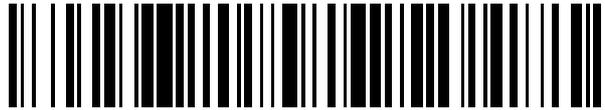


19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 582 044**

51 Int. Cl.:

**A61F 9/007**

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **03.08.2011 E 11825599 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.04.2016 EP 2616024**

54 Título: **Punta de factoemulsificación equilibrada**

30 Prioridad:

**17.09.2010 US 884285**

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

**08.09.2016**

73 Titular/es:

**ALCON RESEARCH, LTD. (100.0%)  
6201 South Freeway, Mail Code TB4-8  
Fort Worth, TX 76134, US**

72 Inventor/es:

**OVCHINNIKOV, MIKHAIL A.**

74 Agente/Representante:

**CURELL AGUILÁ, Mireia**

**ES 2 582 044 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

Punta de facoemulsificación equilibrada.

### 5 **Campo de la invención**

La presente invención se refiere en general a facoemulsificación. Más particularmente, pero no a modo de limitación, la presente invención se refiere a puntas de facoemulsificación.

### 10 **Descripción de la técnica relacionada**

El ojo humano, en sus términos más sencillos, funciona para proporcionar visión transmitiendo luz a través de una parte exterior transparente denominada la córnea, y enfocando la imagen mediante el cristalino sobre la retina. La calidad de la imagen enfocada depende de muchos factores incluyendo el tamaño y la forma del ojo, y la transparencia de la córnea y el cristalino.

Cuando la edad o la enfermedad hacen que el cristalino se haga menos transparente, la visión se deteriora debido a la luz disminuida que puede transmitirse a la retina. Esta deficiencia en el cristalino del ojo se conoce médicamente como cataratas. Un tratamiento aceptado para este estado es la extirpación quirúrgica del cristalino y la sustitución de la función del cristalino mediante una lente intraocular (LIO).

Los cristalinicos con cataratas pueden extirparse mediante una técnica quirúrgica denominada facoemulsificación. Durante este procedimiento, puede insertarse una punta de facoemulsificación delgada en el cristalino enfermo y se hace vibrar por ultrasonidos. La punta vibrante puede licuar o emulsionar el cristalino de modo que el cristalino puede aspirarse fuera del ojo. Se conocen puntas apropiadas a partir del documento WO 2011/002576 y WO 86/02257. El cristalino enfermo, una vez extirpado, puede sustituirse por una lente artificial.

### **Sumario de la invención**

30 La presente invención proporciona una punta de facoemulsificación equilibrada, según las reivindicaciones que siguen. Los métodos divulgados a continuación en la presente memoria no forman parte de la invención.

En diversas formas de realización, una punta de facoemulsificación puede incluir un vástago y una parte de borde de corte que presenta por lo menos una primera y una segunda curvatura. La geometría del vástago y de las por lo menos primera y segunda curvaturas puede estar configurada para dar como resultado un desplazamiento lateral, perpendicular al vástago durante la vibración torsional ultrasónica de la punta, del vástago a lo largo de su longitud que es menor de aproximadamente el 5% al 25% (por ejemplo, el 15%) (también pueden utilizarse otros umbrales) del desplazamiento del punto de extremo distal de la punta. En algunas formas de realización, el vástago puede extenderse desde el extremo de una parte cónica (que puede estar, por ejemplo, a aproximadamente 12 mm del punto de extremo distal de la punta) hasta la primera curvatura en la parte de borde de corte (que puede estar, por ejemplo, a aproximadamente 5 mm del punto de extremo distal de la punta). También se contemplan otras ubicaciones de la primera curvatura (por ejemplo, 3 mm, 8 mm, etc. del punto de extremo distal de la punta). En algunas formas de realización, un extremo proximal de la parte cónica (es decir, el cilindro) puede estar configurado para acoplarse a una sonda ultrasónica.

En algunas formas de realización, un método de determinación de una geometría de punta puede incluir proporcionar dos o más geometrías de punta (por ejemplo, en un formato electrónico tal como un archivo de entrada legible por ordenador con una o más variables almacenadas que describen la geometría), modelar el comportamiento de las geometrías de punta durante las vibraciones torsionales ultrasónicas y comparar el desplazamiento lateral de las diversas geometrías de punta para seleccionar una punta con un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para situarse a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación (que puede ser, por ejemplo, desde un extremo de la parte cónica hasta la primera curvatura).

En algunas formas de realización, un método de determinación de una geometría de punta puede incluir proporcionar dos o más puntas físicas con diferente geometrías (por ejemplo, curvada a mano en dos o más ubicaciones a lo largo de la punta), hacer vibrar en torsión por ultrasonidos las diferentes puntas, determinar el desplazamiento lateral de las diversas puntas y comparar los desplazamientos laterales determinados para seleccionar una punta con un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para situarse a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación.

### **Breve descripción de los dibujos**

65 Para una comprensión más completa de la presente invención, se hace referencia a la siguiente descripción tomada conjuntamente con los dibujos adjuntos en los que:

la figura 1 ilustra una punta de facoemulsificación equilibrada con un extremo distal que presenta dos curvaturas, según una forma de realización;

5 la figura 2 ilustra una consola quirúrgica de facoemulsificación conectada a una pieza de mano a través de una línea de irrigación y una línea de aspiración, según una forma de realización;

la figura 3 ilustra una sonda ultrasónica unida a la punta equilibrada, según una forma de realización;

10 la figura 4 ilustra el movimiento de la punta equilibrada, según una forma de realización;

la figura 5 ilustra una punta equilibrada insertada en una incisión en el ojo, según una forma de realización;

15 la figura 6 ilustra vibraciones de torsión y vibraciones laterales en relación con la punta equilibrada, según una forma de realización;

la figura 7a ilustra ecuaciones modelo para el desplazamiento de torsión a lo largo del eje z de la punta, según una forma de realización;

20 la figura 7b ilustra ecuaciones modelo para desplazamiento lateral a lo largo del eje z de la punta, según una forma de realización;

la figura 7c ilustra una componente (1(z)) de las ecuaciones de modelado, según una forma de realización;

25 las figuras 8a a b ilustran formas de realización de formas de punta de entrada y desplazamiento lateral de salida y ángulo de torsión correspondientes a lo largo de la longitud de punta según las ecuaciones modelo;

la figura 9 ilustra un diagrama de flujo del método para determinar una geometría de punta, según una forma de realización;

30 la figura 10 ilustra un diagrama de flujo de otro método para determinar una geometría de punta, según una forma de realización; y

la figura 11 ilustra seis posibles formas de realización de punta equilibrada.

35 Ha de entenderse que tanto la descripción general anterior como la descripción detallada que sigue se proporcionan a modo de ejemplo y explicativas únicamente y se pretende que proporcionen una explicación adicional de la presente invención según se reivindica.

#### 40 Descripción detallada de las formas de realización

La figura 1 ilustra una punta 100 de facoemulsificación equilibrada con un extremo 114 proximal y una parte de borde de corte 112 que está curvada en relación con un vástago 108 de punta. La punta 100 equilibrada puede incluir un vástago 108 predominantemente recto y por lo menos dos curvaturas (primera curvatura 102 y segunda curvatura 104) en la parte de borde de corte 112. También se contemplan otros números de curvaturas (por ejemplo, 3 curvaturas, 4 curvaturas, 7 curvaturas, etc.). La punta 100 equilibrada puede utilizarse conjuntamente con una pieza 204 de mano de facoemulsificación (por ejemplo, véase la figura 2). Cuando se utiliza con la pieza 204 de mano, la punta 100 equilibrada puede hacerse vibrar longitudinalmente y/o en torsión, es decir, haciendo rotar la punta 100 hacia delante y hacia atrás alrededor de su eje. Las curvaturas 102/104 pueden colocarse, por ejemplo, a lo largo de aproximadamente del 5 al 25% distal de la longitud de la punta 100 equilibrada (que puede ser una parte colocada aproximadamente a 5 mm del punto de extremo distal 106 de la punta (medido a lo largo del eje 116 de punta) hasta aproximadamente 12 mm del punto de extremo distal 106 de la punta 100). También se contemplan otras partes de la longitud.

55 En algunas formas de realización, equilibrar la punta 100 puede incluir configurar una geometría de la punta 100 (por ejemplo, la geometría de una parte cónica 110 de la punta, el vástago 108, y/o la por lo menos primera curvatura 102 y segunda curvatura 104) de manera que, durante la vibración torsional ultrasónica de la punta 100, un desplazamiento lateral del vástago 108, perpendicular al vástago 108, a lo largo de su longitud puede ser menor de aproximadamente el 5% al 25% (por ejemplo, el 15%) del desplazamiento lateral del punto de extremo distal 106 de la punta 100 (por ejemplo, medido durante las frecuencias a las que se hace vibrar la punta durante un procedimiento oftálmico). También pueden utilizarse otros umbrales (por ejemplo, del 10 al 20%, del 15 al 30%, del 10 al 40%, etc.). En algunas formas de realización, el desplazamiento lateral de la punta (durante las frecuencias operacionales esperadas) en el punto de extremo distal 106 puede estar aproximadamente en un intervalo de 30 a 200 micrómetros. Como ejemplo, si el punto de extremo distal 106 presenta un desplazamiento lateral de aproximadamente +/- 0,035 mm durante la vibración torsional ultrasónica de la punta 100, la geometría de la punta puede configurarse de manera que el desplazamiento lateral máximo a lo largo del vástago sea menor de 5 micrómetros (también son posibles otros desplazamientos). Como otro ejemplo, si el punto de extremo distal 106

5 presenta un desplazamiento lateral de aproximadamente +/- 0,055 mm durante la vibración torsional ultrasónica de la punta 100, la geometría de la punta puede configurarse de manera que el desplazamiento lateral máximo a lo largo del vástago sea menor de 8 micrómetros. En algunas formas de realización, el vástago puede extenderse desde el extremo de una parte cónica 110 (que puede estar, por ejemplo, a aproximadamente 12 mm del punto de extremo distal 106) hasta la primera curvatura 102 en el borde de corte 106 (que puede estar, por ejemplo, a aproximadamente 5 mm del punto de extremo distal 106). También se contemplan otras ubicaciones de la primera curvatura 102 (por ejemplo, 3 mm, 8 mm, etc. del punto de extremo distal 106).

10 La figura 2 ilustra una consola 214 quirúrgica de facoemulsificación conectada a una pieza 204 de mano a través de una línea de irrigación 206 y una línea de aspiración 208. En algunas formas de realización, puede suministrarse energía a la pieza 204 de mano a través del cable 210 eléctrico y un usuario puede controlar el flujo a través de las líneas de irrigación/aspiración 206 y 208 (por ejemplo, a través del conmutador 212 de pedal) para realizar un procedimiento de facoemulsificación. Un ejemplo de una pieza de mano para un procedimiento de facoemulsificación se describe en la publicación de solicitud de patente U.S. titulada "Ultrasound Handpiece", publicación n.º 2006/0041220, n.º de serie 1 1/183.591, de Mikhail Boukhny, James Y. Chon y Ahmad Salehi presentada el 18 de julio de 2005.

20 En algunas formas de realización, la pieza 204 de mano puede acoplarse a una punta 100 de facoemulsificación equilibrada. En algunas formas de realización, la pieza 204 de mano puede incluir por lo menos un conjunto de elementos 227 piezoeléctricos polarizados para producir movimiento longitudinal cuando se excitan a una frecuencia resonante relevante. Tal como se observa en la figura 3, los cristales 227 piezoeléctricos pueden conectarse a una sonda 216 ultrasónica a la que se une una punta 100 equilibrada. La sonda 216 y/o la punta 100 equilibrada pueden incluir una pluralidad de rendijas o hendiduras 224 diagonales. Las rendijas o hendiduras 224 pueden producir movimiento torsional en la punta 100 equilibrada cuando los cristales piezoeléctricos se excitan a una frecuencia resonante. El movimiento de la punta 100 equilibrada producido por las hendiduras 224 que enganchan elementos fijos en la pieza 204 de mano puede incluir una componente de rotación torsional en relación con una línea central de la sonda 216.

30 Tal como se observa en la figura 4, en algunas formas de realización, la punta 100 equilibrada puede configurarse para la rotación torsional ultrasónica hacia delante y hacia atrás a través de aproximadamente un arco en el intervalo de aproximadamente 2 a 6 grados (por ejemplo, un arco de 4 grados). También se contemplan otros arcos (por ejemplo, arco de 10 grados (por ejemplo, más o menos 5 grados descentrado (véase el diagrama central 2), más o menos 20 grados descentrado, más o menos 90 grados descentrado, etc.)). En algunas formas de realización, la punta 100 equilibrada puede hacerse vibrar en torsión por ultrasonidos a una frecuencia de aproximadamente entre 35 10-60 kHz (por ejemplo, 31 kHz). También se contemplan otros arcos y frecuencias. Por ejemplo, puede utilizarse un arco de más o menos 20 grados y/o una frecuencia de 42 kHz. El arco mostrado en la figura 4 está exagerado para mostrar movimiento (es decir, el arco total mostrado es de 180 grados, mientras que la punta 100 equilibrada puede presentar un arco 4 grados). En algunas formas de realización, el movimiento de punta en la figura 4 también puede incluir una componente longitudinal (por ejemplo, hacia arriba y hacia abajo a lo largo de un eje paralelo al vástago).

40 Tal como se observa en la figura 5, cuando se utiliza para realizar facoemulsificación, pueden insertarse los extremos de la punta 100 equilibrada y un manguito 226 de irrigación en una pequeña incisión 511 en la córnea 501, la esclerótica 507 u otras ubicaciones en el tejido ocular para acceder a, por ejemplo, la cámara 503 anterior del ojo 509. En diversas formas de realización, una parte o la totalidad de la punta 100 equilibrada puede estar dentro del manguito 226 de irrigación. Una parte 513 de la punta 100 a lo largo de la incisión 511 puede estar en contacto térmico con la incisión 511 (y/o otras partes del ojo) a través del manguito 226 de irrigación durante el procedimiento de facoemulsificación. En algunas formas de realización, la parte 513 a lo largo de la incisión 511 puede estar en contacto directo con la incisión 511 (por ejemplo, en ausencia del manguito 226). La punta 100 equilibrada puede hacerse vibrar en torsión por ultrasonidos a lo largo de su eje longitudinal dentro del manguito 226 de irrigación mediante una sonda 216 ultrasónica activada por cristal, emulsionando de ese modo con el contacto el tejido seleccionado *in situ*. La perforación hueca de la punta 100 equilibrada puede comunicarse con la perforación en la sonda que a su vez puede comunicarse con la línea de aspiración desde la pieza 204 de mano hasta la consola 214 (por ejemplo, véase la figura 2). Una fuente de vacío o presión reducida en la consola 214 puede extraer o aspirar el tejido emulsionado del ojo 509 a través de un extremo abierto de la punta 100 equilibrada, la perforación de la punta 100 equilibrada, la perforación de la sonda y la línea de aspiración 208 y al interior de un dispositivo de recogida. Puede ayudarse a la aspiración del tejido emulsionado mediante una solución salina de lavado o disolución de irrigación que puede inyectarse en el sitio quirúrgico a través del pequeño espacio anular entre la superficie interior del manguito 226 de irrigación y una superficie exterior de la punta 100 equilibrada.

60 Tal como se observa en la figura 6, las vibraciones torsionales ultrasónicas de la punta 100 equilibrada pueden dar como resultado por lo menos dos movimientos: 1) desplazamiento lateral, de la punta 100 equilibrada desde su posición de equilibrio, perpendicular con respecto a un eje 116 que es colineal con una parte de vástago recta (el eje 116 puede indicarse como el "eje z") y perpendicular con respecto a un eje de una curvatura de la punta (indicado como eje y en la figura 1) (formando el eje y y el eje z un plano que incluye la curvatura); 2) ángulo de torsión a lo largo del eje z de la punta 100 equilibrada. Una punta desequilibrada puede presentar una curvatura significativa a lo largo de la longitud de punta (especialmente en el vástago) bajo la acción de vibración de torsión. Al equilibrar la

punta tal como se describe en la presente memoria, puede reducirse el desplazamiento lateral a lo largo del vástago de la punta 100 a la vez que puede aumentarse el desplazamiento lateral en el punto de extremo distal 106 de la punta 100. Pueden estar presentes vibraciones torsionales en la punta 100 (por ejemplo, mediante la torsión hacia delante y hacia atrás a lo largo de un ángulo de torsión en relación con el eje z) lo que puede conducir a un desplazamiento lateral relativamente grande del punto de extremo distal 106 además de o en ausencia del desplazamiento lateral del vástago 108.

En algunas formas de realización, equilibrar la punta 100 puede incluir ajustar la geometría de punta y someter a prueba físicamente una punta con la geometría de punta ajustada o utilizando ecuaciones de modelado o análisis de elementos finitos (FEA) para modelar las vibraciones de punta para encontrar una geometría de punta que dé como resultado desplazamiento lateral reducido a lo largo del vástago 108 con desplazamiento lateral aumentado y torsión en el punto de extremo distal 106 (por ejemplo, utilizando software tal como ANSYS). Las características de la geometría de punta pueden incluir, por ejemplo, el número de curvaturas (por ejemplo, curvaturas 102, 103), la ubicación de las curvaturas, la longitud del vástago, el diámetro del vástago 108, la longitud de la parte cónica 110 y el diámetro de la parte cónica. También pueden modificarse otras características de la geometría de punta. En algunas formas de realización, pueden someterse a prueba diferentes geometrías de punta, por ejemplo, creando físicamente puntas con diversas geometrías de punta, haciendo vibrar las puntas (por ejemplo, utilizando frecuencias y modos que se utilizan durante la facoemulsificación) y monitorizando el desplazamiento lateral y/o el calor generado por las diversas geometrías de punta. Una o más iteraciones de someter a prueba diferentes geometrías de punta (por ejemplo, fijando la ubicación de una curvatura en la punta y sometiendo a prueba diferentes puntas con diferentes ubicaciones de segunda curvatura y grados de curvatura) pueden dar como resultado identificar una o más geometrías de punta optimizadas. También son posibles otros números de curvaturas y modificaciones geométricas (por ejemplo, modificando la ubicación de ambas curvaturas manteniendo a la vez constante el grado de curvatura de ambas curvaturas, modificando la ubicación y el grado de curvatura de las curvaturas, modificando el número de curvaturas, modificando la longitud del vástago, modificando la longitud de la parte cónica, modificando el radio del vástago, modificando los radios de la parte cónica, etc.).

En algunas formas de realización, pueden utilizarse ecuaciones de modelado (en lugar de o además de FEA y/o pruebas físicas) para someter a prueba diferentes geometrías de punta. Por ejemplo, las ecuaciones que describen cómo varían el ángulo de torsión ( $\phi$ ) y el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) a lo largo del eje z mientras se hace vibrar en torsión por ultrasonidos una punta recta (predominantemente cilíndrica) (por ejemplo, basándose en la teoría de elasticidad general) pueden representarse tal como sigue (véanse también las figuras 7a a b):

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) \text{ donde } \ddot{\phi} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}; I(z) = \frac{\pi}{2} (R_2^4(z) - R_1^4(z)); C(z) = I(z) * \mu$$

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \frac{d^2 u_x}{dz^2} \right) \text{ donde } \ddot{u}_x = \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}; I_y(z) = \frac{\pi}{4} (R_2^4(z) - R_1^4(z));$$

$$S(z) = \pi (R_2^2(z) - R_1^2(z))$$

donde  $\phi$  es el ángulo de torsión de la punta,  $\rho$  es la densidad del material de punta,  $I(z)$  es el momento de inercia de la sección transversal de punta cilíndrica alrededor del eje z,  $R_1(z)$  es el radio interior de una sección interior hueca del cuerpo de punta cilíndrico (si el cuerpo cilíndrico es sólido,  $R_1(z)$  puede ser 0 a lo largo de todo el eje z);  $R_2(z)$  es el radio exterior de un cuerpo de punta cilíndrico; t es el tiempo,  $u_x$  es el desplazamiento lateral a lo largo del eje x,  $S(z)$  es el área de sección transversal de la punta cilíndrica a lo largo del eje z,  $E$  es el módulo de Young del material de punta,  $I_y(z)$  es el momento de inercia de la sección transversal de una punta cilíndrica alrededor del eje y, y  $\mu$  es el módulo torsional del material de punta. Características tales como  $\rho$  pueden ser iguales para toda la punta, mientras que características tales como  $R_1(z)$  y  $R_2(z)$  pueden variar a lo largo del eje z (y por tanto pueden representarse, por ejemplo, como una matriz de valores). Las ecuaciones que describen cómo varía el ángulo de torsión ( $\phi$ ) y el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) a lo largo del eje z mientras se hace vibrar en torsión por ultrasonidos una punta curvada (predominantemente cilíndrica) (por ejemplo, una punta con curvaturas 102/103) pueden representarse tal como sigue (véanse también las figuras 7a a b):

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \right) \right) \text{ donde } \ddot{\phi} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2};$$

$$I(z) = \frac{\pi}{2} (R_2^4(z) - R_1^4(z)); C(z) = I(z) * \mu$$

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right) \quad \text{donde} \quad \ddot{u}_x = \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2};$$

$$I_y(z) = \frac{\pi}{4} (R_2^4(z) - R_1^4(z)); \quad S(z) = \pi (R_2^2(z) - R_1^2(z))$$

5 Donde  $\phi$  es el ángulo de torsión de la punta,  $\rho$  es la densidad del material de punta,  $l(z)$  es el momento de inercia de la sección transversal de punta cilíndrica alrededor del eje  $z$ ,  $R_1(z)$  es el radio interior de una sección interior hueca del cuerpo de punta cilíndrico (si el cuerpo cilíndrico es sólido,  $R_1(z)$  puede ser 0);  $R_2(z)$  es el radio exterior de un cuerpo cilíndrico;  $t$  es el tiempo,  $u_x$  es el desplazamiento lateral a lo largo del eje  $x$ ,  $S(z)$  es el área de sección transversal de la punta cilíndrica a lo largo del eje  $z$ ,  $E$  es el módulo de Young del material de punta,  $I_y(z)$  es el momento de inercia de la sección transversal de una punta cilíndrica alrededor del eje  $y$ ,  $\mu$  es el módulo de torsión del material de punta y  $l(z)$  es el desplazamiento lateral a lo largo del eje  $y$  tal como se observa en la figura 7c. En algunas formas de realización, una o más de las entradas y/o ecuaciones pueden modificarse para explicar la presencia de un medio en el que está vibrando la punta (por ejemplo, agua, humor vítreo, etc.). Por ejemplo, la ecuación para el desplazamiento lateral de la punta puede modificarse tal como sigue:

$$\ddot{u}_x - \gamma \dot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z) + \rho_{Medios} S_{Medios}(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

20 Donde  $\gamma$  es un parámetro empírico que representa la disipación debida a los medios (tal como agua). El valor de  $\gamma$  puede ajustarse para alinear la ecuación con desplazamientos medidos de puntas existentes en los medios. El término  $\rho_{Medios} S_{Medios}(z)$  en el denominador representa el aumento de la masa de la punta debido a los medios que siguen el movimiento de la punta. El término  $\rho_{Medios}$  es la densidad de los medios y el término  $S_{Medios}(z)$  es la sección transversal de los medios que se mueven junto con la punta, lo que puede evaluarse utilizando la teoría de fluidos

ideales como:  $S_{Medios}(z) = \pi (R_1^2(z) + R_2^2(z))$  (donde  $R_1$  es el diámetro interior de la masa de medios y  $R_2$  es el diámetro exterior de la masa de medios que siguen a la punta). También se contemplan otras modificaciones.

25 En algunas formas de realización, junto con las diversas características de punta (por ejemplo,  $\rho$ ,  $E$ , etc.), el usuario puede introducir características geométricas (por ejemplo,  $S(z)$ ,  $l(z)$ ,  $C(z)$ ,  $I_y(z)$ , etc.) o pueden calcularse por un software de modelado (por ejemplo, Matlab™) basándose en otras entradas proporcionadas por el usuario (por ejemplo, el usuario puede proporcionar un radio interior (si la punta es hueca en el centro), un radio exterior de la punta a lo largo del eje  $z$ , una ubicación (por ejemplo, puntos de partida y detención (a lo largo del eje  $z$ )) y grado de curvatura de una o más curvaturas, etc.). El usuario también puede dibujar la forma de la punta utilizando una interfaz gráfica de usuario (por ejemplo, véanse los gráficos de entrada en las figuras 8a a b), el usuario puede precargar una geometría de punta (por ejemplo, una representación tridimensional), etc. En algunas formas de realización, el radio exterior puede ser grande a valores de  $z$  pequeños (es decir, en la parte cónica de la punta) y relativamente pequeño en el extremo de la punta. También se contemplan otras entradas.

35 En algunas formas de realización, las soluciones para  $\phi$  y  $u_x$  de las ecuaciones anteriores pueden utilizarse para examinar el desplazamiento lateral y los ángulos de torsión a lo largo del eje  $z$  para diferentes geometrías de punta y puede seleccionarse una geometría de punta equilibrada/ajustada a partir de varias geometrías de punta lo que maximiza el desplazamiento lateral  $u_x$  y el ángulo de torsión  $\phi$  del punto de extremo distal 106 a la vez que se minimiza el desplazamiento lateral  $u_x$  a lo largo de la longitud de punta (por ejemplo, a lo largo del vástago 108). En algunas formas de realización, la resolución para  $\phi$  y  $u_x$  puede incluir utilizar el análisis de armónicos. Una solución de las ecuaciones para  $\phi$  y  $u_x$  puede proporcionar el ángulo de torsión y/o los desplazamientos laterales como funciones tanto de  $z$  como de  $t$  (por ejemplo,  $u(z,t)$  y  $\phi(z,t)$ ). Estas soluciones pueden utilizarse entonces para modelar la punta según una fuerza armónica. El modelado según una fuerza armónica puede incluir modelar la punta como si la punta oscilara a cierta frecuencia  $\omega$  como  $\cos(\omega t)$ . Por tanto, pueden utilizarse armónicos para simplificar las ecuaciones de modelado para  $u(z,t)$  y  $\phi(z,t)$  según las ecuaciones para  $\ddot{\phi}$  y  $\ddot{u}_x$ : proporcionadas anteriormente. En algunas formas de realización, la solución puede modelarse según  $u(z) \cos(\omega t)$  (es decir la amplitud de vibración puede modelarse para que dependa sólo de  $z$ ). La fórmula  $u(z) \cos(\omega t)$  puede utilizarse en las

40 ecuaciones de movimiento ( $\ddot{\phi}$  y  $\ddot{u}_x$ ) para proporcionar una ecuación diferencial para la amplitud de vibraciones  $u(z)$  que es independiente del tiempo. Entonces pueden representarse gráficamente las soluciones para la amplitud de desplazamiento y la amplitud de torsión de la punta (por ejemplo, véanse las salidas en las figuras 8a a b). En algunas formas de realización, puede no utilizarse el análisis de armónicos (por ejemplo, pueden determinarse y analizarse diversas soluciones dependientes del tiempo y de  $z$ ).

Las figuras 8a a b ilustran formas de punta de entrada y el desplazamiento y los ángulos de torsión correspondientes a lo largo de la longitud de punta según las ecuaciones modelo proporcionadas anteriormente. En algunas formas de realización, pueden seleccionarse la posición y el grado de curvatura de la primera curvatura 102 basándose en diversos factores tales como consideraciones ergonómicas y de fabricación. La segunda curvatura 104 puede colocarse más cerca del borde de corte 106 de la punta 100 equilibrada. El grado de curvatura de esta curvatura puede elegirse entonces utilizando la predicción de las ecuaciones modelo proporcionadas anteriormente. La forma de punta resultante puede verificarse y/o ajustarse entonces realizando simulaciones de análisis de elementos finitos. El grado de curvatura ideal puede ser de manera que el modo de vibración de torsión y el modo de vibración de curvatura de la punta 100 equilibrada estén desacoplados. El movimiento de la punta 100 equilibrada bajo la fuerza de torsión puede ser el mismo que su modo de vibración de torsión. En algunas formas de realización, las curvaturas de punta (por ejemplo, 102/103) pueden colocarse de manera que la energía de vibración torsional ultrasónica en la punta 100 equilibrada puede estar en un modo de vibración de torsión a lo largo de una parte sustancial del vástago 108 (con movimiento lateral reducido). En algunas formas de realización, también puede ajustarse la longitud del vástago 108 para ajustarse al modo de vibración de torsión de manera que esa vibración de torsión esté en resonancia con el mecanismo de accionamiento ultrasónico (por ejemplo, los elementos 227 piezoeléctricos en la pieza de mano combinados con una sonda) para aumentar el desplazamiento de torsión en el punto de extremo distal 106.

En algunas formas de realización, la amplitud del desplazamiento lateral del punto de extremo distal de la punta 100 equilibrado puede depender de la resonancia entre la fuerza de accionamiento de torsión y el modo de vibración de torsión. Aunque la frecuencia de accionamiento puede establecerse por el diseño de la sonda de torsión, la frecuencia del modo de torsión puede ajustarse seleccionando, por ejemplo, una longitud de la parte 110 cónica de la punta 100 equilibrada. La longitud de la parte 110 cónica puede elegirse para maximizar las vibraciones de torsión de la punta 100 equilibrada, dando como resultado por tanto el desplazamiento de torsión máximo del punto de extremo distal 106. También pueden variarse otras características de punta.

En algunas formas de realización, la punta 100 equilibrada puede presentar un diámetro en un intervalo de aproximadamente 0,5 mm a 2 mm (por ejemplo, 1,5 mm). En algunas formas de realización, la punta 100 equilibrada puede presentar un diámetro en una parte superior de la punta de aproximadamente 1,5 mm y un diámetro cerca de un extremo distal de la punta de 0,9 mm (también se contemplan otros diámetros y configuraciones). En una forma de realización, la punta 100 equilibrada puede presentar una longitud de aproximadamente 1 y 3/8 pulgadas y las curvaturas 102,103 pueden estar ubicadas a lo largo de la aproximación distal a 1/8 y 2/8 pulgadas. También se contemplan otras dimensiones. En algunas formas de realización, la primera curvatura 102 puede estar aproximadamente en un intervalo de -10 a -30 grados mientras que la segunda curvatura 104 puede estar aproximadamente en un intervalo de 20 a 50 grados. También se contemplan otros ángulos de curvatura. La parte de borde de corte 112 puede presentar un extremo ensanchado, de sección decreciente y/o biselado (en algunas formas de realización, la parte de borde de corte 112 puede ser plana). La punta 100 equilibrada puede estar constituida por acero inoxidable o titanio (también pueden utilizarse otros materiales). La punta 100 equilibrada puede presentar una longitud global de entre 0,50 pulgadas y 1,50 pulgadas (por ejemplo, 1,20 pulgadas). También se contemplan otras longitudes. La punta 100 equilibrada puede formarse utilizando tecnología metalúrgica convencional y puede someterse a electropolido. El vástago 108 puede ser generalmente tubular, con un diámetro exterior de entre 0,005 pulgadas y 0,100 pulgadas y un diámetro interior de entre 0,001 pulgadas y 0,090 pulgadas (también se contemplan otros diámetros).

La figura 9 ilustra un diagrama de flujo del método para determinar una geometría de punta, según una forma de realización. Los elementos proporcionados en el diagrama de flujo son únicamente ilustrativos. Pueden omitirse diversos elementos proporcionados, pueden añadirse elementos adicionales, y/o pueden realizarse diversos elementos en un orden diferente del proporcionado a continuación.

En 901, puede introducirse una geometría de punta en el sistema. Por ejemplo, las entradas de geometría pueden almacenarse en un archivo de entrada. En algunas formas de realización, la geometría de punta puede incluir una o más de las siguientes definidas como valores de la geometría en cortes de la punta (por ejemplo, la punta puede dividirse en 500 cortes y las características geométricas de la punta en cada corte pueden almacenarse en una matriz separada asignada a una variable geométrica respectiva). Por ejemplo, las características geométricas para los cortes de punta pueden incluir el grado de curvatura (por ejemplo, en grados), la rigidez a la torsión (por ejemplo,  $C(z)$ ), el momento de inercia alrededor del eje x (por ejemplo,  $I(z)$ ), el área de sección transversal (por ejemplo,  $S(z)$ ), el momento de inercia del corte alrededor del eje y que controla la rigidez de la curvatura de la punta (por ejemplo,  $I_y(z)$ ), la distancia de la punta desde el eje z (por ejemplo,  $l(z)$ ). También se contemplan otras entradas.

En algunas formas de realización, estas matrices basadas en cortes pueden introducirse directamente por un usuario o pueden calcularse basándose en otras entradas geométricas. Por ejemplo, el usuario puede proporcionar una longitud de la punta, la longitud de la parte cónica, la ubicación a lo largo de la punta donde comienza la primera curvatura, la ubicación a lo largo de la punta donde termina la primera curvatura, el grado de curvatura de la primera curvatura, la ubicación a lo largo de la punta donde comienza la segunda curvatura, la ubicación a lo largo de la punta donde termina la segunda curvatura, el grado de curvatura de la segunda curvatura, el módulo de cizalladura del material de punta, el módulo de Young para el material de punta, la densidad del material de punta, etc. y las

entradas específicas para los diferentes cortes pueden calcularse y almacenarse en un archivo de entrada o pueden proporcionarse al software de modelado. En algunas formas de realización, el sistema informático puede generar las entradas automáticamente. Por ejemplo, el sistema informático puede realizar ciclos a través de diversas iteraciones de posibles geometrías de punta. En algunas formas de realización, el usuario puede dibujar una punta (por ejemplo, a través de una interfaz gráfica de usuario) y el sistema informático puede calcular la geometría basándose en el dibujo. También pueden contemplarse otros tipos de entrada.

En 903, el sistema puede utilizar ecuaciones de modelado y análisis de armónicos para determinar un desplazamiento lateral y el ángulo de torsión a lo largo de la longitud de la punta para la geometría de punta y la frecuencia de vibración torsional ultrasónica dadas (por ejemplo, aproximadamente 31 kHz). También se contemplan otras frecuencias. Por ejemplo, las ecuaciones

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

y

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

pueden resolverse para  $u_x$  y  $\phi$  utilizando entradas (tal como se definió anteriormente) y análisis de armónicos (por ejemplo, utilizando armónicos con  $u(z)\cos(\omega t)$ ,  $\phi(z)\cos(\omega t)$ ) para simplificar los resultados eliminando el tiempo. Según el análisis de armónicos, en algunas formas de realización, puede suponerse que

$$u_x(z, t) = u(z) \cos(\omega t) \quad \phi(z, t) = \phi(z) \cos(\omega t)$$

Tomando una derivada del tiempo:

$$\cos(\omega t)'' = -\omega^2 \cos(\omega t)$$

y sustituyendo en las ecuaciones originales y cancelando el coseno de tiempo pueden obtenerse ecuaciones independientes del tiempo:

$$-\omega^2 u(z) = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u(z)}{dz^2} - \phi(z) \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

$$-\omega^2 \phi(z) = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi(z)}{\partial z} \right) - \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u(z)}{dz^2} - \phi(z) \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

Las ecuaciones anteriores pueden resolverse entonces para las amplitudes de desplazamiento  $u(z)$  y el ángulo de torsión  $\phi(z)$ . También pueden utilizarse otras ecuaciones para resolver  $u_x$ .

En 905, el sistema puede representar gráficamente uno o más del desplazamiento lateral y/o el ángulo de torsión para la geometría de punta (por ejemplo, véanse las figura 8a-8b).

En 907, el usuario (o el sistema) puede proporcionar una segunda geometría de punta (o puede modificar la primera geometría de punta) y recalculer el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) y el ángulo de torsión ( $\phi$ ) a lo largo de la longitud de la punta. También pueden utilizarse otras técnicas de modelado. Por ejemplo, puede utilizarse análisis de elementos finitos (FEA) para determinar el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) y/o el ángulo de torsión ( $\phi$ ) a lo largo de la longitud de puntas de diversas geometrías sometidas a diversas vibraciones. Además, también pueden utilizarse otras ecuaciones (por ejemplo, pueden utilizarse diferentes ecuaciones para el modelado de una punta cuadrada).

En 909, pueden calcularse las características para varias puntas con diferentes geometrías según 901-907 y compararse para la selección de una de las geometrías de punta (o para la generación de una nueva geometría de punta que va a analizarse). Seleccionar una de las geometrías de punta puede incluir seleccionar una geometría de punta basándose en qué geometría de punta presenta un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación. En algunas formas de realización, si el desplazamiento lateral (de las geometrías de punta analizadas) a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación (por ejemplo, por toda una parte del vástago que se extiende desde el extremo proximal del vástago (tal como el extremo de la parte cónica) hasta la primera curvatura de la parte de

borde de corte) es mayor de aproximadamente el 5% el 25% (por ejemplo, el 15%) del desplazamiento lateral del punto de extremo distal 106, (también pueden utilizarse otros umbrales (por ejemplo, 1 micrómetro, 2 micrómetros, 100 micrómetros, 2 mm, etc.)), puede generarse otra geometría de punta, puede modelarse el desplazamiento lateral de la nueva geometría de punta y compararse con por lo menos uno del desplazamiento lateral de las geometrías de punta primera o segunda para la selección adicional entre la geometría primera, segunda y nueva (punto en el que puede seleccionarse una de las puntas o puede generarse otra geometría de punta para fines de comparación).

En algunas formas de realización, generar nuevas geometrías puede incluir modificar las geometrías sometidas a prueba anteriormente para el modelado adicional. En algunas formas de realización, el usuario puede modificar adicionalmente una geometría de punta seleccionada para ajustar la geometría según criterios adicionales. Por ejemplo, el usuario puede modificar la longitud de la parte cónica 110 (u otras características geométricas tales como la longitud del vástago) para aumentar las vibraciones de torsión de la punta 100 equilibrada para proporcionar un mayor desplazamiento lateral del punto de extremo distal 106. En algunas formas de realización, el usuario puede intentar ubicaciones y grados de curvatura diferentes de una o más de las curvaturas para reducir el desplazamiento lateral hacia el extremo proximal de la punta mientras que aumenta el desplazamiento lateral hacia el extremo distal de la punta. Las modificaciones pueden utilizarse para una punta tercera, cuarta, etc., y los resultados pueden compararse con los resultados de punta anteriores para optimizar la selección de las características geométricas de la punta.

La figura 10 ilustra un diagrama de flujo de otro método para determinar una geometría de punta, según una forma de realización. Los elementos proporcionados en el diagrama de flujo son únicamente ilustrativos. Pueden omitirse diversos elementos proporcionados, pueden añadirse elementos adicionales y/o pueden realizarse diversos elementos en un orden diferente del proporcionado a continuación.

En 1001, puede modelarse o construirse físicamente una primera punta que presenta una primera geometría (por ejemplo, utilizando análisis de elementos finitos). En algunas formas de realización, la primera punta puede presentar una sección transversal circular, una sección transversal cuadrada o una sección transversal que varía a lo largo de un eje de la punta.

En 1003, puede hacerse vibrar la primera punta en condiciones similares a un procedimiento de facoemulsificación (por ejemplo, sujetándose en una pieza de mano de facoemulsificación tal como se muestra en las figuras 2-3 y se hace vibrar a una frecuencia de aproximadamente 31 kHz y/o se hace "vibrar" utilizando software de modelado tal como ANSYS). También se contemplan otras frecuencias (por ejemplo, aproximadamente entre 10 kHz y 60 kHz). En algunas formas de realización, la primera punta puede sujetarse a una pieza de mano de facoemulsificación que va a hacerse vibrar. En algunas formas de realización, la punta puede sujetarse a un aparato diferente (por ejemplo, un elemento de fijación de prueba) para aplicar las vibraciones. En algunas formas de realización, el extremo de la primera punta puede colocarse en agua o un material con características similares al humor vítreo (también se contemplan otros líquidos). En algunas formas de realización, la primera punta puede incluir dos curvaturas (por ejemplo, 102, 103). También se contemplan otros números de curvaturas.

En 1005, puede analizarse la primera punta durante las vibraciones. Por ejemplo, puede utilizarse obtención de imágenes térmica, estroboscopia, medición física del desplazamiento, etc. para determinar el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) y/o el ángulo de torsión ( $\phi$ ) (o características indicativas de desplazamiento lateral ( $u_x$ ) y/o ángulo de torsión ( $\phi$ )) para la punta. Por ejemplo, en un examen térmico de la punta en vibración, las ubicaciones de calor superior a lo largo de la longitud de punta pueden ser indicativas de desplazamientos laterales mayores ( $u_x$ ).

En 1007, puede construirse una segunda punta (por ejemplo, puede modificarse la geometría de la primera punta). Pueden realizarse modificaciones a diferentes características geométricas tal como se proporcionó anteriormente. Por ejemplo, pueden modificarse la ubicación y/o el grado de curvatura de la segunda curvatura 103.

En 1009, puede hacerse vibrar la segunda punta en condiciones similares a las de la primera punta.

En 1011, puede analizarse la segunda punta durante las vibraciones para determinar características similares (tales como desplazamiento lateral y ángulo de torsión) tal como se determinó para la primera punta.

En 1013, pueden compararse las características para la primera punta y la segunda punta y puede seleccionarse una de las geometrías de punta primera y segunda o puede generarse una nueva geometría de punta y someterse a prueba para fines de comparación. Por ejemplo, la selección de la primera geometría de punta o la segunda geometría de punta puede basarse en qué geometría de punta presenta un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación. En algunas formas de realización, si el desplazamiento lateral a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación (por ejemplo, por toda una parte del vástago que se extiende desde el extremo proximal del vástago (tal como el extremo de la parte cónica) hasta la primera curvatura de la parte de borde de corte) es mayor de aproximadamente el 5% al 25% (por ejemplo, el 15%) (tal como se indicó anteriormente, también son posibles

otros umbrales) del desplazamiento del punto de extremo distal 106 de la punta, puede generarse y examinarse una tercera punta. El desplazamiento lateral y/o el ángulo de torsión de la tercera geometría de punta pueden determinarse y compararse con el desplazamiento lateral y/o el ángulo de torsión de las geometrías de punta primera o segunda para la selección adicional entre las geometrías de punta primera, segunda y tercera (punto en el que puede seleccionarse una de las puntas y puede generarse otra geometría de punta para fines de comparación).

La figura 11 ilustra seis posibles formas de realización de punta equilibrada (también son posibles otras formas de realización). La punta 100 equilibrada puede presentar una geometría según uno de los conjuntos de parámetros proporcionados en la tabla de la figura 11. La punta 100 equilibrada puede presentar un diámetro exterior de  $OD$  pulgadas; un diámetro de la perforación interior de  $ID$  pulgadas; una longitud total de  $L$  pulgadas desde el cilindro (el punto proximal de la punta 100 que está configurado para unirse a la sonda ultrasónica) hasta el borde de corte 106 de la punta 100. La parte cónica 110 de la punta 100 puede extenderse  $L_c$  pulgadas desde el cilindro. La primera curvatura 102 de la punta 100 puede presentar un ángulo de  $\alpha_1$  grados y extenderse entre puntos que se encuentran a una distancia de  $x_1$  y  $x_2$  pulgadas del punto de extremo distal 106. La segunda curvatura 104 puede presentar el ángulo de  $\alpha_2$  grados y extenderse entre puntos que se encuentran a una distancia de  $\gamma_1$  y  $\gamma_2$  pulgadas del punto de extremo distal 106. La parte de borde de corte 112 puede presentar un borde biselado (es decir, en el borde más distal de la parte de borde de corte), es decir, orientado hacia arriba 30 ó 45 grados u orientado hacia abajo 30 grados tal como se indica en la tabla (como ejemplo, el bisel mostrado en la figura 1 está orientado hacia abajo).

En algunas formas de realización, un sistema de modelado puede incluir uno o más procesadores. El procesador puede incluir dispositivos de procesamiento individuales o una pluralidad de dispositivos de procesamiento. Un dispositivo de procesamiento de este tipo puede ser un microprocesador, controlador (que puede ser un microcontrolador), procesador de señales digitales, microordenador, unidad central de proceso, matriz de compuertas programables de campo, dispositivo lógico programable, máquina de estado, conjunto de circuitos lógicos, conjunto de circuitos de control, conjunto de circuitos analógicos, conjunto de circuitos digitales y/o cualquier dispositivo que manipule señales (analógicas y/o digitales) basándose en instrucciones de funcionamiento. La memoria acoplada a y/o incluida en los procesadores puede ser un dispositivo de memoria individual o una pluralidad de dispositivos de memoria. Un dispositivo de memoria de este tipo puede ser una memoria de solo lectura, memoria de acceso aleatorio, memoria volátil, memoria no volátil, memoria estática, memoria dinámica, memoria flash, memoria caché y/o cualquier dispositivo que almacene información digital. Obsérvese que cuando los procesadores implementan una o más de sus funciones a través de una máquina de estado, conjunto de circuitos analógicos, conjunto de circuitos digitales y/o conjunto de circuitos lógicos, la memoria que almacena las correspondientes instrucciones de funcionamiento puede estar incluida dentro de, o puede ser externa a, los conjuntos de circuitos que comprenden la máquina de estado, conjunto de circuitos analógicos, conjunto de circuitos digitales y/o conjunto de circuitos lógicos. La memoria puede almacenar, y el procesador puede ejecutar, instrucciones de funcionamiento correspondientes a por lo menos algunos de los elementos ilustrados y descritos en asociación con las figuras (por ejemplo, las figuras 9 y 10). La presente invención descrita en la presente memoria también puede definirse como en los siguiente párrafos numerados, numerados 7-20:

7. Un método de determinación de una geometría de punta de facoemulsificación, que comprende:

proporcionar una primera geometría de punta;

modelar el desplazamiento lateral de la primera geometría de punta durante la vibración torsional ultrasónica de la punta;

proporcionar una segunda geometría de punta;

modelar el desplazamiento lateral de la segunda geometría de punta durante la vibración torsional ultrasónica de la punta;

comparar el desplazamiento lateral de la primera geometría de punta y el desplazamiento lateral de la segunda geometría de punta; y

seleccionar la primera geometría de punta o la segunda geometría de punta basándose en qué geometría de punta presenta un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación.

8. El método del párrafo 7, en el que la primera geometría de punta comprende por lo menos:

$I(z)$  el desplazamiento lateral con respecto a la geometría recta,

$\rho$  como densidad de un material de punta,

$I(z)$  como momento de inercia de una sección transversal de punta cilíndrica alrededor de un eje colineal con un vástago de punta,

$S(z)$  como área de sección transversal de la punta a lo largo del eje colineal con el vástago,

$E$  como módulo de Young del material de punta,

$I_y(z)$  como momento de inercia de una sección transversal de la punta alrededor de un eje perpendicular al eje colineal con el vástago,

$$C(z) = I(z) * \mu, y$$

$\mu$  como módulo torsional del material de punta.

9. El método del párrafo 8, en el que el modelado del desplazamiento lateral ( $u_x$ ) de la geometría de punta durante la vibración torsional ultrasónica de la punta comprende determinar el movimiento lateral de la punta según las ecuaciones

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)_y$$

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

10. El método del párrafo 7, en el que las geometrías de punta primera y segunda comprenden una parte cónica y en el que el método comprende además modelar vibraciones torsionales de la punta según la ecuación

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)_y$$

y determinar una longitud de la parte cónica que da como resultado vibraciones de torsión aumentadas de la punta durante las vibraciones torsionales ultrasónicas para proporcionar un mayor desplazamiento lateral en el punto de extremo distal de la punta.

11. El método del párrafo 7, en el que las geometrías de punta primera y segunda incluyen por lo menos una primera y una segunda curvaturas y en el que las geometrías de punta primera y segunda incluyen una ubicación o grado de curvatura diferente de la segunda curvatura.

12. El método del párrafo 7, que comprende además determinar si el desplazamiento lateral a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación es menor de aproximadamente el 15% del desplazamiento lateral del punto de extremo distal.

13. El método del párrafo 11, que comprende además, si el desplazamiento lateral a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación es mayor de aproximadamente el 15% del desplazamiento lateral del punto de extremo distal, generar una tercera geometría de punta, modelar el desplazamiento lateral de la tercera geometría de punta y comparar el desplazamiento lateral de la tercera geometría de punta con por lo menos uno del desplazamiento lateral de las geometrías de punta primera o segunda.

14. Un método de determinación de una geometría de punta de facoemulsificación, que comprende:

proporcionar una primera punta con una primera geometría de punta;

hacer vibrar en torsión por ultrasonidos la primera geometría de punta;

determinar un desplazamiento lateral a lo largo de la geometría de punta durante la vibración torsional ultrasónica de la primera punta;

proporcionar una segunda punta con una segunda geometría de punta;

hacer vibrar en torsión por ultrasonidos la segunda geometría de punta;

determinar un desplazamiento lateral a lo largo de la segunda geometría de punta durante la vibración torsional ultrasónica de la segunda punta;

comparar el desplazamiento lateral de la primera geometría de punta y el desplazamiento lateral de la segunda geometría de punta; y

5 seleccionar la primera geometría de punta o la segunda geometría de punta basándose en qué geometría de punta presenta un desplazamiento lateral más pequeño a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación.

10 15. El método del párrafo 14, en el que seleccionar las geometrías de punta primera o segunda comprende además determinar cuál de la primera geometría de punta y la segunda geometría de punta presenta un desplazamiento lateral más pequeño del vástago de punta por toda una parte del vástago que se extiende desde el extremo proximal del vástago hasta por lo menos la mitad de la longitud del vástago.

15 16. El método del párrafo 14, en el que las geometrías de punta primera y segunda incluyen por lo menos una primera y segunda curvaturas.

17. El método del párrafo 16, en el que las geometrías de punta primera y segunda incluyen ubicaciones o curvaturas respectivas diferentes de la segunda curvatura.

20 18. El método del párrafo 14, que comprende además determinar si el desplazamiento lateral a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación es menor de aproximadamente el 5 al 25% del desplazamiento lateral en el punto de extremo distal de la punta.

25 19. El método del párrafo 18, que comprende además, si el desplazamiento lateral a lo largo de una parte del vástago de punta configurada para estar a lo largo de una incisión en un ojo durante un procedimiento de facoemulsificación es mayor de aproximadamente el 5 al 25% del desplazamiento lateral en el punto de extremo distal de la punta, generar una tercera geometría de punta, modelar el desplazamiento lateral de la tercera geometría de punta, y comparar el desplazamiento lateral de la tercera geometría de punta con por lo menos uno del desplazamiento lateral de las geometrías de punta primera o segunda.

30 20. El método del párrafo 14, en el que determinar un movimiento lateral de la geometría de punta comprende utilizar por lo menos uno de obtención de imágenes térmica, estroboscopia o medición física del desplazamiento.

35

**REIVINDICACIONES**

1. Punta (100) de facoemulsificación, que comprende

- 5 - un vástago (108) por lo menos parcialmente recto;
- una parte de borde de corte (112) en el extremo distal del vástago, en la que la parte de borde de corte comprende por lo menos una primera y segunda curvatura (102,104) y un punto de extremo distal (106);
- 10 - estando la punta configurada para hacerse vibrar en torsión por ultrasonidos cuando se utiliza con una pieza (204) de mano de facoemulsificación, que comprende un mecanismo de accionamiento ultrasónico,

mediante lo cual la vibración torsional ultrasónica de la punta da como resultado por lo menos dos movimientos, que comprenden:

- 15 - un desplazamiento lateral de la punta perpendicular a un eje colineal con una parte de vástago recta y perpendicular a un eje de una curvatura de la punta;
- un ángulo de torsión a lo largo del eje colineal con una parte de vástago recta de la punta;

20 en la que la geometría del vástago y de dichas por lo menos una primera y segunda curvatura está configurada para dar como resultado, durante la vibración torsional ultrasónica de la punta (100), un desplazamiento lateral del vástago (108), perpendicular al vástago (108), de menos de aproximadamente entre el 5 y el 25% del desplazamiento lateral del punto de extremo distal (106) de la punta (100) a lo largo de la longitud del vástago que se extiende desde el extremo proximal del vástago hasta la primera curvatura de la parte de borde de corte,

25 en la que el desplazamiento lateral ( $u_x$ ) se determina por lo menos parcialmente utilizando la ecuación,

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right), \text{ en la que:}$$

- 30  $\phi$  es el ángulo de torsión de la punta,
- $\rho$  es la densidad del material de punta,
- $S(z)$  es un área de sección transversal de la punta a lo largo del eje (116) colineal con el vástago (108),
- 35  $E$  es el módulo de Young de un material de punta,
- $I_y(z)$  es un momento de inercia de una sección transversal de la punta alrededor de un eje perpendicular al eje colineal con el vástago, y
- 40  $l(z)$  es el desplazamiento lateral a lo largo del eje perpendicular al eje colineal con el vástago, y
- en la que la longitud del vástago está configurada para ajustar la vibración de torsión de manera que la vibración de torsión esté en resonancia con el mecanismo de accionamiento ultrasónico para aumentar el desplazamiento de torsión en el punto de extremo distal (106).

2. Punta de facoemulsificación según la reivindicación 1, en la que  $\phi$  se proporciona por de la ecuación

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right), \text{ en la que } l(z) \text{ es un momento de inercia}$$

50 de una sección transversal de punta cilíndrica alrededor de un eje colineal con el vástago,  $C(z) = l(z) * \mu$ , y  $\mu$  es el módulo torsional del material de punta.

3. Punta de facoemulsificación según la reivindicación 2, en la que las ecuaciones

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

y

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \right) \right)$$

5

se resuelven mediante un análisis de armónicos.

4. Punta de facoemulsificación según la reivindicación 3, en la que el extremo (114) proximal de la punta incluye una parte cónica, y en la que se selecciona una longitud de la parte cónica para aumentar las vibraciones de torsión de la punta durante las vibraciones torsionales ultrasónicas para proporcionar un mayor desplazamiento lateral en el punto de extremo distal (106) de la punta.

10

15

5. Punta de facoemulsificación según la reivindicación 1, en la que el desplazamiento lateral de la punta en el punto de extremo distal (106) de la punta está aproximadamente en un intervalo comprendido entre 40 y 200 micrómetros.

6. Punta de facoemulsificación según la reivindicación 1, en la que la primera y segunda curvaturas (102,104) están posicionadas de manera que la energía de vibración torsional ultrasónica en la punta (100) durante la vibración torsional ultrasónica esté en un modo de vibración de torsión a lo largo de una parte sustancial del vástago (108).

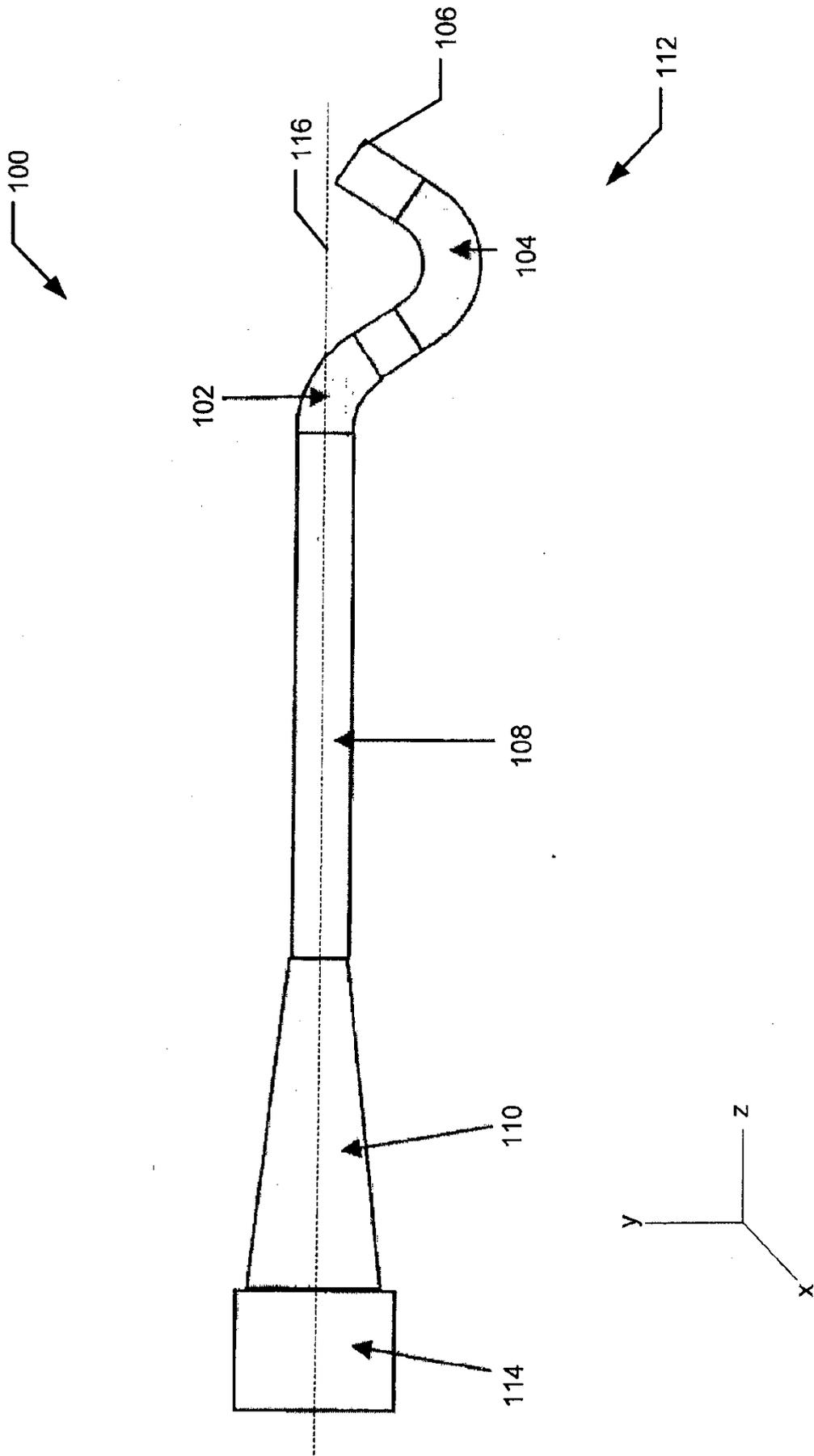
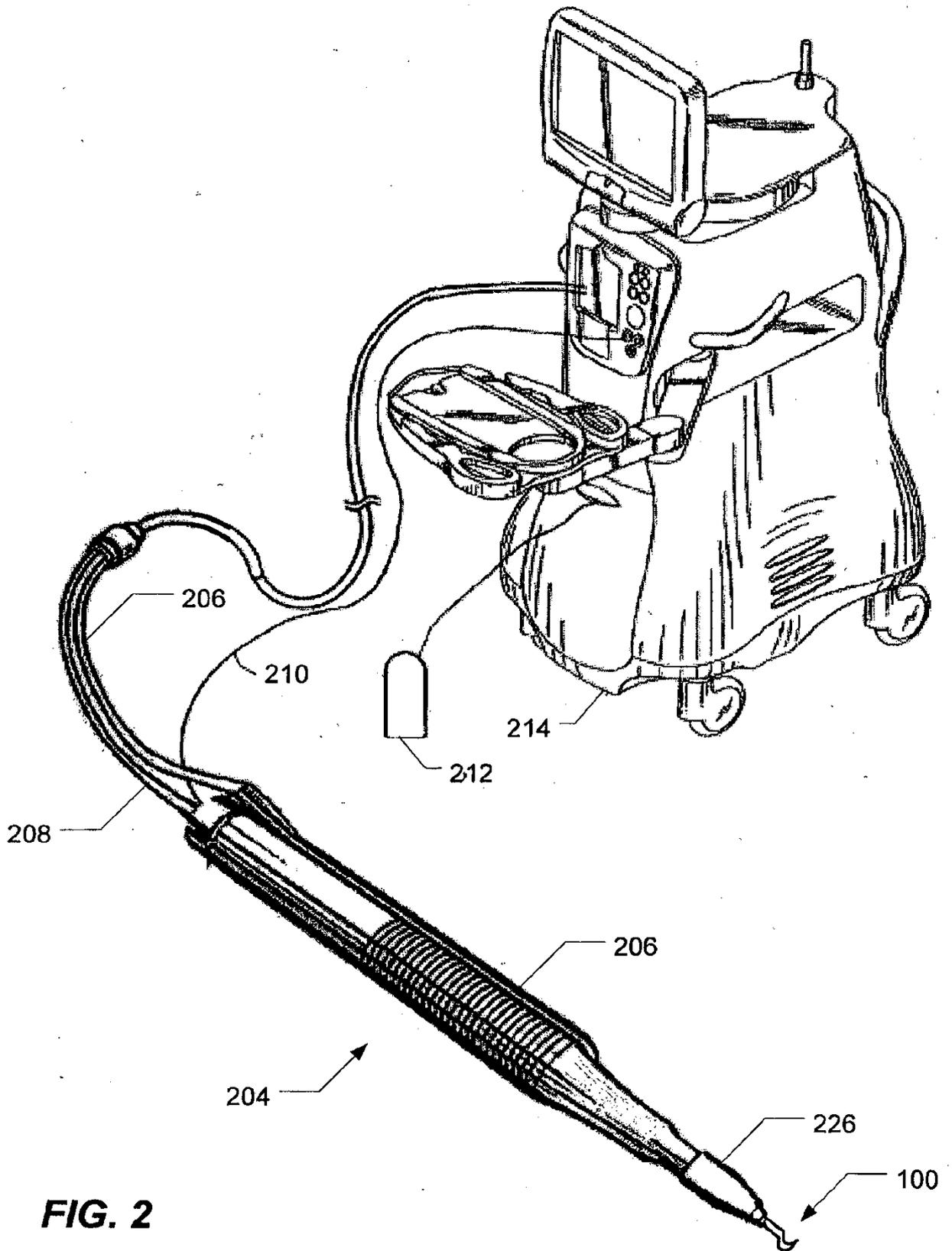
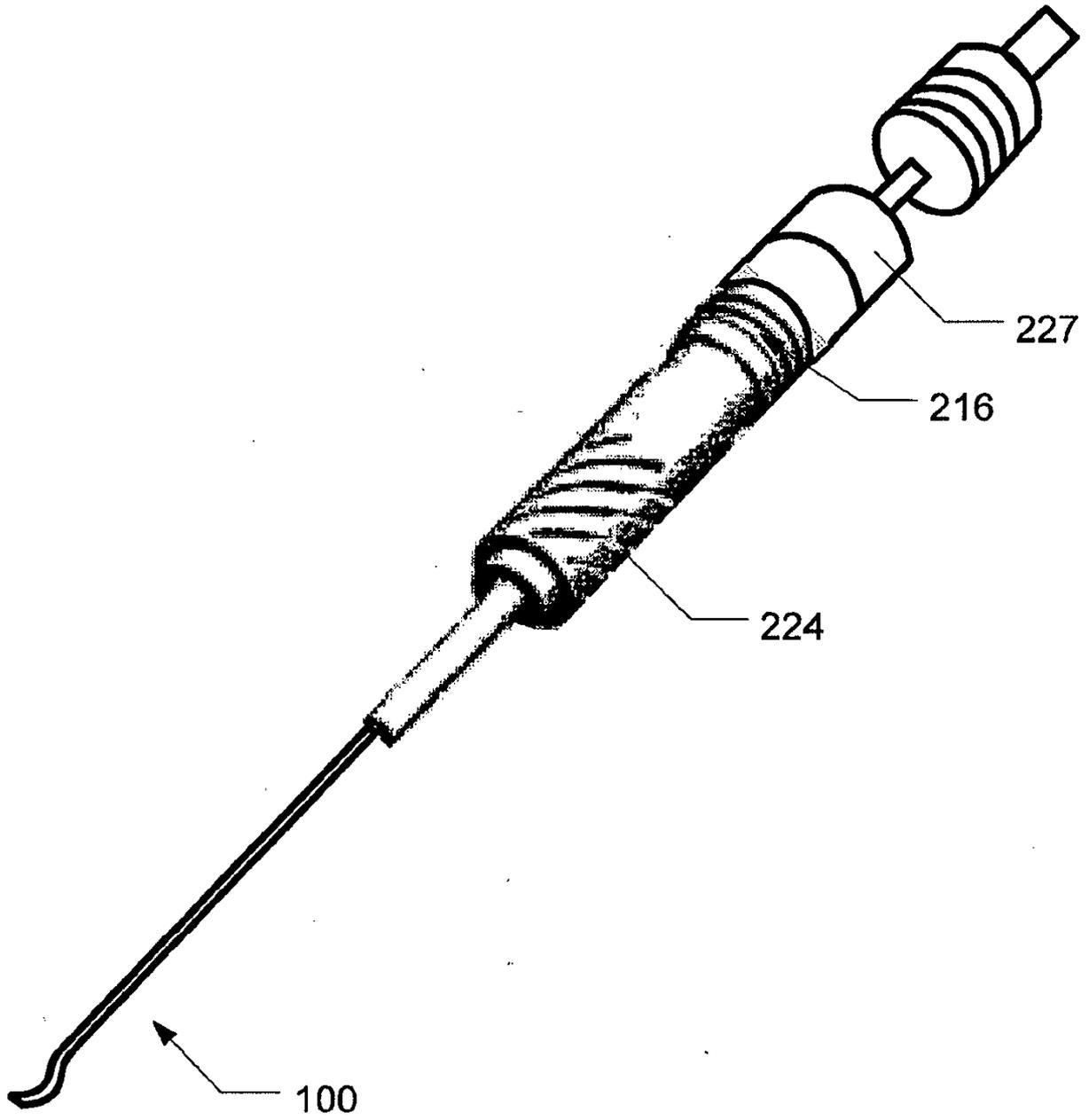


FIG. 1



**FIG. 2**



**FIG. 3**

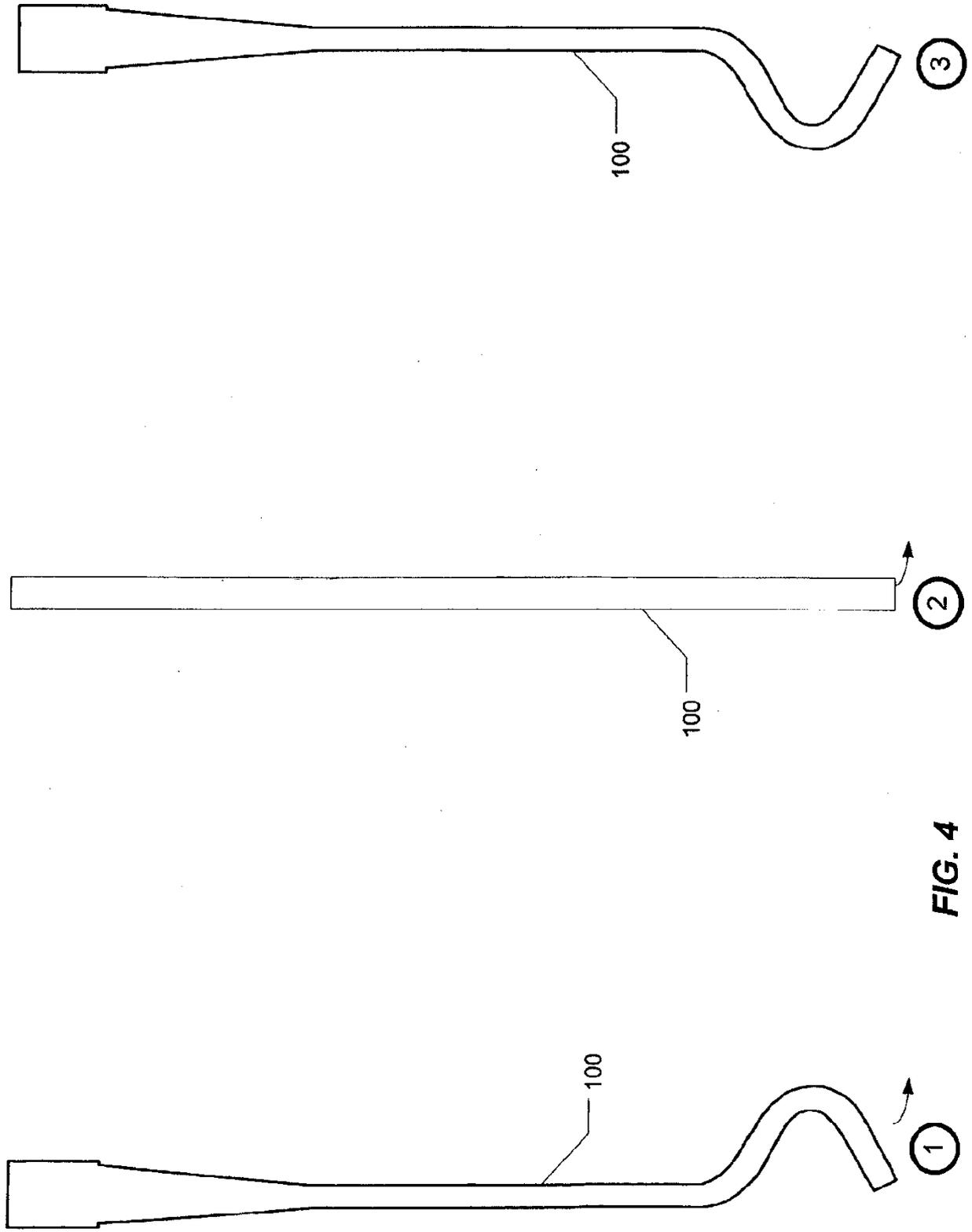
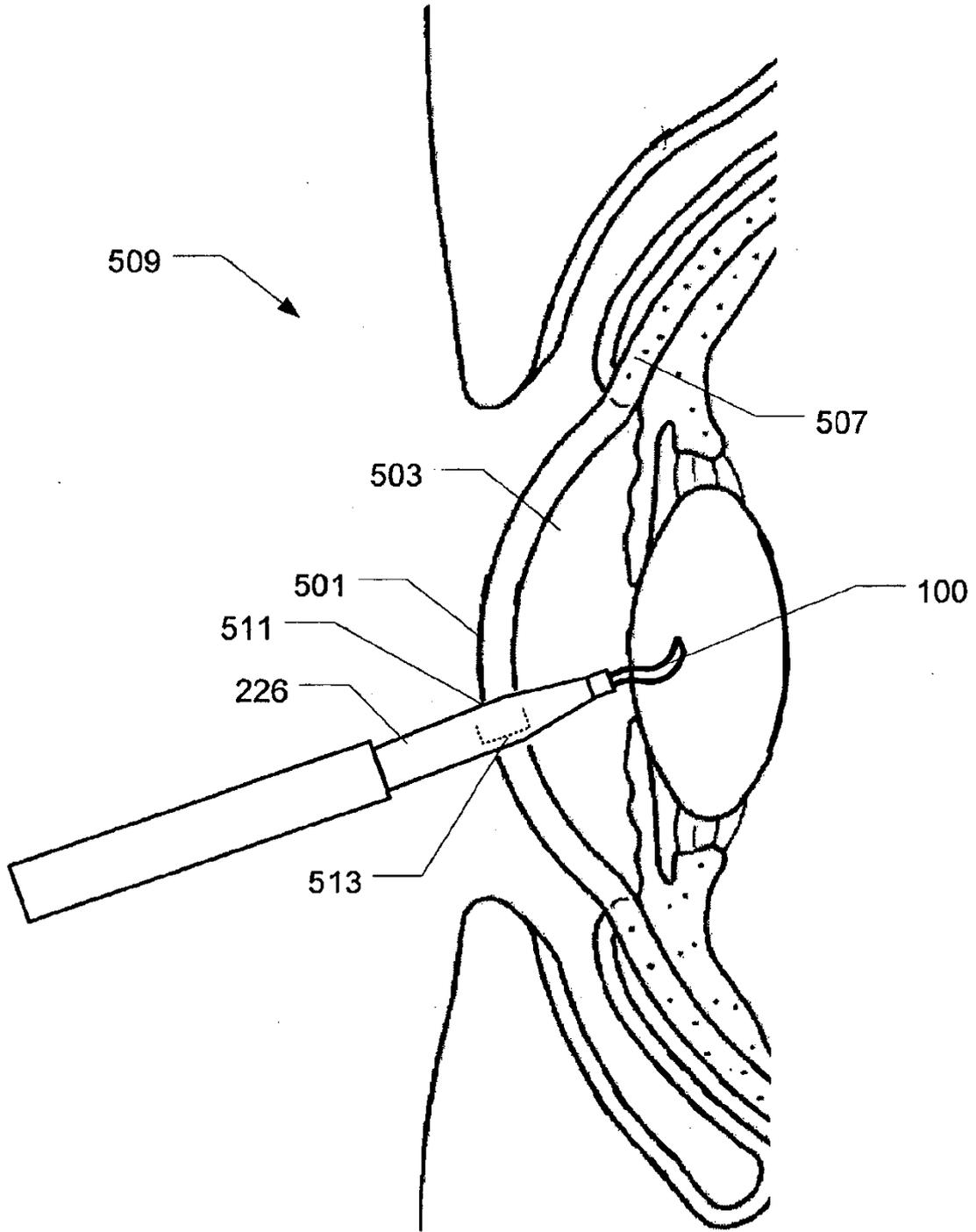
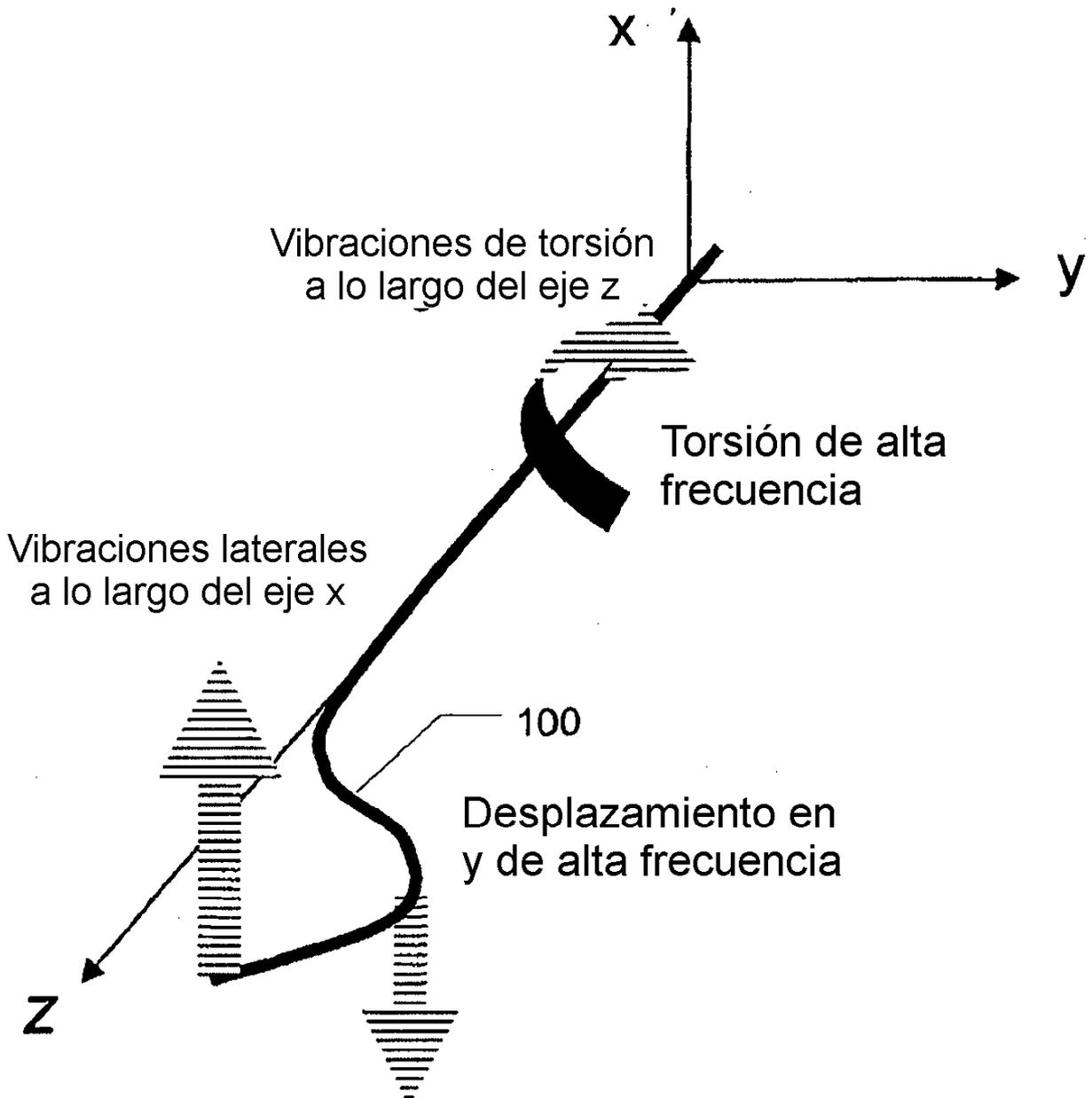


FIG. 4

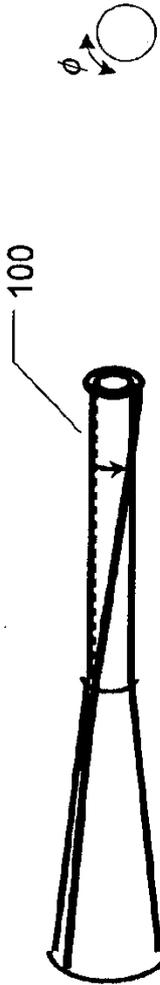


**FIG. 5**

### Modo de torsión de la punta equilibrada



**FIG. 6**



Ángulo de torsión  $\phi$

Punta recta

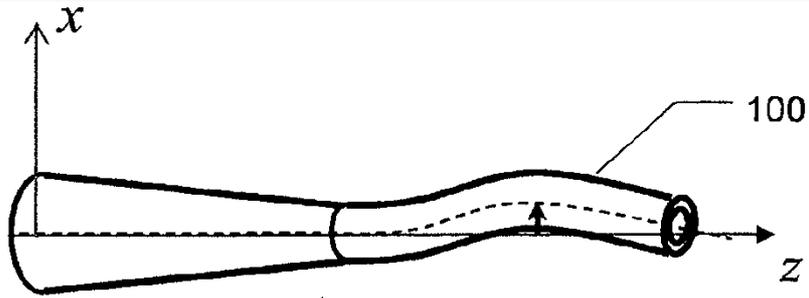
$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right)$$

Punta curvada

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{\rho I(z)} \frac{\partial}{\partial z} \left( C(z) \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) - \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 I(z)}{dz^2} \right) \right)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} \quad I(z) = \frac{\pi}{2} (R_2^4(z) - R_1^4(z)) \quad C(z) = I(z) * \mu$$

**FIG. 7a**



Desplazamiento lateral  $u_x$

Punta recta

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \frac{d^2 u_x}{dz^2} \right)$$

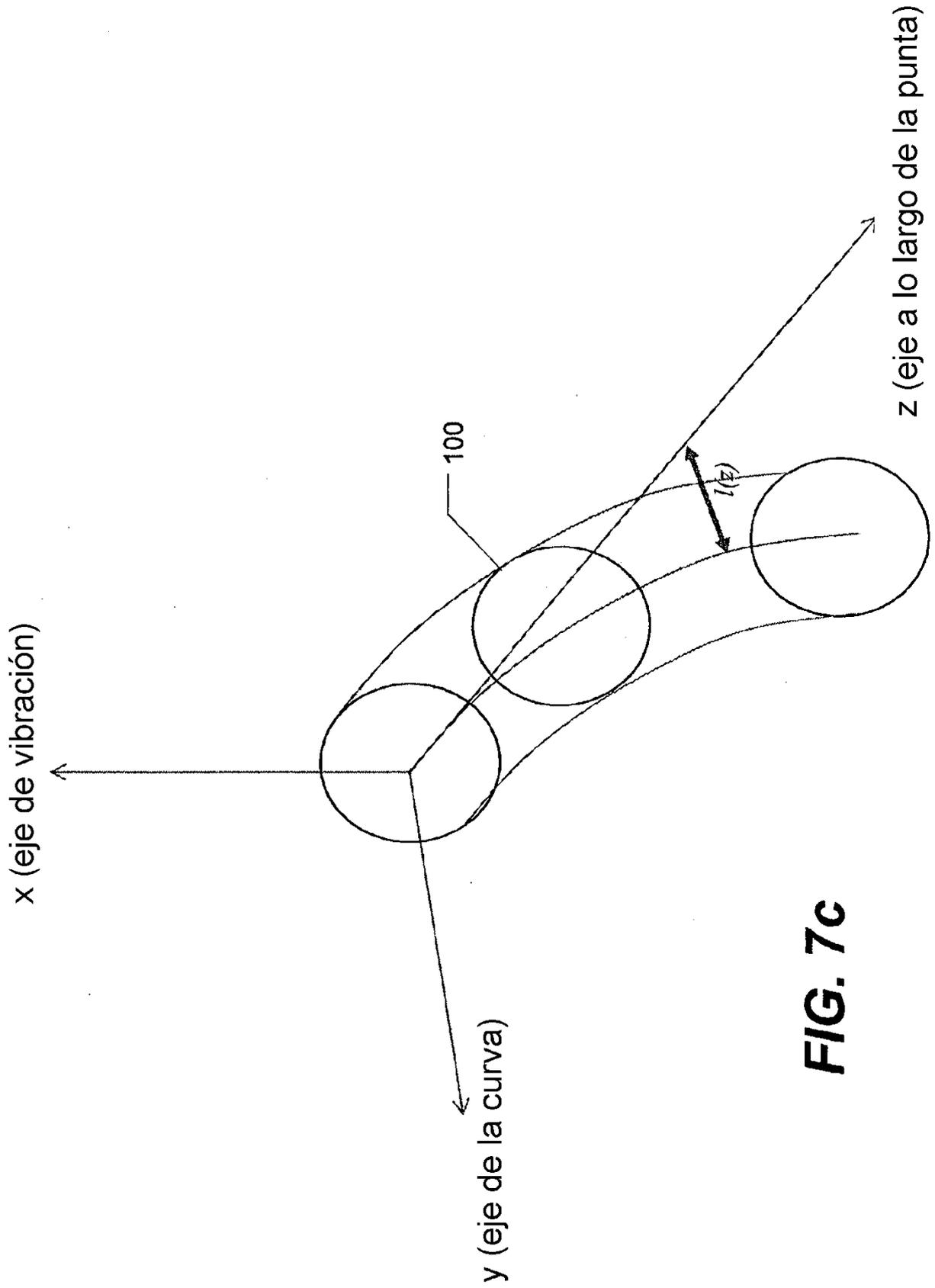
Punta curvada

$$\ddot{u}_x = \frac{1}{\rho S(z)} \frac{d^2}{dz^2} \left( E I_y(z) \left( \frac{d^2 u_x}{dz^2} - \phi \frac{d^2 l(z)}{dz^2} \right) \right)$$

$$\ddot{u}_x = \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2} \quad I_y(z) = \frac{\pi}{4} (R_2^4(z) - R_1^4(z))$$

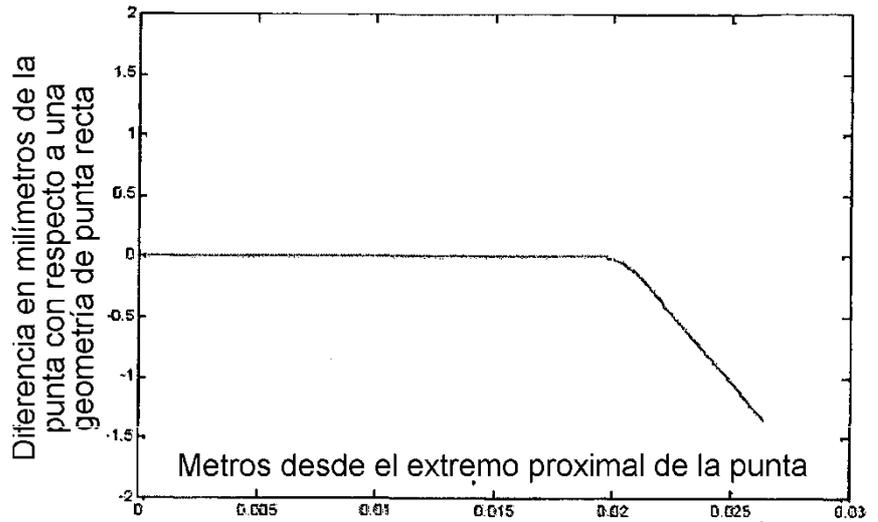
$$S(z) = \pi (R_2^2(z) - R_1^2(z))$$

**FIG. 7b**

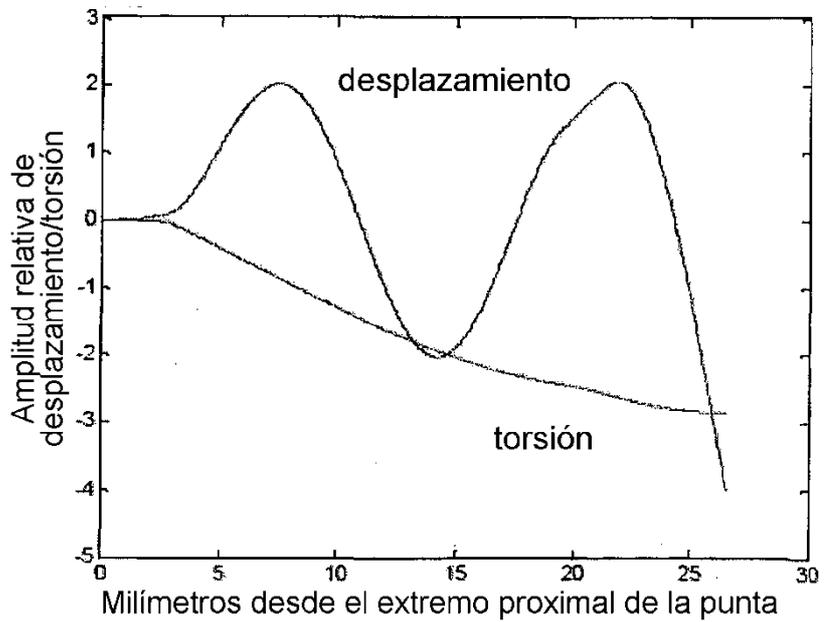


**FIG. 7c**

Entrada:  
forma de la  
punta

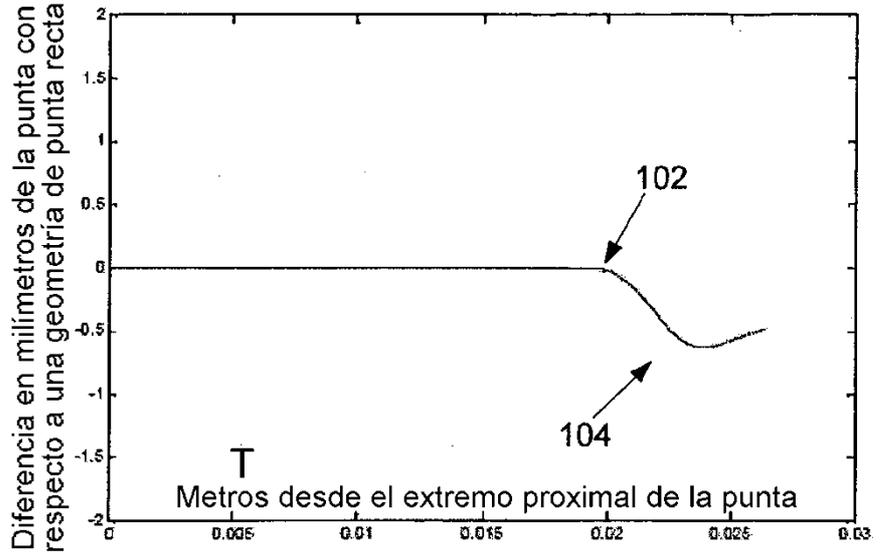


Salida:  
Desplazamientos de  
modo de torsión

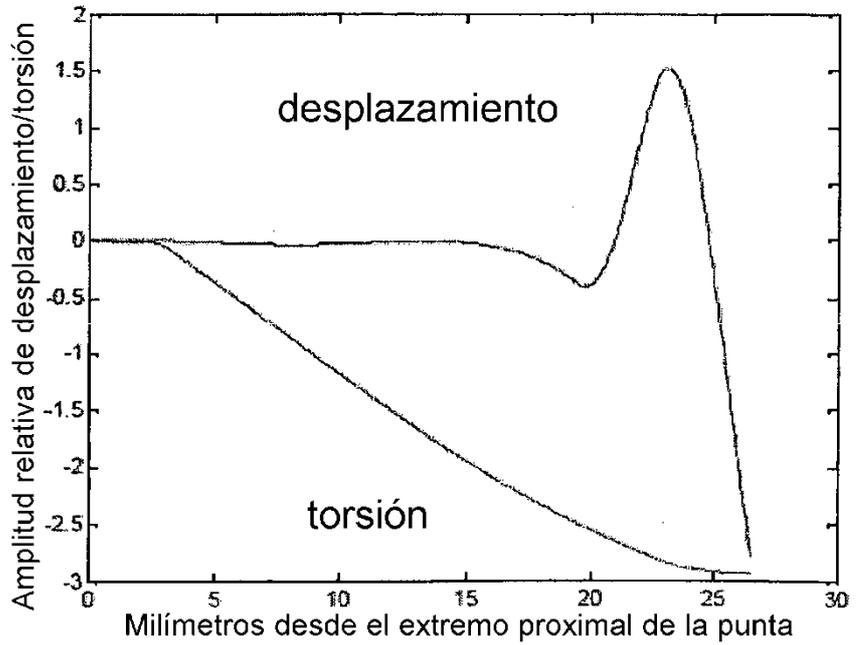


**FIG. 8a**

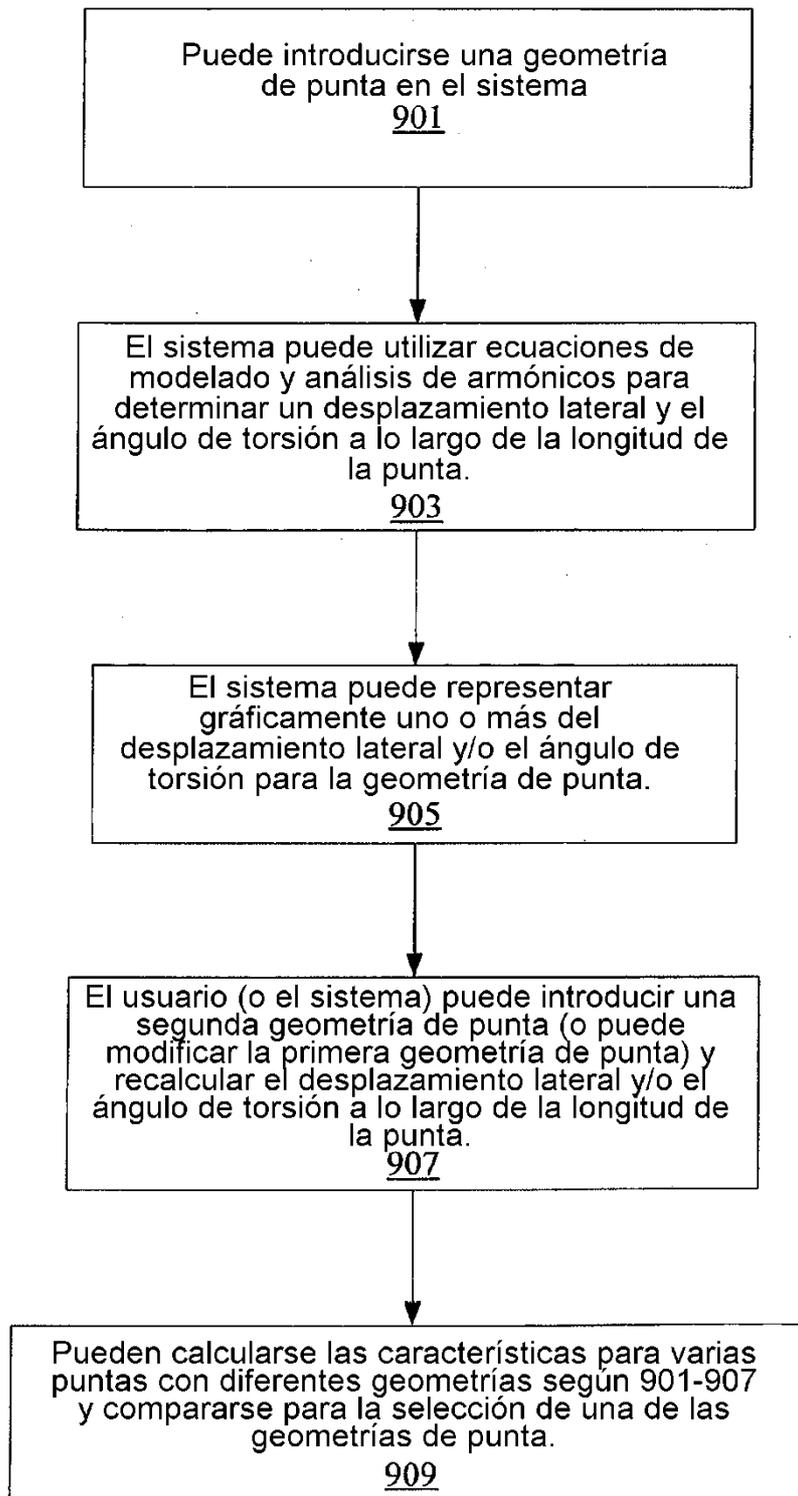
Entrada: forma de la punta



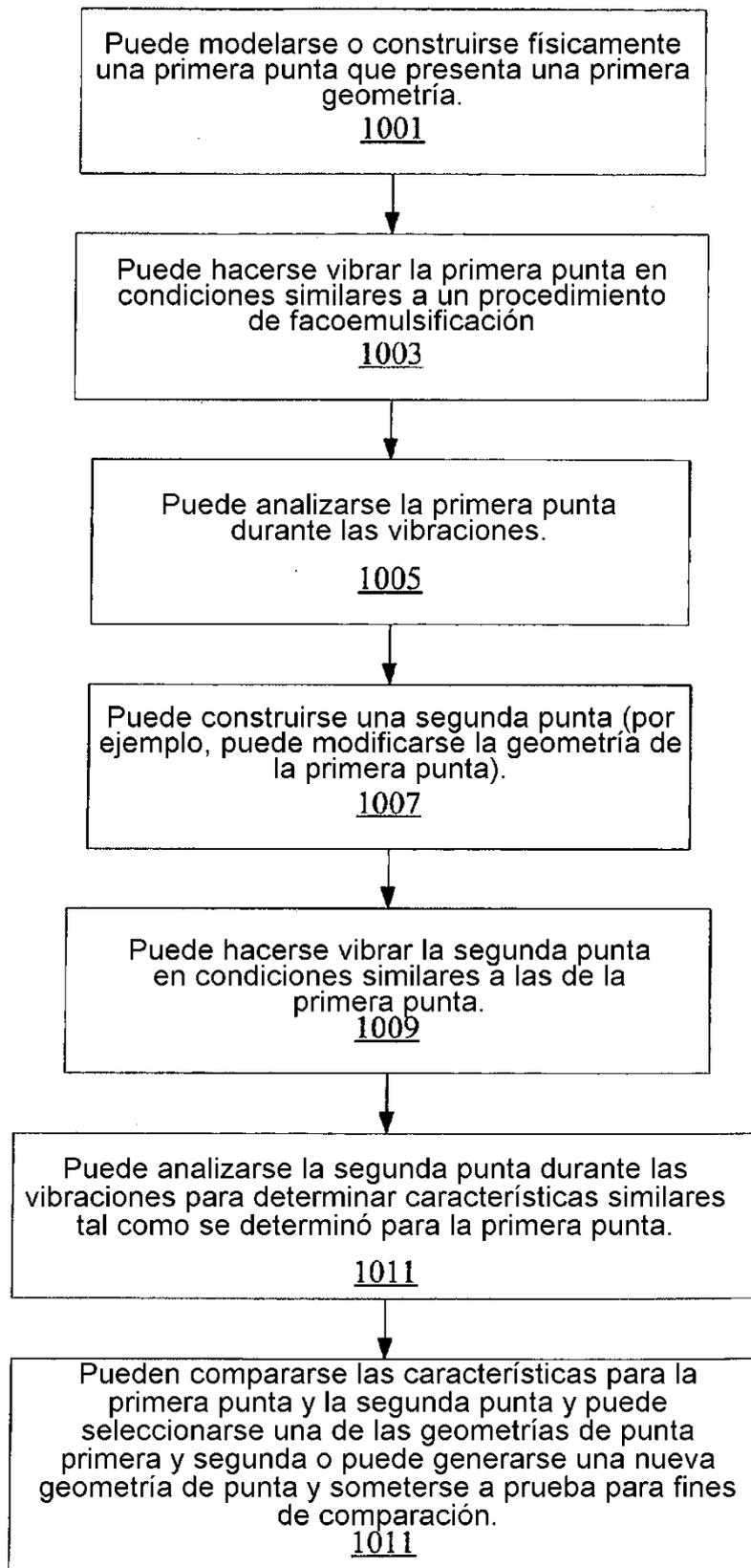
Salida: Desplazamientos de modo de torsión



**FIG. 8b**



**FIG. 9**



**FIG. 10**

Punta equilibrada	OD	ID	L	$L_e$	$x_1$	$x_2$	$\alpha_1$	$y_1$	$y_2$	$\alpha_2$	Bisel
Punta 1	.033	.0225	1.174	.308	.252	.153	-19	.152	.055	37	Hacia arriba 30 ó 45 grados
Punta 2	.033	.0225	1.175	.308	.258	.155	-19	.154	.060	36	Hacia abajo 30 grados
Punta 3	.0315	.0225	1.175	.308	.252	.153	-19	.152	.058	36	Hacia arriba 30 ó 45 grados
Punta 4	.0315	.0225	1.185	.308	.252	.153	-19	.152	.058	36	Hacia abajo 30 grados
Punta 5	.028	.020	1.177	.312	.238	.121	-12	.121	.043	27	Hacia arriba 30 ó 45 grados
Punta 6	.028	.020	1.187	.312	.244	.127	-12	.127	.049	27	Hacia abajo 30 grados

**FIG. 11**