

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 748 160**

51 Int. Cl.:

**G01C 19/5691** (2012.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **13.12.2011** **E 11193233 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **22.05.2019** **EP 2463623**

54 Título: **Giroscopio de resonador semiesférico de masa distribuida**

30 Prioridad:

**13.12.2010 US 966700**

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

**13.03.2020**

73 Titular/es:

**SYSTRON DONNER INERTIAL, INC. (100.0%)**  
**2700 Systron Drive**  
**Concord, CA 94518, US**

72 Inventor/es:

**PAINTER, CHRIS**

74 Agente/Representante:

**ELZABURU, S.L.P**

**ES 2 748 160 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

Giroscopio de resonador semiesférico de masa distribuida

**Antecedentes**

5 Durante muchos años, los giroscopios de resonador semiesférico se han empleado ampliamente y se han considerado los sensores de rotación vibratoria con mejores rendimientos en el mercado. Un giroscopio de resonador semiesférico incluye una semiesfera de sílice fundida accionada por un electrodo forzador y detectada utilizando un conjunto diferente de electrodos transductores. El giroscopio de resonador semiesférico puede medir velocidades de rotación o ángulos de rotación a través del acoplamiento rotacional-vibracional (esto es, el acoplamiento de Coriolis) entre modos estructurales del giroscopio. Uno de los modos, denominado modo conductor o accionador, se hace inicialmente que oscile a altos niveles de velocidad. La fuerza de Coriolis inducida por la rotación acopla entonces el movimiento del primer modo en un modo estructural secundario con una magnitud proporcional a la magnitud de la rotación de entrada. Los modos vibratoriales usados más comúnmente en los giroscopios de resonador semiesférico son los dos modos  $\cos 2\theta$ , denominados por su forma del modo.

15 El tiempo de amortiguación ("ring down time") es un factor de calidad o mérito de cada giroscopio de resonador semiesférico y se designa comúnmente mediante el símbolo  $\tau$ . El tiempo de amortiguación se puede considerar la constante de decaimiento de la amplitud del resonador semiesférico del giroscopio si se eliminan todas las fuerzas externas y se deja que la semiesfera oscile libremente. El tiempo de amortiguación puede cuantificar también la cantidad del esfuerzo requerido para mantener el patrón de oscilación del resonador semiesférico, de tal forma que un resonador semiesférico con un tiempo de amortiguación mayor requiere menos esfuerzo. El tiempo de amortiguación es proporcional a la masa equivalente ( $m$ ) y al coeficiente de amortiguación ( $b$ ) del resonador semiesférico, siendo  $\tau = 2m/b$ . Como saben las personas expertas en la técnica, matemáticamente la masa equivalente de un giroscopio de resonador semiesférico se puede pensar que es equivalente a la de una serie de masas puntuales localizadas en los puntos de velocidad máxima o deformación máxima para las dos formas del modo, mientras que el resto de la semiesfera se considera que no tiene masa. En una semiesfera, la masa equivalente es aproximadamente igual a un tercio de la masa total de la semiesfera. Para aumentar el tiempo de amortiguación,  $\tau$ , se puede hacer mayor la masa equivalente del resonador semiesférico del giroscopio, típicamente aumentando el diámetro de la semiesfera. Sin embargo, hay muchas aplicaciones que necesitan una semiesfera de tamaño fijado o un giroscopio a escala micro en las cuales no es factible o práctico aumentar el tamaño de la semiesfera.

30 Por ejemplo, algunas aplicaciones (por ejemplo, aplicaciones personales o portátiles) pueden limitar o restringir el factor de forma de la semiesfera de tal forma que no sea mayor de un diámetro concreto. Además, algunas aplicaciones (por ejemplo, aplicaciones militares o para exterior) pueden restringir o condicionar la energía suministrada al giroscopio. Por ejemplo, en un medio ambiente con pérdida de energía el tiempo de amortiguación puede imponer la duración del período en el que el giroscopio continuará funcionando sin ser accionado. De este modo, aumentar el tiempo de amortiguación de un giroscopio de resonador semiesférico entra en conflicto típicamente con mantener el factor de forma del giroscopio. El documento de la patente de Estados Unidos US6640630B1 describe un giroscopio cilíndrico o semiesférico que tiene masas equivalentes colocadas contra la pared del cuerpo del giroscopio perpendicular a la dirección de la vibración del cuerpo del giroscopio. El documento de la patente de Estados Unidos US5712427A describe un sensor de rotación vibratorio semiesférico sin masas equivalentes adicionales. El documento de la patente EP1923667A2 describe un giroscopio cilíndrico en el que se disminuye la frecuencia de resonancia de los antinodos aumentando el espesor de la pared del resonador en los antinodos. El documento de la patente GB2272053 describe un giroscopio vibracional que comprende una campana resonadora cuyas masas están situadas en las líneas nodales de la campana resonadora.

**Compendio**

45 En vista de lo precedente, se proporciona un giroscopio de resonador semiesférico y métodos para fabricarlo y hacerlo funcionar. El giroscopio incluye un sustrato con un conjunto de electrodos transductores que se usan para detectar la orientación azimut del patrón de vibración de un resonador semiesférico y aplicar fuerzas de control, por ejemplo, para suprimir efectos de cuadratura no deseados. Se configura un electrodo transductor forzador en anillo para accionar el resonador semiesférico. Se puede aplicar voltaje al electrodo forzador para controlar la amplitud de la onda permanente asociada con el resonador. Los electrodos transductores del conjunto se pueden usar para determinar la situación y amplitud de la onda estacionaria y, adicionalmente, para aplicar fuerzas de control para, por ejemplo, suprimir efectos de cuadratura no deseados. Por ejemplo, los electrodos transductores pueden incluir electrodos condensadores. La capacidad eléctrica de los electrodos transductores se puede modular a la frecuencia de flexión del resonador. Los cambios de capacidad en los electrodos transductores se pueden usar luego para determinar velocidades de rotación o ángulos de rotación, mediante el acoplamiento rotacional-vibracional (por ejemplo, el acoplamiento de Coriolis) entre modos estructurales del giroscopio.

La masa equivalente del resonador semiesférico se puede aumentar colocando masas alrededor de la periferia del resonador semiesférico. Por ejemplo, se pueden colocar un conjunto de masas alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico. Las masas se pueden preparar con cualquier metal pesado, como wolframio,

oro, platino o plomo, o cualquier combinación suya. Las masas se pueden colocar en los puntos de máxima deformación o velocidad del resonador semiesférico. Por ejemplo, en algunas realizaciones, en un resonador que usa los dos modos vibracionales  $\cos 2\theta$ , se distribuyen ocho masas separadas entre sí por ángulos de aproximadamente 45 grados alrededor de la periferia del borde exterior del resonador. En algunas realizaciones, cada masa puede adoptar una forma que es simétrica respecto del vector radial que se dirige hacia afuera de dicha masa. Por ejemplo, se pueden usar masas circulares, cuadradas, rectangulares o con forma de cuña de pastel. Los pesos de las masas pueden ser idénticos en algunas realizaciones, y pueden depender de varios factores, entre los que se incluyen, por ejemplo, los niveles de amortiguación esperados y el tiempo de amortiguación deseado,  $\tau$ . En otras realizaciones, los pesos de las masas pueden variar alrededor de la periferia de la semiesfera, estando las masas más pesadas situadas en los puntos de deformación máxima asociados con los modos vibracionales del resonador. Las masas más ligeras se pueden colocar entre los puntos de máxima desviación, separadas entre sí por distancias iguales, alrededor de la periferia de la semiesfera.

En algunas realizaciones, se usa un diámetro de semiesfera de 2 mm (o menor) y las masas se colocan alrededor de la periferia del borde exterior de la semiesfera de tal modo que proporcionen un tiempo de amortiguación de al menos 500 segundos. El giroscopio se puede acoplar a, o poner en comunicación con un transceptor inalámbrico de tal forma que las medidas del giroscopio se pueden transmitir a un dispositivo de almacenamiento en red para su almacenamiento, procesado o registro. Las medidas se pueden transmitir también a un sistema de posicionamiento o navegación inercial. El sistema de posicionamiento o navegación inercial puede recibir también informaciones de entrada de otros sensores (por ejemplo, entradas de sensores de movimiento como acelerómetros) con el fin de determinar la posición, situación, u orientación de un objeto asociado con el giroscopio.

Por ejemplo, en algunas realizaciones, el objeto es un animal o una persona, y el giroscopio se asocia con el animal o la persona. El giroscopio se puede fijar a o integrar en una prenda que lleve el objeto (por ejemplo, una bota o un zapato). De manera alternativa o adicional, el giroscopio se puede fijar a o integrar en un elemento de joyería o relojería (como una pulsera o un reloj) que lleve el objeto. La naturaleza de micro-escala del giroscopio puede hacer que éste sea adecuado para muchas otras aplicaciones personales o portátiles.

En algunas realizaciones, se puede integrar el giroscopio en un sistema de navegación de un objeto motorizado que se mueve, o incluirlo como parte del mismo, tal como un vehículo a motor, una aeronave, un barco, o una nave espacial. En algunas realizaciones, el giroscopio se puede montar también sobre un objeto impulsado, como un misil guiado (por ejemplo, un misil balístico rápido) y usarlo como parte del sistema de guiado que guía el objeto impulsado en vuelo.

En algunas realizaciones, se pueden usar uno o más circuitos de control para controlar el funcionamiento del giroscopio. Los electrodos transductores pueden proporcionar señales proporcionales a las amplitudes de oscilación de la onda estacionaria principal (también llamada onda antinodal) y la onda estacionaria secundaria (denominada también onda de cuadratura nodal). La onda estacionaria principal se puede mantener con una amplitud determinada utilizando un circuito de control de amplitud. La onda estacionaria secundaria se puede llevar a cero utilizando un circuito de seguimiento de fase. El circuito de seguimiento de fase puede ser un circuito de retroalimentación, en algunas realizaciones, que puede detectar y converger en la frecuencia de resonancia y fase del giroscopio. La salida de este circuito de control se puede enviar a una circuitería de procesado de señal que mantiene la fase y velocidad correctas de los muestreos nodal y antinodal.

En algunas realizaciones, se proporciona un sensor de rotación que incluye un medio resonador para crear un patrón de vibración, medios para aumentar la masa equivalente del medio resonador, medios para accionar el medio resonador y medios para detectar la orientación del patrón de vibración. Los medios para aumentar la masa equivalente del medio resonador pueden incluir numerosas masas fijadas en ubicaciones adecuadas del medio resonador tal como, por ejemplo, a lo largo de la periferia del medio resonador.

La presente invención proporciona un giroscopio resonador semiesférico y un método para fabricarlo tal como se define en las reivindicaciones anexas.

### Breve descripción de los dibujos

La figura 1 es un diagrama de bloques de un sistema de aplicación de un giroscopio a escala micro.

La figura 2 es un diagrama de bloques de un sistema de navegación.

La figura 3 es un diagrama de bloques de los circuitos de control para controlar un giroscopio.

La figura 4 es una vista en perspectiva del despiece ordenado de un giroscopio.

La figura 5 muestra los modos de oscilación ilustrativos del giroscopio mostrado en la figura 4.

Las figuras 6A y 6B son una vista en perspectiva y una vista superior, respectivamente, de un resonador semiesférico con masas en forma de trozo de tarta distribuidas a lo largo de la periferia del borde del resonador.

Las figuras 7A y 7B son una vista en perspectiva y una vista lateral de una sección transversal del resonador ilustrativo de las figuras 6A y 6B.

Las figuras 8A y 8B son una vista en perspectiva y una vista en perspectiva de una sección transversal de un montaje de un giroscopio usado en la fabricación del giroscopio mostrado en la figura 4.

5 La figura 9 es una vista en perspectiva del despiece ordenado del molde mostrado en las figuras 8A y 8B.

La figura 10 es un diagrama de flujo de bloques de un procedimiento para fabricar el giroscopio mostrado en la figura 4.

Y la figura 11 es un diagrama de flujo de bloques de un procedimiento para distribuir masas a lo largo del borde del resonador mostrado en las figuras 6A y 6B.

### Descripción detallada

10 Un giroscopio de escala micro incluye un sustrato con electrodos transductores que se usan para detectar la orientación azimut de un patón de vibración de un resonador semiesférico. Aunque en este documento se usa el término giroscopio, de manera más general el giroscopio puede ser un sensor de rotación o un sensor de vibración con un resonador semiesférico. Se configura un electrodo forzador de anillo para accionar el resonador semiesférico. Se puede aplicar voltaje al electrodo forzador para controlar la amplitud de la onda estacionaria asociada con el resonador y para, por ejemplo, suprimir efectos de cuadratura no deseados. Los electrodos transductores, por ejemplo, electrodos condensadores, se pueden usar para determinar la ubicación y la amplitud de la onda estacionaria y adicionalmente para aplicar fuerzas de control para, por ejemplo, suprimir efectos de cuadratura no deseados. La capacidad eléctrica de los electrodos transductores se puede modular a la frecuencia de flexión del resonador. Los cambios de capacidad de los electrodos transductores se pueden usar para determinar velocidades de rotación o ángulos de rotación mediante el acoplamiento vibracional-rotacional (por ejemplo, acoplamiento de Coriolis) entre modos estructurales del giroscopio.

15 La masa equivalente del resonador semiesférico se aumenta colocando masas alrededor de la periferia del resonador semiesférico. Las masas se colocan alrededor de la periferia del borde exterior de la semiesfera. Las masas pueden estar hechas de un metal pesado como wolframio, oro, platino o plomo, o cualquier combinación de los mismos. Las masas se colocan en puntos de máxima deformación o velocidad del resonador. Por ejemplo, en un resonador que usa los modos vibratorios  $\cos 2\theta$ , se distribuyen ocho masas separadas entre sí por ángulos de aproximadamente 45 grados alrededor de la periferia del borde exterior del resonador. La forma de cada masa es simétrica respecto del vector radial que se dirige hacia afuera de dicha masa. Por ejemplo, se pueden usar masas circulares, cuadradas, rectangulares o con forma de cuña de pastel. Los pesos de las masas pueden ser sustancialmente idénticos (es decir, dentro de las tolerancias de fabricación de 0-5 %) y/o pueden depender de varios factores, entre los que se incluyen, por ejemplo, los niveles de amortiguación esperados y el tiempo de amortiguación deseado,  $\tau$ . Los pesos de las masas individuales pueden variar alrededor de la periferia de la semiesfera, estando las masas más pesadas situadas en los puntos de deformación máxima asociados con los modos vibratorios del resonador. Las masas más ligeras se pueden colocar entre los puntos de máxima deformación, preferiblemente separadas entre sí por distancias iguales, alrededor de la periferia de la semiesfera.

20 La figura 1 muestra un sistema de aplicación 100 que incluye un giroscopio de escala micro 102 y un procesador de señal 104. Debido al factor de forma de escala micro del giroscopio 102, el giroscopio 102 se puede usar en una amplia variedad de aplicaciones personales y portátiles. Por ejemplo, tal como se describe con más detalle más adelante, en algunas realizaciones el giroscopio 102 incluye un resonador semiesférico con un diámetro de 2 mm (o menos) y un factor de forma total de menos de 3 mm. Además de su pequeño factor de forma, el tiempo de amortiguación mejorado del giroscopio 102 puede hacer que el giroscopio 102 sea adecuado para aplicaciones en medios limitados, restringidos o con pérdida de energía. Por ejemplo, el giroscopio 102 se puede usar en aplicaciones militares o al aire libre en las cuales el suministro de energía es intermitente, está limitado o no está disponible durante periodos de tiempo limitados. El procesador de señal 104, que puede incluir circuitería de procesamiento de señal, tal como un procesador de señal digital (DSP, por sus siglas en inglés), se puede acoplar al giroscopio 102. El procesador de señal 104 puede procesar las medidas recibidas del giroscopio 102 sobre una base periódica o continua, con el fin de producir medidas de la velocidad de rotación o del ángulo de rotación. El procesador de señal 104 puede también filtrar, amplificar, mejorar o ecualizar cualquiera de las señales recibidas del giroscopio 102 así como controlar los modos de funcionamiento del giroscopio 102, tal como se describe más adelante con mayor detalle.

25 Entre las aplicaciones ilustrativas del giroscopio 102 se incluyen, como se muestra, su uso en prendas de vestir 106, en vehículos de motor 108, en aeronaves 110, en barcos o submarinos 112 y en misiles guiados 116. El giroscopio 102 puede estar unido a una prenda 106 o integrado en la misma, la cual está asociada con un objeto (por ejemplo, un animal o una persona). La prenda o elemento de vestuario 106 puede ser cualquiera que se pueda llevar, como zapatos, botas, sombreros, cascos, guantes o cualquier otra prenda o accesorio. El giroscopio 102 puede estar integrado dentro de la prenda 106 (por ejemplo, dentro de la suela o de la lengüeta de una bota o zapato) de tal forma que está fijado a la misma de forma permanente o semipermanente. La prenda 106 puede ser también un accesorio de joyería o relojería, como una pulsera o reloj. El giroscopio 106 puede estar unido al elemento de joyería

(por ejemplo, como una unidad funcional) o bien estar integrado en el mismo.

Como ejemplo, el giroscopio 102 puede estar incorporado en el zapato o bota del personal militar que está en el terreno. El giroscopio 102 puede ser parte de un sistema de rastreo, posicionamiento o ubicación, como se describe con más detalle más adelante en relación con la figura 2. El sistema de rastreo, posicionamiento o ubicación se puede usar para rastrear o controlar la posición, ubicación u orientación del personal militar que lleva la bota o zapato.

El giroscopio 102 puede estar también incorporado, o incluido como parte suya, en el sistema de navegación de un objeto motorizado que se mueve, tal como un vehículo a motor 108, una aeronave 110, un barco o submarino 112 o un vehículo espacial 114. En algunas realizaciones, el giroscopio 102 se puede montar también en un objeto propulsado, tal como un misil guiado 116 (por ejemplo, un misil balístico de flota) y se puede usar como parte del sistema de guía del objeto propulsado.

La figura 2 muestra un sistema de navegación / posicionamiento 200 que incluye un sensor de rotación 202, un sensor de movimiento 204, un procesador de señal 206, un transceptor inalámbrico 208 y un sistema inercial de navegación / posicionamiento 210. El sensor de rotación 202 (por ejemplo, el giroscopio 102 de la figura 1) puede medir la velocidad de rotación o el ángulo de rotación de un objeto asociado con el sensor de rotación 202 (por ejemplo, una persona, un vehículo de motor, una aeronave, un submarino, etc.). Se puede proporcionar la salida del sensor de rotación 202 al procesador de señal 206. El procesador de señal 206 puede incluir uno o más microprocesadores, convertidores de analógico a digital, archivadores, amplificadores, lógica de control y circuitería relacionada para procesar la salida del giroscopio 202 y puede realizar cualquier operación de procesamiento de señal adecuada (por ejemplo, filtrado, amplificación o ecualización) de cualquiera de sus entradas. El procesador de señal 206 se puede configurar para convertir una o más salidas del giroscopio 202 en una velocidad de rotación o un ángulo de rotación, tal como se describe con más detalle más adelante en el texto.

El procesador de señal 206 puede recibir también señales de salida en uno o más casos del sensor de movimiento 204. El sensor de movimiento 204 puede incluir cualquier tipo de detector o sensor de movimiento, incluyendo, por ejemplo, un acelerómetro de un solo eje o multieje. El procesador de señal 206 puede convertir una salida del sensor de movimiento 204 en, por ejemplo, una cantidad de aceleración relativa a un marco inercial. El procesador de señal 206 puede estar en comunicación con el transceptor inalámbrico 208, o eléctricamente acoplado con él. El transceptor inalámbrico 208 puede transmitir de manera inalámbrica las medidas de rotación y/o de movimiento del sensor de rotación 202 y/o del sensor de movimiento 204 al sistema inercial de navegación / posicionamiento 210. El sistema inercial de navegación / posicionamiento 210 puede determinar, por ejemplo, la localización, dirección (por ejemplo, orientación) y velocidad de un objeto asociado con el sensor de rotación 202 y/o con el sensor de movimiento 204. Por ejemplo, el sistema inercial de navegación / posicionamiento 210 puede determinar la ubicación, dirección y velocidad de uno o más de los siguientes objetos: persona asociada con una prenda 106 (figura 1), vehículo 108 (figura 1), aeronave 110 (figura 1), barco o submarino 112 (figura 1), nave espacial 114 (figura 1) y misil 116 (figura 1).

El procesador de señal 206 puede controlar también el funcionamiento del sensor de rotación 202, del sensor de movimiento 204, o de ambos. Por ejemplo, el procesador de señal 206 puede determinar la frecuencia de las medidas y la duración y los modos de funcionamiento del sensor de rotación 202, del sensor de movimiento 204 o de ambos. El procesador de señal 206 puede consultar a uno o más de los elementos sensor de rotación 202 y sensor de movimiento 204 para actualizar periódicamente las medidas (esto es, siguiendo una programación regular, por ejemplo, cada segundo) continuamente, o después de algún evento predefinido (esto es, para apoyar consultas motivadas por eventos).

La figura 3 muestra los circuitos de control 300 usados para controlar el funcionamiento del giroscopio 302. Las pequeñas amplitudes de deformación del esqueleto del resonador asociado con el giroscopio 302 pueden corresponder a la onda estacionaria principal y a la onda estacionaria secundaria. Cuando la onda estacionaria principal y la onda estacionaria secundaria están en fase (y en el caso especial en que sean de igual amplitud), el resultado de superponer la onda estacionaria principal y la onda estacionaria secundaria es una onda estacionaria similar cuyos lóbulos (antinodos) y nodos están a mitad de camino entre los nodos y antinodos de la onda estacionaria principal y la onda estacionaria secundaria.

Para controlar el giroscopio 302, una de las ondas estacionarias (esto es, la onda estacionaria principal o la onda antinodal) se mantiene a una amplitud impuesta. La otra onda (es decir, la onda estacionaria secundaria o la onda de cuadratura nodal) se pueden llevar a cero. En el modo de reequilibrio, se pueden desarrollar fuerzas adicionales para mantener la onda estacionaria en una situación fijada. Para poner en práctica los circuitos de control 300, se procesan las salidas de los electrodos transductores asociados con el giroscopio 302 para proporcionar señales proporcionales a las amplitudes de oscilación de la onda estacionaria principal (antinodal) y a la onda de cuadratura nodal. En el funcionamiento de reequilibrio, las señales leídas pueden proporcionar las señales deseadas debido a que los electrodos transductores se pueden posicionar directamente sobre los antinodos y los nodos de las ondas antinodal y de cuadratura nodal en algunas realizaciones.

Las señales antinodal y de cuadratura nodal se pueden desmodular respecto de las señales de un oscilador de

referencia para proporcionar salidas que son proporcionales a sus componentes oscilatorios que están en fase (por ejemplo, la salida coseno antinodal 310 y la salida coseno nodal 306) y en cuadratura (salida seno antinodal 308 y salida seno nodal 304) con el oscilador de referencia. La frecuencia y la fase del oscilador de referencia se pueden controlar mediante un circuito de seguimiento de fase que ajusta la frecuencia y la fase del oscilador de referencia de tal modo que lleva la salida seno antinodal 308 a cero. Llevar a cero la salida seno antinodal 308 puede hacer que el oscilador de referencia siga la frecuencia y fase de la onda principal (por ejemplo, antinodal). La salida coseno antinodal 310 puede entonces proporcionar una medida de la amplitud de la onda estacionaria y se puede usar como variable de control por la lógica de control de la amplitud 312 usada para mantener la amplitud igual a un valor predeterminado.

5  
10 La lógica de control de seguimiento de fase 314 puede mantener la fase del oscilador de referencia igual a la fase de la onda antinodal. La salida seno nodal 304 puede ser proporcional a la amplitud de la onda de cuadratura nodal. Por lo tanto, la salida seno nodal 304 se puede usar como variable de control en el circuito cerrado que lleva la amplitud de la onda de cuadratura nodal a cero (por ejemplo, usando la lógica de control de cuadratura 318), asegurando, de este modo, que la onda principal sea una onda estacionaria pura.

15 Se puede realizar una operación de reequilibrio (por ejemplo, usando la lógica de reequilibrio y control de velocidad 316), ejerciendo fuerzas de la fase correcta en los nodos de la onda estacionaria de manera que se anule la salida coseno nodal 306. La amplitud de la fuerza necesaria se relaciona con la velocidad de rotación del giroscopio 302 que está intentando rotar la onda estacionaria y crear de este modo una salida coseno nodal 306 que no sea cero. Como se ha mencionado previamente, durante una operación de reequilibrio, los electrodos transductores pueden definir la ubicación de los antinodos y los nodos de las dos ondas y por lo tanto las salidas de los electrodos desmoduladas se pueden usar directamente como variables de control en los diversos circuitos.

20  
25 El circuito de seguimiento de fase controlado por la lógica de control de seguimiento de fase 314 puede ser un circuito de retroalimentación, el cual detecta y converge en la fase y frecuencia de resonancia única del giroscopio 302. La salida de este circuito de control puede generar un control de frecuencia específica para el procesado de señal digital (por ejemplo, procesador de señal 206 (figura 2) o procesador de señal 104 (figura 1)), que mantiene la velocidad correcta y la fase de los muestreos nodal y antinodal.

30 La figura 4 muestra un giroscopio 400 que incluye una carcasa 402, un resonador 404 y los electrodos transductores 406. El giroscopio 400 puede incluir un cierto número de electrodos 422 que están metalizados en la superficie interior de la carcasa externa 402, la cual puede ser concéntrica con el resonador en forma de concha semiesférica 404. Los electrodos 422 en la carcasa exterior 402 junto con la superficie del resonador en forma de concha semiesférica 404 forman una serie de condensadores electrostáticos forzadores. Se puede aplicar voltaje a las combinaciones de electrodos 422 para controlar la amplitud de la onda estacionaria y para suprimir efectos de cuadratura no deseados.

35 El giroscopio 400 se puede hacer girar alrededor de un eje normal al plano del borde 434 del resonador en forma de concha semiesférica 404. Esta rotación provoca que la onda estacionaria gire en la dirección opuesta respecto del giroscopio 400 en un ángulo proporcional al ángulo de rotación del giroscopio 400. De este modo, midiendo el ángulo de rotación de la onda estacionaria respecto del giroscopio 400, se puede determinar el ángulo de rotación del giroscopio 400.

40 El modo vibracional del resonador en forma de concha semiesférica 404 se puede excitar colocando un voltaje de polarización de corriente continua DC en el resonador y un voltaje de corriente alterna AC en el electrodo forzador con forma de anillo 420. La frecuencia del voltaje AC puede ser el doble de la frecuencia de resonancia del resonador en forma de concha semiesférica 404 en algunas realizaciones.

45 Las señales procedentes del giroscopio 400 contienen información acerca de la amplitud y de la ubicación de la onda estacionaria del resonador en forma de concha semiesférica 404. Estas señales se pueden obtener capacitivamente. Los electrodos transductores 406 y 424 pueden estar formados por la superficie interior metalizada 430 del resonador en forma de concha semiesférica 404 y pueden estar situados sobre una carcasa concéntrica interior mantenida muy cerca de la carcasa metalizada interior del resonador en forma de concha semiesférica 404. Debido a la deformación oscilante de la concha, la capacidad de cada uno de los electrodos transductores 406 y 424 se puede modular a la frecuencia de flexión del resonador. Se pueden usar circuitos electrónicos, por ejemplo, para medir estos cambios en la capacidad a partir de los cuales se pueden determinar la ubicación y la amplitud de la onda estacionaria.

50  
55 La figura 5 muestra vistas de los modos estructurales 500 y 502 del borde de la semiesfera del giroscopio 400 de la figura 4. Generalmente, el resonador semiesférico de un giroscopio de resonador semiesférico tiene dos modos estructurales que comprenden los modos primarios de funcionamiento del giroscopio. Los dos modos estructurales pueden corresponder a modos estructurales 500 y 502. El resonador semiesférico se puede conducir inicialmente a un patrón de oscilación primario como se muestra en el modo estructural 500. La fuerza de Coriolis inducida por rotación puede causar la precesión del patrón de oscilación primario al modo estructural 502. La precesión puede ser proporcional, por ejemplo, a la velocidad y al ángulo de rotación. El patrón de oscilación vibratoria inicial 504 y el patrón de oscilación tras la precesión 506 que corresponden a los modos estructurales 500 y 502 se muestran

superpuestos en el borde de la semiesfera 505.

Las figuras 6A-6B muestran un resonador semiesférico 600. El resonador semiesférico 600 puede estar soportado por una varilla 604 y puede reemplazar al resonador con forma de concha semiesférica 404 (figura 4) del giroscopio 400 (figura 4) en algunas realizaciones. El resonador semiesférico 600 se puede fabricar, por ejemplo, utilizando procedimientos compatibles con el micromecanizado como, por ejemplo, la deposición de capas atómicas de óxido. Se colocan masas distribuidas 602 sobre el borde del resonador semiesférico 600 con el fin de aumentar la masa equivalente del resonador. En algunas realizaciones, las masas distribuidas 602 pueden estar hechas de cualquier material pesado (por ejemplo, un metal pesado) propicio para la fabricación a escala micro, como, por ejemplo, oro, platino, wolframio, plomo, o cualquier combinación suya. El uso de un metal pesado para las masas distribuidas 602 puede optimizar el aumento de masa dado un factor de forma geométrico restringido del giroscopio. En algunas realizaciones, las masas distribuidas 602 se pueden fabricar utilizando electrodeposición.

Aumentando la masa equivalente del resonador semiesférico 600, se puede aumentar también el tiempo de amortiguación,  $\tau$ , del giroscopio 400. El tiempo de amortiguación se puede considerar la constante de decaimiento de la amplitud del resonador semiesférico 600 si se eliminan todas las fuerzas externas y se deja que el resonador semiesférico 600 oscile libremente. El tiempo de amortiguación puede cuantificar también la cantidad de esfuerzo requerido para mantener el patrón de oscilación de la semiesfera, de tal forma que una semiesfera con un tiempo de amortiguación mayor requiere menos esfuerzo. El tiempo de amortiguación es proporcional a la masa equivalente ( $m$ ) y al coeficiente de amortiguación ( $b$ ) del resonador semiesférico 600, siendo  $\tau = 2m/b$ .

Las masas distribuidas 602 se colocan alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico 600. Las masas se posicionan en los puntos de máxima deformación o velocidad del resonador. Por ejemplo, en algunas realizaciones, en un resonador que usa los modos vibracionales  $\cos 2\theta$ , se distribuyen ocho masas espaciadas entre sí por ángulos de aproximadamente 45 grados alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico 600. En otras realizaciones se pueden colocar alrededor del borde exterior del resonador semiesférico 600 más masas o masas más pequeñas. En algunas realizaciones, cada masa puede adoptar una forma que es simétrica respecto del vector radial que se dirige hacia afuera de dicha masa. Por ejemplo, se pueden usar masas circulares, cuadradas, rectangulares o con forma de cuña de pastel. Los pesos de las masas pueden ser sustancialmente idénticos en algunas realizaciones, y pueden depender de varios factores, entre los que se incluyen, por ejemplo, los niveles de amortiguación esperados y el tiempo de amortiguación deseado,  $\tau$ . En otras realizaciones, los pesos de las masas pueden variar alrededor de la periferia de la semiesfera, estando las masas más pesadas situadas en los puntos de deformación máxima asociados con los modos vibracionales del resonador. Las masas más ligeras se pueden colocar entre los puntos de máxima desviación, separadas entre sí por distancias angulares iguales, alrededor de la periferia de la semiesfera.

La figura 6B es una vista superior del resonador semiesférico 650 que muestra ocho masas distribuidas 602 igualmente espaciadas entre sí alrededor del borde exterior del resonador semiesférico 650. Como se ha mencionado anteriormente, se pueden posicionar más masas, o masas más pequeñas alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico 600, en otras realizaciones. El número real de masas escogido para su distribución sobre el resonador semiesférico 650 se puede basar, al menos en parte, en los modos vibracionales usados para accionar el resonador semiesférico 650. Como se ha mencionado previamente, si se usan los modos vibracionales  $\cos 2\theta$ , entonces se pueden colocar ocho masas en los puntos de máxima deformación del resonador semiesférico 650. Si se usan modos vibracionales de orden superior para accionar el resonador semiesférico 650, entonces se puede posicionar un número mayor de masas alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico 650. Por ejemplo, se pueden posicionar 10, 12, 16, 18, 24 o más masas alrededor de la periferia del borde exterior del resonador semiesférico, en algunas realizaciones.

Las figuras 7A-7B muestran una mitad 700 del resonador semiesférico 600. Como se muestra en la mitad 700, la forma de la masa 602-1 puede ser simétrica alrededor del vector radial 702 que va hacia afuera de la masa. Aunque en el ejemplo de la figura 7 se muestran masas con forma de cuñas de pastel, se pueden usar otras formas para las masas, entre las que se incluyen formas circulares, cuadradas o rectangulares. En la vista lateral transversal del resonador semiesférico 750, se puede ver la masa 602-1 adherida al borde exterior del resonador semiesférico 750 sobre el plano 752. La masa 602-1, al igual que las otras masas fijadas al borde exterior del resonador semiesférico 750, se pueden adherir utilizando cualquier técnica adecuada. Por ejemplo, tal como se describe en relación con las figuras 8A-8B y 9, más adelante, se pueden estampar las masas utilizando electrodeposición de un metal pesado, como oro, platino, wolframio o plomo.

Las figuras 8A-8B muestran un montaje 800 de un giroscopio con resonador semiesférico usado en la fabricación del giroscopio 600. Los montajes del giroscopio con resonador semiesférico 800 y 850 incluyen una semiesfera fabricada utilizando la deposición de una capa atómica de una película delgada de óxido en un micro molde 802, donde el molde puede convertirse, eventualmente, en parte del montaje completo. Antes del depósito del óxido, se depositan electrodos metálicos y se les modela para formar electrodos transductores. Una vez depositados los electrodos, se deposita una capa de protección que se eliminará para definir el hueco entre la semiesfera y los electrodos. A continuación, se forma la semiesfera utilizando deposición de una capa atómica de, por ejemplo, una película delgada de óxido o nitruro con una película delgada de metal depositada en el plano medio de la semiesfera para proporcionar el contacto eléctrico usado en la transducción electrostática de la semiesfera. Una vez depositada

la semiesfera, se pueden añadir entonces las masas 602 utilizando electrodeposición de un metal pesado, como oro, platino, wolframio o plomo. Además de crear las masas, la electrodeposición puede añadir simultáneamente el anillo de refuerzo 804 alrededor de la periferia de la semiesfera para proporcionar las fuerzas electrostáticas para accionar la estructura. Después del proceso de electrodeposición, se puede eliminar la capa de protección para formar una semiesfera independiente conectada al sustrato mediante una varilla o vástago (por ejemplo, la varilla 604 de la figura 6) situada en la base de la semiesfera.

La figura 9 muestra un montaje 900 de un giroscopio con resonador semiesférico. El montaje 900 puede incluir un sustrato 902, que puede estar compuesto de silicio. Se puede crear un molde utilizando grabado isotrópico del sustrato 902. Se pueden imprimir a continuación electrodos metálicos 908 para que sirvan como los electrodos de transducción. Aunque en el ejemplo del montaje 900 se muestran ocho electrodos 908, en las ejecuciones reales se pueden incluir más o menos electrodos (por ejemplo, 12 o 16 electrodos). El resonador semiesférico 904 se puede conformar utilizando depósito en capas sobre una capa de protección que se retira. Luego, se modelan las masas de metal pesado sobre el resonador semiesférico. El electrodo forzador 906 se puede conformar a la vez que las masas utilizando una técnica de electrodeposición y puede servir para accionar el resonador semiesférico 904. Aunque en algunas realizaciones se usa la activación electrostática (por ejemplo, para excitar y accionar el oscilador del giroscopio), en otras realizaciones se pueden usar otras técnicas de accionamiento, como accionamiento piezoeléctrico, magnético, térmico u óptico. En tales casos, un actuador piezoeléctrico, magnético, térmico u óptico puede reemplazar al electrodo forzador 906. Además, aunque se pueden usar en algunas realizaciones sensores o mecanismos de detección capacitivos, se pueden usar en otras realizaciones otras formas de detección (como detección piezoeléctrica, piezoresistiva, óptica o magnética), en cuyo caso los electrodos metálicos 908 se pueden reemplazar por un sensor o elemento de detección piezoeléctrico, piezoresistivo, óptico o magnético adecuado.

En relación con la figura 10, con referencia adicional a las figuras 1-9, se muestra un procedimiento 1000 de fabricación de un giroscopio 400 que incluye las etapas indicadas. Sin embargo, el procedimiento 1000 es solo un ejemplo no limitador. El procedimiento 1000 se puede alterar, por ejemplo, añadiéndole etapas, o quitándolas, o reordenándolas, o combinándolas, o llevándolas a cabo de manera simultánea, de forma parcial o bien totalmente.

En la etapa 1002, se graba o moldea una cavidad semiesférica en un sustrato. Por ejemplo, en algunas realizaciones, el sustrato puede estar hecho de silicio. En la etapa 1004, se dibujan y depositan los electrodos transductores. Por ejemplo, los electrodos transductores se pueden diseñar y depositar sobre el sustrato 902 (figura 9). En la etapa 1006, se deposita una capa de protección de forma que defina el hueco o espacio entre el resonador semiesférico (que se formará en la etapa 1008) y los electrodos. En la etapa 1008, el resonador semiesférico se forma utilizando deposición de capa atómica sobre la capa de protección que se elimina y que fue depositada en la etapa 1006. En la etapa 1010, usando un proceso de electrodeposición, se añaden varias masas al borde del resonador semiesférico. Durante el mismo proceso de electrodeposición, se puede formar simultáneamente con las varias masas un electrodo de anillo de fuerza, utilizando una única etapa de electrodeposición. En la etapa 1012 se elimina la capa de protección para formar un resonador semiesférico independiente soportado en un vástago.

Aunque el procedimiento 1000 describe una técnica específica para crear el giroscopio 400, se pueden usar también muchas otras técnicas. Por ejemplo, se puede usar la técnica de micromoldeo en lugar de, o además de la técnica de deposición de capas atómicas descrita anteriormente. Como otro ejemplo, se puede usar un proceso de grabado en seco o en húmedo en lugar de, o además de la técnica de deposición de capas atómicas descrita anteriormente. También se pueden usar otros procedimientos adecuados de fabricación.

En relación con la figura 11, con referencia adicional a las figuras 1-9, se describe un procedimiento 1100 para depositar masas sobre el resonador 600 que incluye las etapas indicadas. Sin embargo, el procedimiento 1100 es solo un ejemplo no limitador. El procedimiento 1100 se puede alterar, por ejemplo, añadiéndole etapas, o quitándolas, o reordenándolas, o combinándolas, o llevándolas a cabo de manera simultánea, de forma parcial o bien total.

En la etapa 1102, se recibe información de la escala deseada del giroscopio y del tiempo de amortiguación deseado. Por ejemplo, se pueden recibir especificaciones que hacen referencia a un giroscopio de escala micro con un diámetro de resonador de 2 mm y un tiempo de amortiguación de 500 segundos. Tomando como base al menos en parte las especificaciones, se pueden seleccionar los modos de funcionamiento del giroscopio en la etapa 1104. Por ejemplo, tal como se describe previamente, los modos vibracionales usados más comúnmente en un resonador semiesférico de un giroscopio son los dos modos  $\cos 2\theta$ . Los modos de orden mayor o menor también se pueden escoger en la etapa 1104. En la etapa 1106, se determinan los puntos de máxima deformación del resonador tomando como base, al menos en parte, los modos vibracionales escogidos. Por ejemplo, usando los modos vibracionales  $\cos 2\theta$  mencionados previamente, hay ocho puntos de máxima deformación, estando separados cada par de puntos entre sí por aproximadamente  $45^\circ$  alrededor de la periferia del resonador. En la etapa 1108, los pesos de las masas a colocar en los puntos de máxima deformación se calculan tomando como base, al menos en parte, el tiempo de amortiguación deseado.

Por ejemplo, tal como se describe previamente, el tiempo de amortiguación de un giroscopio se puede aumentar aumentando la masa equivalente del resonador del giroscopio. El tiempo de amortiguación se puede considerar la constante de decaimiento de la amplitud de la semiesfera del giroscopio si se eliminan todas las fuerzas externas y

se deja que la semiesfera oscile libremente. El tiempo de amortiguación puede cuantificar también la cantidad de esfuerzo requerido para mantener el patrón de oscilación de la semiesfera, de tal forma que una semiesfera con un tiempo de amortiguación mayor requiere menos esfuerzo. El tiempo de amortiguación,  $\tau$ , es proporcional a la masa equivalente ( $m$ ) y al coeficiente de amortiguación ( $b$ ) de la semiesfera, siendo  $\tau = 2m/b$ .

5 En la etapa 1110, las masas se depositan a lo largo de la periferia del resonador del giroscopio con el fin de aumentar la masa equivalente del resonador. Las masas se colocan en los puntos de máxima deformación o velocidad del resonador. Por ejemplo, como se muestra en el ejemplo de la figura 6, se pueden colocar ocho masas a lo largo del borde exterior del resonador 600 (figura 6) separadas entre sí aproximadamente 45 grados. Esta colocación puede corresponder a los ocho puntos de máxima deformación del resonador usando los dos modos  $\cos 2\theta$  mencionados previamente. Los ocho puntos de máxima deformación del resonador pueden resultar del patrón de oscilación vibratorio inicial 504 (figura 5) y del patrón de oscilación tras la precesión 506 (figura 5) que corresponden a los modos estructurales 500 (figura 5) y 502 (figura 5). Se pueden colocar más o menos masas sobre el resonador en otras realizaciones.

15 En algunas realizaciones, la forma de cada masa puede ser cualquiera que sea simétrica respecto del vector radial que se dirige hacia afuera de dicha masa. Por ejemplo, se pueden usar masas circulares, cuadradas, rectangulares o con forma de cuña de pastel. Los pesos de las masas pueden ser sustancialmente idénticos en algunas realizaciones y pueden depender de varios factores, entre los que se incluyen, por ejemplo, los niveles de amortiguación esperados y el tiempo de amortiguación deseado,  $\tau$ . En otras realizaciones, los pesos de las masas individuales pueden variar alrededor de la periferia de la semiesfera, estando las masas más pesadas situadas en los puntos de deformación máxima asociados con los modos vibracionales del resonador. Las masas más ligeras se pueden colocar entre los puntos de máxima deformación, preferiblemente separadas entre sí por distancias iguales, alrededor de la periferia de la semiesfera.

25 Se pueden proporcionar diversas modificaciones, montajes y construcciones alternativas y equivalentes, de acuerdo con la invención, tal como se define en las reivindicaciones anexas. Por ejemplo, uno o más elementos descritos previamente pueden ser un componente de un sistema más grande en el cual pueden ser prioritarias otras reglas o, de lo contrario, modificar la aplicación del ejemplo o elemento concreto. Asimismo, se puede llevar a cabo un cierto número de etapas antes, durante o después de que se consideren los elementos anteriores. Por consiguiente, la descripción anterior no limita el alcance de esta publicación, incluyendo las reivindicaciones anexas, a los ejemplos proporcionados.

30

**REIVINDICACIONES**

1. Un giroscopio (400) que comprende:  
un resonador semiesférico (600, 650, 700, 750) que incluye una cavidad y un borde (505) que rodea la cavidad, de forma que el borde define un plano (752); y
- 5 un conjunto de masas (602-1, 602-2, 602-3, 602-4, 602-5, 602-6, 602-7, 602-8) colocada sobre el plano (752) del borde y de forma que cada una de las masas del conjunto se extiende hacia afuera desde el borde y hacia adentro desde el borde, donde al menos algunas masas del conjunto están colocadas en los puntos de máxima deformación del resonador semiesférico y se configuran para aumentar la masa equivalente del resonador; donde el giroscopio (400) se hace funcionar con una onda estacionaria en el resonador semiesférico (600, 650, 700, 750); y donde los puntos de máxima deformación en el resonador semiesférico toman como base modos de funcionamiento escogidos del giroscopio incluyendo modos vibracionales escogidos.
- 10
2. El giroscopio de la reivindicación 1, en el que las masas del conjunto están espaciadas a intervalos iguales alrededor del borde del resonador semiesférico.
- 15
3. El giroscopio de la reivindicación 1 o de la reivindicación 2 en el que las masas del conjunto se componen de un metal pesado escogido en el grupo que consiste en oro, platino, wolframio y plomo.
4. El giroscopio de cualquier reivindicación precedente en el que las masas del conjunto están colocadas en puntos de máxima deformación del resonador semiesférico vibratorio
5. El giroscopio de la reivindicación 1, en el que:
- 20 al menos uno de los modos vibracionales del resonador semiesférico escogidos comprende un modo vibracional  $\cos 2\theta$ ; y  
el conjunto de masas comprende ocho masas colocadas de forma que están separadas entre sí por ángulos de  $45^\circ$  alrededor del borde del resonador semiesférico.
6. El giroscopio de cualquier reivindicación precedente en el que el resonador semiesférico tiene un diámetro de 2 mm o menos y un tiempo de amortiguación de 500 segundos o más.
- 25
7. El giroscopio de cualquier reivindicación precedente en el que cada una de las masas del conjunto es simétrica respecto del vector radial respectivo que va hacia afuera respecto de cada una de las masas del conjunto.
8. El giroscopio de la reivindicación 7, en el que cada una de las masas del conjunto tiene forma de cuña.
9. El giroscopio de cualquier reivindicación precedente en el que cada una de las masas del conjunto tiene un peso sustancialmente idéntico al de las otras.
- 30
10. El giroscopio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 3 y 6 a 8 en el que:  
las masas del conjunto de masas tienen pesos diferentes;  
las masas más pesadas se colocan en los puntos de máxima deformación del resonador semiesférico; y  
las masas más ligeras se colocan entre los puntos de máxima deformación.
- 35
11. El giroscopio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 10, que comprende, además:  
medios para manejar el resonador semiesférico; y  
medios para detectar la orientación del patrón de vibración del resonador semiesférico.
12. El giroscopio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 11 en el que las masas del conjunto se electroconforman sobre el plano del borde.
- 40
13. El giroscopio de cualquiera de las reivindicaciones 1 a 12, que comprende, además:  
un electrodo forzador en forma de anillo en conexión con el resonador semiesférico y configurado para dirigir el resonador semiesférico; y  
un conjunto de electrodos dispuestos cerca del resonador semiesférico y configurados para detectar la orientación del patrón de vibración del resonador semiesférico.
- 45
14. Un método (1000) para fabricar un giroscopio que comprende:

formar (1002) una cavidad semiesférica en un sustrato;

estampar y depositar (1004) un conjunto de electrodos transductores en el sustrato;

depositar (1006) una capa de protección para formar un hueco entre el conjunto de electrodos transductores y el resonador semiesférico;

5 formar (1008) el resonador semiesférico que incluye una cavidad y un borde (505) que rodea la cavidad, que define un plano (752), utilizando deposición de capa atómica sobre la capa de protección;

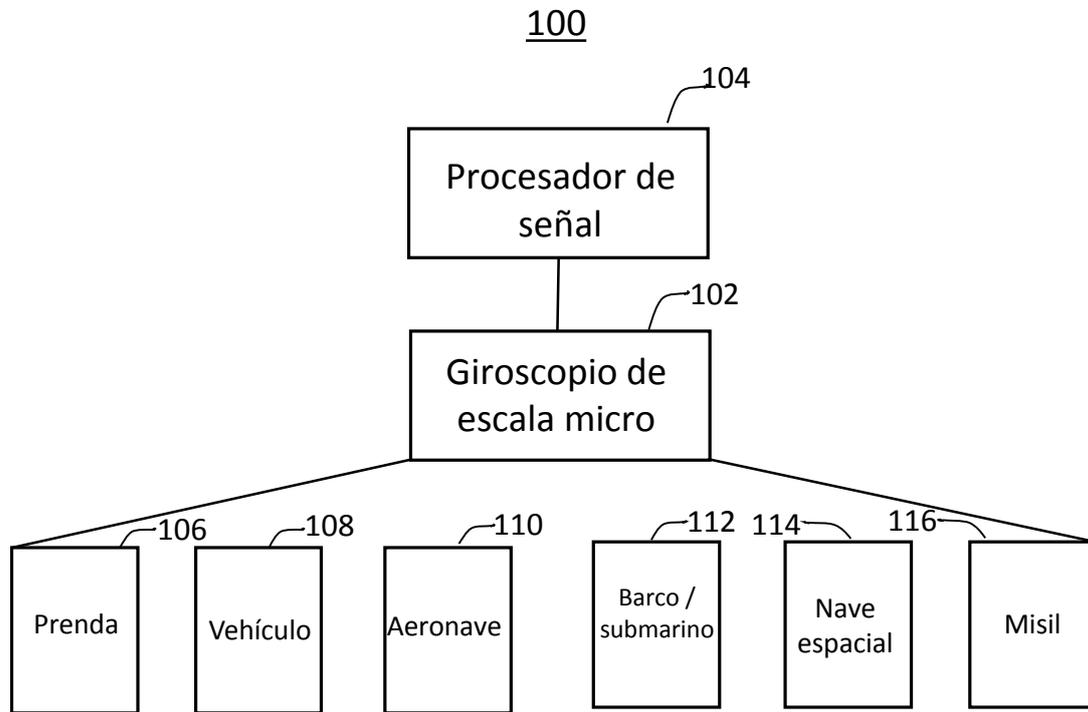
seleccionar (1104) modos de funcionamiento del giroscopio que incluyen modos vibratoriales escogidos;

determinar (1106) puntos de máxima deformación tomando como base, al menos en parte, los modos vibratoriales escogidos;

10 electroconformar (1010) (electrodepositar) un conjunto de masas colocadas sobre el plano (752) del borde de modo que cada una de las masas del conjunto se extiende hacia afuera desde el borde y hacia adentro desde el borde, donde el proceso de electroconformación incluye depositar (1110) las masas a lo largo de la periferia del resonador semiesférico en los puntos de máxima deformación; y

eliminar (1012) la capa de protección.

15



**FIG. 1**

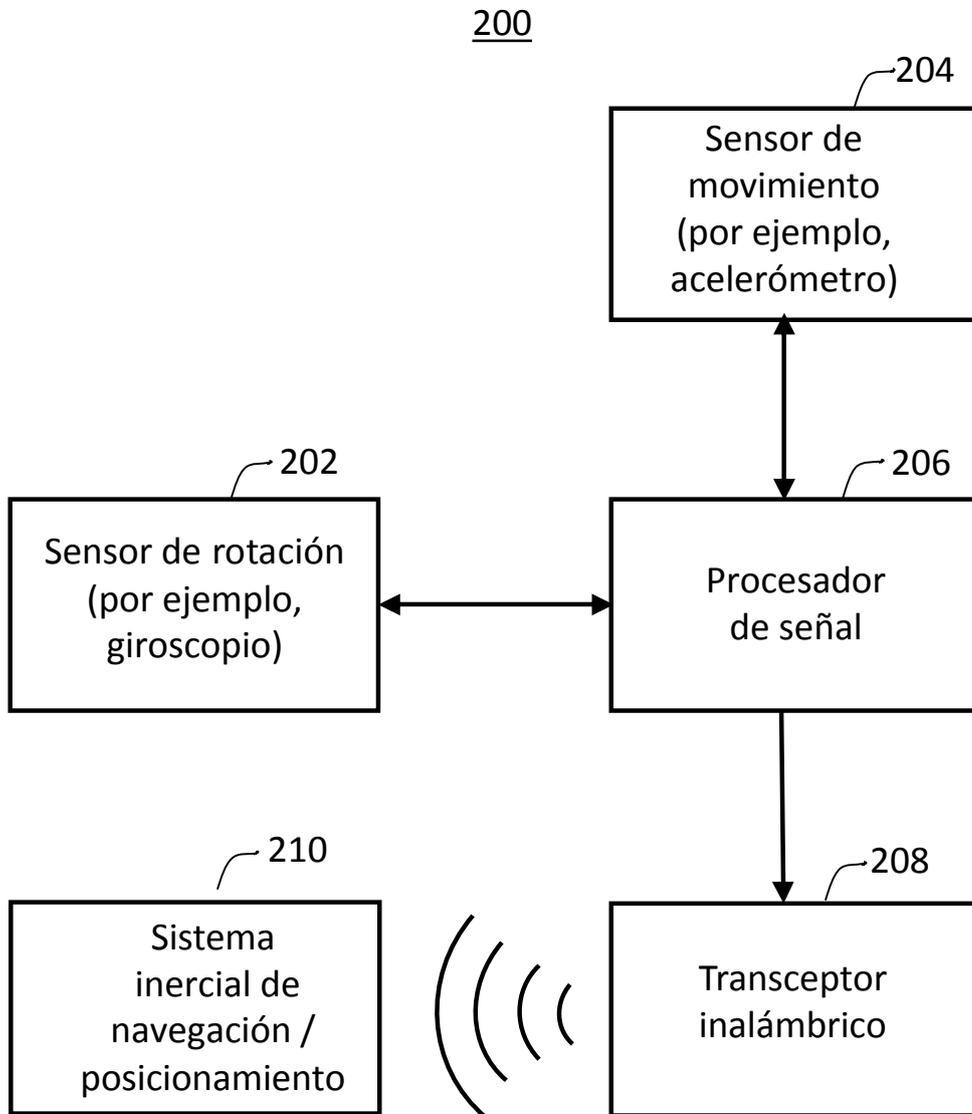


FIG.2

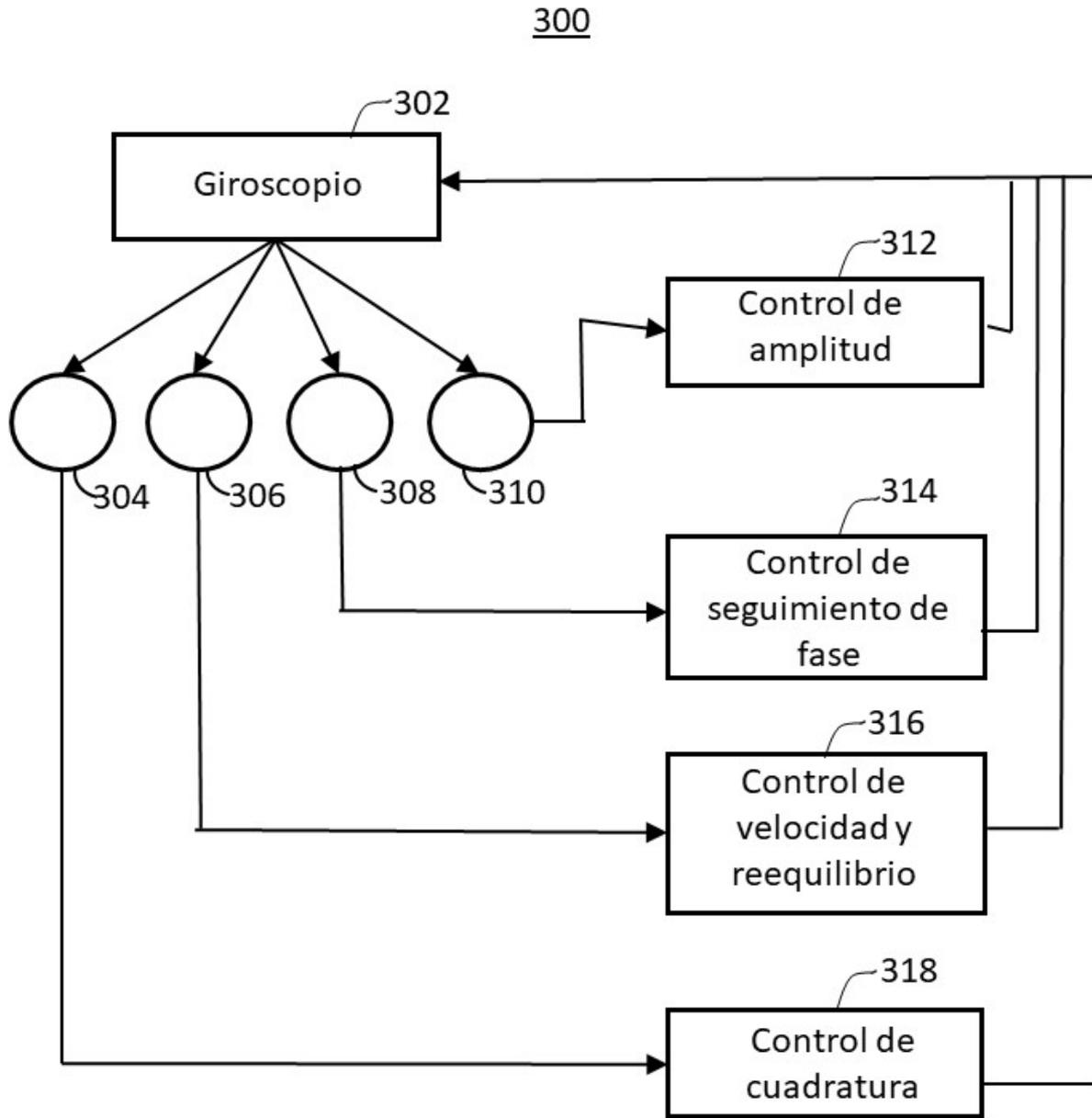


FIG.3

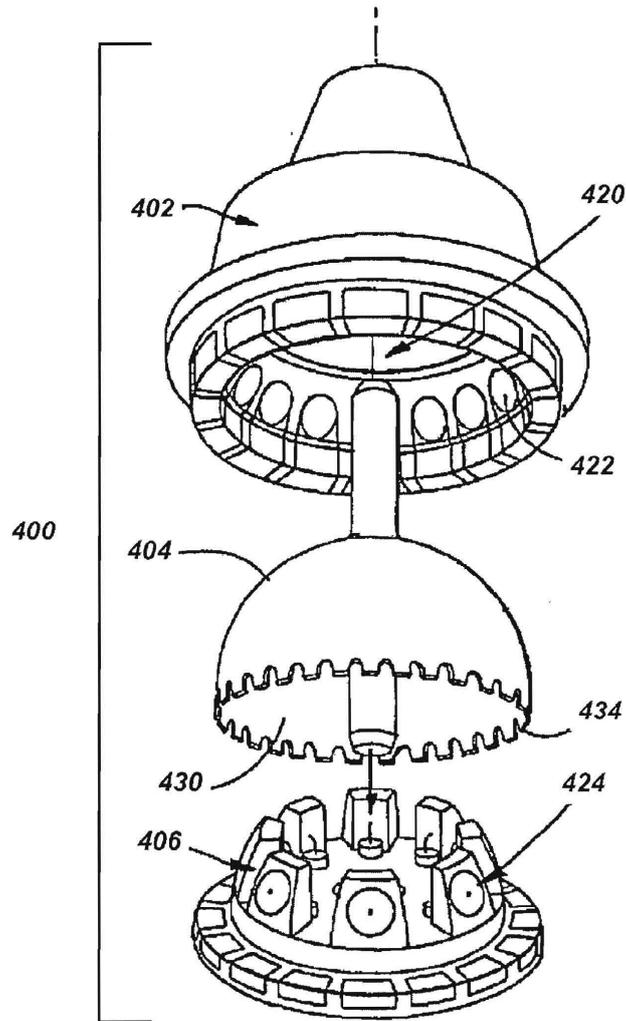


FIG. 4



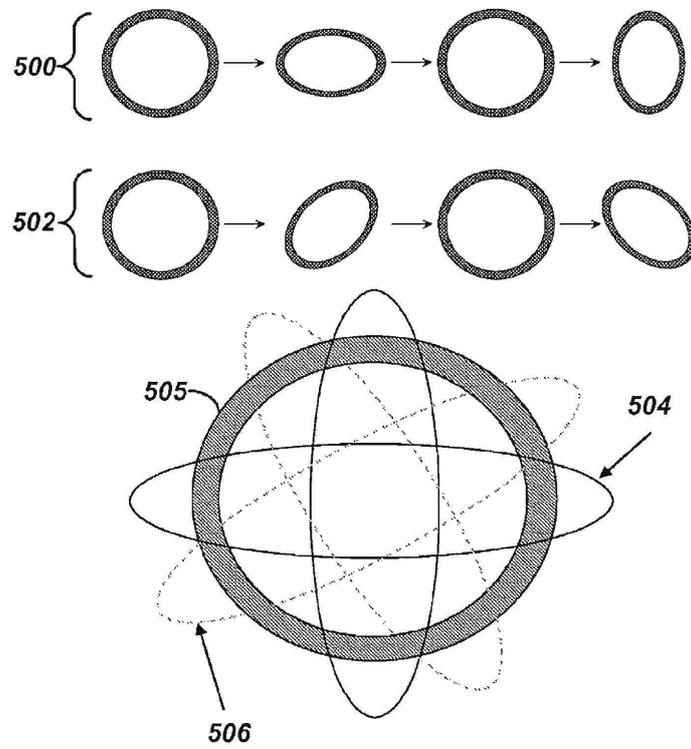
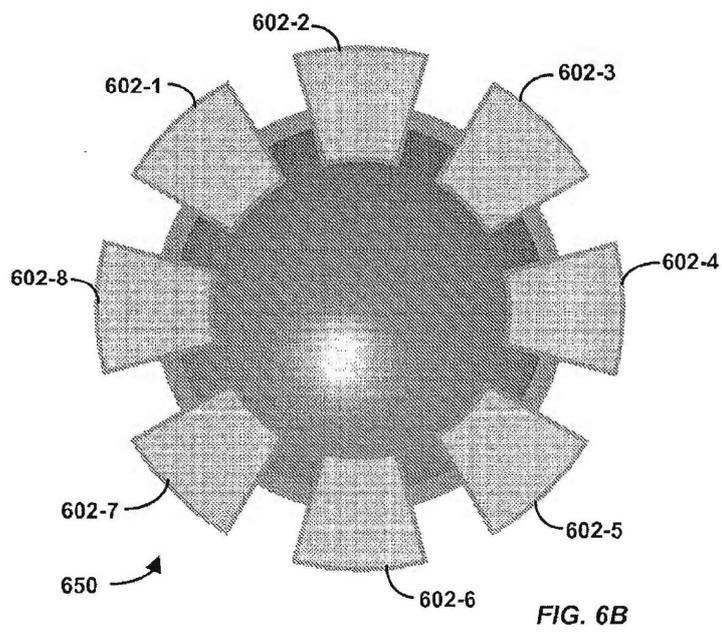
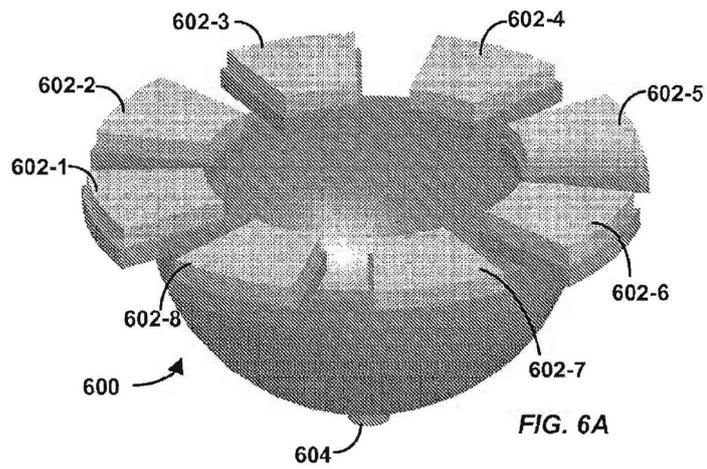
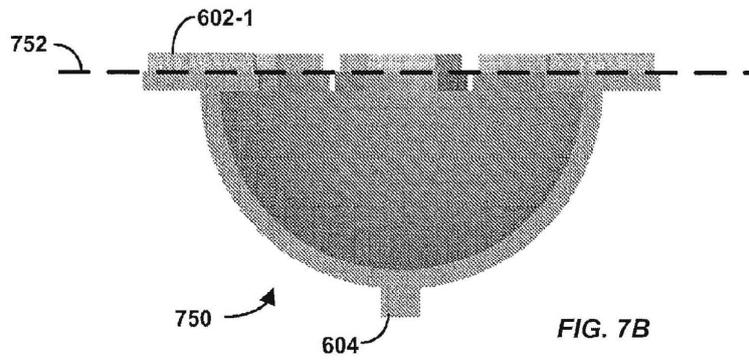
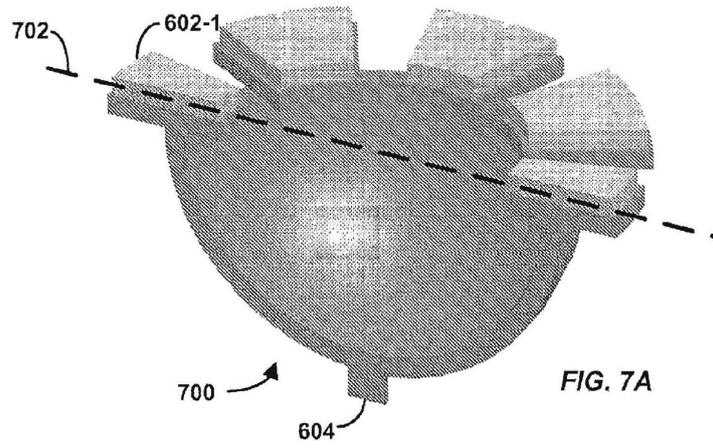
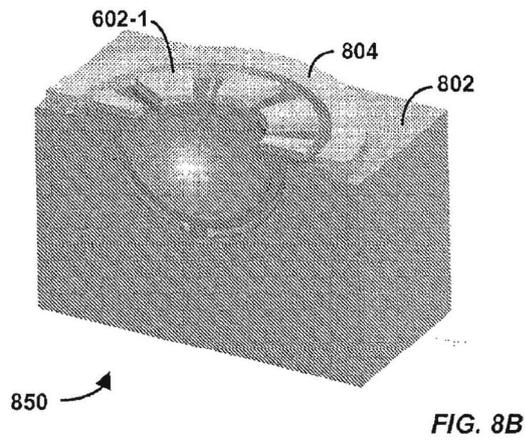
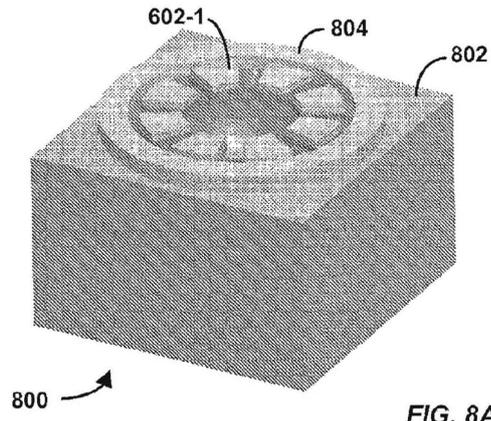


FIG. 5









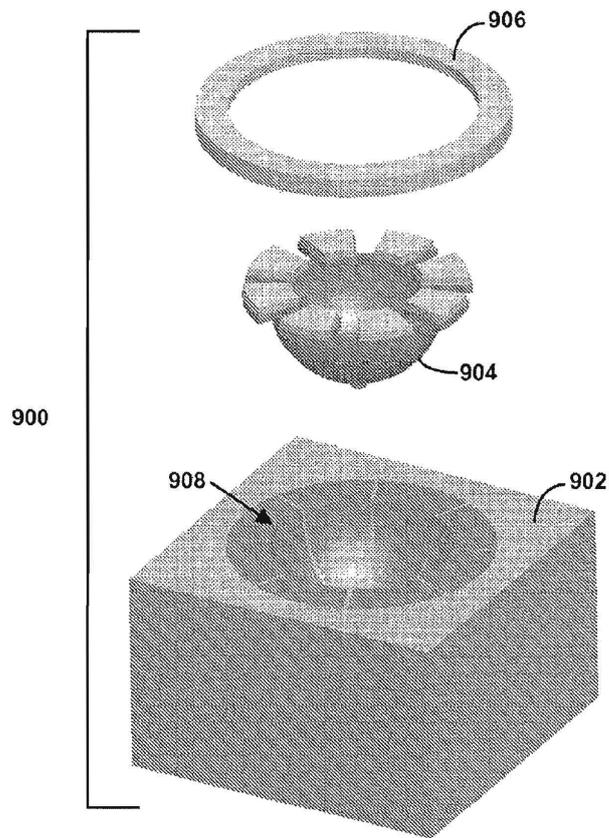


FIG. 9



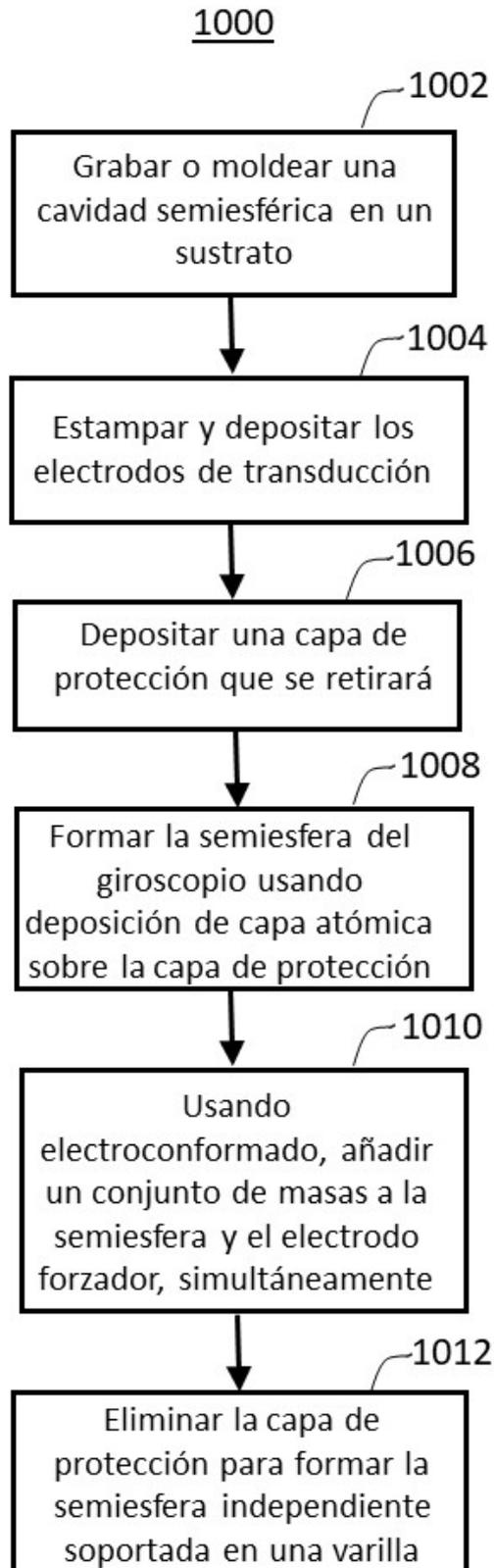
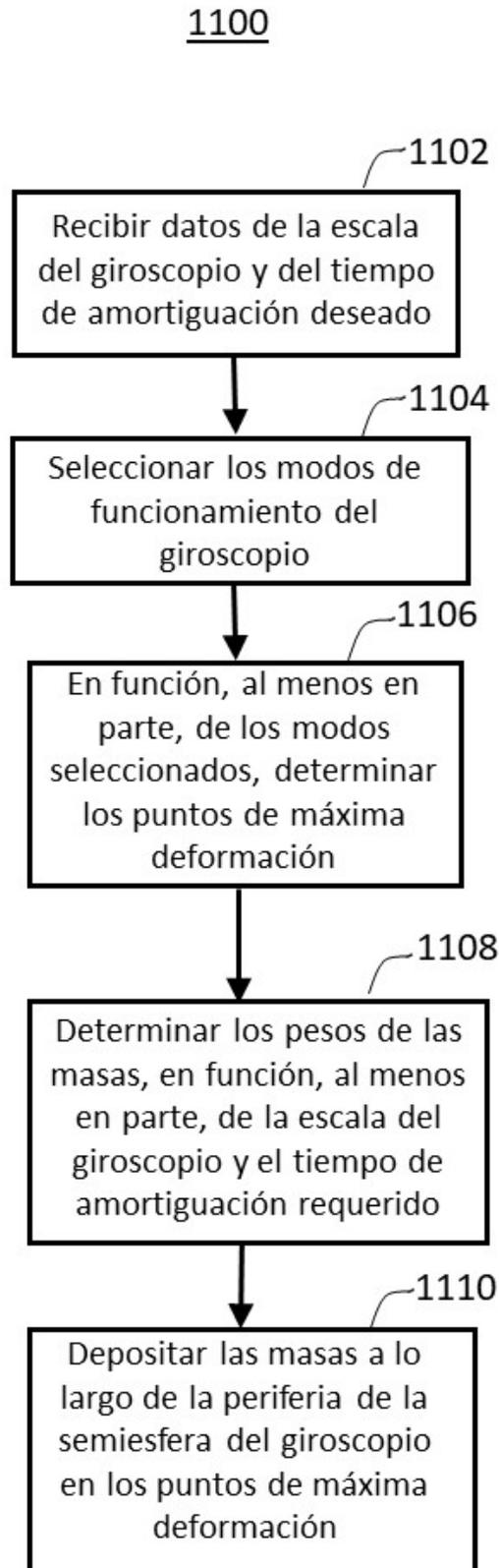


FIG. 10



*FIG. 11*