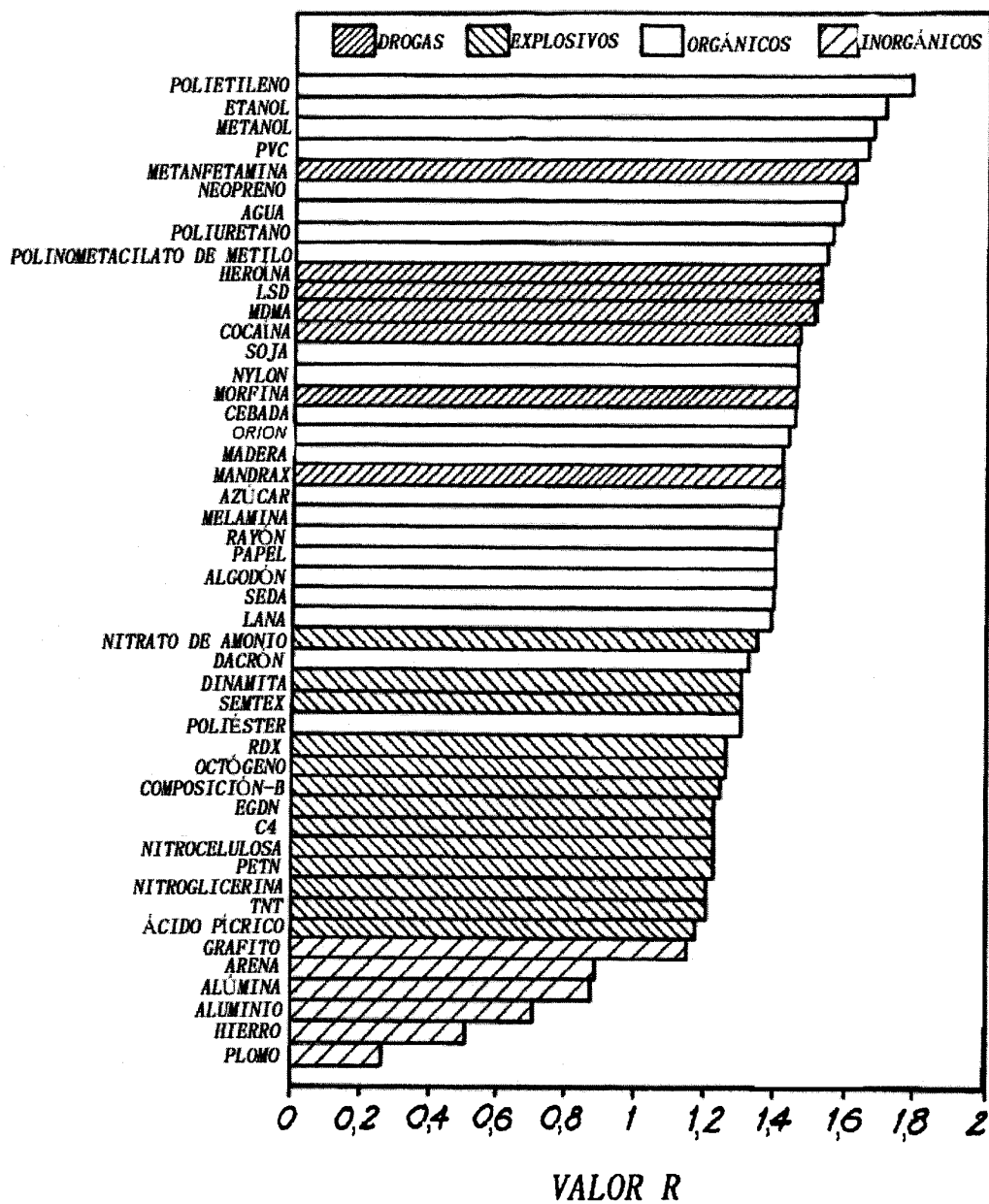


FIG. 3

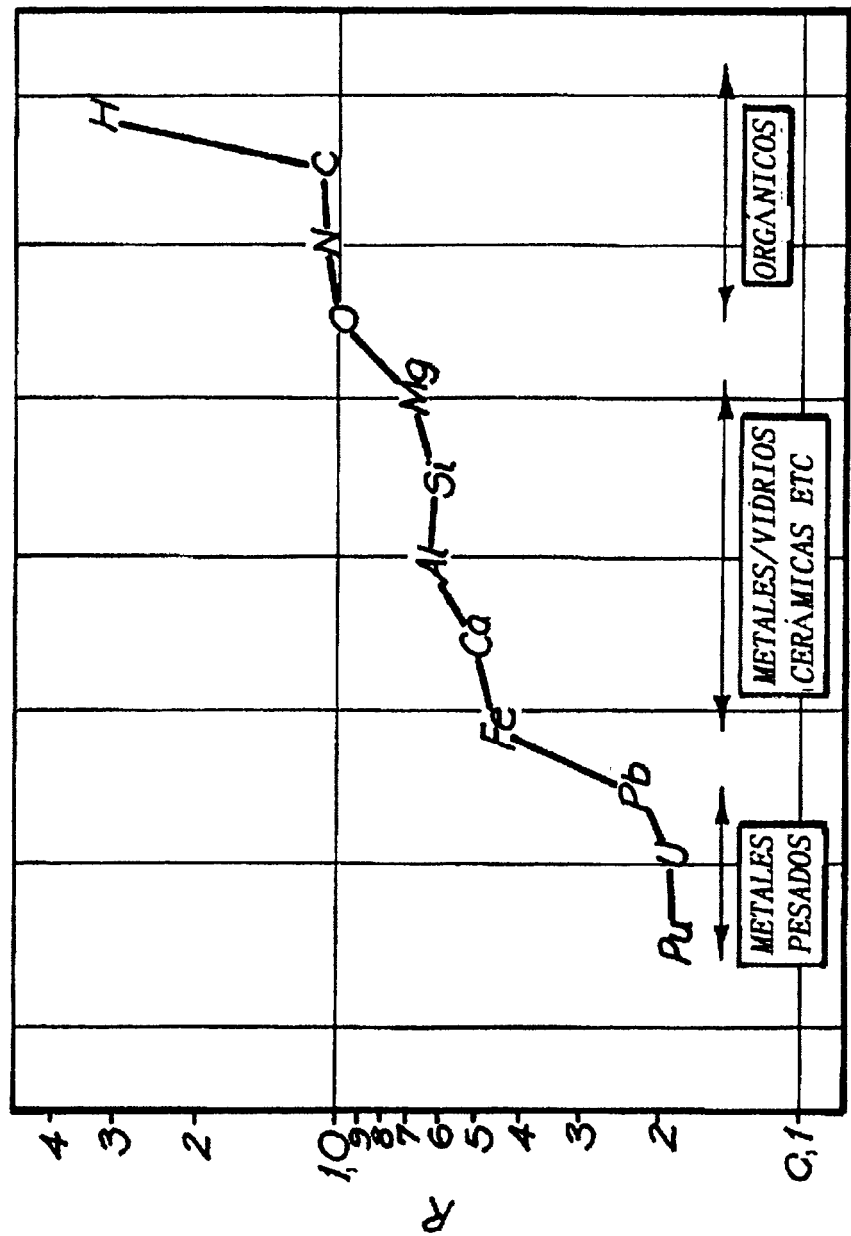
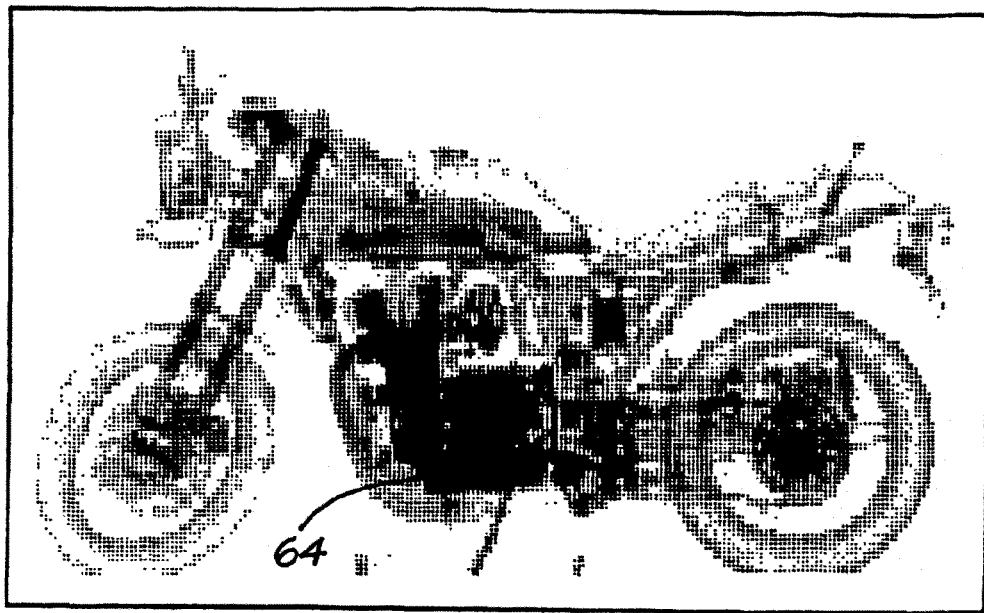
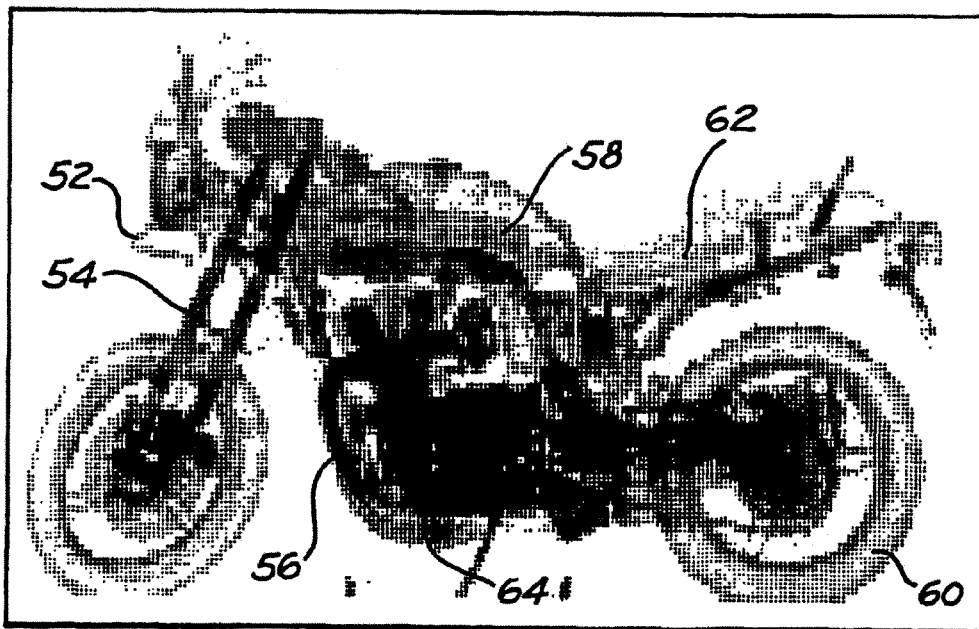


FIG. 4

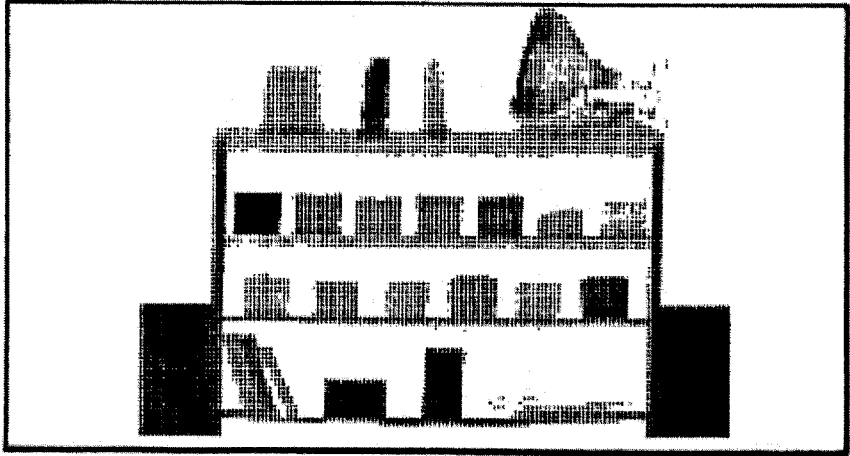
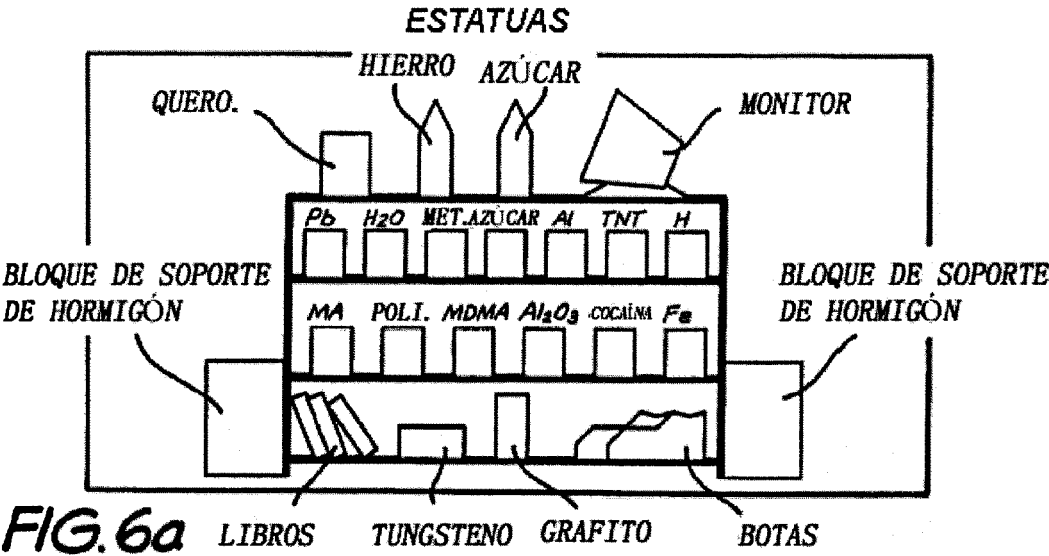
ELEMENTO



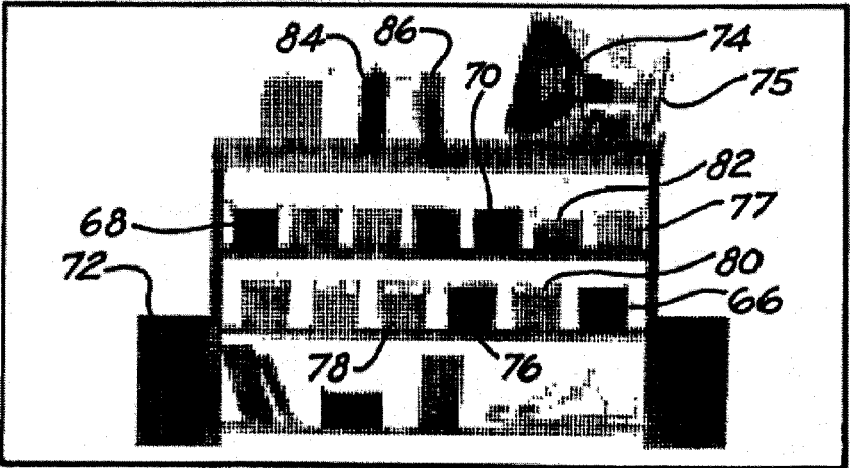
*FIG. 5a*



*FIG. 5b*



**FIG. 6b**



**FIG. 6c**

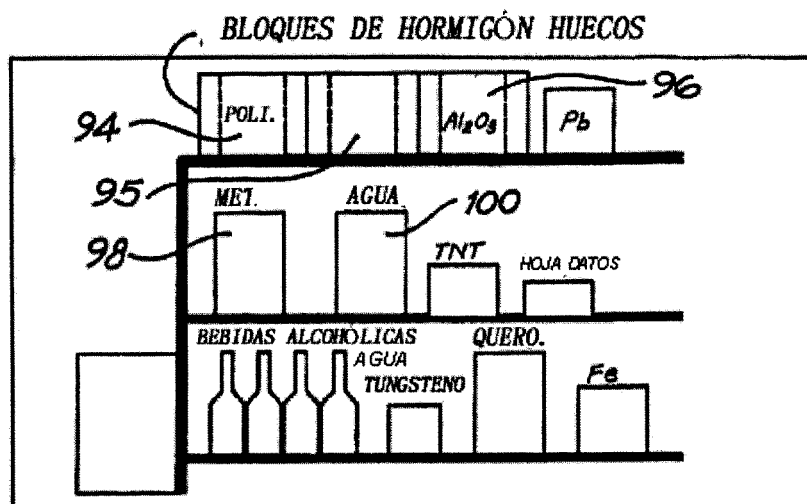


FIG. 7a

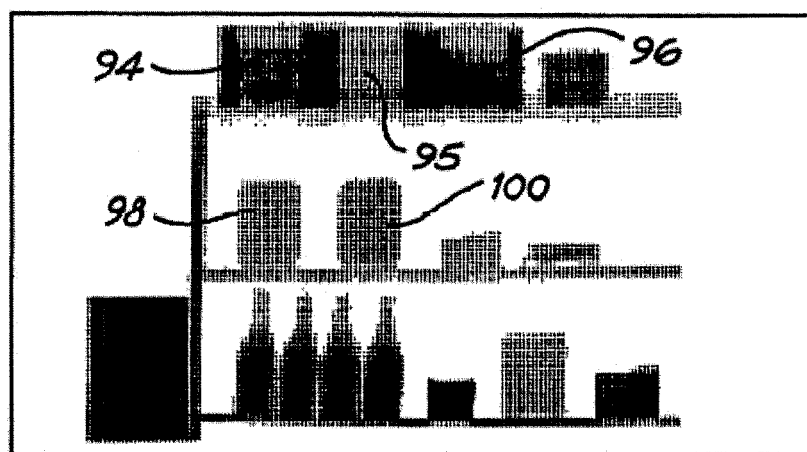


FIG. 7b

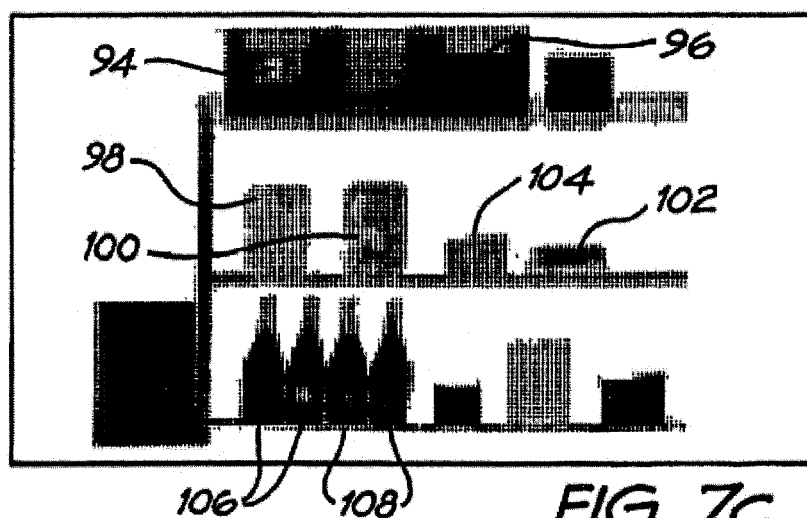


FIG. 7c

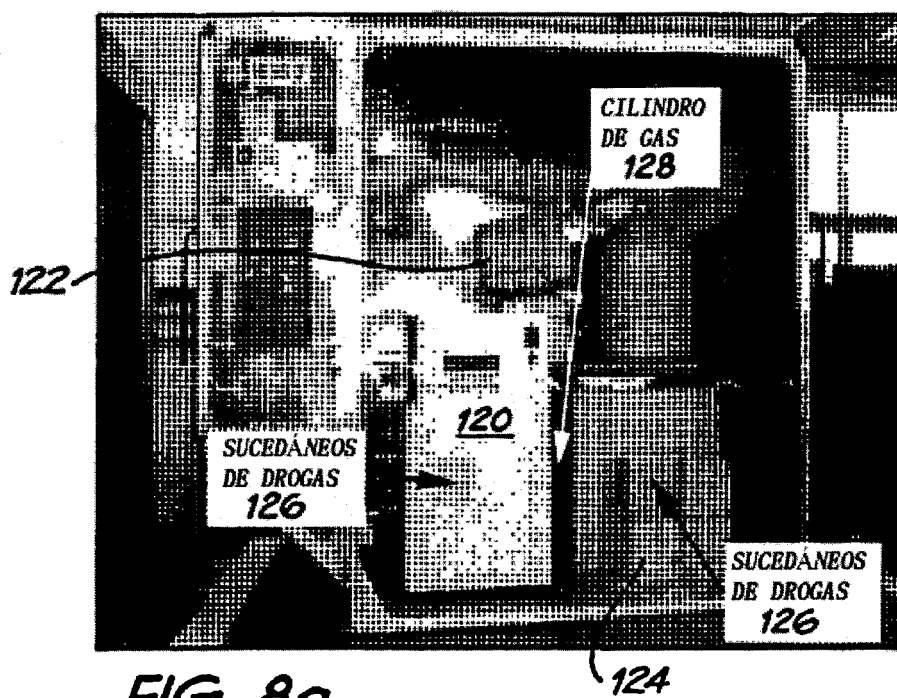


FIG. 8a

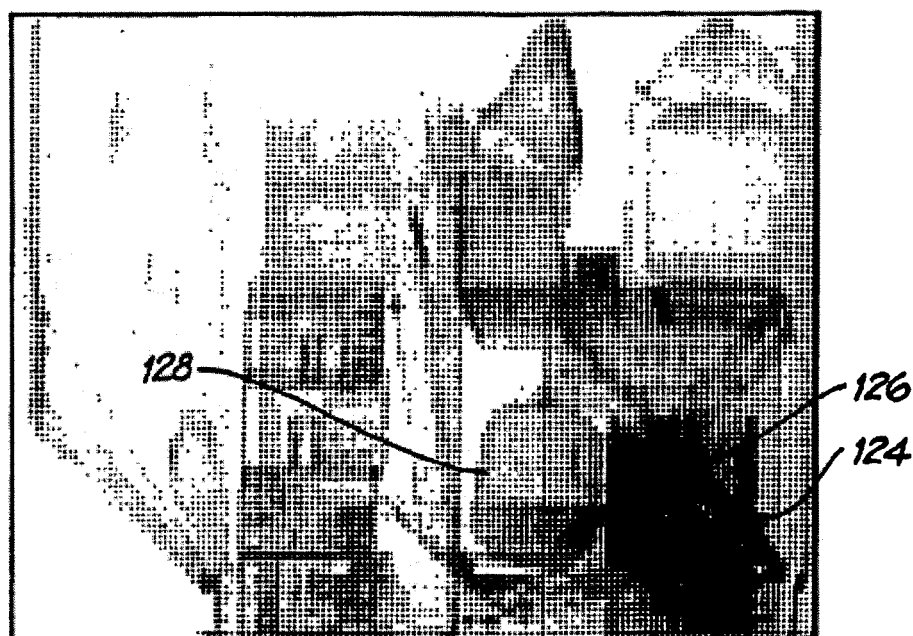
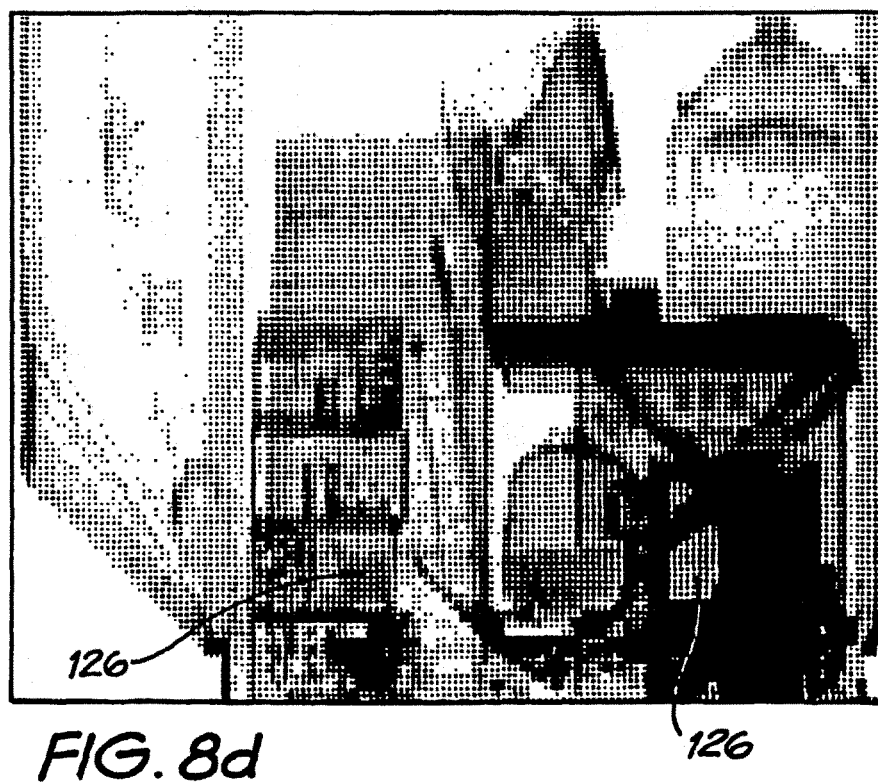
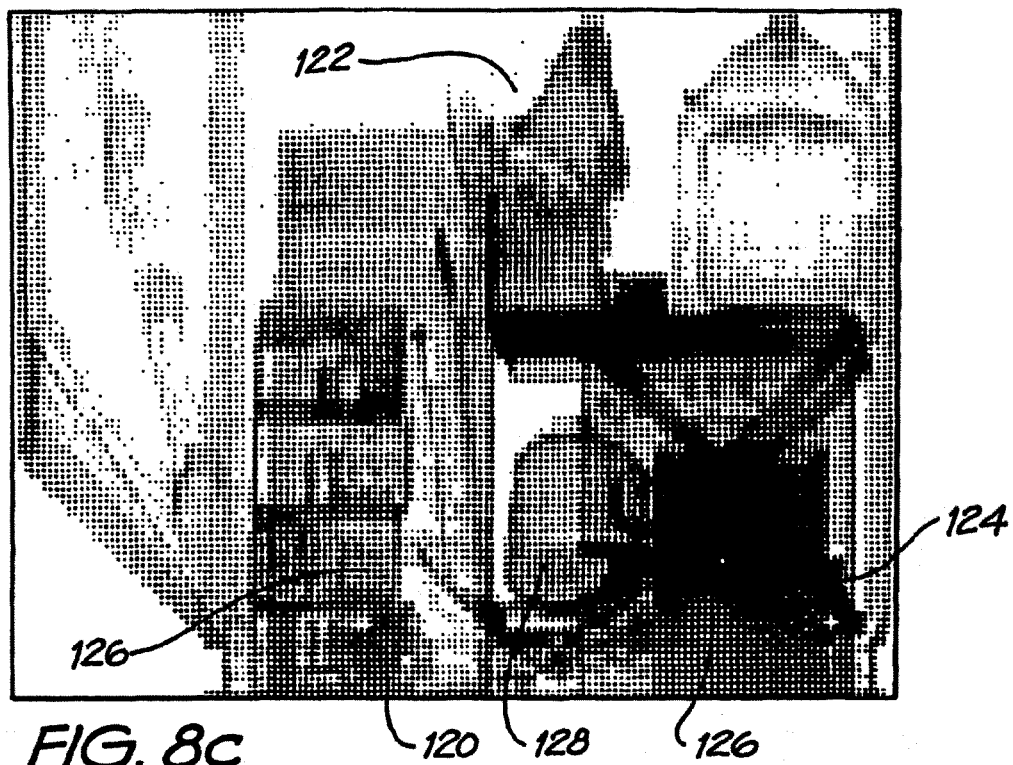
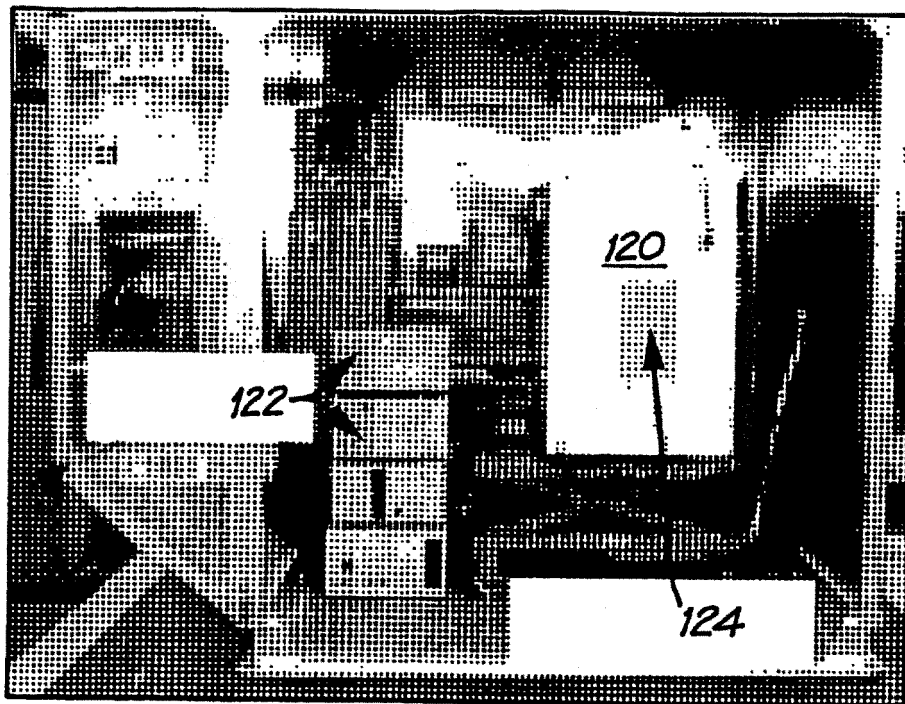
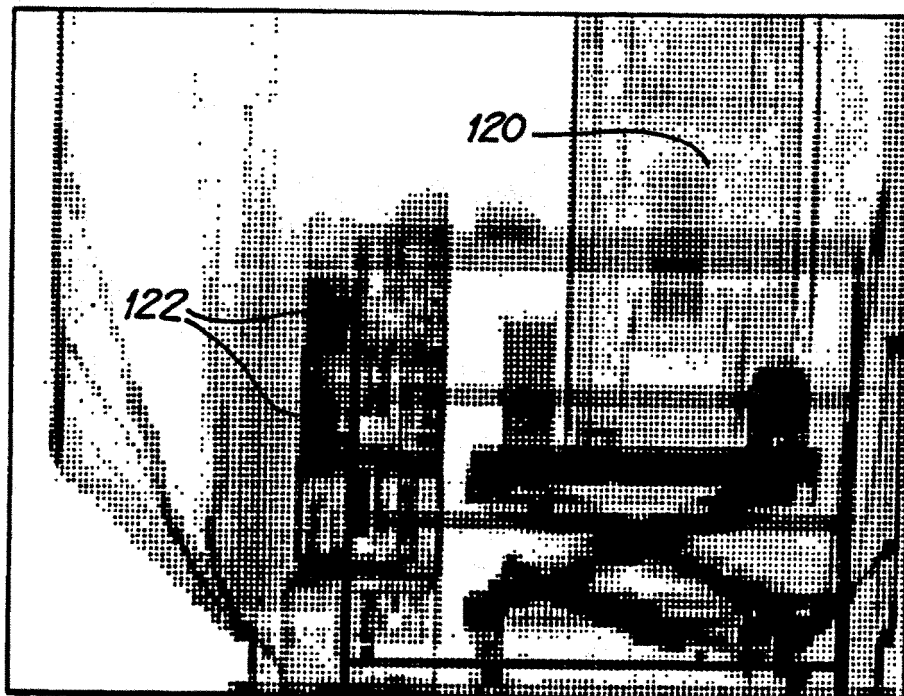


FIG. 8b





*FIG. 9a*



*FIG. 9b*

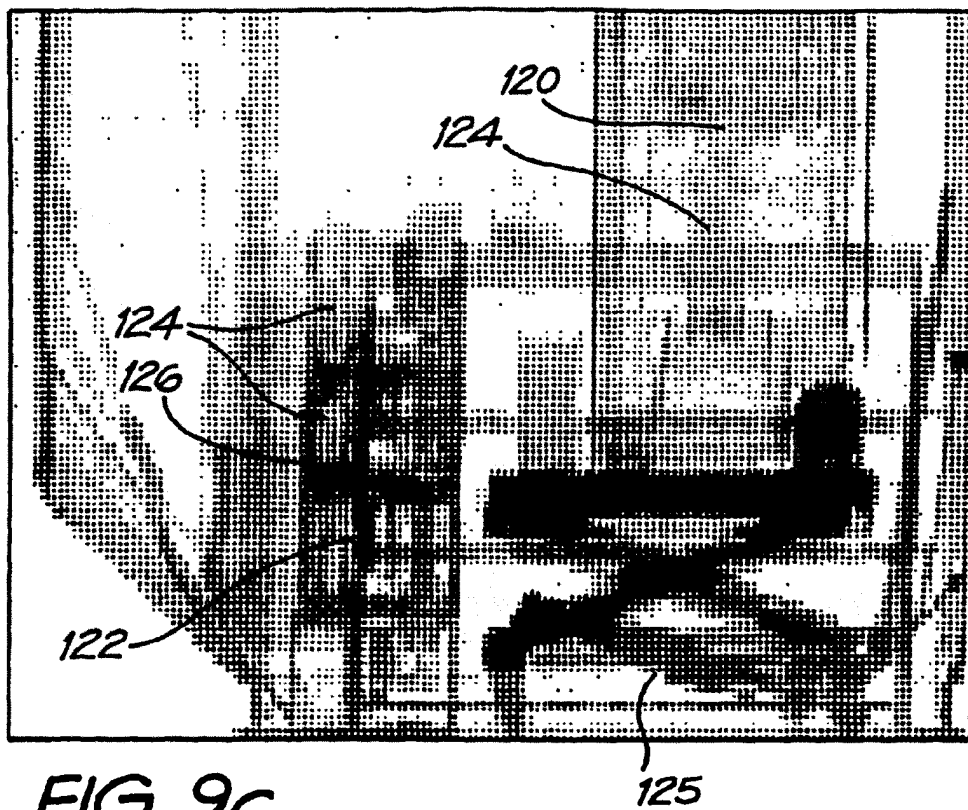


FIG. 9c

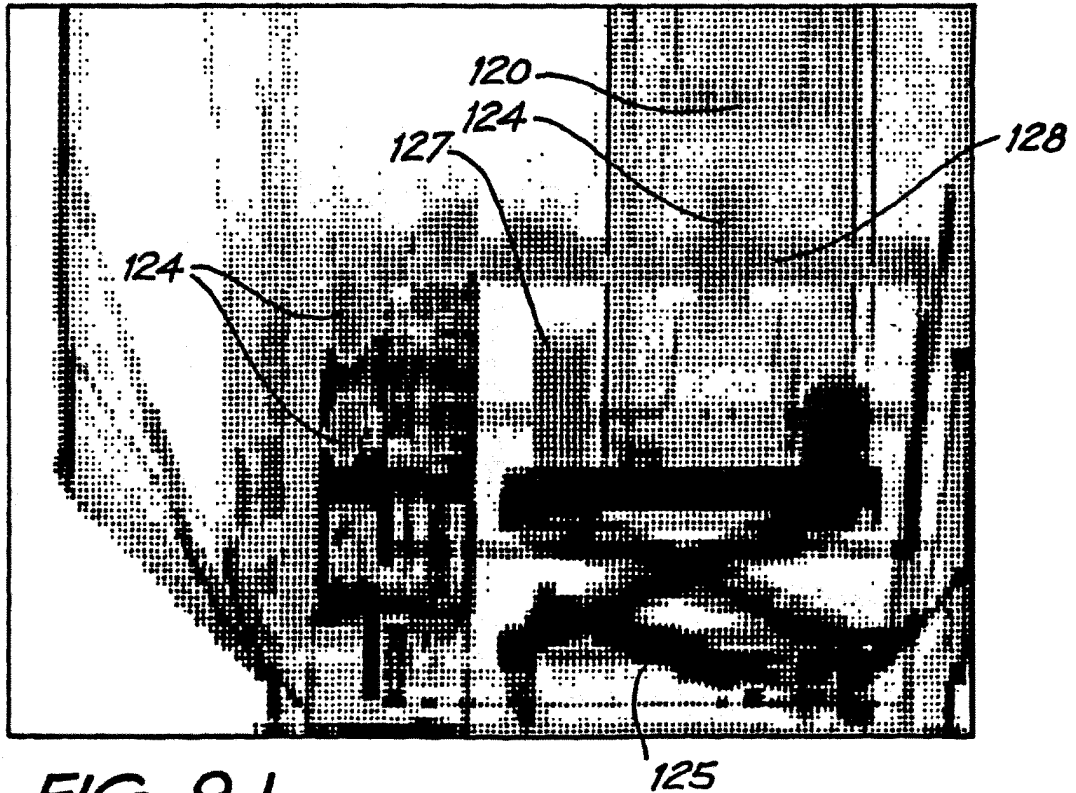
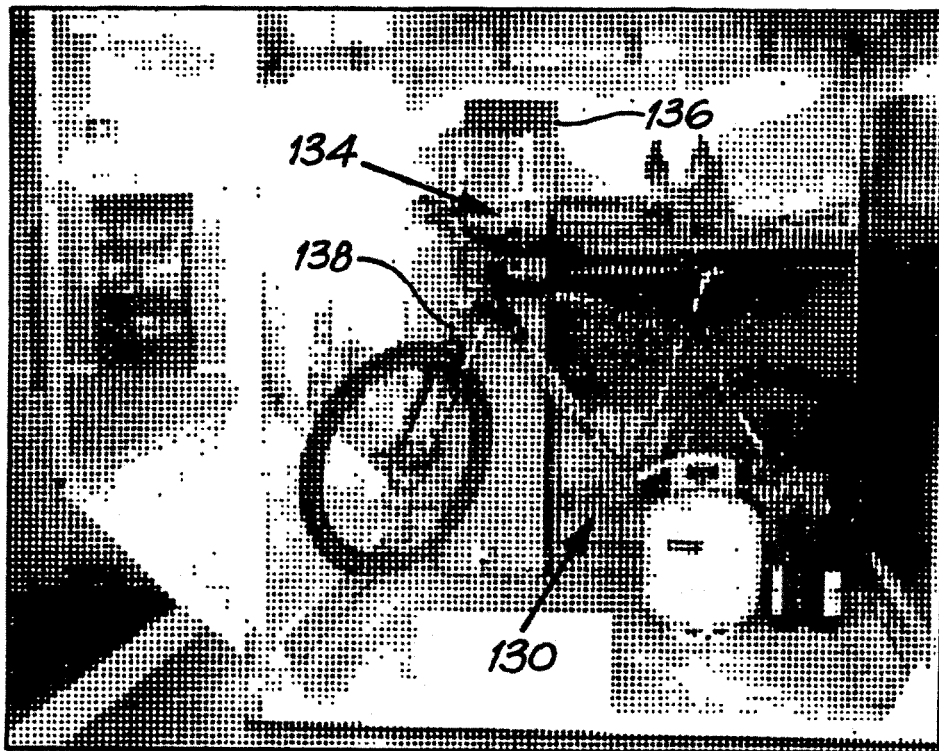
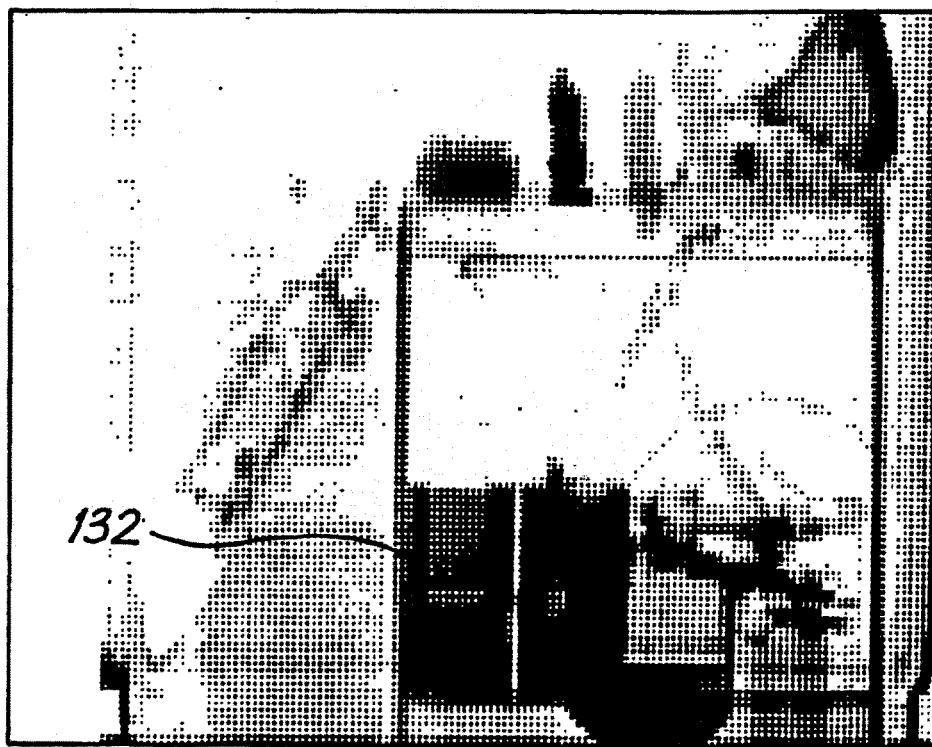


FIG. 9d



*FIG. 10a*



*FIG. 10b*

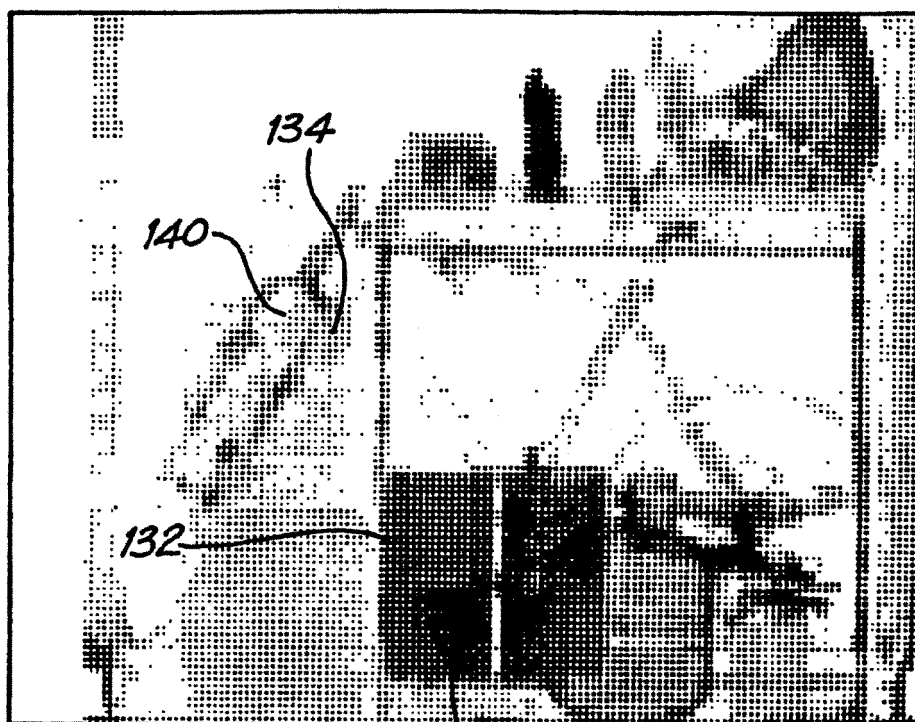


FIG. 10c

130

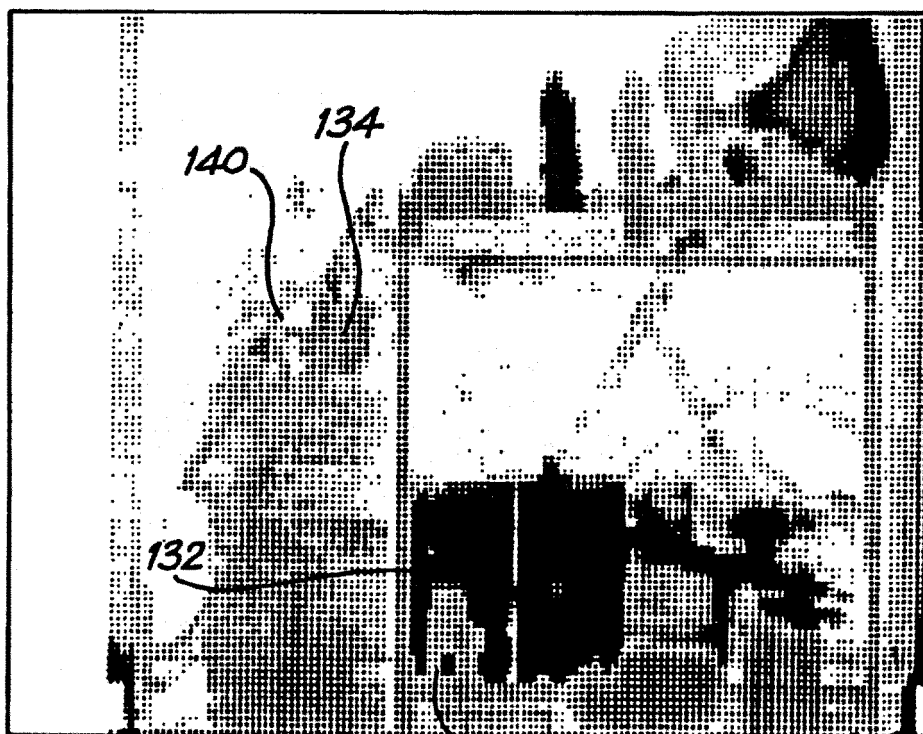


FIG. 10d

130

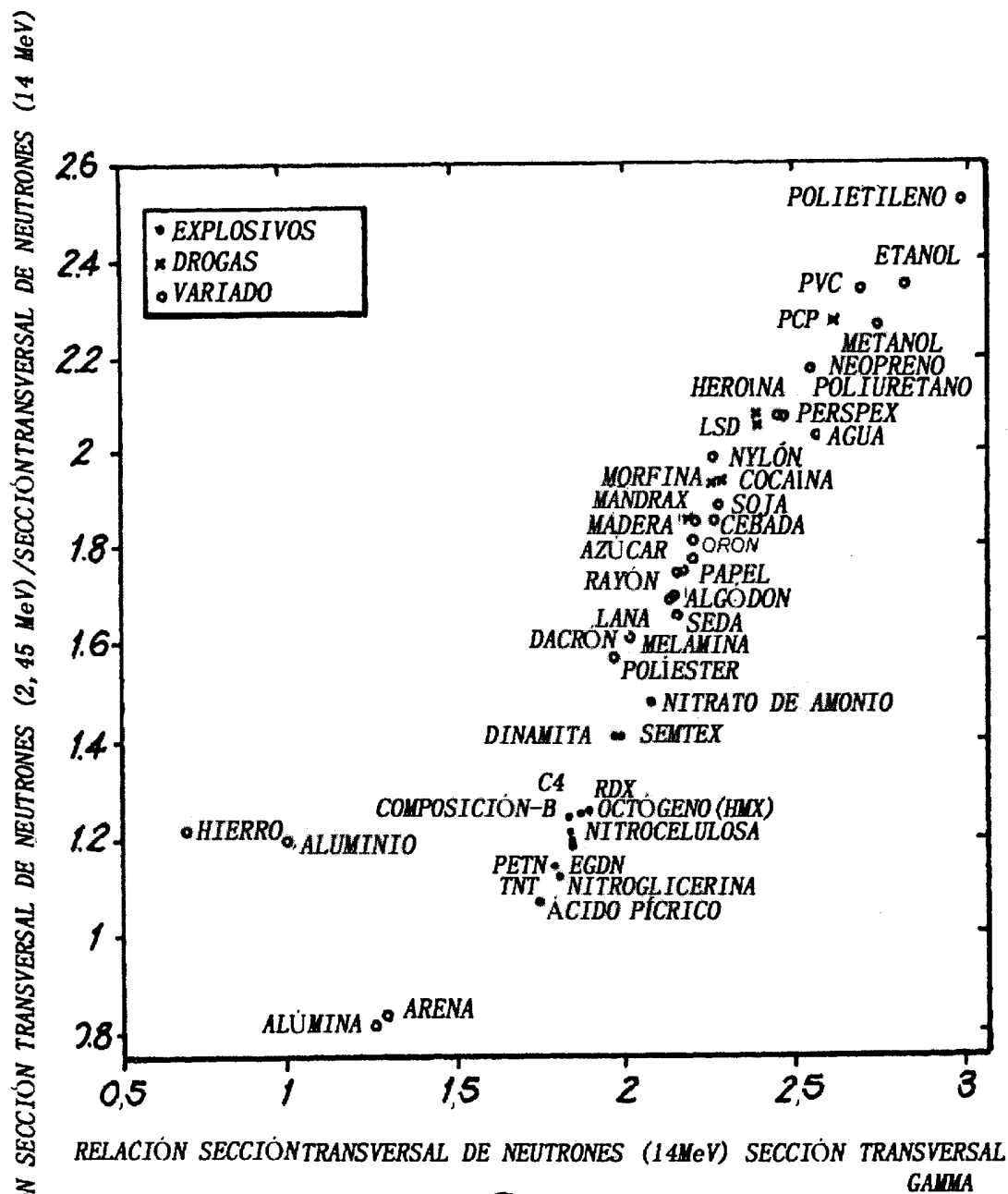


FIG. 11

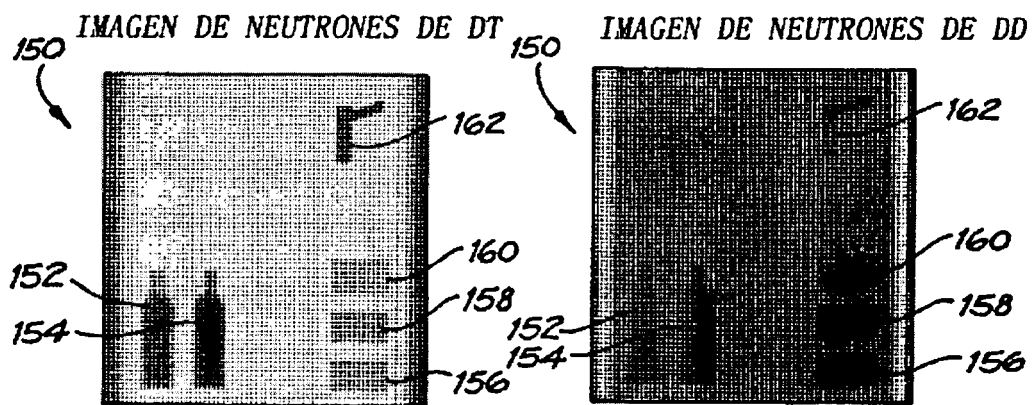


FIG. 12a

FIG. 12b

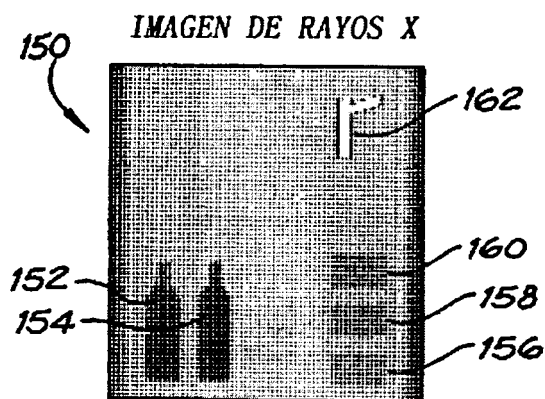


FIG. 12c

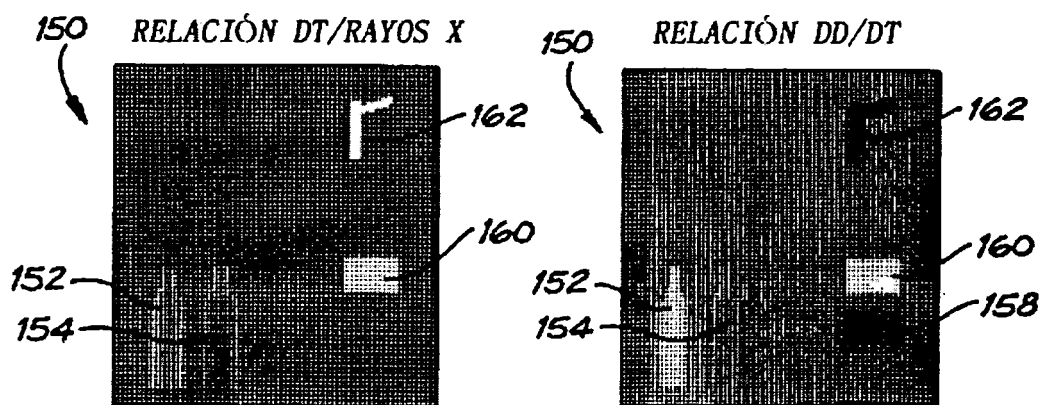


FIG. 12d

FIG. 12e



FIG. 13a

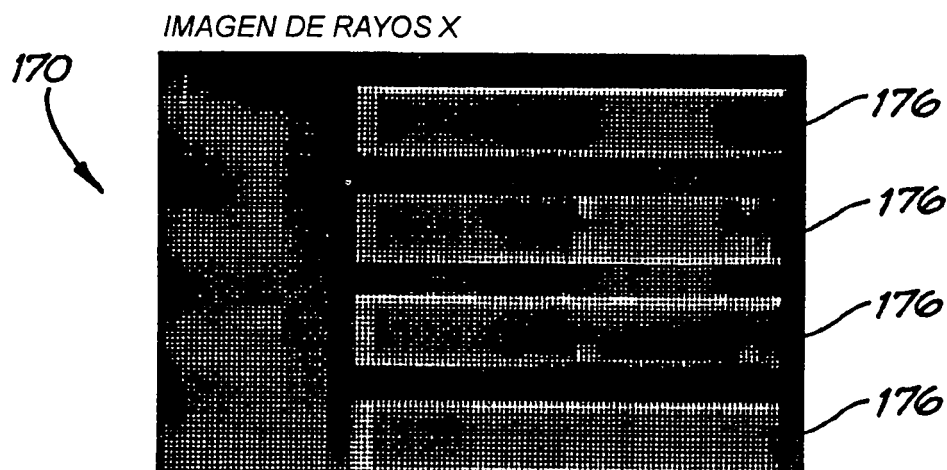


FIG. 13b

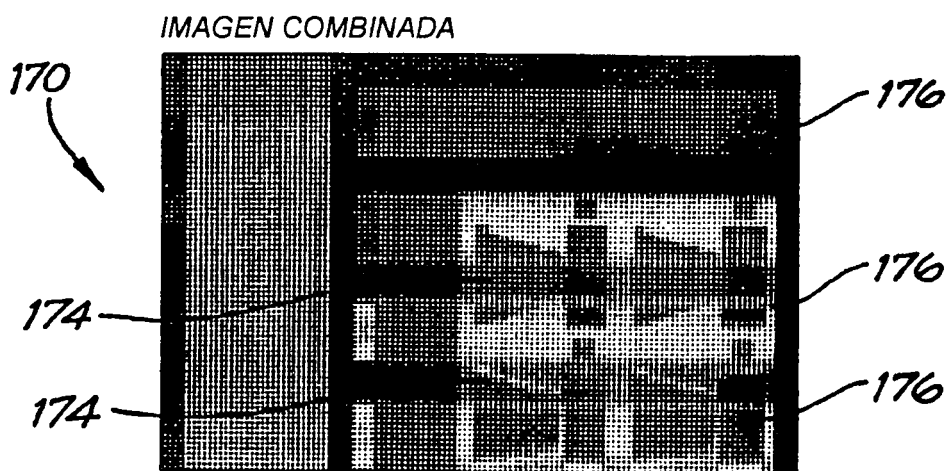


FIG. 13c