



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS  
ESPAÑA



⑪ Número de publicación: **2 940 858**

⑫ Número de solicitud: 202230979

⑮ Int. Cl.:

**G03H 5/00** (2006.01)

⑫

## PATENTE DE INVENCION CON EXAMEN

B2

⑬ Fecha de presentación:

**14.11.2022**

⑭ Fecha de publicación de la solicitud:

**11.05.2023**

Fecha de concesión:

**19.12.2023**

⑮ Fecha de publicación de la concesión:

**27.12.2023**

⑬ Titular/es:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID  
(100.0%)  
AVENIDA DE SÉNECA, 2  
28040 MADRID (Madrid) ES**

⑯ Inventor/es:

**MOLINA DE LA PEÑA, Ignacio;  
CALVO PADILLA, María Luisa y  
FERNÁNDEZ ÁLVAREZ-ESTRADA, Ramón**

⑯ Título: **Sistema para generación de hologramas digitales vía simulación**

⑯ Resumen:

Sistema para generación de hologramas digitales vía simulación.

El holograma es un formato innovador y atractivo de interés en ámbitos tan variados como la exposición de productos en ferias, diseño asistido por ordenador, arquitectura, hasta medicina o educación. Sin embargo, la generación de hologramas 3D ha requerido hasta ahora una gran potencia informática, difícil de conseguir.

La invención aporta una solución a este problema reduciendo considerablemente los recursos de computación necesarios. Para ello, utiliza un nuevo método numérico de simulación del patrón de interferencia, calculando la función de transmitancia basándose en la extensión de un algoritmo aplicable a la simulación de guías de onda de neutrones.

El sistema y método de simulación se plantea tanto para la producción de hologramas y placas zonales asociados a radiación electromagnética (IR, luz visible, UV, rayos-X, gamma...) como para la producción de hologramas y placas zonales de neutrones.

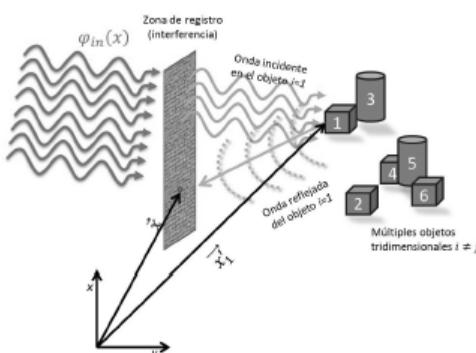


Figura 5

**ES 2 940 858 B2**

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 41 LP 24/2015.

Dentro de los seis meses siguientes a la publicación de la concesión en el Boletín Oficial de la Propiedad Industrial cualquier persona podrá oponerse a la concesión. La oposición deberá dirigirse a la OEPM en escrito motivado y previo pago de la tasa correspondiente (art. 43 LP 24/2015).

## DESCRIPCIÓN

Sistema para generación de hologramas digitales vía simulación

### 5 SECTOR DE LA TÉCNICA

La invención se refiere a un sistema implementado por ordenador para la generación de hologramas digitales vía simulación. De forma más concreta, se refiere a un sistema y método para almacenamiento digital de objetos tridimensionales a partir del cálculo de 10 la transmitancia en un sistema genérico de proyección holográfica.

### ANTECEDENTES DE LA INVENCIÓN

Una fotografía representa un registro bidimensional de una escena tridimensional ya 15 que solamente registra la intensidad de las ondas luminosas reflejadas por el objeto fotografiado y, por ello, se pierde el carácter tridimensional de la escena (no se puede cambiar la perspectiva de la escena al ver la fotografía desde otro ángulo). Sin embargo, un holograma no sólo registra la información de la amplitud de la onda sino también la fase de la onda y, por ello, la imagen producida tiene una verdadera forma 20 tridimensional.

Actualmente, el holograma es un formato innovador y atractivo que no necesita de gafas especiales y permite visualizar una imagen realista y completa. Por ello, es de interés en ámbitos tan variados como la exposición de productos en ferias, diseño asistido por 25 ordenador, arquitectura, hasta medicina o educación.

Sin embargo, crear un holograma para una aplicación concreta requiere de un desarrollo complejo a través de la programación. Cada holograma codifica una gran cantidad de datos y, por este motivo, la generación de hologramas 3D ha requerido hasta ahora una 30 gran potencia informática, difícil de conseguir. Con este objetivo, se desarrollaron algunas estrategias pero, a cambio de reducir la cantidad de computación necesaria, se reducía también la calidad de la imagen.

Actualmente, con la óptica física se consigue generar hologramas para sistemas de 35 imágenes en tiempo real. Sin embargo, la utilización de técnicas holográficas en

sistemas de video requiere un proceso complejo que supone un gran reto a nivel tecnológico. Si bien esta técnica es factible, tanto desde la implementación de sistemas reales como digitales, en estos últimos las ecuaciones de cálculo involucradas suponen una enorme carga computacional debido a la diferencia entre la longitud de onda a

5 simular y los objetos macroscópicos simulados, que hacen inviables los métodos de cálculo con los recursos de computación actuales, tanto en cuanto a tiempos de computación como de cantidad de memoria requerida. Las limitaciones técnicas están relacionadas con la capacidad de cálculo y el almacenamiento de datos y tienen como consecuencia que las posibles aplicaciones en tiempo real sean casi imposibles.

10

La presente invención pretende aportar una solución a este problema actual, mediante un sistema de generación de hologramas digitales vía simulación que permite reducir considerablemente los recursos de computación necesarios, respecto a otros métodos probados.

15

## **EXPLICACIÓN DE LA INVENCIÓN**

Un holograma digital es un holograma generado a partir de un objeto o escena modelado

computacionalmente. Puede usarse para reconstruir y visualizar digitalmente dicho

40 objeto o escena, o puede implementarse sobre una pantalla digital o una máscara adecuada que, al ser iluminada con luz coherente, permite proyectar en el espacio la imagen holográfica correspondiente.

Cuando un objeto es iluminado por con luz coherente (haz de referencia), éste dispersa

45 una luz (haz del objeto) que posee información sobre su morfología. La luz dispersada por el objeto se combina con otro haz de luz inalterado parar formar un patrón de interferencia, el cual es único y depende de las características de la luz utilizada y de la conformación de la escena (ubicaciones relativas del objeto, la fuente de luz y el observador). La generación de un holograma digital consiste en calcular por medios

50 computacionales el patrón de interferencia.

De forma más concreta, el sistema de generación de hologramas digitales que se

presenta en esta invención utiliza un nuevo método numérico de simulación del patrón

55 de interferencia, calculando la función de transmitancia, que permite reproducir

numéricamente puntos en el espacio y polígonos simples con bajo coste de

computación.

En general, el término “transmitancia” se refiere tanto a la transmitancia en amplitud como a la reflectancia, ya que ambos términos se calculan de forma prácticamente 5 análoga: la primera da lugar a hologramas de transmisión, mientras que la segunda se utiliza en hologramas de reflexión. A estos efectos, son equivalentes.

Los neutrones normalmente se consideran partículas pero también tienen propiedades ondulantes similares a la luz, dependiendo de su velocidad. La holografía de neutrones 10 permite, por ejemplo, obtener imágenes holográficas de átomos utilizando neutrones térmicos. La holografía de neutrones de resolución atómica se ha aplicado a la determinación de estructuras cristalinas.

El método de simulación se basa en la extensión de un algoritmo aplicable a la 15 simulación de guías de onda de neutrones. Este algoritmo, publicado por los inventores con anterioridad (Molina de la Peña, I. et al. *Neutron optics: New algorithm based on Green's functions for simulating waveguides with Dirichlet boundary conditions*. App. Math. Mod. 101, **2022**) se caracteriza porque calcula el valor de la función escalar de 20 cada punto del espacio de forma independiente a los demás (solo a través de las funciones auxiliares en las fronteras), con lo que se puede paralelizar de forma trivial. Con él se pueden desarrollar gran variedad de simulaciones que describen fenómenos variados como el confinamiento de haces de neutrones en guías de onda y generación de modos de propagación, simulación de placas zonales, holografía o aplicaciones en la mejora de la terapia contra el cáncer BNCT (*Boron Neutron Capture Therapy*).

25

El algoritmo anterior se basa en la utilización de funciones de Green y condiciones de contorno de Dirichlet. Para aplicarlo a la generación de hologramas, en la presente invención se describe cómo se han redefinido las condiciones de contorno (fronteras de 30 una guía de onda) para modelar objetos en el espacio tridimensional. Tras esta modelación, se aprovechan ciertas características del algoritmo original para, en lugar de simular el espacio completo, reducir una dimensión en el problema y obtener sólo la función de transmitancia necesaria para caracterizar el holograma. El sistema tiene como *input* (señal de entrada) la figura tridimensional que se quiere modelar y como 35 posibles *outputs* (señal de salida) la función de transmitancia almacenada (a implementar de forma física o digital) y, en caso de ser requerido, la reproducción digital

tridimensional del objeto (Figura 2).

Las simulaciones permiten reproducir numéricamente puntos en el espacio y polígonos simples con un bajo coste de computación, de forma que un objeto tridimensional macroscópico puede convertirse en una nube tridimensional de puntos o en un grupo de polígonos que pueden ser implementados en el algoritmo. Los tiempos de computación se encuentran cercanos a la proyección de imágenes en tiempo real (video holográfico). Además, el sistema calcula los valores puntuales de la función de transmitancia de forma independiente, por lo que admite, de forma trivial, la posibilidad de computación paralela, mejorando aún más los tiempos de cómputo.

El cálculo de la transmitancia de un objeto tridimensional permite el almacenamiento digital de dicho objeto en bits de información. Esta transmitancia también puede utilizarse como señal de entrada a una pantalla LCD de forma que, con las condiciones de iluminación adecuadas, permite la reconstrucción holográfica del objeto (televisión holográfica). Además, esta transmitancia puede utilizarse como función de entrada para la reconstrucción digital del objeto.

La novedad de la invención radica, como se ha comentado anteriormente, en obtener el holograma de un objeto con bajo coste computacional transformando el problema de computar el espacio tridimensional en un problema bidimensional. Si bien la base matemática es similar a otros casos, se han redefinido las condiciones de contorno de manera que se aprovechan ciertas características de un algoritmo, conocido para simplificar un problema para simular una guía de onda de neutrones, para simular un holograma (Figura 3) o puntos independientes en el espacio (Figura 4).

Como se ha comentado anteriormente, el algoritmo original se basa en la utilización de funciones de Green y condiciones de contorno de Dirichlet. La idea de la presente invención nace de considerar las condiciones de contorno de Dirichlet como si se tratase de los objetos materiales sobre los que incide y se refleja una onda. Una vez calculada la forma de la onda reflejada por el objeto, ésta se propaga hasta una región del espacio y se calcula la forma de la interacción en esa zona con la propia onda incidente, obteniéndose el patrón de interferencia asociado a la transmitancia. Estas operaciones suponen simular digitalmente un proceso equivalente a la grabación de un holograma máster y tiene como resultado la codificación en forma de transmitancia del objeto

tridimensional (holograma).

La función de onda asociada a un problema concreto,  $\varphi(x)$ , se puede escribir como:

$$5 \quad \varphi(x) = \varphi_{in}(x) + \sum_{i=1}^n \int_{\partial\Omega_i} d\Omega_i \frac{\partial G(x-x'_i)}{\partial n_i} \Big|_{x'_i \in \partial\Omega_i} \mu_i(x'_i) \quad [1]$$

Donde  $\varphi_{in}(x)$  es la función de onda incidente (haz de referencia en el caso de la holografía);  $\mu_i(x'_i)$  son las funciones auxiliares a definir en cada uno de los contornos  $\partial\Omega_i$  ( $i=1\dots n$ ); (Figura 5) y  $G(x-x')$  es la función de Green asociada a la propagación de la onda reflejada (en 2D en este caso, siendo trivial su extensión 3D) dada por:

$$G(x-x') = - \iint_{-\infty}^{\infty} \frac{d^2 K'}{(2\pi)^2} \frac{\exp[iK'(x-x')]}{E + i\varepsilon - \frac{h^2}{2m} K'^2}$$

Al imponer las condiciones de Dirichlet (la onda no penetra en el objeto simulado), estas funciones quedan claramente definidas a través de un método iterativo. De esta forma, las funciones  $\mu_i(x_i)$  se pueden caracterizar aplicando recurrentemente la siguiente relación hasta que la solución converja al resultado.

$$15 \quad \mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j) - \sum_{i=1, i \neq j}^n \int_{\partial\Omega_i} d\Omega_i \frac{\partial G(x_j-x'_i)}{\partial n_i} \Big|_{x'_i \in \partial\Omega_i} \mu_i(x'_i) \quad [2]$$

Así, la función de onda queda caracterizada por un algoritmo iterativo en el que se aplica secuencialmente las ecuaciones [1] y [2].

25 En la presente invención, la propagación de las condiciones de Dirichlet (entendidas como objeto sólidos en el espacio tridimensional) a través del uso de funciones de Green, puede utilizarse en el campo de la holografía. Para ello, las funciones auxiliares  $\mu_i(x_i)$  se redefinen para que representen a un objeto en el espacio con forma y posición arbitrarias, sea un punto o una figura plana. Estos puntos o figuras constituyen el *input* (señal de entrada) del método de computación.

30 Para la obtención de la función de transmitancia (señal de salida, *output*), se define numéricamente una onda incidente que, a través de la ecuación [2] permite un cálculo

inicial de la forma numérica de la función (o funciones)  $\mu_i(x_i)$  definidas en los contornos de integración  $\partial\Omega_i$  (en este caso el objeto a representar).

- 5 En el primer paso de la iteración, se definen cada una de las funciones auxiliares como  $\mu_i(x_i) = 0$  y se recalculan como  $\mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j)$ .

El método de cálculo iterativo propuesto supone recalcular cada una de las funciones auxiliares que definen el objeto,  $\mu_i(x_i)$ , aplicando la ecuación [2]. Esta ecuación se 10 puede resolver empleando el algoritmo *Fast Fourier Transform (FFT)*, que permite un cálculo rápido de la contribución de cada uno de los objetos, según la ecuación:

$$\mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j) - FFT[\mu_i(x'_i)](x_j) \quad [3]$$

- 15 donde los términos  $FFT[\mu_i(x'_i)](x_j)$  son la representación de la aplicación de la FFT a cada una de las funciones auxiliares  $\mu_i(x_i)$  y propagado el resultado hasta el punto  $x_j$ . Cada punto  $x_j$  se calcula de forma independiente al resto.

- 20 Una vez hallados los valores correspondientes a las funciones auxiliares que definen el objeto, el siguiente paso consiste en propagar la función de onda total  $\varphi(x)$  utilizando la ecuación [1]. El nuevo algoritmo permite entonces el cálculo directo de la función de transmitancia que debería aplicarse a una placa holográfica, que se calcula haciendo uso de la ecuación [1] con el algoritmo *FFT*.

$$25 \quad \varphi(x) = \varphi_{in}(x) + \sum_{i=1}^n FFT[\mu_i(x'_i)](x) \quad [4]$$

Supuesto que la placa holográfica esté situada en el punto  $x_0$ , la función de onda sería:

$$\varphi(x_0) = \varphi_{in}(x_0) + \sum_{i=1}^n FFT[\mu_i(x'_i)](x_0)$$

30

Y la función de transmitancia se calcula como:

$$T(x_0) = (\varphi(x_0) + \varphi(x_0))(\varphi_{in}(x_0) + \varphi(x_0))^* = \\ = I_{in}(x_0) + I(x_0) + (\varphi_{in}(x_0)\varphi(x_0)^*) + (\varphi_{in}(x_0)^*\varphi(x_0)) \quad [5]$$

donde  $x_0$  es el punto donde se sitúa la placa holográfica numérica;  $I_{in}(x_0)$  es la intensidad de onda del haz de referencia en  $x_0$ ;  $I(x_0)$  es la intensidad total de la superposición de la onda de referencia entrante en el objeto y la onda del objeto difractado en el punto  $x_0$  donde se hace el registro; y  $^*$  denota el complejo conjugado.

El patrón de interferencia que se calcula es el equivalente numérico al registro que se obtendría en una placa fotográfica (con luz coherente). Esta transmitancia calculada, si se implementa en una pantalla LCD y se ilumina con una fuente coherente (láser) permitiría la reconstrucción de la imagen tridimensional del objeto.

El cálculo de la transmitancia del objeto simulado permite el almacenamiento digital de dicho objeto tridimensional como un *output* (señal de salida) de este sistema. Así, el resultado obtenido permite almacenar en una función o imagen bidimensional (mapa de bits, formato de imagen jpg, png, etc.) el objeto tridimensional.

Este patrón podría almacenarse de dos formas: como transmitancia puramente dicha (esto es, como una función de números reales) o como el patrón de interferencia creado (esto es, como una función compleja, lo cual implica dos imágenes bidimensionales: una para la parte real del campo y otra para la parte imaginaria localizadas simétricamente respecto al origen).

Una segunda aplicación del método descrito permite no sólo generar la transmitancia sino recuperar el holograma generado. Una vez calculado el resultado, el patrón y la formulación empleada en la ecuación [1] pueden utilizarse para realizar un proceso equivalente al revelado del holograma. Para ello, se define una función auxiliar  $\mu(x) = \varphi_{in}(x) \cdot T(x)$  que se puede propagar hacia adelante aplicando la ecuación [1]. De hecho, esta función ya representa un holograma de Gabor en eje.

El método es también extensible a hologramas generados con luz parcialmente coherente.

Al basarse en ecuaciones de onda escalares, este método, diseñado especialmente para la holografía de neutrones, es directamente aplicable a cualquier sistema holográfico representado por una onda escalar y se puede extrapolar de forma directa

a un método genérico de onda vectorial (a cualquier campo holográfico).

- El sistema computacional donde se implementa el algoritmo descrito (Figura 1), comprende un haz de luz coherente o parcialmente coherente (1), que es expandido y
- 5 filtrado en un sistema óptico (2) para incidir como ondas planas en una placa zonal (3) donde se ha reproducido la función de transmisión de un objeto (3). La difracción de la onda de luz da lugar a una imagen real (4) y una imagen virtual (5) que representa un holograma de Gabor en eje.
- 10 Este sistema y método de simulación se plantea tanto para la producción de hologramas y placas zonales asociados a radiación electromagnética (IR, luz visible, UV, rayos-X, gamma...) como para la producción de hologramas y placas zonales de neutrones.
- 15 El sistema de la presente invención podría tener aplicación en dispositivos de reproducción en múltiples áreas, desde la biomedicina hasta los sistemas de seguridad y diseño de dispositivos fotónicos.
- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS**
- 20 Para complementar la descripción que se está realizando y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:
- 25 Figura 1. Esquema de implementación real para la reproducción de la función de transmitancia generada: (1) haz de luz coherente o parcialmente incoherente, (2) sistema óptico y expansor de haz, (3) placa con función de transmisión, (4) imagen real del objeto, (5) imagen virtual y (6) observador.
- 30 Figura 2. Posibles señales de salida (*outputs*) del sistema.

Figura 3. Holograma digital obtenido con el sistema donde se ha simulado tanto la reflexión de una onda arbitraria incidente como su transmisión, dando lugar a una imagen real y una imagen virtual en eje.

Figura 4. Simulación de dos puntos independientes en el espacio y posterior combinación en una única función de transmisión.

Figura 5. Descripción visual de la notación utilizada en las ecuaciones [1] a [3]

5

Figura 6. Patrón de interferencia y transmisión para una placa. El patrón de interferencia es complejo, por lo que se representa la parte real (a) y la parte imaginaria (b) del patrón de interferencia de forma independiente. La función de transmisión es real (c).

10 Figura 7. Imagen de la reproducción de una placa.

Figura 8. Imagen de la reproducción de una placa al incidir el haz de lectura con un ángulo diferente.

## 15 **REALIZACIÓN PREFERENTE DE LA INVENCIÓN**

La presente invención se ilustra mediante los siguientes ejemplos, los cuales no pretended ser limitativos de su alcance.

### 20 **Ejemplo 1**

En este ejemplo se muestra el procedimiento completo obtención de la función de transmisión de una placa de anchura  $x = 200 \text{ \AA}$  localizada centrada y a una distancia de  $z = 700 \text{ \AA}$ , junto con un punto localizado en  $x = 150 \text{ \AA}$  a una distancia de  $z = 300 \text{ \AA}$  ambos iluminados por un haz monocromático (onda escalar) de  $\lambda = 1.8 \text{ \AA}$ . Para la correcta visualización de estos resultados, se muestra el resultado de la simulación bidimensional, siendo trivial el paso a tridimensional.

30 Una vez definidos los objetos, se aplican las ecuaciones [1] y [5] para obtener el patrón de interferencia y la función de transmisión. En la Figura 6 se muestra tanto el patrón de interferencia (al ser complejo, se muestra como parte real e imaginaria) y la función de transmisión total. Con estos resultados se puede implementar la función de transmisión en un *setup* similar al representado en la Figura 1 y obtener una imagen real y una imagen virtual. Por otro lado, estas funciones calculadas, ya permiten la reconstrucción 35 tridimensional del objeto, por lo que se convierten en un medio de almacenamiento

eficiente. De este modo, pueden almacenarse tanto la función de transmisión como el patrón de interferencia perdiendo así menos información.

**Ejemplo 2**

5

En este ejemplo se muestra la simulación de la lectura digital de la función de transmisión hallada en el ejemplo 1.

10 En la Figura 7 se observa que, efectivamente, el sistema reproduce una plaza de  $z = 700 \text{ \AA}$  y un punto descentrado en  $z = 300 \text{ \AA}$  y  $x = 150 \text{ \AA}$ . El carácter tridimensional de la información contenida no se manifiesta solo en la disposición espacial de los objetos sino que, como se parecía en la Figura 8, al incidir el haz de lectura con un ángulo diferente ( $10^\circ$  en este caso), los objetos se desplazan en su posición y aparecen girados.

## REIVINDICACIONES

5 1. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación implantado en un sistema computacional donde el patrón de interferencia que caracteriza el holograma es la función de transmitancia y comprende:

- Definir numéricamente una función de onda  $\varphi_{in}(x)$  incidente en un punto  $x$
- Calcular inicialmente la función o funciones auxiliares  $\mu_i(x_i)$  que definen el objeto en los contornos de integración  $\partial\Omega_i$  ( $i=1\dots n$ ) mediante la ecuación [2]

$$10 \quad \mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j) - \sum_{i=1}^n \int_{\partial\Omega_i} d\Omega_i \frac{\partial G(x_j - x'_i)}{\partial n_i} \Big|_{x'_i \in \partial\Omega_i} \mu_i(x'_i) \quad [2]$$

considerando  $\mu_i(x_i) = 0$  y recalculando como  $\mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j)$

- 15
- Resolver la ecuación [2] calculando iterativamente cada una de las funciones auxiliares que definen el objeto  $\mu_i(x_i)$  según la ecuación [3], donde los términos  $FFT[\mu_i(x'_i)](x_j)$  son la representación de la aplicación de la FFT a cada una de las funciones auxiliares  $\mu_i(x_i)$ , y propagar el resultado hasta el punto  $x_j$ .

$$20 \quad \mu_j(x_j) = -\varphi_{in}(x_j) - FFT[\mu_i(x'_i)](x_j) \quad [3]$$

- 25
- Propagar la función de onda total  $\varphi(x)$  utilizando la ecuación [1] con el algoritmo FFT, según la ecuación [4]

$$\varphi(x) = \varphi_{in}(x) + \sum_{i=1}^n FFT[\mu_i(x'_i)](x) \quad [4]$$

- Calcular la función de transmitancia como equivalente numérico al registro que se obtendría en una placa holográfica empleando la ecuación [5]

$$T(x_0) = (\varphi(x_0) + \varphi(x_0))(\varphi_{in}(x_0) + \varphi(x_0))^* = \\ = I_{in}(x_0) + I(x_0) + (\varphi_{in}(x_0)\varphi(x_0)^*) + (\varphi_{in}(x_0)^*\varphi(x_0)) \quad [5]$$

30 donde  $x_0$  es el punto donde se sitúa la placa holográfica numérica;  $I_{in}(x_0)$  es la intensidad de onda del haz de referencia en  $x_0$ ;  $I(x_0)$  es la intensidad total de la superposición de la onda de referencia entrante en el objeto y la onda

del objeto difractado en el punto  $x_0$  donde se hace el registro; y \* denota el complejo conjugado.

2. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación, según  
5 reivindicación 1, donde el patrón de interferencia se almacena digitalmente como una función de números reales.
3. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación, según  
10 reivindicación 1, donde el patrón de interferencia se almacena digitalmente como una función compleja que comprende dos imágenes bidimensionales: una parte real del objeto y otra imaginaria, situadas simétricamente.
4. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación, según  
15 reivindicación 1, que comprende la recuperación del holograma generado definiendo una función auxiliar  $\mu(x) = \varphi_{in}(x) \cdot T(x)$  que se puede propagar hacia adelante aplicando la ecuación [1].
5. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación, según  
20 reivindicación 1, donde el haz de luz de referencia que genera el holograma es de luz coherente o parcialmente incoherente.
6. Método de generación de holograma digital de un objeto vía simulación, según  
reivindicación 1, donde el sistema holográfico está representado por una onda escalar o una onda vectorial.
7. Sistema computacional donde se implementa el método descrito, que  
25 comprende un haz de luz coherente o parcialmente coherente (1), que es expandido y filtrado en un sistema óptico (2) para incidir como ondas planas en una placa zonal (3) donde se ha reproducido la función de transmisión de un objeto (3) y la difracción de la onda de luz da lugar a una imagen real (4) y una imagen virtual (5) que representa un holograma de Gabor en eje.
8. Método y sistema reivindicados donde el haz de onda es un haz de neutrones para la generación específica de hologramas de neutrones, placas zonales de neutrones como técnica coadyuvante de laboratorio u otros usos.

9. Método y sistema reivindicados donde el haz de onda es luz visible, IR, UV, rayos-X o gamma para la generación de hologramas en todo el espectro electromagnético, incluyendo placas zonales y dispositivos de enfoque.

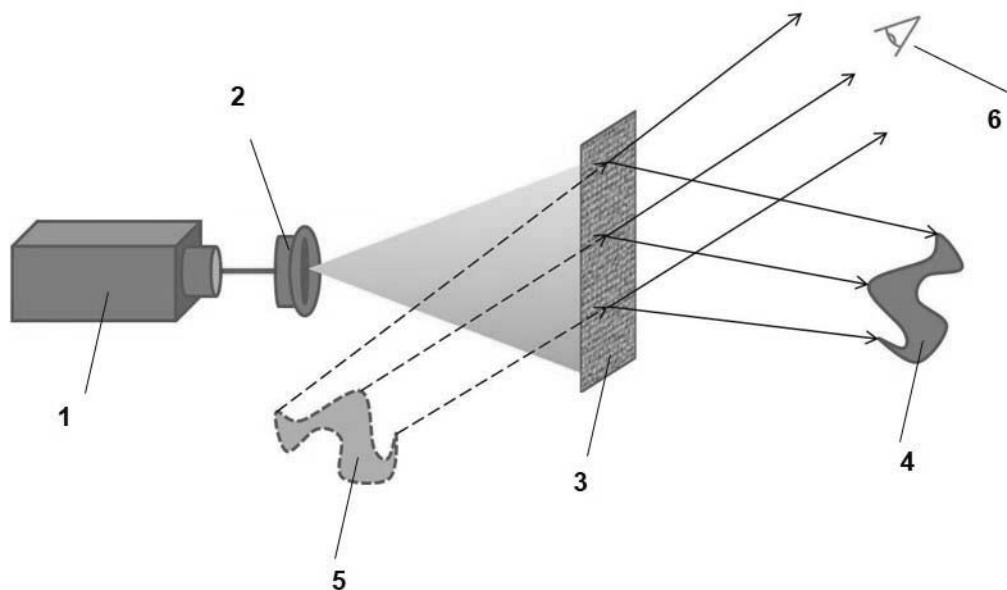


Figura 1

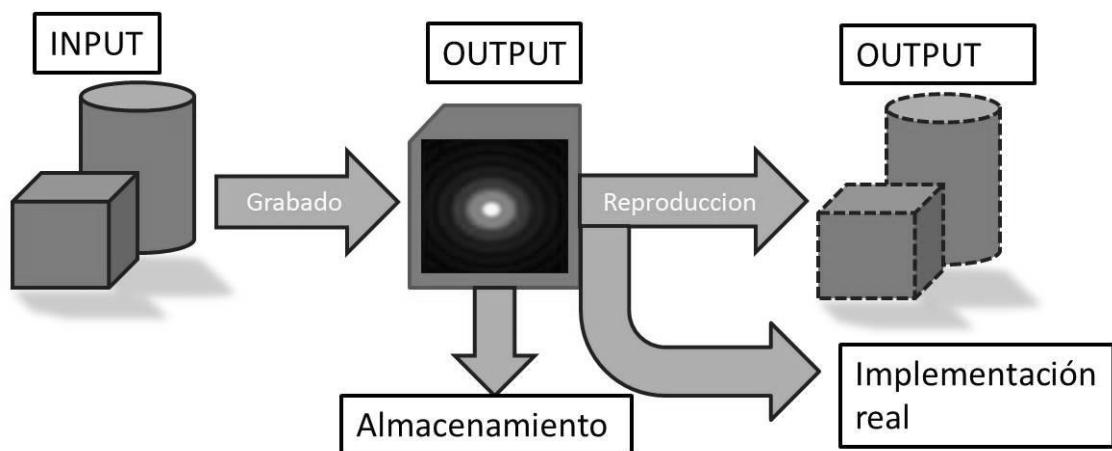
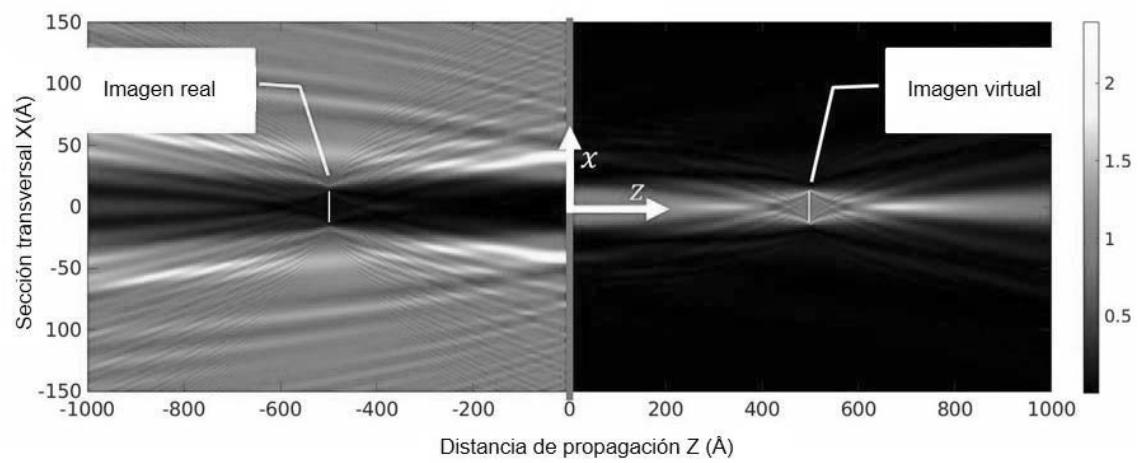
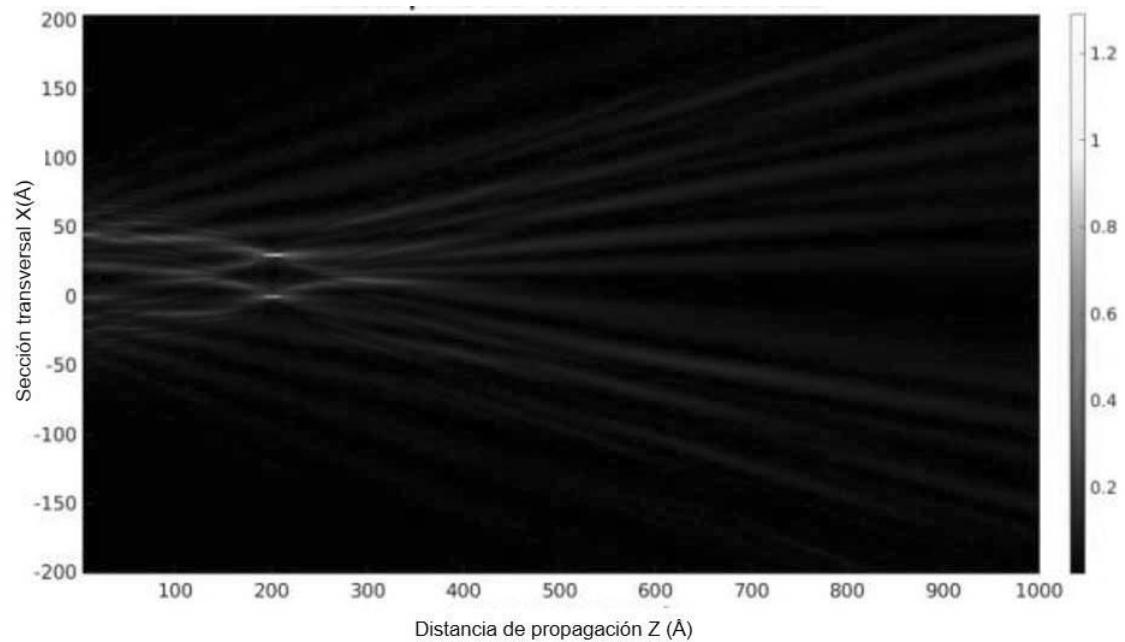


Figura 2



**Figura 3**



**Figura 4**

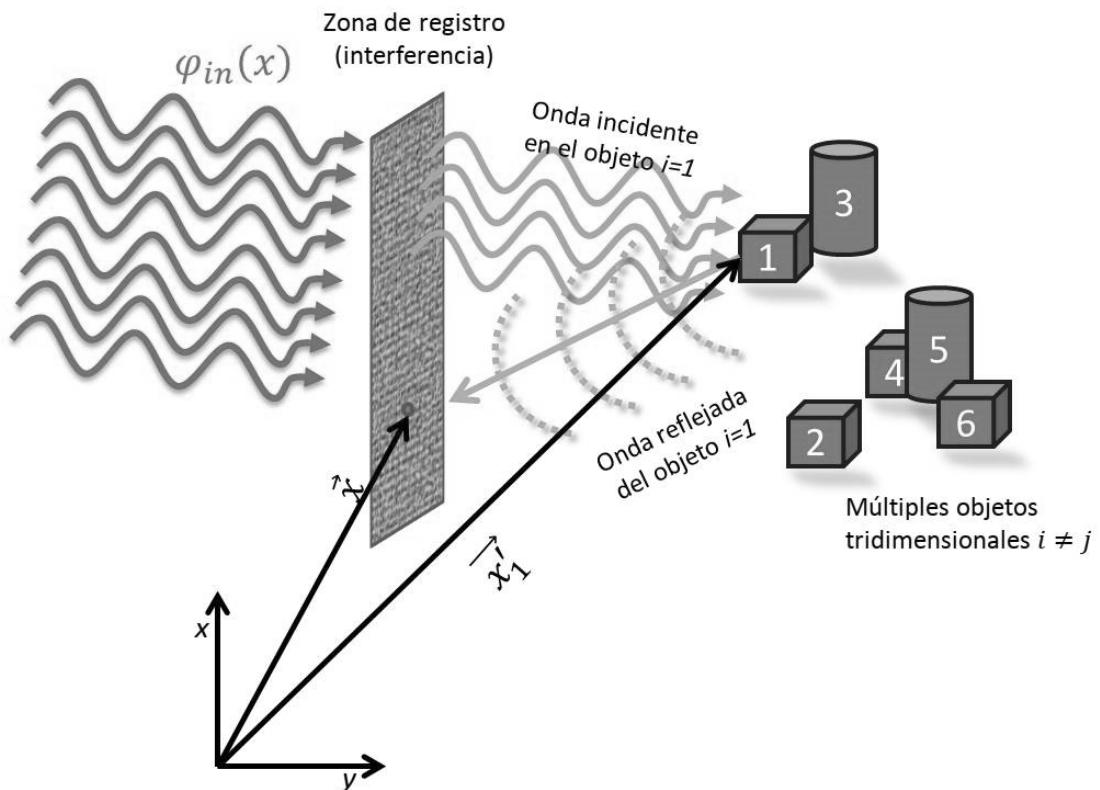


Figura 5

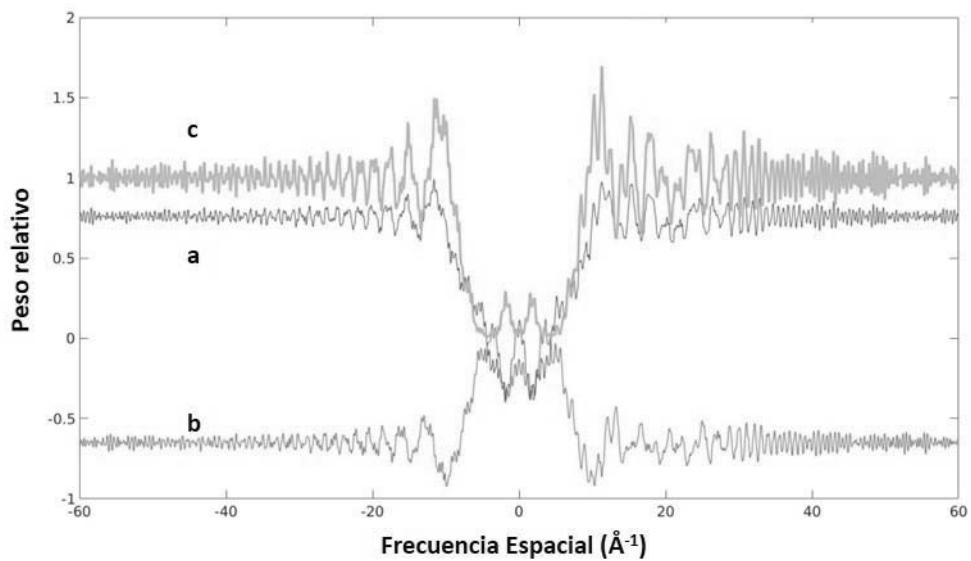
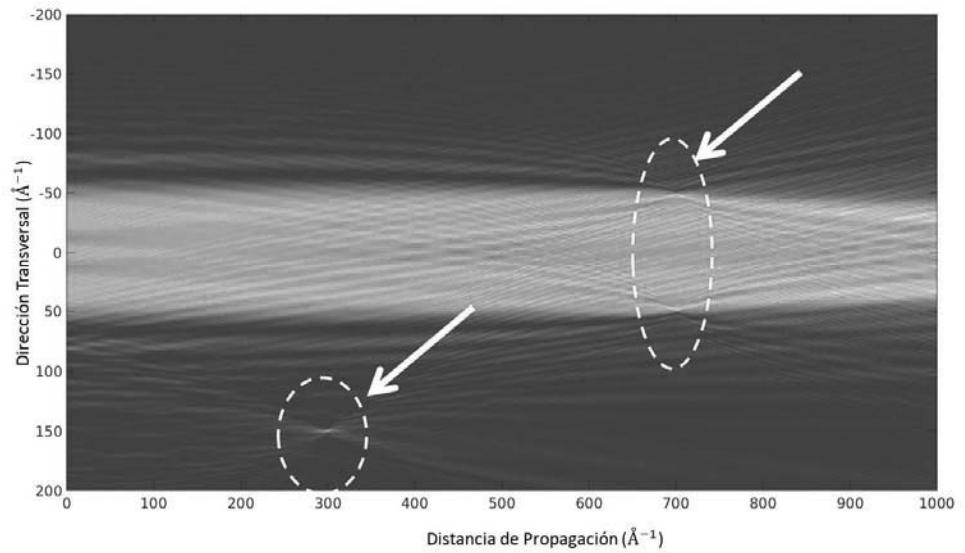
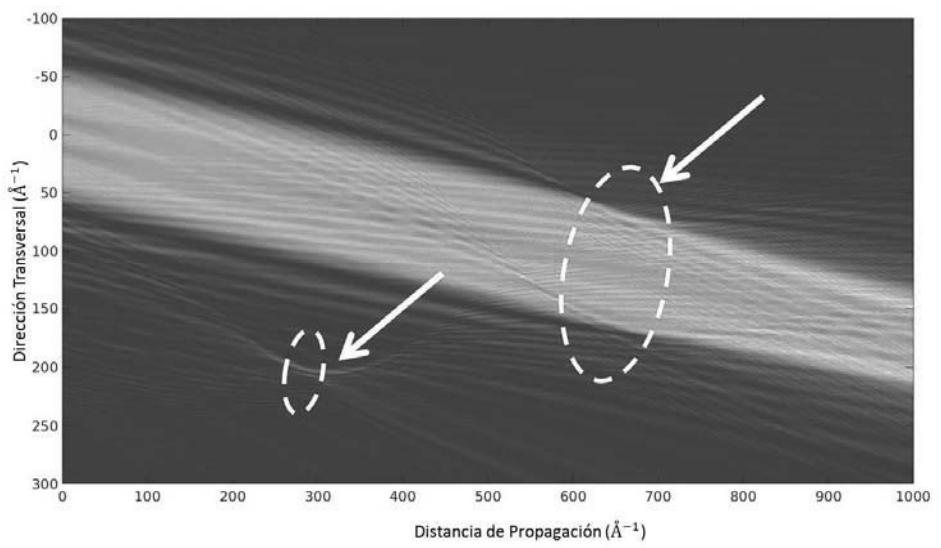


Figura 6

## ES 2 940 858 B2



**Figura 7**



**Figura 8**