

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 982 500**

51 Int. Cl.:

<b>B23K 26/03</b>	(2006.01)	<b>G01B 11/02</b>	(2006.01)
<b>B23K 26/20</b>	(2014.01)		
<b>G01N 21/84</b>	(2006.01)		
<b>B23K 26/082</b>	(2014.01)		
<b>B23K 26/24</b>	(2014.01)		
<b>G01B 9/02</b>	(2012.01)		
<b>G05B 19/418</b>	(2006.01)		
<b>G07C 3/14</b>	(2006.01)		
<b>B23K 31/12</b>	(2006.01)		
<b>G01B 5/00</b>	(2006.01)		

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

- 86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **19.12.2019 PCT/US2019/067542**
- 87 Fecha y número de publicación internacional: **25.06.2020 WO20132282**
- 96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **19.12.2019 E 19900782 (4)**
- 97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **06.03.2024 EP 3898061**

54 Título: **Supervisión del procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes determinada a partir de la formación de imágenes coherentes en línea (ICI)**

30 Prioridad:

**19.12.2018 US 201862782071 P**

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

**16.10.2024**

73 Titular/es:

**IPG PHOTONICS CORPORATION (100.0%)  
50 Old Webster Road  
Oxford, Massachusetts 01540, US**

72 Inventor/es:

**GALBRAITH, CHRISTOPHER M.;  
KANKO, JORDAN;  
WEBSTER, PAUL J.L.;  
VAN VLACK, COLE y  
HAYES, GENEVIEVE ELIZABETH**

74 Agente/Representante:

**LEHMANN NOVO, María Isabel**

ES 2 982 500 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Supervisión del procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes determinada a partir de la formación de imágenes coherentes en línea (ICI)

### CAMPO TÉCNICO

- 5 La presente divulgación se refiere a la supervisión del procesamiento de materiales y, más particularmente, a la supervisión del procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes determinada a partir de la formación de imágenes coherentes en línea (ICI, por sus siglas en inglés).

### INFORMACIÓN DE ANTECEDENTES

- 10 La formación de imágenes coherentes en línea (ICI) puede utilizarse para supervisar diversos tipos de procesos detectando reflexiones de una pieza de trabajo en línea con un haz de proceso dirigido a la pieza de trabajo. La ICI generalmente implica dirigir un haz de formación de imágenes junto con el haz de procesamiento hacia una pieza de trabajo y utilizar un interferómetro para recibir reflexiones del haz de formación de imágenes y producir un resultado que indica las características del proceso y/o pieza de trabajo, tal como la profundidad de ojo de cerradura de soldadura. Los ejemplos de ICI se describen con mayor detalle en las patentes de EE. UU. N.º 2016/039045 A1 (que constituyen la base para el preámbulo de la reivindicación 1), 8.822.875, 9.757.817 y 10.124.410.

- 15 La soldadura con láser es un ejemplo de un proceso que puede supervisarse efectivamente con ICI. Las soldaduras con láser de todo tipo contienen a menudo defectos debido a que los parámetros del proceso están fuera de tolerancia, variaciones en la materia prima de entrada, o fluctuaciones naturales o inestabilidades en el baño de fusión y el canal de vapor o el ojo de cerradura. La medición directa de la penetración del canal de vapor o el ojo de cerradura es muy importante para la detección de defectos, y la ICI es la primera tecnología viable desde el punto de vista industrial para lograr esto. La ICI es muy eficaz para la detección de defectos en canales de vapor de penetración ciega/parcial, pero ha sido menos efectiva para procesos de soldadura de penetración total. La ICI se utiliza normalmente para medir la longitud de la trayectoria óptica a la interfaz de retrodispersión (p. ej., la parte inferior del ojo de cerradura), dando como resultado datos inestables cuando el ojo de cerradura penetra completamente en el material.

- 20 La soldadura con láser presenta desafíos únicos cuando se supervisa con ICI. En una técnica de soldadura por oscilación, por ejemplo, el haz de proceso se mueve rápidamente en un patrón de oscilación durante la soldadura. Cuando se supervisa la soldadura por oscilación con ICI, alineando un haz de formación de imágenes con el ojo de cerradura, la región de cambio de fase (PCR, por sus siglas en inglés) u otra subregión de la pieza de trabajo presenta desafíos porque el haz de proceso se mueve en un patrón de oscilación.

### SUMARIO

30 De manera coherente con un aspecto de la presente divulgación, se divulga un método de acuerdo con la reivindicación 1.

### BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIBUJOS

- 35 Estas y otras características y ventajas se entenderán mejor leyendo la siguiente descripción detallada, tomada junto con los dibujos en donde:

La Figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema de procesamiento de materiales con un sistema de formación de imágenes coherentes en línea (ICI) capaz de supervisar el procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

- 40 La Figura 2A es un diagrama de flujo de un método para supervisar el procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

La Figura 2B es un diagrama de flujo de un método para determinar la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

Las Figuras 3A-3C son diagramas que ilustran diferentes algoritmos de densidad de señal para determinar la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

- 45 La Figura 4A es una imagen que muestra un gráfico de densidad de señal de ojo de cerradura como una función de la posición a lo largo de una soldadura, conforme a una realización de la presente divulgación.

La Figura 4B es una imagen que muestra un gráfico de datos sin procesar de ojo de cerradura para una serie de escaneos A en una pluralidad de líneas A a lo largo de una soldadura, que indica la profundidad del ojo de cerradura como una función de la posición a lo largo de la soldadura, conforme a una realización de la presente divulgación.

- 50 Las Figuras 5A-5E son ilustraciones de una pieza que puede soldarse a tope con un láser y supervisarse utilizando la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a una realización de la presente divulgación.

La Figura 6 es una imagen que muestra datos de ICI sin procesar que indican la profundidad como una función de la longitud de soldadura para una pieza que se ha soldado a tope con láser, conforme a una realización de la presente divulgación.

5 La Figura 7 ilustra gráficos de potencia láser de soldadura y factor de relleno de señal de formación de imágenes (densidad) como una función de la distancia (longitud de soldadura), conforme a una realización de la presente divulgación.

Las Figuras 8A-8E son imágenes que muestran datos de ICI sin procesar que indican la profundidad como una función de la longitud de soldadura evaluada utilizando solo la densidad de señal de formación de imágenes (o factor de relleno) para fines de garantía de calidad de éxito/fracaso, conforme a una realización de la presente divulgación.

10 La Figura 9 es una imagen que muestra datos de ICI sin procesar que indican la profundidad como una función de la longitud de soldadura evaluada utilizando la densidad de señal de formación de imágenes (o factor de relleno) y mediciones de distancia para fines de garantía de calidad de éxito/fracaso, conforme a una realización de la presente divulgación.

15 Las Figuras 10A y 10B son ilustraciones esquemáticas de penetración de soldadura en otras geometrías de pieza que tienen bolsas subsuperficiales, que pueden supervisarse utilizando la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

Las Figuras 11A-11C son imágenes de la raíz de soldadura de soldaduras a tope realizadas utilizando diferentes potencias láser, que pueden supervisarse utilizando la densidad de señal de formación de imágenes, conforme a realizaciones de la presente divulgación.

20 Las Figuras 12A-12C son gráficos de mediciones de ojo de cerradura de ICI de las soldaduras a tope mostradas en las Figuras 11A-11C como una función de la longitud de soldadura.

La Figura 13 es un gráfico que muestra el factor de relleno (o densidad de señal de formación de imágenes) para las soldaduras mostradas en las Figuras 11A-11C como una función de la distancia a lo largo de la soldadura.

25 La Figura 14 es un gráfico que muestra mediciones de ojo de cerradura de ICI (parte superior) y densidad de señal de formación de imágenes para una soldadura a tope de menor velocidad.

La Figura 15A es un gráfico de mediciones de escaneo A con seguimiento de profundidad como una función de la longitud de soldadura para un proceso de soldadura oscilante de lengüeta de batería donde la alineación del ojo de cerradura a la posición del haz de formación de imágenes varía periódicamente de acuerdo con el patrón de soldadura oscilante.

30 La Figura 15B muestra un gráfico de densidad de señal correspondiente a los datos con seguimiento de profundidad en la Figura 15A mostrando la línea discontinua un nivel umbral de densidad de señal constante utilizado en etapas de procesamiento posteriores.

35 La Figura 15C muestra gráficos de las mediciones de escaneos A con seguimiento de profundidad de la Figura 15A clasificadas como mediciones de profundidad de "superficie" y "ojo de cerradura" de acuerdo con la densidad de señal y el nivel umbral de la Figura 15B, en donde los canales clasificados se identifican en el gráfico por las regiones delimitadas.

La Figura 15D muestra un gráfico de profundidad de ojo de cerradura referenciado en relación con su altura de superficie local obtenida restando los datos de profundidad y superficie de ojo de cerradura en la Figura 15C, en donde la altura de la superficie local está representada por la línea discontinua a profundidad cero.

#### 40 DESCRIPCIÓN DETALLADA

Sistemas, métodos y aparatos, consistentes con la presente divulgación, se utilizan para supervisar el procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes calculada para un haz de formación de imágenes dirigido a una pieza de trabajo o región de procesamiento, por ejemplo, durante la formación de imágenes coherentes en línea (ICI). La densidad de señal de formación de imágenes puede utilizarse, por ejemplo, para supervisar procesos de soldadura con láser y con haz de electrones tales como soldadura de penetración total o parcial realizada utilizando soldadura pulsada, soldadura por puntos y/o soldadura por oscilación. En algunos ejemplos, la densidad de señal de formación de imágenes indica la penetración de la soldadura como resultado de las reflexiones desde un piso de ojo de cerradura y/o desde una estructura subsuperficial debajo del ojo de cerradura. La supervisión puede incluir la evaluación automatizada de éxito/fracaso o de calidad de la soldadura o del procesamiento de materiales o de las piezas producidas de este modo. La densidad de señal de formación de imágenes también se puede utilizar para controlar la soldadura o el procesamiento de materiales y/o la supervisión, por ejemplo, usando un resultado de datos de densidad de señal de formación de imágenes como retroalimentación. La densidad de señal de formación de imágenes puede utilizarse sola o junto con otras mediciones o métricas, tales como mediciones de distancia o profundidad.

5 Como se utiliza en el presente documento, la formación de imágenes coherentes en línea (ICI) se refiere a un proceso en el que un haz de formación de imágenes se dirige a una pieza de trabajo junto o "en línea" con un haz de proceso para fines de medición de características del proceso y/o la pieza de trabajo. El término "en línea" no requiere que los haces de formación de imágenes y de proceso sean coaxiales. El haz de formación de imágenes puede ser coaxial con el haz de proceso o puede estar desplazado o en ángulo con respecto al haz de proceso. Como se utiliza en el presente documento, el término "soldadura por oscilación" se refiere a un proceso de soldadura en el que un haz de proceso se mueve con un movimiento alternante relativamente pequeño ("oscilación") a medida que el haz de proceso se traslada por el sitio de soldadura (p. ej., moviendo la pieza de trabajo y/o el sistema de suministro de haz).

10 Como se utiliza en el presente documento, la densidad de señal (también denominada factor de relleno) se refiere a un porcentaje de mediciones que muestran la señal por encima de un umbral de intensidad de señal (p, ej., en dB). La densidad de señal de la ICI puede determinarse, por ejemplo, produciendo una pluralidad de escaneos axiales o escaneos A de una pieza de trabajo o región de procesamiento utilizando la ICI y calculando la densidad de señal de la ICI determinando si cada escaneo A contiene un punto de medición por encima de un umbral de intensidad de señal y calculando un porcentaje de escaneos A que cumplen con esta condición. El porcentaje puede calcularse dentro de una distancia o tiempo definido o un número definido de escaneos A denominados como ventana o contenedor de densidad de señal, como se describirá con mayor detalle más adelante. Se puede producir una pluralidad de escaneos A respectivamente en una pluralidad de líneas axiales o líneas A separadas a lo largo de una pieza de trabajo o se puede producir en una ubicación.

20 Este enfoque reconoce que la densidad de señal de ciertas regiones de profundidad en una región de cambio de fase (PCR) formada durante la soldadura puede ser relevante para evaluar la penetración o la calidad de una soldadura. Por ejemplo, una densidad de señal creciente o alta que emana de una región que comienza con la parte superior de la pieza de trabajo y termina sustancialmente en el espesor conocido de la pieza de trabajo sugeriría que el ojo de cerradura o canal de vapor se está cerrando o está cerrado.

25 Por el contrario, una señal creciente o de alta densidad que emana de una distancia sustancialmente más profunda que el espesor conocido de la característica de la pieza de trabajo que se está soldando podría indicar que el canal de vapor se está abriendo o está abierto, revelando otra característica de la pieza de trabajo, tal como la parte inferior de una bolsa de escape de gas u otra característica de la máquina, pieza o conjunto tal como una placa de respaldo o material protector que se coloca de manera intencional para generar una fuerte reflexión para el sistema de ICI y posibilitar los métodos descritos en el presente documento, como se describirá con mayor detalle más adelante.

30 Haciendo referencia a la Figura 1, la densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para supervisar el procesamiento de materiales, consistente con realizaciones de la presente divulgación, en un sistema de procesamiento de materiales 110 utilizando un sistema de formación de imágenes coherentes en línea (ICI) 120. El sistema de procesamiento de materiales 110 genera y dirige un haz de proceso 112 a una pieza de trabajo 102 para procesar la pieza de trabajo (p. ej., mediante soldadura). El sistema de formación de imágenes coherentes en línea (ICI) 120 genera y dirige un haz de formación de imágenes 122 a la muestra o pieza de trabajo 102 junto o "en línea" con el haz de proceso 112 para formar imágenes de la pieza de trabajo y generar datos de ICI que indican las características de la pieza de trabajo y/o el procesamiento de materiales. Un sistema de supervisión/control 130 recibe los datos de ICI del sistema de ICI 120 y determina la densidad de señal de formación de imágenes de ICI, así como otras mediciones para fines de supervisión y/o control del procesamiento de materiales.

40 El sistema de procesamiento de materiales 110 incluye una fuente de haz de proceso 114, tal como una fuente de láser o de haz de electrones, para generar el haz de proceso 112. El sistema de procesamiento de materiales 110 también incluye elementos ópticos 116, tales como colimadores y/o lentes, para suministrar el haz de proceso 112 a la pieza de trabajo 102 para realizar el procesamiento de materiales. En una realización de ejemplo, el sistema de procesamiento de materiales 110 es un sistema de soldadura con láser o haz de electrones y el haz de proceso puede utilizarse para formar un canal de vapor u ojo de cerradura durante el proceso de soldadura. Un ejemplo del sistema de procesamiento de materiales 110 es un sistema de soldadura con láser disponible de IPG Photonics Corporation donde la fuente de haz de proceso 114 incluye un láser de fibra. Otros sistemas de procesamiento de materiales también están dentro del alcance de la presente divulgación.

50 Otro ejemplo del sistema de procesamiento de materiales 110 es un sistema de soldadura por oscilación donde el haz de proceso se mueve rápidamente en un patrón de oscilación mientras se escanea por un sitio de soldadura en la pieza de trabajo. En un sistema de soldadura por oscilación, los elementos ópticos 116 también pueden incluir espejos móviles u otros deflectores activos o accionadores de escaneo para mover el haz de proceso en el patrón de oscilación. Un ejemplo del movimiento de "oscilación" puede ser un movimiento alternante de un haz láser (p. ej., en uno o más ejes) y dentro de un campo de visión relativamente pequeño definido por un ángulo de escaneo de menos de 10° o por un desplazamiento de ángulo de haz máximo de menos de ± 5°. Un ejemplo de un sistema de soldadura por oscilación se describe con mayor detalle en la publicación de solicitud de patente de EE. UU. N.º 2016/0368089.

55 Un ejemplo de ICI utilizada en un sistema de soldadura por oscilación se describe con mayor detalle en la publicación de solicitud de patente de EE. UU. N.º 16/515.892 presentada el 18 de julio de 20: 9.

El sistema de ICI 120 incluye una fuente de haz de formación de imágenes 124, tal como una fuente de luz

semicoherente, para generar el haz de formación de imágenes 122 y los elementos ópticos 126, tales como colimadores y/o lentes, para dirigir el haz de formación de imágenes 122 a la pieza de trabajo. El sistema de ICI 120 también incluye un interferómetro 128, tal como un interferómetro de Michelson, para producir un resultado del interferómetro desde el haz de formación de imágenes reflejado 122 y un detector 129, tal como un espectrómetro y una cámara, para detectar el resultado del interferómetro y producir datos de ICI (es decir, datos de interferograma). El resultado de interferometría puede basarse en al menos una longitud de trayectoria óptica a la pieza de trabajo y al menos otra longitud de trayectoria óptica. En la realización de ejemplo, los elementos ópticos 126 pueden suministrar el haz de formación de imágenes 122 en un ojo de cerradura formado durante el proceso de soldadura para formar imágenes de una o más ubicaciones dentro del ojo de cerradura. En otras realizaciones, el sistema de ICI 120 puede incluir elementos de dirección tales como espejos móviles (no mostrados) para dirigir el haz de formación de imágenes 122 a diferentes ubicaciones dentro del ojo de cerradura o respecto a la pieza de trabajo. Un ejemplo del sistema de ICI es un sistema de supervisión de soldadura por ICI con el software OmniWELD disponible de IPG Photonics.

Las realizaciones descritas en la presente divulgación también pueden utilizarse con cualquier sistema de procesamiento de materiales y sistemas de ICI descritos con mayor detalle en las patentes de EE. UU. N.º 8.822.875, 9.757.817 y 10.124.410.

El sistema de supervisión/control 130 incluye hardware (p. ej., un ordenador universal) y software programado para al menos calcular la densidad de señal de formación de imágenes y otras mediciones a partir de los datos de ICI. El sistema de supervisión/control 130 también puede registrar los datos de ICI sin procesar y la densidad de señal de formación de imágenes calculada, así como otras mediciones. El sistema de supervisión/control 130 puede supervisar adicionalmente el proceso y/o la pieza de trabajo durante el procesamiento. El sistema de supervisión/control 130 puede supervisar la densidad de señal de formación de imágenes de ICI para determinar las características del proceso y/o material para fines de inspección o garantía de calidad (p. ej., éxito/fracaso). El sistema de supervisión/control 130 también puede controlar el procesamiento de materiales en respuesta a retroalimentación analógica o digital (es decir, resultados de datos directos) que incluye la densidad de señal de formación de imágenes de ICI. El sistema de supervisión/control 130 también puede determinar y utilizar otras mediciones o métricas que incluyen, sin limitación, profundidad de ojo de cerradura, perfil de costura, altura de la pieza de trabajo, altura de la superficie de soldadura terminada, perfil de reborde y otras mediciones de distancia. El sistema de supervisión/control 130 puede controlar además la supervisión utilizando la ICI que incluye, sin limitación, la posición del haz de formación de imágenes con respecto al haz de proceso.

Haciendo referencia a la Figura 2A, se muestra y describe con mayor detalle un método 210 para calcular la densidad de señal de formación de imágenes de ICI. En general, se genera un haz de formación de imágenes 212 (p. ej., utilizando la fuente de haz de formación de imágenes 124 del sistema de ICI 120) y dirigido 213 a la pieza de trabajo, por ejemplo, junto con un haz de proceso. En un ejemplo de un proceso de soldadura de ojo de cerradura, el haz de formación de imágenes puede dirigirse al interior del ojo de cerradura de soldadura, así como a otras ubicaciones antes y/o después del ojo de cerradura. El haz de formación de imágenes también puede dirigirse a múltiples ubicaciones diferentes dentro del ojo de cerradura y antes y/o después del ojo de cerradura. El haz de formación de imágenes puede alinearse dentro del ojo de cerradura o región de procesamiento para mejorar las mediciones.

Se produce un resultado de interferometría 214 (p. ej., usando el interferómetro 128 en el sistema de ICI 120) a partir de al menos una componente del haz de formación de imágenes reflejado desde la pieza de trabajo y/o región de procesamiento. El resultado de interferometría se basa en al menos una longitud de trayectoria óptica respecto a la pieza de trabajo (p. ej., un brazo de muestra) y al menos otra longitud de trayectoria óptica (p. ej., un brazo de referencia). En el ejemplo de soldadura de ojo de cerradura, el haz de formación de imágenes puede retrodispersarse desde los lados del ojo de cerradura, desde un piso del ojo de cerradura y/o desde una estructura subsuperficial tal como un estante debajo del ojo de cerradura.

El resultado de interferometría se detecta 216 (p. ej., usando el detector 126) para producir datos de interferometría, tal como datos de interferograma, y se determina una densidad de señal de formación de imágenes 218 (p. ej., en el sistema de supervisión/control 130) a partir del resultado de interferometría. En el ejemplo de soldadura de ojo de cerradura, los datos de interferometría y la densidad de señal de formación de imágenes indican al menos la profundidad del ojo de cerradura y la penetración del ojo de cerradura a través de la pieza de trabajo, como se describirá con mayor detalle más adelante. La densidad de señal de formación de imágenes puede utilizarse a continuación para proporcionar garantía automatizada de éxito/fracaso o de calidad de la pieza de trabajo o región de procesamiento tal como la soldadura. Los datos de densidad de señal de formación de imágenes también pueden salir directamente al sistema de procesamiento de materiales 110 para proporcionar control de retroalimentación del procesamiento de materiales. Adicionalmente o como alternativa, la densidad de señal de formación de imágenes puede retroalimentarse al sistema de supervisión 130, por ejemplo, para ajustar la posición de supervisión o una ubicación del haz de formación de imágenes en relación con el haz de proceso o la pieza de trabajo.

Haciendo referencia a la Figura 2B, se muestra y describe con mayor detalle un método 220 para determinar la densidad de señal de formación de imágenes. De acuerdo con esta realización del método, se producen una pluralidad de escaneos A 222 de una pieza de trabajo utilizando la ICI en una pluralidad respectiva de líneas A separadas por la región de procesamiento de la pieza de trabajo o separadas en el tiempo. En el ejemplo de soldadura de ojo de cerradura, se puede realizar una serie de escaneos A a lo largo de la soldadura mientras el haz de proceso realiza la

soldadura.

Una densidad de señal de ICI se calcula 224 determinando si cada uno de una pluralidad de escaneos A contiene un punto de medición por encima de un umbral de intensidad de señal (p. ej., en dB) y calculando un porcentaje de escaneos A que cumplan con esta condición dentro de un contenedor o ventana de escaneos A durante una distancia o tiempo definido. De acuerdo con la invención, la densidad de señal se calcula para múltiples contenedores de densidad de señal ubicados a lo largo de una región de procesamiento para representar la densidad de señal de formación de imágenes como una función de la posición a lo largo de la región de procesamiento. En el ejemplo de soldadura de ojo de cerradura, este porcentaje de mediciones realizadas dentro de una región específica (es decir, dentro del contenedor o ventana) de todas las mediciones posibles totales en la región representa la densidad de señal de ojo de cerradura como una función de la longitud de la soldadura. El umbral de intensidad de señal (también denominado umbral de medición o seguimiento) y/o el tamaño del contenedor de densidad de señal pueden ser definidos por el usuario. Se pueden utilizar diferentes algoritmos para calcular la densidad de señal de formación de imágenes con diferentes disposiciones de los contenedores o ventanas de densidad de señal a lo largo de la región de procesamiento, por ejemplo, a lo largo de la soldadura, como se describirá con mayor detalle más adelante. Los cálculos de densidad de señal de formación de imágenes también se pueden suavizar utilizando algoritmos de suavizado conocidos tales como filtros de cuantil, medianas o medios móviles.

Haciendo referencia a las Figuras 3A-3C, se describen con mayor detalle algoritmos de ejemplo para calcular la densidad de señal de formación de imágenes utilizando contenedores o ventanas de densidad de señal. Las Figuras 3A-3C muestran diferentes algoritmos con diferentes disposiciones de contenedores o ventanas de densidad de señal por la longitud de una región de procesamiento tal como la longitud de una soldadura. Cada ventana o contenedor de densidad de señal incluye una longitud fija (p. ej., 5  $\mu\text{m}$ ) o tiempo fijo que contiene un número fijo de puntos de medición de línea A (es decir, escaneos A), que ocurren con una separación uniforme de muestras por la región de procesamiento. Para calcular la densidad de señal de formación de imágenes, el número de mediciones detectadas (es decir, mediciones por encima del umbral en dB) dentro de una ventana se dividen por el número total posible de mediciones dentro de la ventana y se multiplican por el 100 %.

En los ejemplos ilustrados, cada ventana incluye tres (3) puntos de medición o escaneos A para simplificar; sin embargo, una ventana o contenedor de densidad de señal puede incluir otros números de puntos de medición y la longitud de la ventana puede ser definida por el usuario. Si se detecta una medición para los tres (3) puntos de medición o escaneos A, la densidad de señal dentro de esa ventana o contenedor es del 100 %. Si se detecta una medición para uno (1) de tres (3) puntos de medición, la densidad de señal dentro de esa ventana o contenedor es del 33 %. Estos porcentajes calculados pueden representarse a continuación como una función de la posición a lo largo de la región de procesamiento.

En la Figura 3A, el algoritmo de densidad de señal utiliza ventanas fijas que se colocan de un extremo a otro (es decir, no superpuestas) por la región de procesamiento. En el ejemplo ilustrado, después de cada tres (3) puntos de medición, la densidad de señal se calcula en función de los tres (3) puntos de medición anteriores (es decir, dentro de una ventana que se extiende hacia atrás). Utilizando este algoritmo, la longitud de la ventana de densidad de señal se puede establecer como un múltiplo de la separación de muestras a lo largo de la región de procesamiento de manera que cada una de las ventanas tenga un número constante de puntos de medición totales posibles dentro de cada una de las ventanas. De acuerdo con este algoritmo, los porcentajes a continuación se pueden trazar como el valor y con la posición inicial de la ventana a lo largo de la región de procesamiento como el valor x de la medición.

En las Figuras 3B y 3C, los algoritmos de densidad de señal disponen las ventanas de densidad de señal de manera que cada una de las ventanas de densidad de señal tenga un número uniforme de mediciones totales posibles. En el algoritmo de densidad de señal mostrado en la Figura 3B, la densidad de señal se calcula en cada punto de medición (es decir, cada ubicación donde se toma una medición, ya sea detectada o no). En el ejemplo ilustrado, en cada punto de medición, la densidad de señal se calcula en función de los tres (3) puntos de medición anteriores (es decir, dentro de una ventana que se extiende hacia atrás). En el algoritmo de densidad de señal mostrado en la Figura 3C, la densidad de señal se calcula en cada ubicación de medición seguida (es decir, cada ubicación con una medición detectada por encima del umbral). En el ejemplo ilustrado, en cada punto de medición donde se detecta una medición por encima del umbral, la densidad de señal se calcula en función de los tres (3) puntos de medición anteriores (es decir, dentro de una ventana que se extiende hacia atrás). Este ejemplo en la Figura 3C da como resultado menos cálculos de densidad de señal, así como ventanas de densidad de señal con un número uniforme de mediciones totales. Aunque estas configuraciones muestran la ventana extendiéndose hacia atrás, la ventana también se puede centrar en el punto de medición, extenderse hacia delante o tener otras configuraciones.

En algunas realizaciones, la densidad de señal de ICI se calcula utilizando múltiples niveles de umbral de intensidad diferentes. El cálculo de la densidad de señal asociado con cada umbral se puede utilizar individualmente o en conjunto, para permitir una detección más específica de los fenómenos del proceso. Por ejemplo, en ciertas aplicaciones de soldadura de ojo de cerradura de penetración total, una soldadura "buena" puede tener una medición de densidad de señal dentro de un rango de porcentaje específico (p. ej., 10 - 20 %) utilizando un nivel de umbral (p. ej., 15 dB) y una medición de densidad de señal dentro de otro rango porcentual específico (p. ej., 5 - 8 %) utilizando otro nivel de umbral (p. ej., 20 dB).

En algunas realizaciones, la densidad de señal de ICI se calcula utilizando niveles de umbral de intensidad dinámico. Los niveles de umbral de intensidad dinámico se pueden especificar como una función de la posición de la trayectoria de soldadura o como una función del tiempo de adquisición. El usuario puede configurar límites dinámicos personalizados de acuerdo con conocimientos específicos sobre las condiciones del proceso. En algunas realizaciones, el nivel de umbral de intensidad puede modificarse de acuerdo con el nivel de señal de CC (retardo 0) de la propia línea A. En otras realizaciones, el nivel de umbral de intensidad puede modificarse de acuerdo con la intensidad de la interfaz medida desde otra región de la pieza de trabajo. En realizaciones adicionales, el nivel de umbral de intensidad puede modificarse de acuerdo con la intensidad de la interfaz medida antes del procesamiento. Los límites dinámicos de este tipo se pueden utilizar para compensar por cambios en las condiciones del proceso (p. ej., cambios en la geometría de la pieza de trabajo, el tipo de material, la energía del haz, la velocidad de avance, la contaminación de la superficie de la pieza de trabajo, etc.) o por cambios en el equipo de procesamiento (p. ej., contaminación del cubreobjetos).

En otras realizaciones, la región sobre la cual considerar la densidad de señal se puede reducir utilizando otras mediciones tales como, por ejemplo, intensidad de señal del ojo de cerradura o profundidad del ojo de cerradura superior/inferior. Por ejemplo, la densidad de señal de ICI se puede calcular para múltiples bandas de profundidad de línea A diferentes. La densidad de señal de ICI dentro de cada banda de profundidad se puede utilizar individualmente o en conjunto, para permitir una detección más específica de los fenómenos del proceso. En ciertas aplicaciones de soldadura de ojo de cerradura de penetración total, por ejemplo, puede requerirse que una soldadura "buena" tenga una medición de densidad de señal dentro de un rango de porcentaje específico cerca de la subsuperficie del material (es decir, la profundidad del saliente del ojo de cerradura) y una densidad de señal dentro de otro rango específico cerca de la superficie inferior del material. En algunas realizaciones, se puede configurar una región de banda de profundidad específicamente para medir los niveles de intensidad de CC (retardo 0).

La densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar en algoritmos de garantía de calidad para determinar éxito/fracaso en soldaduras, como se describirá con mayor detalle más adelante. Una densidad de señal de formación de imágenes que excede un límite o umbral de densidad definido para una distancia o período definido, por ejemplo, puede indicar penetración parcial o pérdida de penetración, lo que da como resultado una soldadura no satisfactoria. En otras realizaciones, un algoritmo de garantía de calidad puede determinar éxito/fracaso basándose en que la densidad de señal de formación de imágenes se encuentre dentro de un rango definido con límites superior e inferior.

En otras realizaciones, la densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para supervisar el estado del sistema (sistema de ICI o sistema de procesamiento de materiales). La densidad de señal medida desde la superficie de la pieza de trabajo, desde ubicaciones específicas dentro del sistema de procesamiento de materiales, o desde ubicaciones específicas dentro del sistema de ICI, puede utilizarse para medir la degradación de, o el daño a, componentes del sistema. La degradación o daño a los componentes del sistema de procesamiento de materiales (p. ej., cubre-objeto, óptica de enfoque, etc.) y componentes del sistema de ICI (p. ej., fibra de suministro, óptica de interferómetro, etc.) dan como resultado una disminución en la transmisión o reflexión del haz de formación de imágenes en etapas específicas de la trayectoria óptica y pueden detectarse mediante una caída en la densidad de señal de ICI a lo largo del tiempo.

En realizaciones adicionales, la densidad de señal de ICI se puede utilizar para supervisar el estado de una celda de procesamiento. Las mediciones de densidad de señal de partes específicas de la celda (p. ej., sujeción, fijación, equipo, maquinaria, etc.) pueden utilizarse para indicar daño o contaminación.

En algunas realizaciones, se puede realizar un promedio de línea A, suavizado u otra operación de agregación antes de calcular la densidad de señal. Estas operaciones se pueden utilizar para hacer que las mediciones de densidad de señal sean más robustas frente al moteado o a las inestabilidades del proceso. En algunas realizaciones, los elementos ópticos de suministro del haz del sistema de ICI pueden incluir elementos ópticos específicos, tal como un difusor, para reducir las motas.

Haciendo referencia a las Figuras 4A y 4B, tanto las densidades de señal calculadas a lo largo de la región de procesamiento como los datos sin procesar de la ICI pueden almacenarse y visualizarse trazándose como una función de la posición a lo largo de la región de procesamiento, por ejemplo, a lo largo de la soldadura. La Figura 4A muestra un ejemplo de densidad de señal de ojo de cerradura como una función de la posición a lo largo de una soldadura durante un proceso de soldadura de ojo de cerradura. La Figura 4B muestra datos sin procesar del ojo de cerradura que indican la profundidad del ojo de cerradura como una función de la posición a lo largo de la soldadura. Como se ilustra, la densidad de señal de formación de imágenes es mayor al principio y al final de la soldadura, donde el haz de formación de imágenes se refleja desde la superficie superior de la pieza de trabajo antes de que se abra el ojo de cerradura y después de que el ojo de cerradura se cierre. La densidad de señal de formación de imágenes disminuye a medida que la profundidad del ojo de cerradura aumenta hasta la penetración total y a continuación aumenta nuevamente después de la penetración total cuando el haz de formación de imágenes se refleja desde un estante subsuperficial (que se muestra como una señal más brillante en los datos sin procesar). En este ejemplo, estos gráficos pueden utilizarse con fines de supervisión de la soldadura y del proceso de soldadura. El gráfico de densidad de señal en la Figura 4A, por ejemplo, se puede utilizar para realizar la garantía de calidad y determinar puntos de fallo y el gráfico de datos sin procesar de ojo de cerradura en la Figura 4B se puede utilizar para garantizar que el gráfico de densidad de señal de ojo de cerradura sea el esperado.

Haciendo referencia a las Figuras 5A-5B, los sistemas y métodos descritos en el presente documento se pueden utilizar para supervisar la penetración de la soldadura en una aplicación de soldadura a tope donde la pieza tiene un estante subsuperficial a lo largo del eje del proceso y debajo de la región de soldadura. Como se muestra en la Figura 5A, la soldadura se realiza a través de una junta a tope de ajuste a presión y el haz de proceso y el haz de formación de imágenes se dirigen hacia una región de soldadura en la pieza 502 (como muestra la flecha). La Figura 5B muestra la pieza 502 y la región de soldadura 503 antes de cualquier formación de ojo de cerradura con una potencia de haz de proceso de 0 W. La pieza forma un vacío 505 y un estante subsuperficial 506 debajo de la región de soldadura 503 (p. ej., a aproximadamente 8 mm por debajo de la superficie superior). La Figura 5C muestra un ojo de cerradura 508 con penetración total a una potencia de haz de proceso de 1150 - 1900 W. En este caso, el ojo de cerradura 508 expone el estante 506 de manera que un haz de formación de imágenes pasa a través del ojo de cerradura 508 y se refleja desde el estante 506 de vuelta a través del ojo de cerradura 508. La Figura 5D muestra el ojo de cerradura 508 con penetración parcial a una potencia de haz de proceso de 900 W. En este caso, el ojo de cerradura 508 se cierra y el haz de formación de imágenes 522 se refleja desde una parte inferior 509 del ojo de cerradura 508.

La Figura 5E ilustra cómo se puede utilizar la ICI para supervisar la penetración total en esta aplicación de soldadura a tope. Un sistema de ICI tiene un campo visual estándar (p. ej., aproximadamente 12 mm en total) utilizados para la supervisión típica de soldaduras de ojo de cerradura. El campo visual completo de la ICI se pliega sobre sí mismo, sin embargo, de manera que cualquier superficie en la mitad inferior aparezca superpuesta con las que están encima de ellas. Este doble campo puede utilizarse para resolver reflexiones desde el estante 506 debajo de la trayectoria de soldadura a lo largo del eje del proceso. La penetración completa del ojo de cerradura 508 proporciona, por lo tanto, una trayectoria definida para el haz de formación de imágenes y permite que se obtengan imágenes de las superficies inferiores y aparezcan en los datos de ICI (dentro del campo doble superpuesto al campo estándar).

Haciendo referencia a las Figuras 6-9, los datos de ICI se pueden utilizar para calcular la densidad de señal y realizar un algoritmo de garantía de calidad para establecer el éxito o fracaso de la soldadura a tope en función de la penetración total, parcial, sobrepenetración y/o pérdida de penetración de la soldadura. La Figura 6 muestra datos sin procesar de ICI producidos a lo largo de la longitud de la soldadura para diferentes potencias láser y que representan diferentes condiciones de penetración durante la soldadura. En este ejemplo, el láser se controló para aumentar la potencia de 0 a 1900 W durante 200 ms, para proporcionar escalones de potencia a 1900 W durante 450 ms, 1650 W durante 400 ms, 1400 W durante 400 ms, 1150 W durante 400 ms, 900 W durante 400 ms y a continuación bajar gradualmente a 0 W durante 400 ms. La Figura 6 también muestra los resultados deseados de éxito/fracaso de un algoritmo de garantía de calidad de soldadura. Las flechas indican dónde los datos sin procesar muestran la superficie del estante inferior después de la penetración del ojo de cerradura y la parte inferior del ojo de cerradura después de la pérdida de penetración. Un cambio distintivo en la señal del estante es visible cuando cambia la potencia.

Este cambio en la señal de estante se puede cuantificar calculando la densidad de señal de formación de imágenes como se ha descrito anteriormente. La Figura 7 muestra la densidad de señal (también denominada factor de relleno) como una función de la distancia a lo largo de la soldadura junto con la potencia del láser como una función de la distancia a lo largo de la soldadura. En este ejemplo, la densidad de señal (o factor de relleno) es el porcentaje móvil de mediciones sobre un umbral de intensidad de 12 dB. Los cambios en la densidad de señal se pueden ver con cada escalón de potencia y los valores de ~100 % de densidad de señal se ven antes y después de la soldadura, donde el haz de formación de imágenes mide el material sólido en la superficie superior de la pieza.

Las Figuras 8A-8E ilustran los resultados de un algoritmo de garantía de calidad basado en la densidad de señal (factor de relleno). En este ejemplo, el algoritmo de garantía de calidad establece el fracaso de la soldadura si la densidad de señal se mantiene por encima de un cierto porcentaje (p. ej., 10 %) en una cierta distancia característica (p. ej., 1 - 2 mm) y alrededor de una banda de profundidad estrecha (p. ej., 200  $\mu$ m) alrededor de la señal del estante. La Figura 8A muestra que la soldadura aprueba correctamente donde la potencia es de 1900 W y la densidad de señal dentro de la banda de profundidad estrecha indica que se logra una penetración total. Las Figuras 8B-8D muestran que se establece correctamente el fracaso de la soldadura porque la densidad de señal dentro de la banda de profundidad estrecha es demasiado alta, lo que indica que la potencia es demasiado baja. En este caso, la alta densidad de señal indica que la potencia es demasiado baja porque la potencia más baja da como resultado menos interrupciones en el estante y más reflexión desde el estante. La Figura 8E muestra que la soldadura aprueba incorrectamente porque la densidad de señal permanece por debajo del umbral como resultado de que la señal de ojo de cerradura penetrada parcialmente no es lo suficientemente densa como para distinguirse de la señal de estante débil observada en las condiciones correctas del proceso (Figura 8A).

Se pueden utilizar otras mediciones para establecer correctamente el fracaso de la soldadura en las condiciones que se muestran en la Figura 8E. En particular, un algoritmo de garantía de calidad puede utilizar la densidad de señal máxima como se ha descrito anteriormente junto con una medición de distancia tal como la distancia máxima consecutiva fuera de los límites para establecer el éxito o el fracaso de una soldadura. Como se muestra en la Figura 9, por ejemplo, la soldadura debería considerarse no satisfactoria (bajo las condiciones mostradas en la Figura 8E) como resultado de una distancia medida consecutiva de 4 mm fuera de los límites o fuera de la banda de profundidad estrecha de 200  $\mu$ m entre 2050  $\mu$ m y 2250  $\mu$ m alrededor de la ubicación de la señal del estante. Los puntos de medición fuera de límites en la región de 1900 W (bajo las condiciones mostradas en la Figura 8A) no son suficientes para causar un fallo y, por lo tanto, la soldadura en estas condiciones aún aprobaría correctamente utilizando este algoritmo de garantía de calidad. Por lo tanto, un algoritmo automatizado de garantía de calidad puede aplicar una

operación lógica "O" a las mediciones de densidad de señal máxima y distancia máxima analizadas anteriormente para establecer el fracaso de una soldadura. También se puede utilizar una densidad de señal mínima en determinadas aplicaciones.

5 Las Figuras 10A y 10B ilustran otras geometrías de piezas donde se pueden utilizar la ICI y densidad de señal de formación de imágenes para supervisar la penetración de la soldadura durante una aplicación de soldadura a tope. La geometría de la pieza en la Figura 10A define una bolsa subsuperficial con un piso de bolsa plano que refleja la mayor parte del haz de formación de imágenes de vuelta al sistema ICI cuando el ojo de cerradura está abierto. La geometría de la pieza en la Figura 10B define una bolsa subsuperficial con un piso de bolsa que contiene una ranura en V que termina en una junta a tope centrada directamente a lo largo del eje del proceso, que dispersa la luz dentro de la bolsa y devuelve menos del haz de formación de imágenes al sistema de ICI cuando el ojo de cerradura está abierto. Incluso con esta geometría y la señal relativamente débil devuelta desde el piso de la bolsa, la densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para supervisar la penetración de la soldadura.

15 En algunas realizaciones, la geometría de la pieza puede modificarse o diseñarse para mejorar la reflexión subsuperficial. Donde hay una estructura subsuperficial con una geometría que no proporciona buena reflectividad (p. ej., como se muestra en la Figura 10B, la estructura subsuperficial puede modificarse para mejorar la reflectividad. Se puede utilizar una capa de polímero u otro recubrimiento en el piso de la bolsa, por ejemplo, para mejorar la reflectividad de una estructura subsuperficial y, por lo tanto, aumentar la intensidad de la señal devuelta desde el piso de la bolsa. La capa y/o recubrimiento puede estar diseñado para ser consumido, evaporado o eliminado de otro modo por el haz de proceso durante el proceso (p. ej., durante la penetración total). Cuando no haya una estructura subsuperficial a lo largo del eje del proceso, la geometría de la pieza puede modificarse o diseñarse para crear una estructura subsuperficial capaz de reflejar el haz de formación de imágenes que pasa a través del ojo de cerradura.

20 Cuando se coloca intencionalmente una placa de soporte o material protector para generar una reflexión fuerte para el sistema de ICI, es especialmente ventajoso si un material o placa de soporte de este tipo se puede renovar, reemplazar o limpiar fácilmente, resiste la energía del láser o del haz de electrones y/o resiste la adhesión de salpicaduras. Un ejemplo de esto es hacer fluir agua sobre o debajo de una superficie de cobre. En esta realización, el sistema de ICI puede obtener imágenes de las superficies de cobre y agua para confirmar que la soldadura ha penetrado totalmente. En otra realización, la superficie de cobre se omite por completo y el sistema de ICI obtiene imágenes de un chorro de agua, niebla (o algún otro fluido) que pasa por debajo de la junta de soldadura. Si hay un medio de dispersión óptica (tal como gas arrastrado, incluido vapor) en el chorro de fluido, crearía múltiples eventos de dispersión para la imagen de ICI que serían muy fáciles de distinguir de otras señales, permitiendo además al usuario confirmar que la luz podía pasar a través de la junta de la pieza de trabajo y que era probable la penetración total de la soldadura. Cambiando el tiempo de integración del sistema de ICI (para modular la sensibilidad del sistema a los artefactos de movimiento de alta velocidad) y/o aplicando técnicas Doppler o de variación de moteado conocidas por los expertos en la materia de tomografías de coherencia óptica, los medios de dispersión se pueden identificar además mostrando que su velocidad está dentro de un cierto rango que es inconsistente con el movimiento de otros aspectos del proceso (canal de vapor, salpicaduras, etc.). Es particularmente ventajosa la aplicación de un procesador de imágenes sincronizado con la modulación del tiempo de integración de ICI de manera que se pueda realizar una comparación diferencial entre mediciones adquiridas con diferentes duraciones de integración.

25 En algunas realizaciones, el fluido comprende o contiene una sustancia que emite (p. ej., fluorescencia) cuando se irradia con el haz de energía del proceso, u otro haz óptico que se suministra junto con el haz de proceso, y el sistema de suministro del haz (p. ej., incluyendo una fibra de suministro) y/o láser están configurados (p. ej., mediante recubrimientos ópticos optimizados conocidos por los expertos en la técnica) para recibir esa emisión y confirmar que se ha producido la penetración total de la soldadura. De acuerdo con una realización, se pueden utilizar sensores ópticos auxiliares para recibir esta emisión. Un ejemplo de un sistema de ICI con sensores auxiliares se divulga con mayor detalle en PCT/US2018/014218.

30 La recepción y el reconocimiento de esta emisión pueden verse cuestionados por otras emisiones del propio proceso, incluida la radiación del cuerpo negro de la pieza de trabajo caliente. Para superar esto, la detección de esta señal podría aislarse en la longitud de onda específica de la emisión (p. ej., una línea fluorescente) mediante filtros ópticos y/o aislándola en el tiempo pulsando la fuente de excitación (a velocidades de varios kHz o incluso MHz) y comparando la señal medida durante el pulso a señales medidas en otros momentos. Si la frecuencia de pulsación es suficientemente diferente de la velocidad a la que cambia el ruido de fondo, resulta mucho más fácil identificar la señal verdadera e identificar la penetración total a través de la soldadura. Estos conceptos también podrían aplicarse a otras aplicaciones de procesamiento de materiales, tal como perforación o corte, para mostrar cuándo se ha producido la penetración total de un material sustancialmente opaco.

35 Haciendo referencia a las Figuras 11A-11C, los sistemas y métodos descritos en el presente documento se pueden utilizar para supervisar la penetración de la soldadura en una soldadura a tope sin ninguna estructura subsuperficial a lo largo del eje del proceso debajo de la región de soldadura. En este ejemplo, la densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para distinguir entre penetración total y la pérdida marginal de penetración. Las Figuras 11A-11C muestran imágenes de una raíz de soldadura donde la potencia del láser se reduce de 9,6 kW a diferentes potencias del láser de 6,0 kW, 7,0 kW y 8,0 kW, respectivamente. La raíz de soldadura es visible en la Figura 11A y esporádicamente visible en la Figura 11B, pero la fusión es continua en toda la soldadura en la Figura 11C con solo

algo de adelgazamiento de la raíz. En este ejemplo, las soldaduras en las Figuras 11A y 11B deberían considerarse no satisfactorias y la soldadura en la Figura 11C debería considerarse satisfactoria.

Las Figuras 12A-12C muestran mediciones de ojo de cerradura de ICI como una función de la distancia para cada una de las soldaduras mostradas en las Figuras 11A-11C, respectivamente. Cada uno de estos gráficos indica algún grado de cierre de ojo de cerradura al comienzo de la región donde cae la potencia, como lo muestra el aumento de la densidad de puntos en esta región. La Figura 13 muestra la densidad de señal de formación de imágenes como una función de la distancia para las tres soldaduras mostradas en las Figuras 11A-11C en un solo gráfico: densidad de señal 1301A para la soldadura a 6,0 kW, densidad de señal 1301B para la soldadura a 7,0 kW, y densidad de señal 1301C para la soldadura a 8,0 kW. En este ejemplo, el umbral de medición o seguimiento es de 17 dB y las soldaduras en las que la densidad de señal de formación de imágenes supera el 2,8 % (como lo indica la línea discontinua) durante más de 2 mm no son satisfactorias. Este gráfico de densidad de señal de formación de imágenes ayuda a ilustrar la determinación de éxito/fracaso al distinguir más claramente entre la soldadura satisfactoria por debajo de la densidad de señal de formación de imágenes (es decir, la soldadura en la Figura 11C) y las soldaduras no satisfactorias por encima de la densidad de señal de formación de imágenes (es decir, las soldaduras en las Figuras 11A y 11B).

La Figura 14 muestra tanto la medición de ojo de cerradura de ICI (arriba) como la densidad de señal de formación de imágenes (parte inferior) para una soldadura donde la potencia se reduce de 9,6 kW a 6,0 kW y a velocidades de 3,8 m/min y 3,5 m/min. En este ejemplo, el umbral de medición o seguimiento fue de 14 dB. Como se muestra, la densidad de señal de formación de imágenes representada como una función de la distancia muestra que la reducción de la velocidad marca la diferencia entre que la soldadura apruebe y falle. La densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para realizar cambios en uno o más parámetros del proceso, tal como la velocidad de soldadura, la potencia, el desenfoque y el desplazamiento lateral del haz de proceso, para cambiar la geometría del ojo de cerradura de soldadura. Los ajustes de medición de ICI, tal como el umbral de medición, el límite de densidad de señal y la posición de medición del ojo de cerradura, también se puede ajustar para garantizar que un algoritmo de garantía de calidad proporcione los resultados de éxito/fracaso deseados para una aplicación en particular.

Haciendo referencia a las Figuras 15A-15D, se puede utilizar una realización adicional del sistema y método para supervisar el procesamiento de materiales utilizando la densidad de señal de formación de imágenes para supervisar un proceso de soldadura por oscilación, tal como un proceso de soldadura con láser de lengüeta de batería. Este tipo de proceso es común en aplicaciones de movilidad eléctrica (electromovilidad), tal como el conjunto de paquetes de baterías, y a menudo se utiliza para unir metales conductores, incluyendo cobre y aluminio, en varias configuraciones. Metales adicionales, tal como acero y otras aleaciones ferrosas, o recubrimientos metálicos, tal como níquel, también son comunes en procesos de este tipo. Las celdas cilíndricas, prismáticas y de bolsa son ejemplos no limitativos de componentes del conjunto de baterías. Las aplicaciones de soldadura de movilidad eléctrica suelen emplear técnicas de soldadura por oscilación con láseres monomodo para mejorar la soldabilidad de los metales altamente reflectantes involucrados en el proceso.

En esta solicitud, el patrón de oscilación da como resultado una variación espacial periódica en la alineación entre la ubicación de medición del haz de formación de imágenes y la posición de la región de cambio de fase (PCR). El patrón de oscilación también puede producir variaciones temporales periódicas en la PCR, debido a cambios en la densidad de energía lineal alrededor del patrón de oscilación, dando como resultado la creación periódica y el colapso del canal de vapor de ojo de cerradura. Como resultado de estas variaciones, una serie de escaneos A obtenidos para una posición determinada del haz de formación de imágenes puede incluir las que corresponden al canal de vapor y las que corresponden a su superficie proximal (p. ej., el baño de fusión o la superficie de la pieza de trabajo). La clasificación de los escaneos A individuales en sus categorías correspondientes (p. ej., PCR, canal de vapor, superficie de la pieza de trabajo, baño de fusión, etc.) es ventajoso para mejorar la precisión del sistema de medición.

La sincronización espaciotemporal precisa con el patrón de oscilación, o más específicamente con la posición de la PCR, puede ser inviable. Por lo tanto, la clasificación de los escaneos A en las categorías o tipos descritos anteriormente se basa en la información incluida en la propia medición. La densidad de señal de formación de imágenes se puede utilizar para realizar dicha clasificación. La Figura 15A ilustra datos de escaneo A (es decir, la distancia de la trayectoria óptica) a lo largo de la soldadura, y las Figuras 15B-15D ilustran la utilización de la densidad de señal de formación de imágenes y los niveles de umbral estáticos para clasificar los datos de escaneo A de la Figura 15A como profundidad o "superficie" de "ojo de cerradura". También se pueden emplear técnicas de umbralización y análisis de señales más complejas para mejorar la precisión de la clasificación.

La Figura 15B muestra el gráfico de densidad de señal correspondiente a los datos con seguimiento de profundidad en la Figura 15A. La densidad de señal se compara con un nivel umbral de densidad de señal constante (0,78 en este ejemplo). Los escaneos A con valores de densidad de señal por encima del umbral se clasifican como "de superficie", mientras que aquellos con valores por debajo del umbral se clasifican como profundidad de "ojo de cerradura". Los puntos de datos con seguimiento de profundidad de los escaneos A de "ojo de cerradura" se trazan por separado de los puntos de datos con seguimiento de profundidad de los escaneos A de "superficie" en la Figura 15C. Los datos categorizados se pueden utilizar a continuación para el procesamiento de datos adicional, determinaciones de garantía de calidad y señales de control de retroalimentación, por ejemplo, como se ha descrito anteriormente. En este ejemplo, la señal de profundidad de "ojo de cerradura" se resta de la señal de "superficie" para producir una medición de profundidad relativa a la superficie local de la pieza de trabajo (Figura 15D). La profundidad de ojo de cerradura con

referencia a la superficie puede entonces estar sujeta a sus propios algoritmos de determinación de garantía de calidad. La señal de "superficie" también se puede utilizar para corregir las variaciones de la distancia de trayectoria óptica debidas a los elementos ópticos de escaneo.

5 También se observan variaciones temporales periódicas similares en la PCR en aplicaciones de soldadura con láser pulsada y pueden beneficiarse de la clasificación descrita anteriormente. Si bien el ejemplo anterior muestra la clasificación de los escaneos A para cambios periódicos de la PCR, las técnicas de clasificación descritas también benefician a los escaneos A de una PCR cambiante u otra característica de la pieza de trabajo, donde los cambios son de naturaleza aperiódica. Ejemplos de procesos que pueden producir cambios de este tipo incluyen aquellos con diferentes condiciones de proceso (tipo de material, potencia del láser, velocidad de soldadura, enfoque, gas de protección, etc.) o aquellos con mayor inestabilidad inherente.

10 Aunque el ejemplo ilustrado muestra clasificaciones de "superficie" u "ojo de cerradura", el concepto de utilizar la densidad de señal de formación de imágenes para clasificar escaneos A se puede utilizar para clasificar escaneos A como pertenecientes a cualquier aspecto de una región de cambio de fase o subregión de la pieza de trabajo. Estos aspectos incluyen, sin limitación, canal de vapor, parte inferior del canal de vapor, pared lateral del canal de vapor, profundidad de penetración de la soldadura, baño de fusión, superficie de la pieza de trabajo, composición del material, fase del material y densidad del material.

15 Otras aplicaciones de las técnicas descritas anteriormente incluyen la clasificación e identificación de diversos aspectos de la pieza de trabajo. Para piezas de trabajo compuestas por múltiples tipos de materiales, la densidad de señal se puede utilizar para diferenciar un tipo de material de otro o clasificar los escaneos A como pertenecientes o no a un tipo de material específico. Las propiedades ópticas y geométricas inherentemente diferentes de los diferentes tipos de materiales dan como resultado niveles variables de señal recibidos por el sistema de formación de imágenes. Estos niveles de señal se manifiestan como diferentes lecturas de densidad de señal, que en combinación con algoritmos de umbralización, se pueden utilizar para clasificar los escaneos A como correspondientes a un tipo de material específico. Una clasificación de este tipo tiene utilidad en una variedad de aplicaciones que incluyen, sin limitación, soldadura con láser de materiales diferentes, eliminación de material por láser, limpieza por láser, fabricación aditiva por láser y marcado por láser.

20 La fase material (p. ej., sólido, líquido, gas) o grado de fase del material (p. ej., semisólido, semilíquido) tiene una influencia similar en los niveles de señal de medición recibidos por el sistema de formación de imágenes y, por tanto, en la densidad de señal. El análisis de la densidad de señal se puede utilizar para distinguir una fase del material, o el grado de fase del material, de otra. Este tipo de clasificación puede beneficiar las aplicaciones de procesamiento láser donde a menudo es útil distinguir entre aspectos del proceso sólidos (p. ej., pieza de trabajo líquidos (p. ej., baño de fusión) y gaseosos (p. ej., canal de vapor en soldaduras de ojo de cerradura).

25 La densidad del material también produce cambios en los niveles de densidad de señal de naturaleza similar a los descritos anteriormente. Por ejemplo, agrupaciones agregadas de partículas de polvo metálico, como las utilizados en la fabricación de aditivos a base de polvo, producen una dispersión más difusa que sus correspondientes formas sólidas a granel. La dispersión difusa normalmente da como resultado lecturas de densidad de señal que se pueden distinguir, por ejemplo, por la estabilidad de la señal o el nivel de la señal, de lecturas de densidad de señal asociadas con superficies que son de naturaleza más especular.

30 Los ejemplos incluidos pretenden ser un ejemplo sencillo de los beneficios de la clasificación de escaneos A basada en la densidad de señal. Las técnicas descritas anteriormente pueden extenderse a otras aplicaciones.

Los usos más generales incluyen, pero sin limitación, clasificar las adquisiciones de escaneos A en uno o más canales separados. Estos canales pueden estar sujetos a análisis adicionales para medir o cuantificar aspectos del proceso. Además de clasificar los escaneos A como pertenecientes a un canal u otro, la clasificación también puede incluir la identificación de escaneos A como no pertenecientes a un canal.

35 Las técnicas descritas en el presente documento pueden ser especialmente útiles cuando se aplican a aplicaciones o procesos donde *a priori* no es posible planificar o sincronizar el proceso, por ejemplo, debido a limitaciones del hardware o condiciones variables del proceso. La clasificación de los escaneos A ayuda a superar tales limitaciones cuando proporciona *a posteriori* sincronización con aspectos del proceso.

40 Se proporcionan sistemas, métodos, algoritmos y software para calcular la densidad de una señal de formación de imágenes coherentes en línea. Estos métodos se pueden utilizar para el seguimiento o control del procesamiento de materiales con láser, o para la inspección general de materiales, piezas, componentes, productos y similares.

45 En una realización, la densidad de señal de ICI se calcula determinando si cada escaneo A contiene un punto de medición por encima de un umbral de intensidad de señal definido por el usuario (p. ej., medido en dB por encima del piso de ruido del detector, excluyendo una región definida por el usuario alrededor del punto de retardo cero), y, luego calculando el porcentaje de escaneos A que cumplen con esta condición dentro de una distancia definida por el usuario o un período definido por el usuario durante el cual se acumula la señal (denominados "contenedores").

En algunas realizaciones, los contenedores pueden definirse de un extremo a otro de una medición que comienza con

- 5 el primer escaneo A adquirido. En algunas realizaciones, los contenedores pueden definirse de manera consistente y superpuesta. En algunas realizaciones, los contenedores pueden definirse de manera superpuesta en relación con las posiciones de los escaneos A que cumplen con la condición anterior. En algunas realizaciones, los valores porcentuales resultantes pueden suavizarse aún más mediante algoritmos que incluyen, aunque no de forma limitativa, filtros de cuantil, medianas o medias móviles.
- En algunas realizaciones, los datos producidos por los métodos pueden utilizarse para una evaluación automatizada de éxito/fracaso o de calidad de un proceso de modificación de material por láser, o para una evaluación automatizada de éxito/fracaso o de calidad de materiales, piezas, componentes, productos y similares.
- 10 En una realización, la intensidad o densidad de señal de ICI se utiliza para supervisar el canal de vapor en procesos de soldadura con láser de penetración total o por haz de electrones.
- En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el canal de vapor en procesos de soldadura con láser de penetración parcial o por haz de electrones.
- En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el baño de fusión en procesos de soldadura con láser en modo de conducción o por haz de electrones.
- 15 En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el baño de fusión o el canal de vapor naciente en procesos de soldadura por haz de electrones o por láser intermedia que se encuentran entre los regímenes típicos de densidad de energía de los procesos de soldadura en modo de ojo de cerradura y en modo de conducción.
- En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el baño de fusión en procesos de soldadura con láser o por haz de electrones de penetración parcial o total.
- 20 En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el estado de la superficie o las características de un material antes de o previamente a un proceso de modificación de material con láser o haz de electrones.
- En otra realización, los métodos se utilizan para supervisar el estado de la superficie o las características de un material después de o posteriormente a un proceso de modificación de material con láser o haz de electrones.
- 25 En otra realización, los métodos se utilizan para inspeccionar el estado de la superficie o las características de un material antes de o previamente a un proceso de soldadura con láser o por haz de electrones.
- En otra realización, los métodos se utilizan para inspeccionar el estado de la superficie o las características de un material después de o posteriormente a un proceso de soldadura con láser o por haz de electrones, donde el "material" puede referirse a la propia zona de fusión de la soldadura, el material circundante, un material/recubrimiento de superficie, o alguna otra superficie relevante para el proceso.
- 30 Los métodos se pueden utilizar para supervisar el canal de vapor en un proceso de soldadura con láser o por haz de electrones de penetración total donde se pretende que el canal de vapor invada un hueco o vacío subsuperficial o en un proceso de soldadura con láser o por haz de electrones de penetración total donde se pretende que el canal de vapor no invada un hueco o vacío subsuperficial. En algunas realizaciones, el hueco o vacío subsuperficial puede ser una bolsa de gas o una característica similar. En algunas realizaciones, se pretende que el canal de vapor pase a través del material hacia el espacio libre donde existe otra superficie en el espacio libre a lo largo del eje del proceso.
- 35 La superficie en este espacio libre puede comprender una repisa o estante o superficie en la pieza o conjunto que se va a soldar, o una superficie del aparato circundante, o una superficie de otro componente dentro del conjunto al que pertenece la pieza soldada, o una superficie de una protección o escudo protector o temporal colocado durante el proceso de soldadura, o una superficie de equipos de sujeción, fijación, suministro de gas o evacuación de escape presente en la celda de soldadura.
- 40 En otra realización, los métodos se utilizan en paralelo a otros métodos, algoritmos y software aplicados a los mismos datos de ICI para extraer o calcular otras métricas o mediciones, tal como la profundidad de penetración de la soldadura. En otra realización, los resultados de los métodos se utilizan para la supervisión, evaluación de éxito/fracaso, o control de ciertos aspectos del proceso de soldadura, independientemente de los resultados de los métodos de extracción de profundidad de penetración aplicados en paralelo a los mismos datos de ICI. En otra realización, los resultados de los métodos se utilizan para la supervisión, evaluación de éxito/fracaso, o control de ciertos aspectos del proceso de soldadura, junto con los resultados de los métodos de extracción de profundidad de penetración aplicados en paralelo a los mismos datos de ICI.
- 45 En otra realización, los métodos se utilizan en paralelo a otros métodos, algoritmos y software aplicados a otros subconjuntos de los datos de ICI adquiridos durante el mismo proceso de modificación del material con láser para extraer o calcular otras métricas o mediciones.
- 50 En otra realización, los métodos se utilizan en paralelo a otros métodos, algoritmos y software aplicados a otros subconjuntos de los datos ICI adquiridos durante el mismo proceso de soldadura con láser o por haz de electrones para extraer y/o calcular la altura del material que se va a soldar, la posición lateral de las costuras, juntas o bordes

en el material o el aparato circundante, el perfil de la superficie longitudinal de la soldadura terminada o métricas y características derivadas de la misma, o el perfil de la superficie transversal de la soldadura terminada o métricas y características derivadas de la misma.

5 En otra realización, la densidad de señal calculada puede utilizarse en conjunto o en paralelo con las intensidades medidas de los mismos datos de ICI para una mejor extracción de información relevante sobre el material, pieza o proceso que se está midiendo. Estos datos de intensidad pueden filtrarse, suavizarse o promediarse.

10 En otra realización, las mediciones de densidad de señal se utilizan para determinar la estabilidad de la soldadura/ojo de cerradura para procesos turbulentos (p. ej., soldadura de aluminio/titanio/aleación). En algunas realizaciones, las características de subsuperficie pueden diseñarse deliberadamente y facilitar la retrodispersión del haz de ICI de una manera consistente o predecible, con el objetivo de utilizar estos métodos de forma más eficaz. Las características de este tipo pueden incluir bolsas o canales de gas, u otras características contenidos dentro de la pieza o conjunto debajo de la región de proceso, o ubicados en otra parte de la región del eje del haz de proceso. Un diseño de este tipo puede incluir geometría, acabado de la superficie, ángulo de superficie, elección de materiales (p. ej., que se puedan identificar por fluorescencia o dispersión óptica), recubrimiento, revestimiento, pintura u otros elementos de diseño destinados a facilitar la medición utilizando estos métodos. Los elementos de diseño de este tipo también pueden incluir enfoques de ventilación o flujo de gas o de gestión del flujo de fusión diseñados para afectar el proceso láser de una manera destinada a facilitar la medición utilizando estos métodos.

20 En otra realización, múltiples características de una región de cambio de fase (PCR) en un material que se está modificando se iluminan con un sistema de ICI de manera simultánea o secuencial, y la densidad de señal de cada región en una o más dimensiones se analiza por separado y/o se correlaciona entre regiones para indicar uno o más parámetros del proceso de modificación del material.

En otra realización, la densidad de señal de una o más regiones en el proceso se utiliza para regular el proceso. La regulación de este tipo podría realizarse en tiempo real (intraproceso) o entre múltiples ciclos.

25 En algunas realizaciones, el haz de ICI se tambalea para compensar por las inestabilidades en el proceso, particularmente cuando dos lados de una junta a tope tienen espesores desiguales. En estos casos, el movimiento de las piezas de trabajo en relación con el haz de proceso puede impactar significativamente en la geometría de la PCR y el tambaleo compensa las inestabilidades causadas por este movimiento.

En algunas realizaciones, la ubicación de la medición de la parte inferior del ojo de cerradura se cambia en función de otras mediciones de ICI de la ubicación de la costura y/o de mediciones de ICI del propio PCR.

30 En una realización adicional, la densidad de señal de ICI se calcula para una soldadura con láser de penetración total que tiene un estante u otra superficie de material del conjunto soldado atravesada por el eje del proceso y aproximadamente normal respecto a este menos de 10 mm retirado desde la junta de soldadura objetivo en el lado opuesto a los elementos ópticos de suministro del haz de soldadura. El estante de material se mide mediante el haz de ICI que pasa a través del canal de vapor completamente penetrado (es decir, se traslada ida y vuelta a través del canal hasta el estante y vuelve) durante el proceso de soldadura. La densidad de señal de ICI se calcula junto con las mediciones de profundidad de penetración de la soldadura extraídas de los mismos datos de ICI en paralelo. La lógica se aplica a la medición de la densidad de señal junto con la medición de la penetración de la soldadura para formular decisiones automatizadas de éxito/fracaso para, o generar datos relevantes para el control automatizado de, el proceso de soldadura con láser. Los métodos se aplican junto con otros métodos para supervisar el proceso según la posición de la costura, la altura del material, el perfil longitudinal de la superficie de soldadura terminada y sus métricas derivadas, y el perfil de superficie transversal y sus métricas derivadas, y otras mediciones (y sus métricas derivadas) producidas por sistemas de formación de imágenes coherentes en línea o de supervisión de procesos basados en fotodiodos.

45 Otro aspecto de la presente divulgación se refiere a un medio de almacenamiento legible por ordenador que contiene instrucciones legibles por ordenador que, cuando son ejecutadas por un procesador, hacen que el procesador (o un dispositivo que contiene el procesador) realice los cálculos de densidad de señal de formación de imágenes consistentes con la presente divulgación. Cuando se utiliza, el medio de almacenamiento legible por ordenador puede tener la forma de un artículo de fabricación. En algunos ejemplos, el medio de almacenamiento legible por ordenador puede ser un medio no transitorio legible por ordenador o un medio de almacenamiento legible por máquina, tal como, aunque no de forma limitativa un medio de almacenamiento óptico, magnético o semiconductor. En cualquier caso el medio de almacenamiento podrá incluir o almacenar instrucciones ejecutables por ordenador, tales como instrucciones para las operaciones del método de calcular la densidad de señal de formación de imágenes y supervisar y/o controlar el procesamiento del material utilizando la densidad de señal de formación de imágenes. Ejemplos no limitantes de medios de almacenamiento legibles por ordenador adecuados que pueden utilizarse incluyen cualquier medio tangible capaz de almacenar datos electrónicos, incluyendo memoria volátil o memoria no volátil, memoria extraíble o no extraíble, memoria borrable o no borrable, memoria grabable o regrabable, etc. Ejemplos de instrucciones ejecutables por ordenador pueden incluir cualquier tipo adecuado de código, tal como código fuente, código compilado, código interpretado, código ejecutable, código estático, código dinámico, código orientado a objetos, código visual y similares.

Si bien los principios de la invención se han descrito en el presente documento, los expertos en la materia deben entender que esta descripción se realiza solo a modo de ejemplo y no como una limitación en cuanto al alcance de la invención que se define en las siguientes reivindicaciones.

**REIVINDICACIONES**

1. Un método que comprende:  
generar un haz de proceso (112) y dirigir el haz de proceso (112) a una pieza de trabajo (102) para procesar material;  
generar (212) un haz de formación de imágenes (122);
- 5 dirigir (213) el haz de formación de imágenes a una pieza de trabajo (102);  
producir (214) un resultado de interferometría a partir de al menos una componente del haz de formación de imágenes (122) reflejado desde la pieza de trabajo (102);  
detectar (216) el resultado de interferometría para producir datos de interferometría, en donde detectar el resultado de interferometría incluye producir una pluralidad de escaneos A de la pieza de trabajo (102);
- 10 estando el método caracterizado por que además comprende  
determinar (218) una densidad de señal de formación de imágenes a partir de los datos de interferometría, determinando si cada escaneo A contiene un punto de medición por encima de un umbral de intensidad de señal y calculando un porcentaje de escaneos A que cumplen con esta condición dentro de un contenedor de escaneos A,  
en donde la densidad de señal de formación de imágenes se calcula para múltiples contenedores de densidad de  
15 señal de escaneos A colocados a lo largo de una región de procesamiento para representar la densidad de señal de formación de imágenes como una función de la posición a lo largo de la región de procesamiento.
2. El método de la reivindicación 1, en donde la pluralidad de escaneos A de la pieza de trabajo (102) se producen en una pluralidad de líneas A distanciadas por una región de procesamiento de la pieza de trabajo (102).
3. El método de la reivindicación 1, en donde la pluralidad de escaneos A de la pieza de trabajo (102) están  
20 distanciados en el tiempo.
4. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde los contenedores se definen de un extremo a otro comenzando con una primera línea A.
5. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde los contenedores se definen de manera superpuesta.
- 25 6. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde los contenedores se definen de manera superpuesta con respecto a las líneas A seguidas que contienen un punto de medición por encima del umbral de intensidad de señal.
7. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, en donde determinar la densidad de señal incluye aplicar un algoritmo de suavizado a los porcentajes calculados.
- 30 8. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además realizar evaluaciones automatizadas de calidad de éxito/fracaso utilizando la densidad de señal.
9. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además supervisar un ojo de cerradura durante un proceso de soldadura de penetración total utilizando la densidad de señal, en donde el proceso de soldadura de penetración total se realiza en una pieza de trabajo (102) que incluye un vacío subsuperficial.
- 35 10. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además inspeccionar el estado de la superficie de un material previamente a o antes de un proceso de modificación del material utilizando la densidad de señal.
11. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además inspeccionar el estado de la  
40 superficie de un material posteriormente a o después de un proceso de modificación del material utilizando la densidad de señal.
12. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además determinar al menos una otra medición utilizando el haz de formación de imágenes (122), en donde la al menos una otra medición es una medición de distancia, en donde la medición de la distancia indica la profundidad de penetración.
- 45 13. El método de cualquiera de las reivindicaciones 1-3, que comprende además modificar la pieza de trabajo para proporcionar características subsuperficiales para facilitar la retrodispersión del haz de formación de imágenes (122).
14. El método de la reivindicación 1, en donde la densidad de señal de formación de imágenes se utiliza para clasificar los escaneos A como pertenecientes a al menos un aspecto de una región de cambio de fase o subregión

de la pieza de trabajo.

15. El método de la reivindicación 14, en donde el al menos un aspecto de la región de cambio de fase o subregión de la pieza de trabajo es al menos uno de: canal de vapor, parte inferior del canal de vapor, pared lateral del canal de vapor, profundidad de penetración de la soldadura, baño de fusión, superficie de la pieza de trabajo, composición del material, fase del material y densidad del material.
- 5

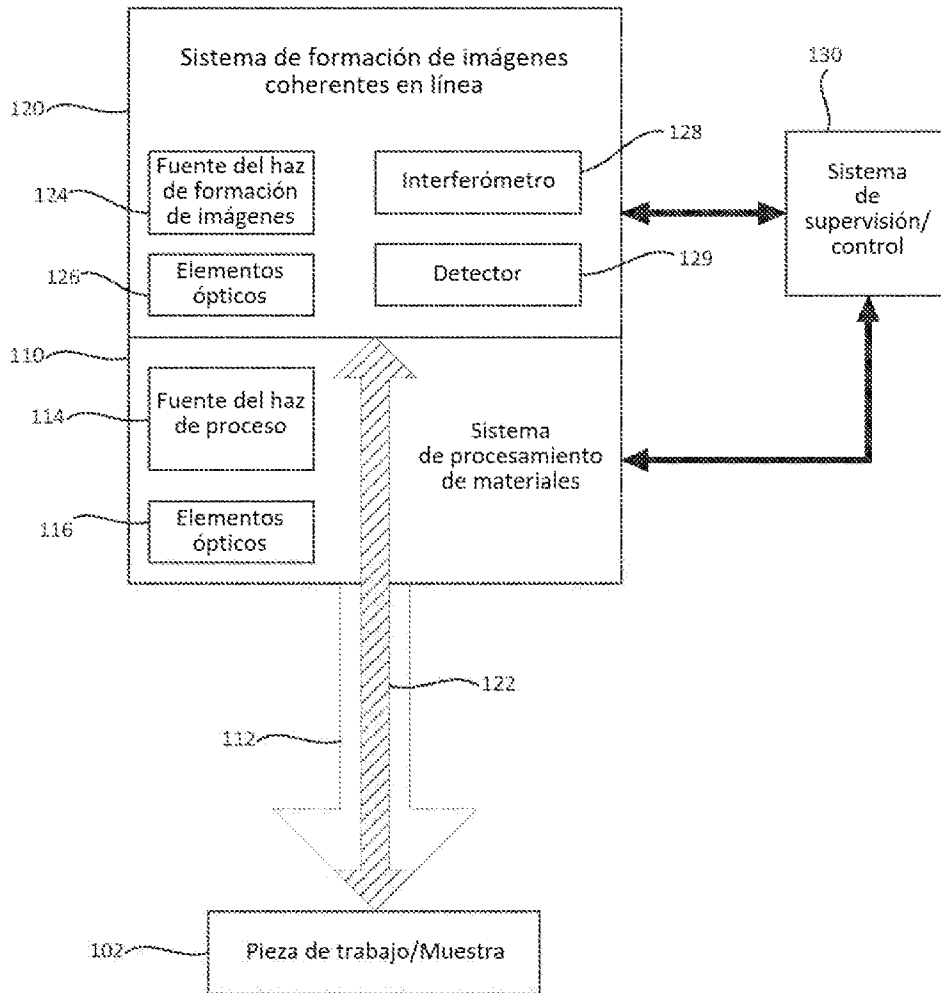


FIG. 1

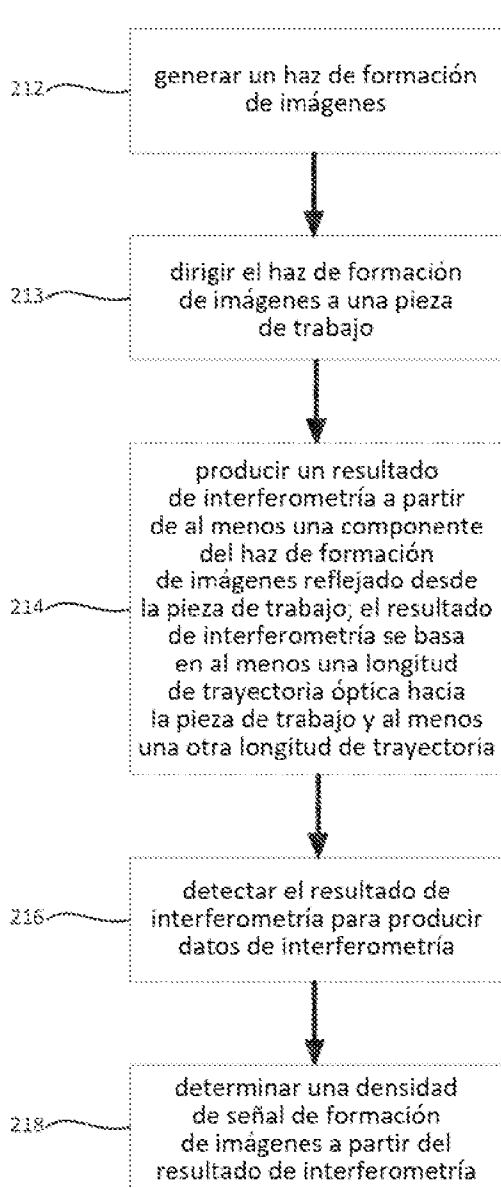


FIG. 2A

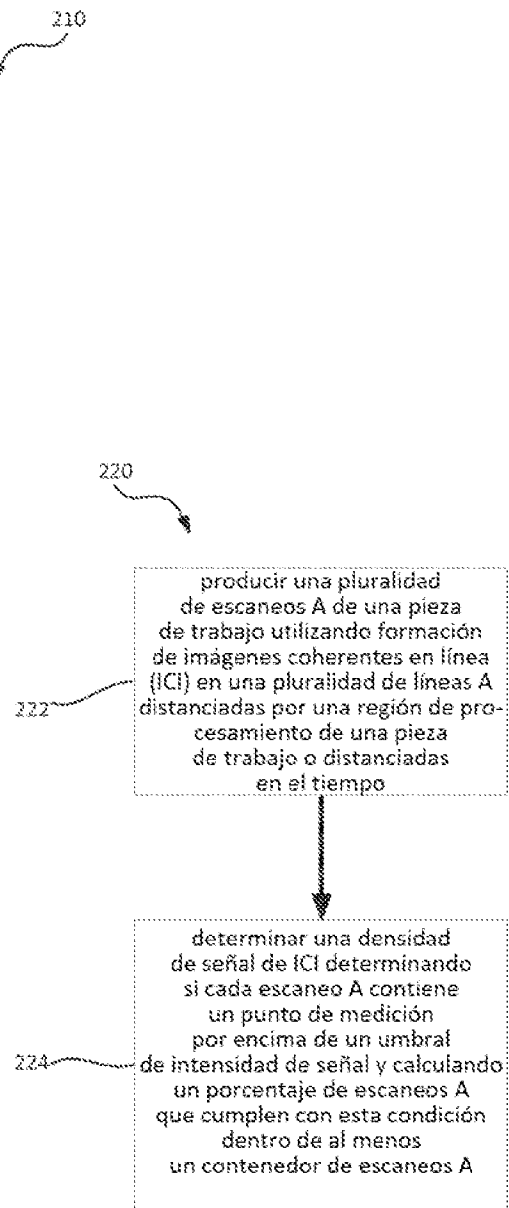


FIG. 2B

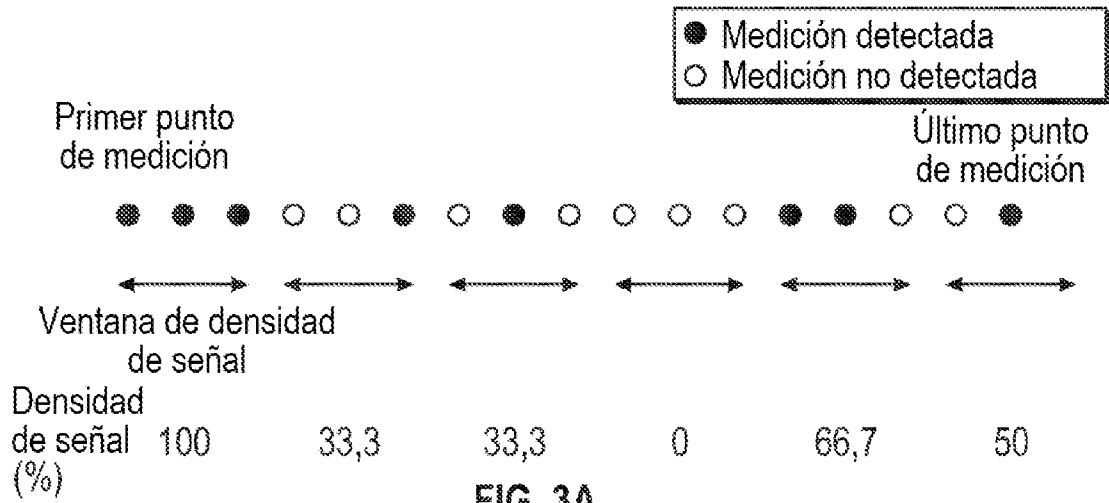


FIG. 3A

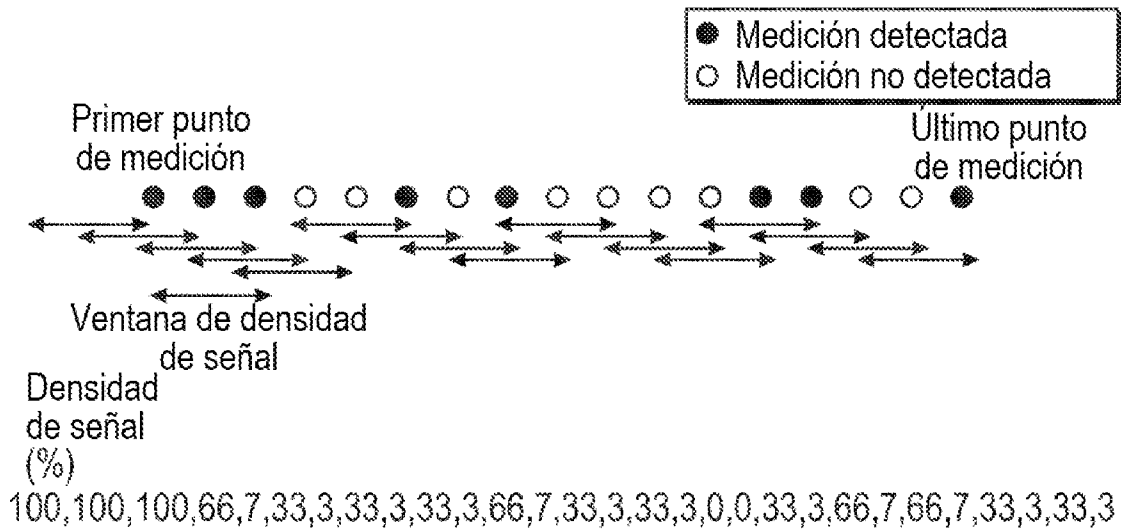


FIG. 3B

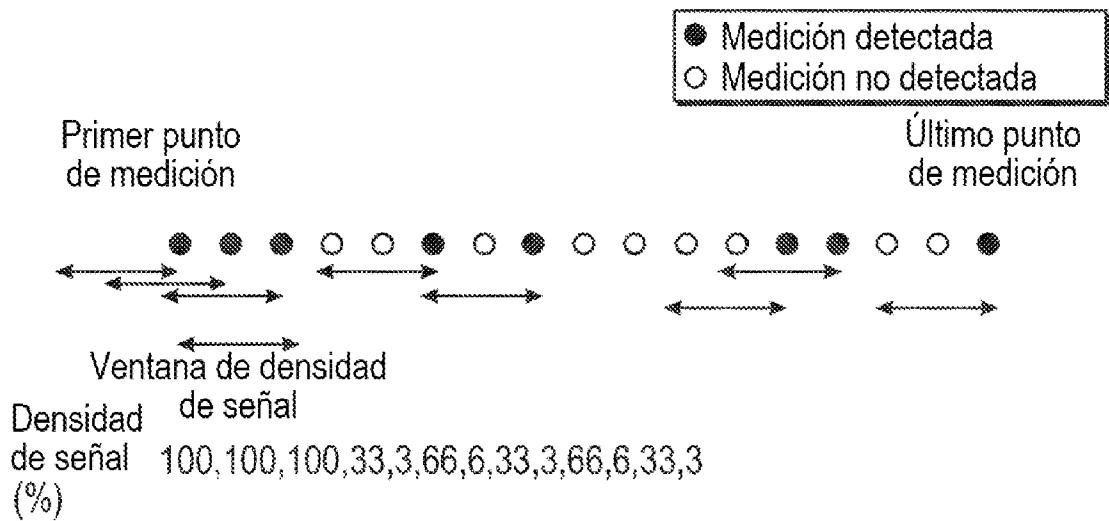
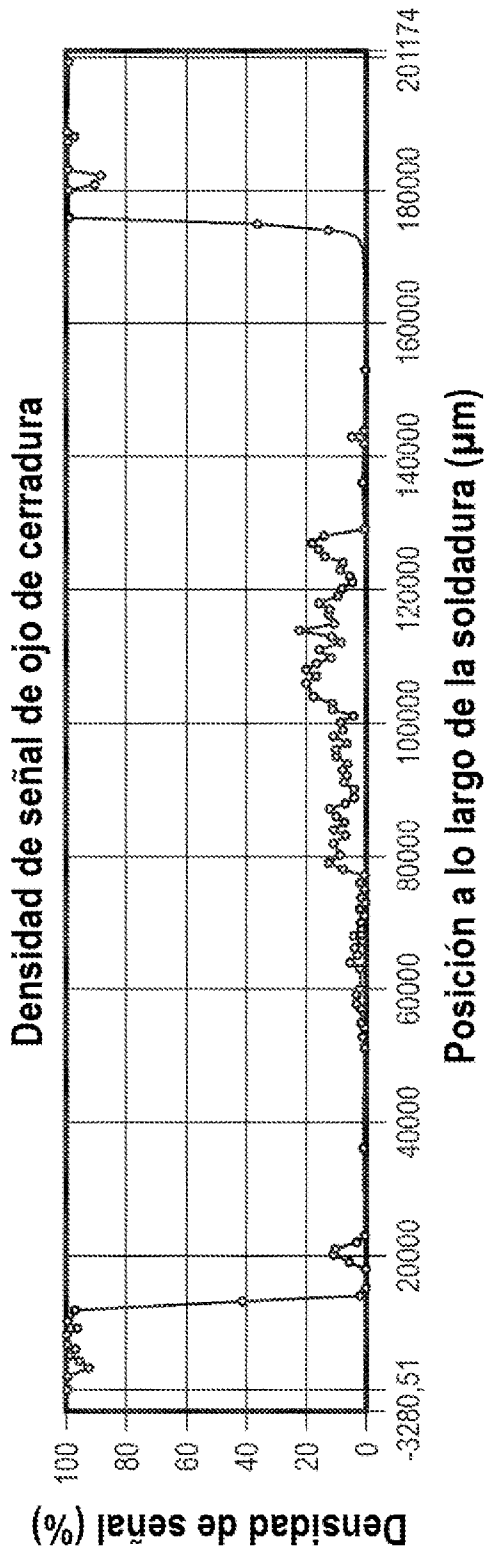
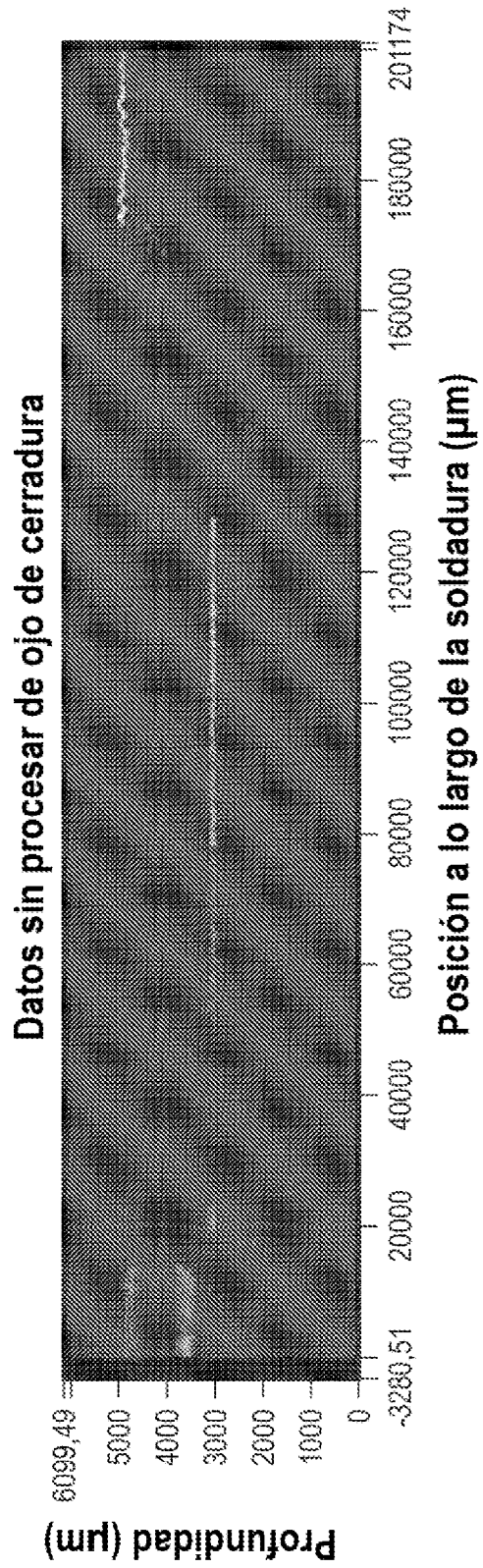


FIG. 3C



**FIG. 4A**



**FIG. 4B**

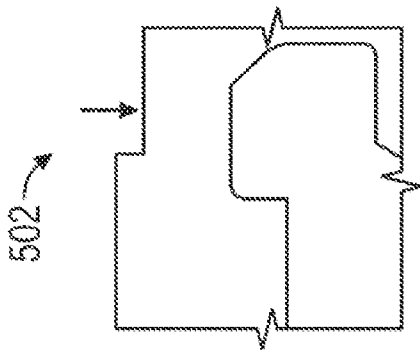
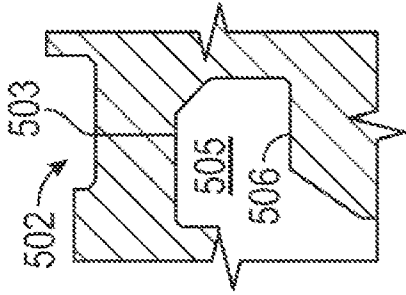
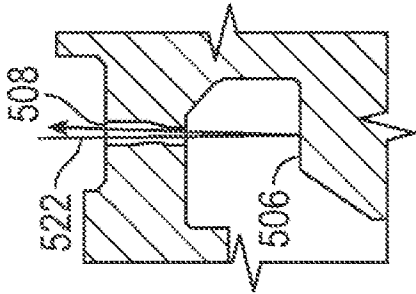


FIG. 5A



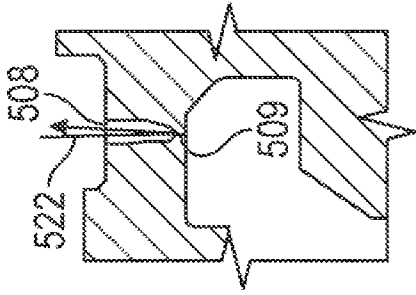
0 W

FIG. 5B



1150-1900 W

FIG. 5C



900 W

FIG. 5D

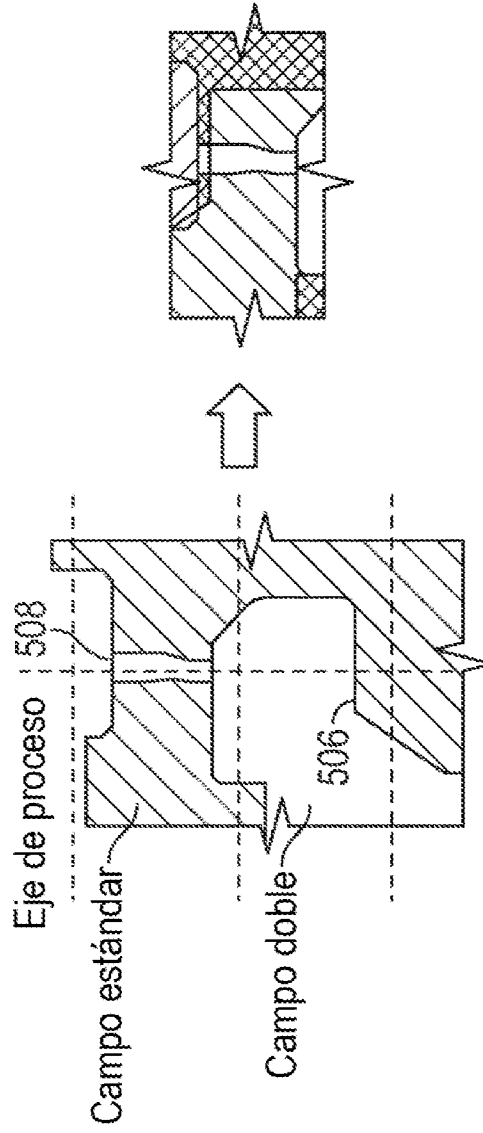


FIG. 5E

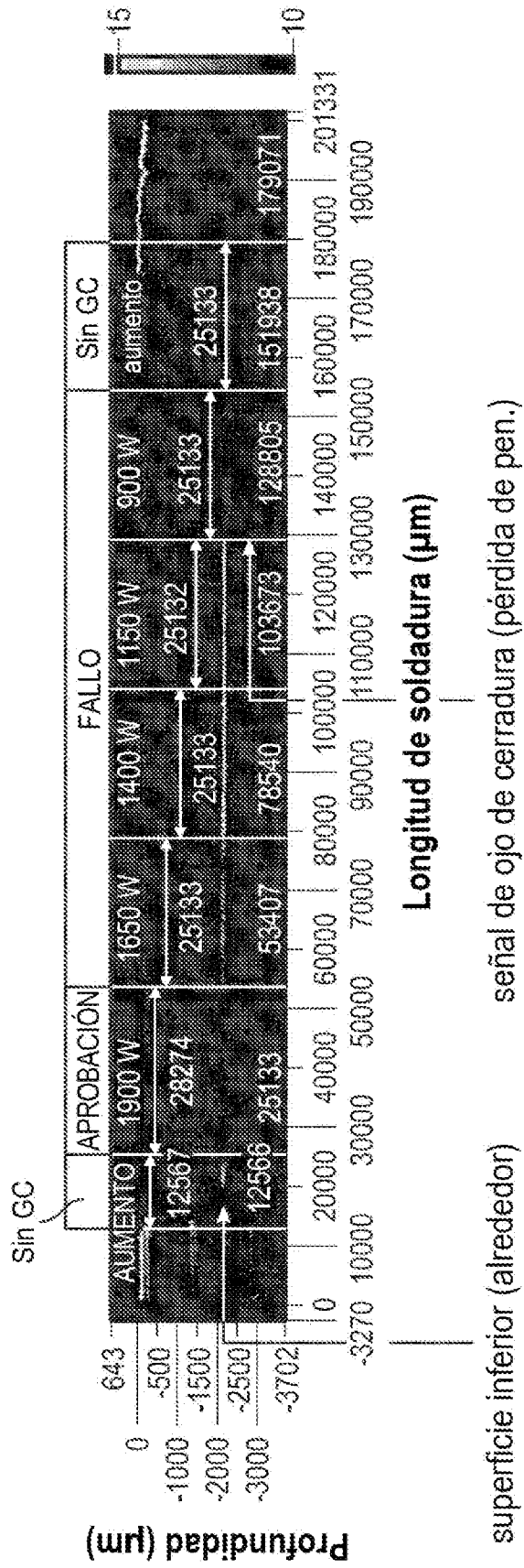


FIG. 6

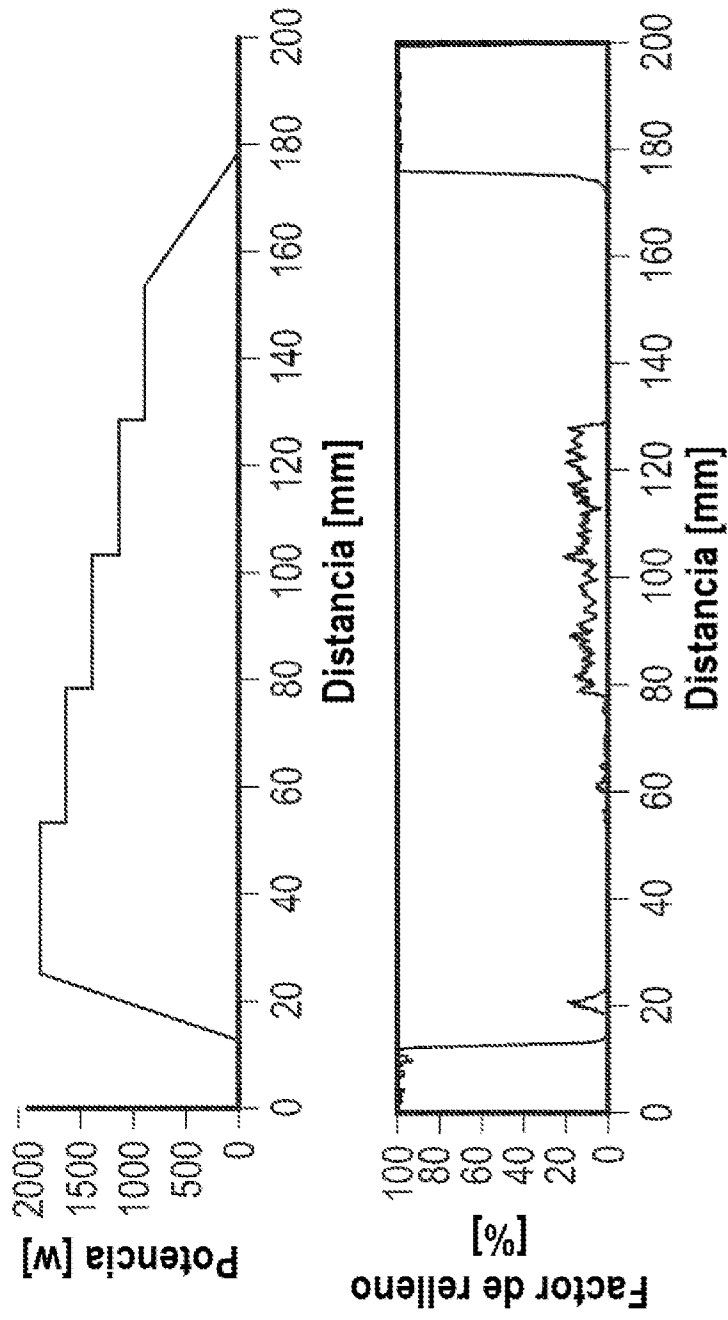


FIG. 7

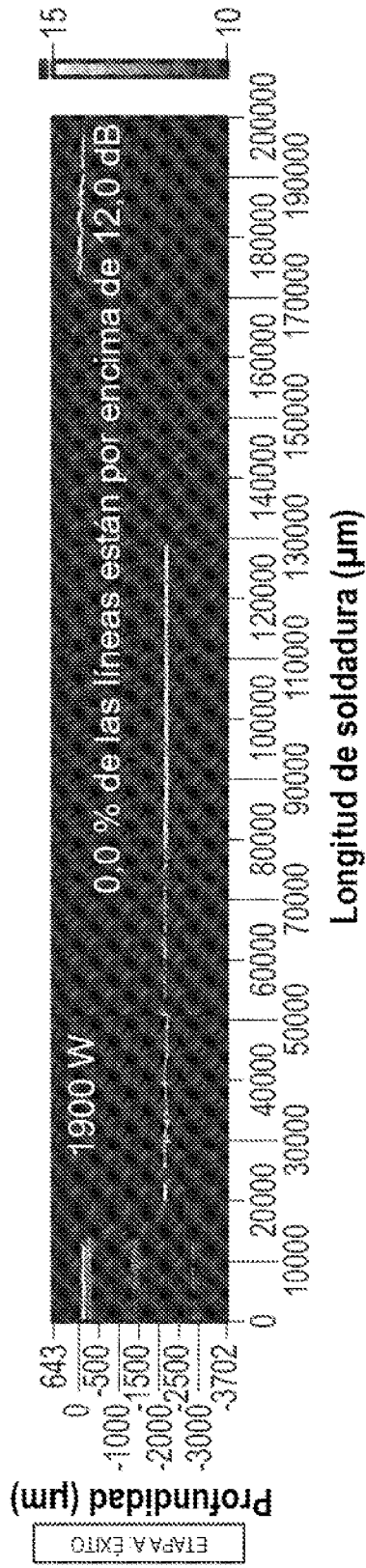


FIG. 8A

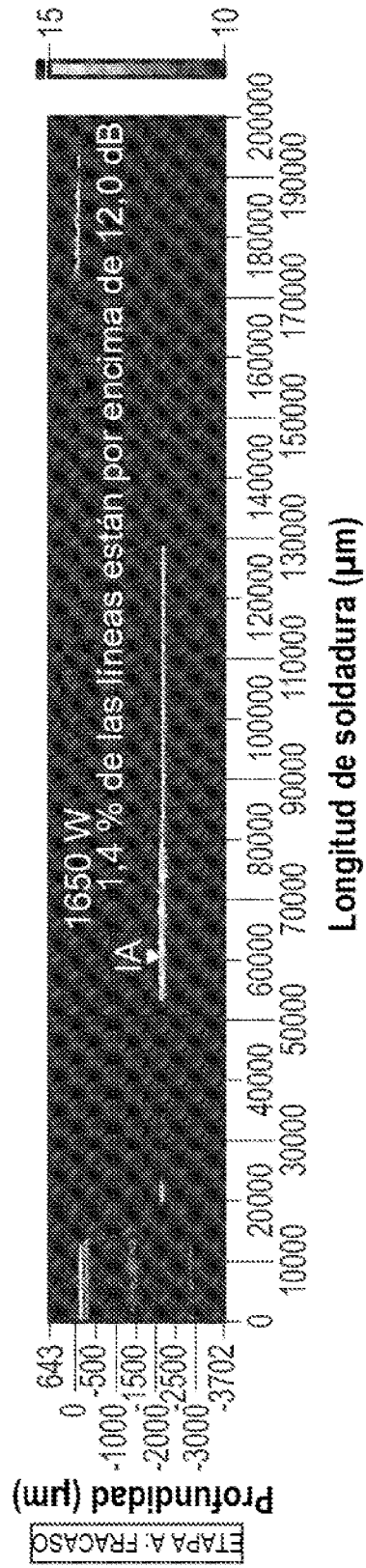


FIG. 8B

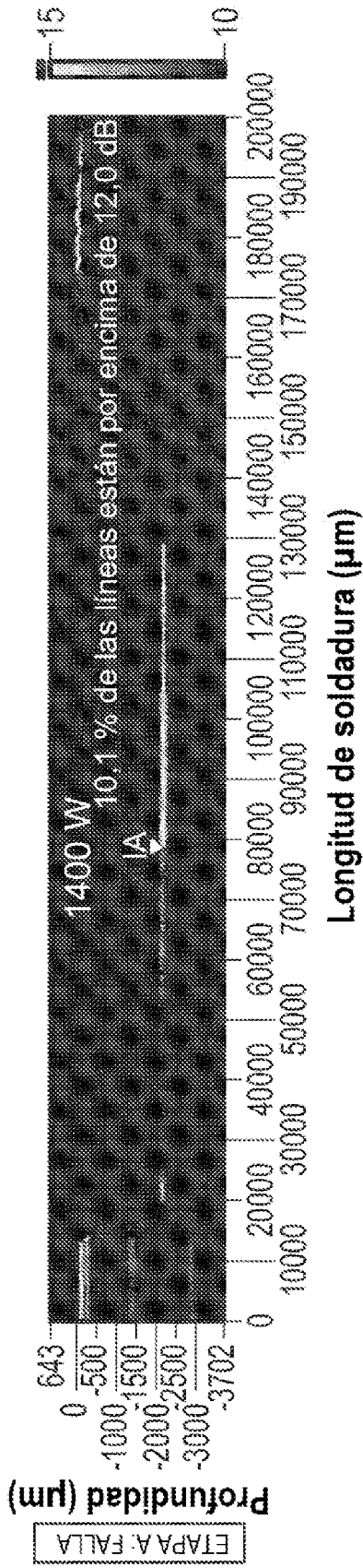


FIG. 8C

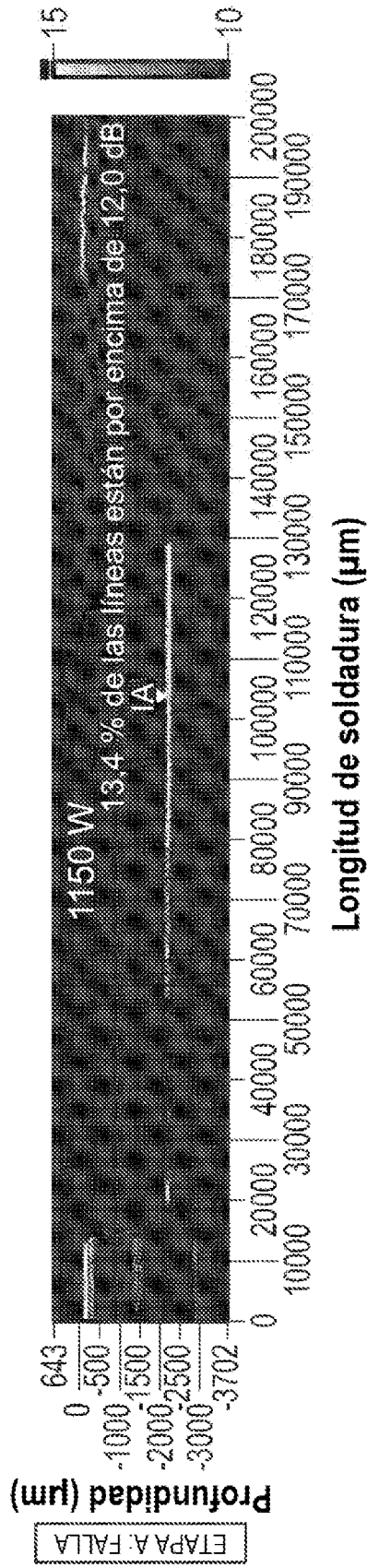


FIG. 8D

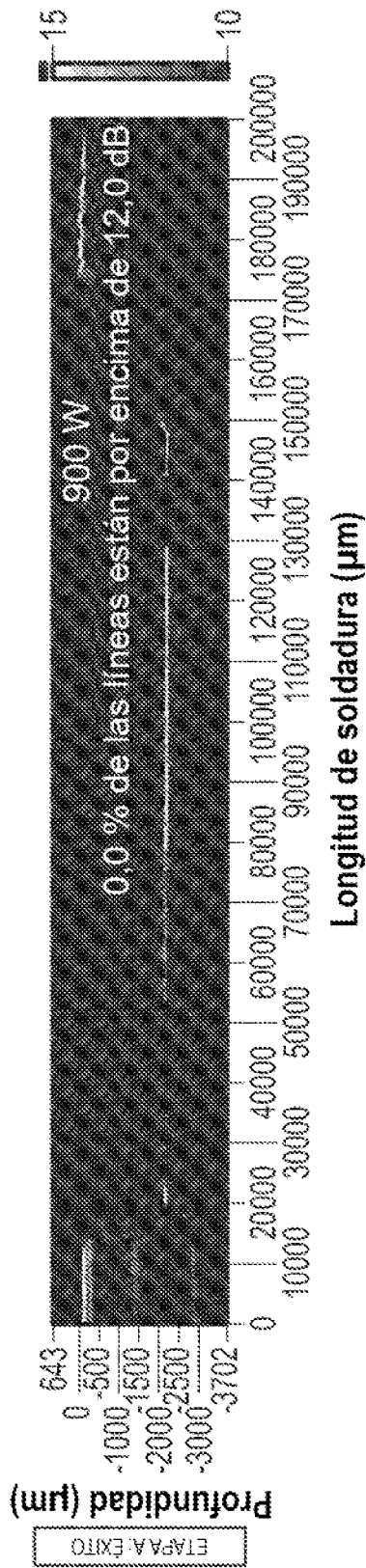


FIG. 8E

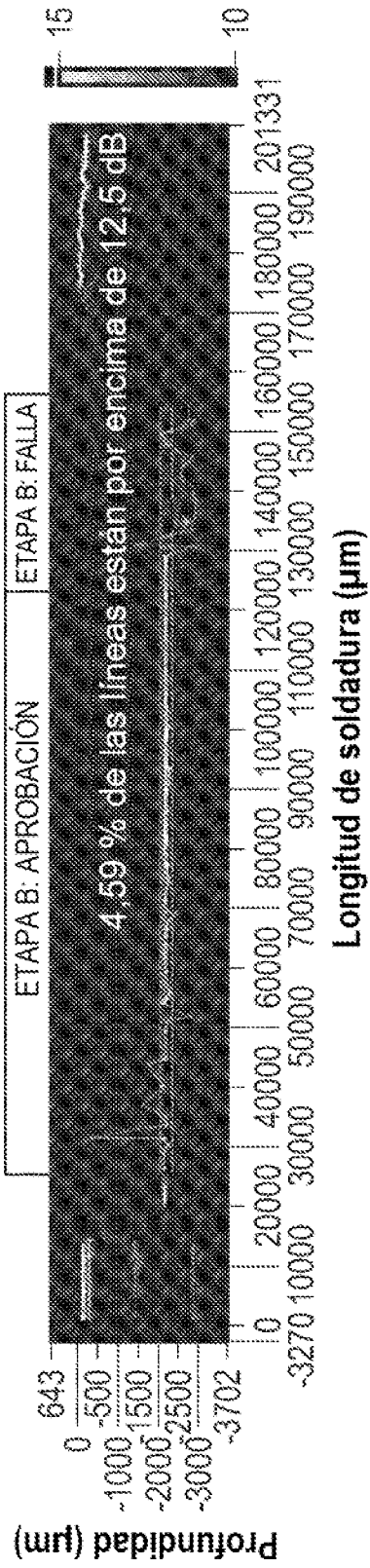
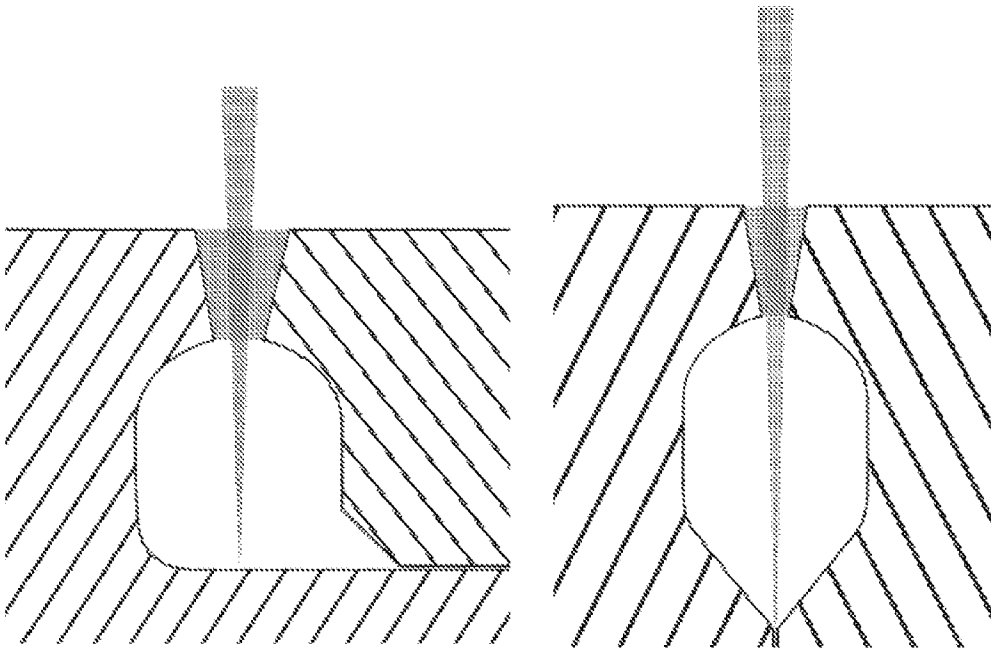


FIG. 9



■ Ojo de cerradura abierto  
■ Haz de ICI

FIG. 10A

FIG. 10B

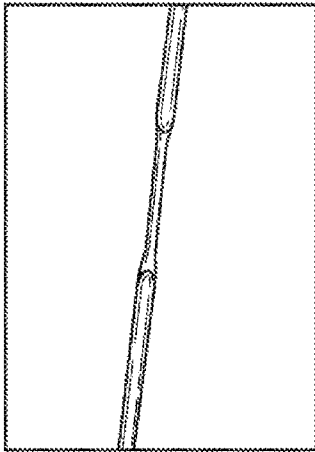


FIG. 11A

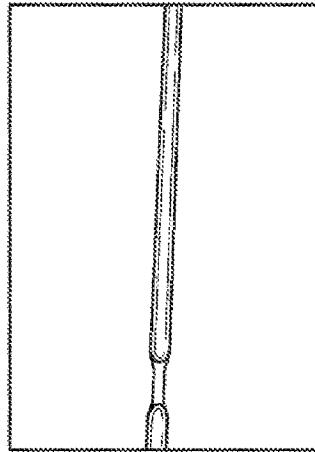


FIG. 11B

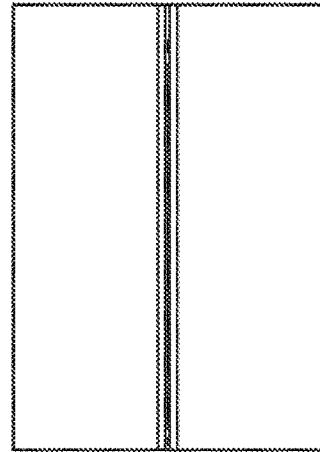


FIG. 11C

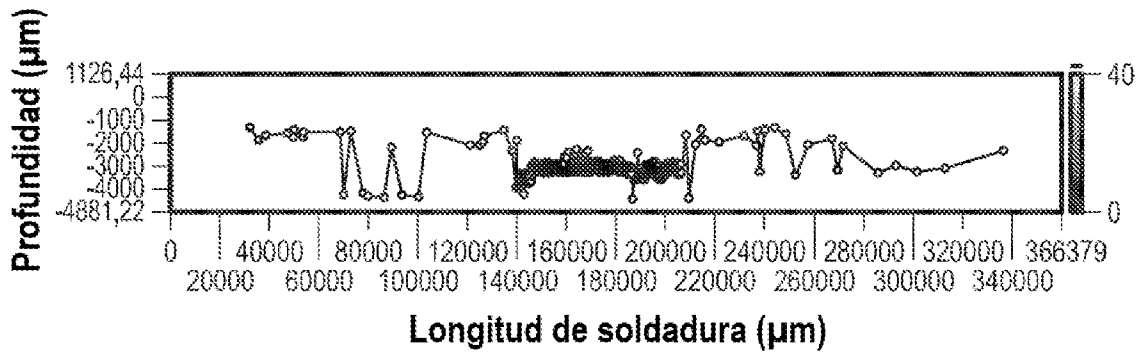


FIG. 12A

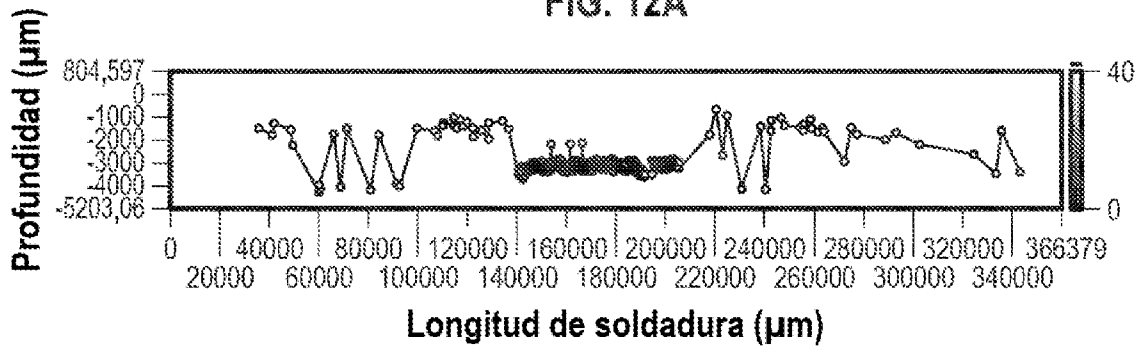


FIG. 12B

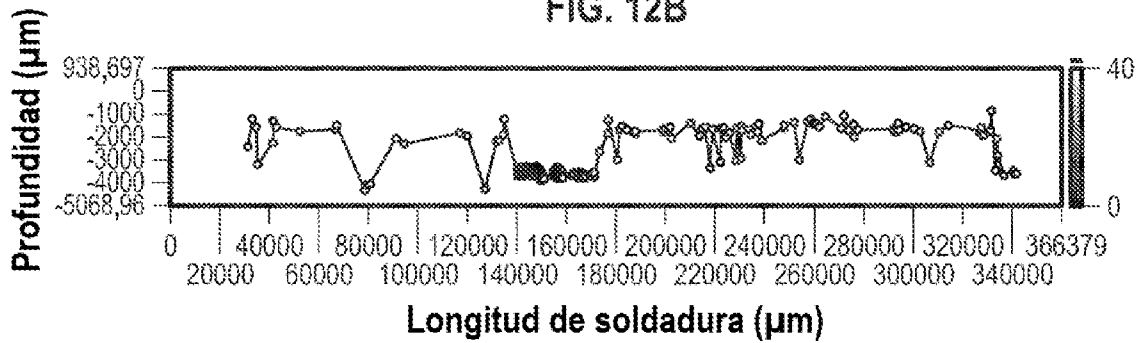
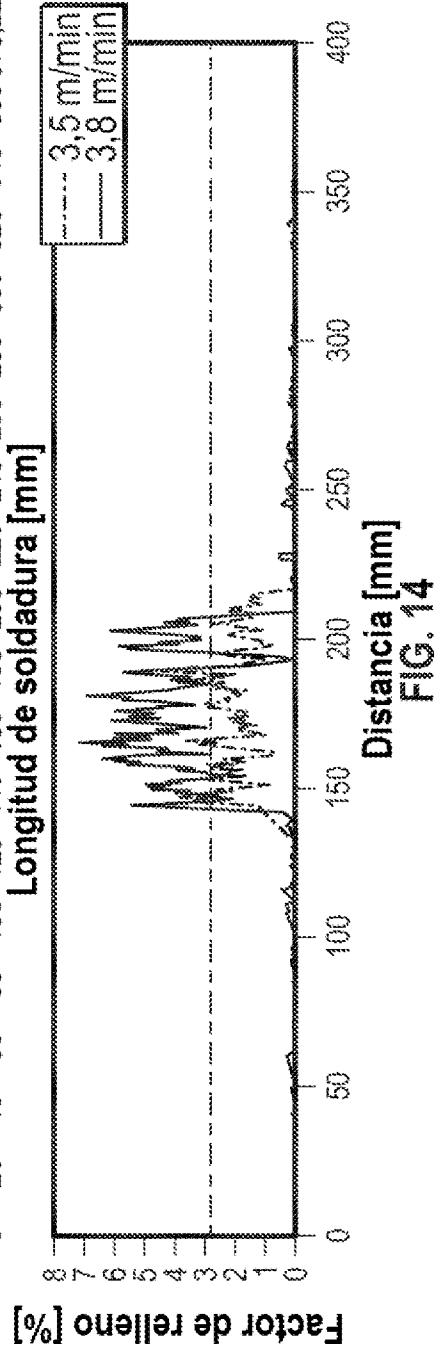
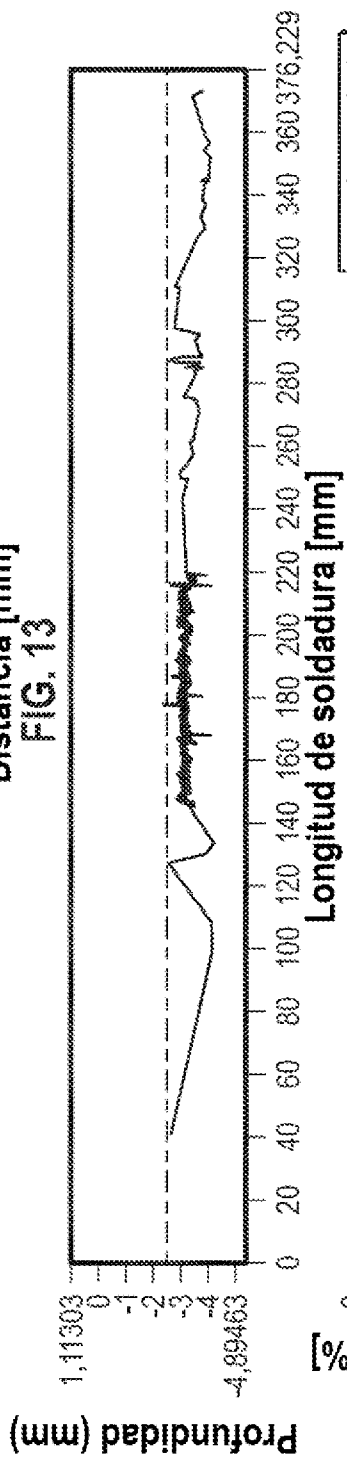
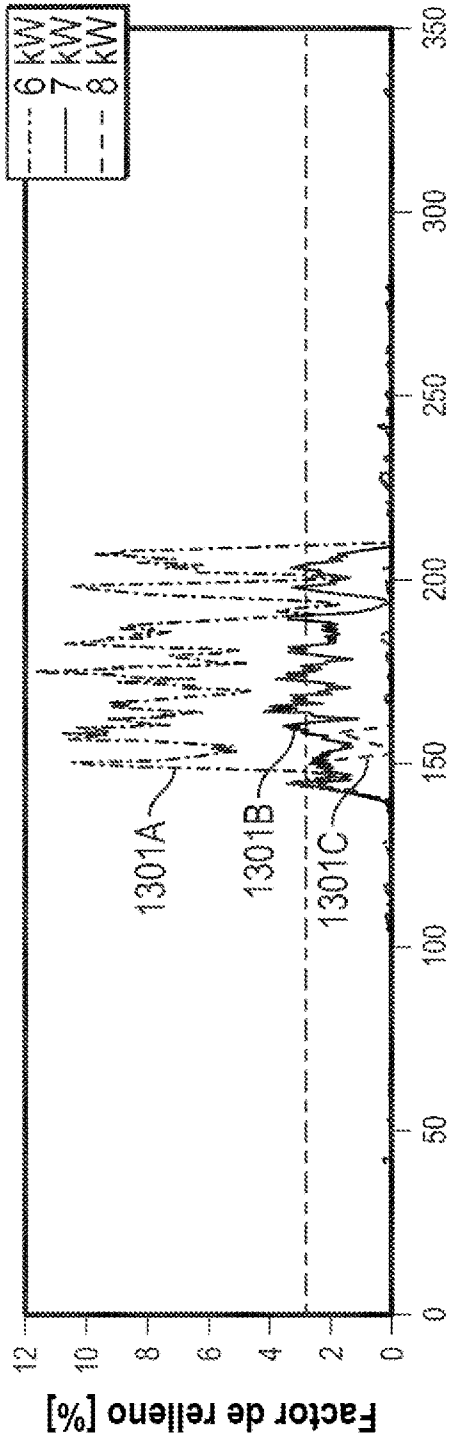
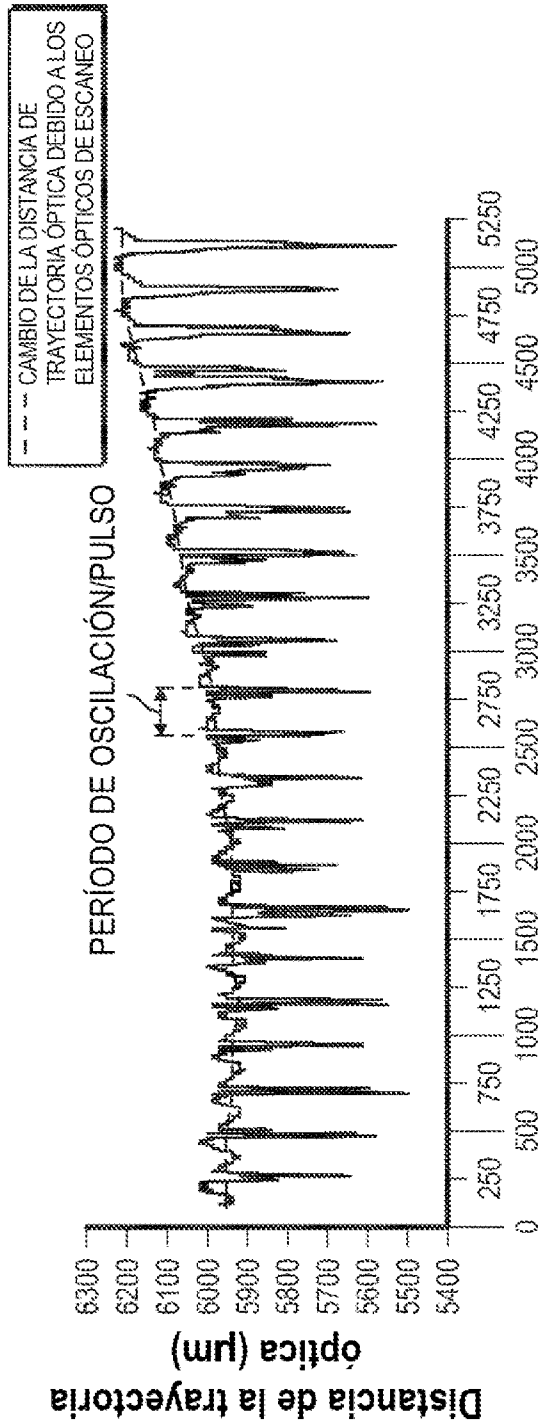
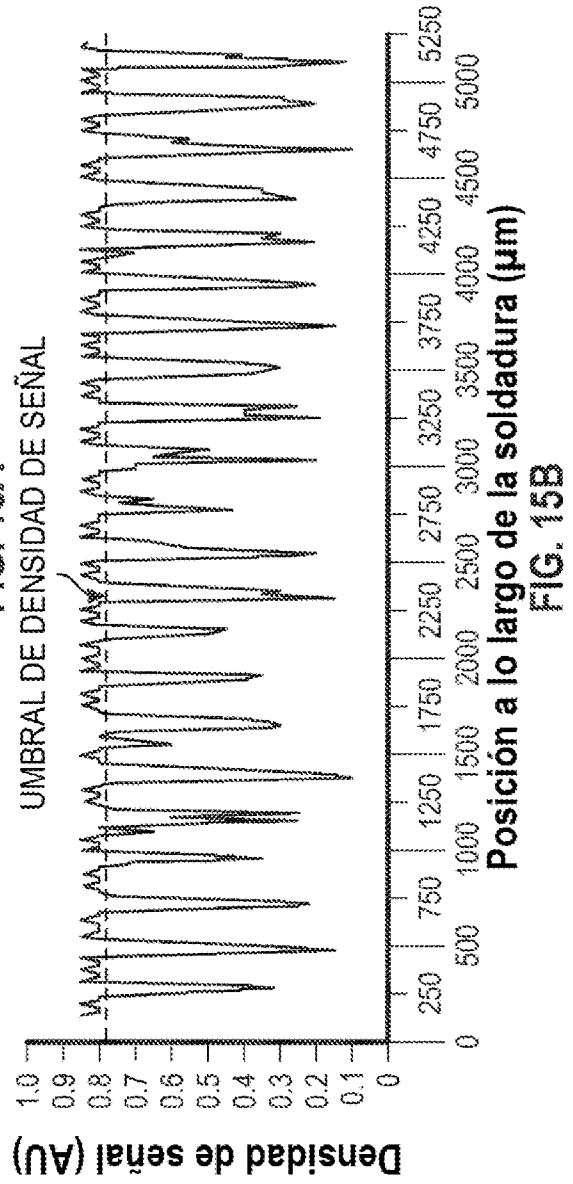


FIG. 12C





**FIG. 15A**  
Posición a lo largo de la soldadura (µm)



**FIG. 15B**  
Posición a lo largo de la soldadura (µm)

